

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Calcul du coup de belier dans les conduites enterrees.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0014-18

APA Citation (APA توثيق):

Ait Slimane, Djamila (2018). Calcul du coup de belier dans les conduites enterrees[These de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات بيداغوجية، مقالات الدوريات، كتب...) و بنه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE URBAINE

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option : ALIMENTATION EN EAU POTABLE.

THEME :

**CALCUL DU COUP DE BELIER DANS LES CONDUITES
ENTERREES**

Présenté Par :

AIT SLIMANE Djamila

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
Mme MEDDI Hind	M.C.A	Présidente
Mr AMMARI Abdelhadi	M.C.B	Examineur
Mr BOUFEKANE Abdelmadjid	M.A.A	Examineur
Mme KHALED/HOULI Samia	M.A.A	Examinatrice
Mr SALAH Boualem	Professeur	Promoteur

Session Juin - 2018

تلخيص

في المجال العملي، وبعد تحليل بيبلوغرافي، تم الملاحظة على أنه عند إيقاف مجموعة من المضخات، يؤدي ذلك إلى تلف محتمل لأنبوب التصريف إما عند مخرج المضخة أو عند النقاط العالية، قد يكون التحديد العشوائي لحجم وسائل مكافحة الظاهرة هو السبب. سنقوم في هذا العمل بإنشاء برنامج سيساعدنا في حساب سرعة الموجة من خلال تغيير أنواع التربة وعمق الأنبوب، ثم نحاول إجراء تحليل حسابي للمطرقة المائية، من أجل رؤية تأثير الأرض على سرعة الموجة وبالتالي تأثيره على المطرقة المائية.

مفتاح الكلمات:

أنبوب التصريف، وسائل مكافحة، برنامج، سرعة الموجة، المطرقة المائية.

Résumé :

Dans le domaine pratique, et après une analyse bibliographique, il a été constaté que lors de l'arrêt d'un groupe de pompes, il en résulte des endommagements probables de la conduite de refoulement soit juste à la sortie de la pompe soit aux points hauts, le dimensionnement du moyen anti-bélier peut en être la cause. Dans ce travail nous allons établir un programme à l'aide du langage MATLAB qui nous aidera dans le calcul de la célérité d'onde en variant les types de sol et la hauteur du remblaiement ensuite nous essayons de faire une analyse de calcul du coup de bélier avec différentes formules celle de la charge de la précontrainte quand la conduite est enterrée et la formule usuelle qui ne tient pas compte de l'effet du sol, dans le but de voir l'influence du sol sur la célérité d'onde et donc son impact sur l'anti bélier.

Mots clés :

Conduite de refoulement, anti-bélier, programme, la célérité d'onde, coup de bélier.

Abstract:

In the work field, and after a bibliographic analysis, it was found that when stopping a group of pumps, this results in damage to the discharge pipe either just at the outlet of the pump or at the high points. The sizing of the anti-ram means may be the cause. In this search we will establish a program using the MATLAB which will help us in the calculation of the wave celerity by varying the types of soil and the height of the embankment then we try to make a calculation analysis of the blow of water hammer with different formulas that of the load of prestressing when the pipe is buried and the usual formula which does not take into account the effect of the ground, in order to see the influence of the ground on the wave celerity and therefore its impact on the anti-ram.

Key words:

discharge pipe, anti-ram, program, wave celerity, water hammer.

Remerciements

Un grand merci à mes parents pour leur soutien et pour leurs sacrifices.

Je tiens à exprimer également mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à Monsieur Salah Boualem, de m'avoir encadré dans ce mémoire de fin d'étude.

Je remercie également et profondément Monsieur A.Djoudi pour son aide précieuse et son orientation durant toute cette période.

Je remercie aussi toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

J'ai tout le plaisir de dédier ce mémoire à:

Mes chers parents : mon papa Belkacem et ma maman Nadia
qui ont œuvré pour ma réussite de par leurs amour,
sacrifices et précieux conseils.

Mon frère : Yanis

Mes sœurs : Lamia et Yasmine.

Toute ma famille

Mon promoteur : professeur Salah Boualem.

Mes amis : Amin, Iméne, Fayf , Melissa, Nariméne, Sonia,
Dyhia, Soussou, Kari, Asma, Rim, Samia ,Safaa, Nonor.

Madame N.Babaci, madame O.Guemache et monsieur
M.Oukrine.

Mes professeurs de l'ENSH

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 : Etude bibliographique sur le coup de bélier	3
I.1. Introduction :	3
I.2. Travaux antérieurs :.....	4
I.3. Conclusion :.....	15
CHAPITRE 2 : Etude du régime transitoire.....	22
II.1. Introduction.....	17
II.2. Analyse du régime transitoire :	17
II.2.1. Equation de continuité	17
II.2.2. Equation dynamique	20
II.2.3. Les équations aux caractéristiques	24
II.2.4. Les équations d'Alliévi :.....	27
II.3. Conclusion :	29
CHAPITRE 3 : Etude de la célérité d'onde de propagation en régime transitoire ...	31
III.1. Introduction :	31
III.2. Types d'écoulements :	31
III.2.1. Ecoulement permanent :	31
III.2.2. Ecoulement transitoire.....	31
III.3. Détermination théorique de l'expression générale de la célérité d'onde de coup de bélier :	31
III.3.1. Calcul de la célérité d'onde dans les conduites non enterrées.....	32
III.3.2. Calcul de la célérité d'onde dans les conduites composites.....	34
III.3.2.1. Galerie en rocher brut	34
III.3.2.2. Galerie en rocher revêtue	34
III.3.2.3. Célérité d'onde dans les conduites en béton armé :	36
III.3.3. Calcul de la célérité d'onde dans les conduites enterrées.....	37

III.3.3.1. Hypothèse de la raideur du sol	38
III.3.3.1. Hypothèse de la charge de la précontrainte.....	40
III.4. Conclusion :	40
CHAPITRE 4 : Calcul du coup de bélier dans les conduites enterrées	42
IV.1. Introduction :	42.
IV.2. Systèmes de protection contre le coup de bélier :	42
IV.2.1. Les soupapes de décharge :	42
IV.2.2. Les ventouses (les reniflards) :	43
IV.2.3. Les réservoirs d'air :.....	44
IV.3. Présentation du logiciel MATLAB :	44
IV.4. Calcul de la célérité par la méthode de la charge de précontrainte :	44
IV.5. Calcul du volume d'air anti bélier :	49
IV.5.1. Méthodes de calcul des réservoirs d'air :.....	49
IV.5.2. Premier cas, avec l'hypothèse de la charge de précontrainte :	52
IV.5.3. Deuxième cas, avec la formule usuelle :	54
IV.6. Conclusion :	55

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE 2: Etude du régime transitoire.

Figure II.1 : Déplacement d'un élément liquide suivant l'axe « x »

Figure II.2 : théorème des quantités de mouvement.

Figure II.3 : forces exercées sur une tranche liquide.

Figure II.4 : Déplacement d'une onde dans le plan (X, t).

CHAPITRE 3: Etude de la célérité d'onde de propagation en régime transitoire.

Figure III.1 : coupe schématique d'une galerie en rocher revêtue.

Figure III.2 : les forces appliquées sur les conduites enterrées.

CHAPITRE 4: Calcul du coup de bélier dans les conduites enterrées

Figure IV.1 : soupape de décharge.

Figure IV.2 : ventouse à fonction unique.

Figure IV.3 : réservoir d'air.

LISTE DES TABLEAUX :

CHAPITRE 3: Etude de la célérité d'onde de propagation en régime transitoire.

Tableau III.1 : Coefficient K selon la nature du matériau.

CHAPITRE 4: Calcul du coup de bélier dans les conduites enterrées.

Tableau N° IV.1 : Profil en long général de la conduite.

Tableau N° IV.2 : calcul de différents paramètres.

Tableau N° IV.3 : Profil en long de la conduite de refoulement.

Tableau N° IV.4 : Calcul du volume du réservoir avec l'hypothèse de la charge de précontrainte.

Tableau N° VI.5 : Calcul du volume du réservoir avec la formule usuelle.

INTRODUCTION GENERALE :

Dans le cadre de la protection des réseaux d'alimentation en eau potable les ingénieurs sont confrontés au problème du coup de bélier, mal maîtrisé, qui peut être provoqué par un mauvais dimensionnement du dispositif mécanique qui est l'anti bélier ou par une variation des performances de certaines machines hydrauliques attachées à la conduite mais aussi par une mauvaise manipulation (fermeture brusque d'une vanne, arrêt inattendu d'une pompe...). Dans l'optique d'une meilleure compréhension du phénomène, on se propose, dans le cadre de ce mémoire, de faire une étude du coup de bélier dans le cas de conduites enterrées. Notre travail sera présenté sous quatre principaux chapitres.

- Dans le premier chapitre, nous allons essayer d'introduire le phénomène transitoire, connaître ses causes et conséquences et faire une étude bibliographique aussi détaillée que possible c'est-à-dire la succession des travaux antérieurs et leurs développements à travers le temps.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons établir les équations de base des écoulements non permanents dans le cadre d'une analyse du régime transitoire pour une quantification du phénomène et donc un meilleur dimensionnement de l'anti bélier.
- Dans le chapitre qui suit nous allons voir l'estimation théorique de la célérité de propagation des ondes selon deux cas différents, conduites enterrées (hypothèse de la raideur du sol puis hypothèse de la charge de la précontrainte) et conduites non enterrées.
- Enfin dans le dernier chapitre, afin de s'approcher au mieux de la réalité nous allons établir un programme qui nous permettra de calculer la célérité d'onde pour différents types de sols et différentes hauteurs du remblai dans le but de voir l'influence du sol sur la valeur de la célérité de propagation d'onde et de mieux comprendre le comportement conduite-sol. Dans une dernière partie du travail et à partir des résultats obtenus nous allons faire le calcul du volume d'air de l'anti bélier par deux formules celle de la charge de la précontrainte et la formule usuelle.

CHAPITRE 1 :

Etude bibliographique sur le coup de
bélier.

I.1. Introduction :

Avant d'accéder à l'étude bibliographique, nous devons nous familiariser avec le phénomène transitoire ou autrement dit coup de bélier.

Supposons une canalisation fonctionnant en régime permanent et comportant en un point une vanne. La fermeture ou l'ouverture de cette vanne va provoquer en un point quelconque de la canalisation une variation de la pression et de la vitesse en fonction du temps, c'est-à-dire qu'un régime variable se substitue au régime permanent initial.

Les surpressions ou dépressions peuvent atteindre des grandeurs assez considérables si la manœuvre de la vanne est suffisamment rapide et il peut résulter de ces chocs des accidents de rupture de la canalisation.

Ces phénomènes sont connus sous le nom de coups de bélier. [1]

La naissance du régime transitoire dans un régime d'écoulement hydraulique est à l'origine de plusieurs facteurs :

- Démarrage ou arrêt inopiné d'une pompe ;
- Ouverture ou fermeture instantanée ou rapide d'une vanne de sectionnement ;
- Variation rapide du niveau d'eau dans le réservoir ;
- Panne de courant dans la station de pompage ;
- Vibration des roues des pompes ;
- Vibration des accessoires déformable tels que les vannes ;
- Action d'une pompe à vitesse variable. [2]

Ce phénomène engendre des effets néfastes qui peuvent causer des dégâts conséquents sur le système hydraulique, qui se résument comme suit :

Cas de fortes pressions : si la somme de la surpression et de la pression initiale dépasse la pression maximale admissible PMA de la conduite il peut y avoir :

- Fissuration de conduites ;
- Dislocation des joints.

Cas de pressions négatives : apparait soit à la suite d'une forte pression, soit à la suite d'un arrêt brusque de la pompe. si la pression devient inférieure à -10m.c. e il y'aura :

- Implosion de la conduite ;
- Aspiration des joints ;
- Décollement de l'enduit interne de protection.

Fatigue de la conduite

L'alternance des surpressions et dépressions qui sont une conséquence inévitable du phénomène provoquant la fatigue pour le matériau de la canalisation même si leur amplitude est faible. [3]

I.2. Travaux antérieurs :

Les recherches sur les ondes dans les milieux fluides ont débuté par l'analyse des ondes sonores dans l'air, celles dans l'eau et aussi l'écoulement du sang dans les artères.

Les premières recherches sur le phénomène du coup de bélier ont été effectuées par **Young** (1808), **Wertheimer** (1848) **Michaud** (1878) et **Joukowski** (1900,1904).

En 1788, **Lagrange** reprend l'étude des écoulements instationnaires compressibles et incompressibles dans les canaux et développe une formule correcte pour la détermination de la célérité des vagues :

$$c = \sqrt{gh} \quad (I.1)$$

En 1808 le médecin **Thomas Young** fut le premier à élaborer expérimentalement la théorie de propagation des ondes de pression dues aux pulsations cardiaques d'où l'apparition du célèbre module de **Young**.

Dans son article connu sous le nom de « Hydraulic Investigation, Subserving to an Intended Croonian Lecture on the Motion of the Blood » il arrive à exprimer la célérité (c) d'une vague de pression se propageant dans un liquide incompressible de densité ρ contenue dans un tube élastique avec le module de **Young** E comme

$$c = \sqrt{(Ee / \rho D)} \quad (I.2)$$

Mais ses travaux ont malheureusement échappé à l'attention jusqu'à ce que les frères allemands **Ernst-Heinrich** et **Wilem Weber** les découvrent un demi-siècle après leur apparition. [5],[4]

En 1866, l'allemand **Wilem Weber** édite une formule plus représentative de la célérité de la vague sous forme :

$$c = \sqrt{(R / (2K\rho))} \quad (I.3)$$

Où son module élastique a été défini par $k = dR/dp$, qui dans la notation moderne

$k = R^2 / (Ee)$ pour les pipes circulaires de rayon $R = D/2$, par conséquent c'est l'équation (I.2).

Helmholtz, Herrmann von (1821-1894) était éditeur pour Pogg (Annalen der Physik et Chimie) et avait intérêts larges. Il semble avoir été le premier à expliquer (en 1848) le fait que la vitesse de propagation de l'onde dans un tuyau contenant de l'eau était inférieure à la vitesse dans l'eau non confinée. Il a expliqué, correctement, que cela était dû à l'élasticité des parois de tuyaux. **Wertheim**, dans la même année, a offert la même explication mais n'a fait aucune étude théorique. [6]

Riemann, B. En 1860, il a publié un papier à Göttingen sur les ondes sonores et plus tard, en 1869, il a publié son texte sur les Équations différentielles partielles (Il se réfère à l'œuvre -**Riemann** a développé et appliqué l'équation tridimensionnelle de mouvement et sa forme unidimensionnelle simplifiée, dans plusieurs domaines, notamment pour les cordes vibrantes et les ondes sonores, comme d'autres avant lui.

Cependant, il a utilisé des définitions et des expressions plus claires propriétés élastiques des médias. [6]

Weber, Wilhelm a étudié la théorie de l'écoulement d'un fluide incompressible dans un tuyau élastique [7]. Il avait déjà fait quelques expériences en 1850 pour trouver la vitesse de propagation. En utilisant les deux relations linéaires d'élasticité et d'accélération qu'il a développées, Il a déduit la vitesse de propagation. Ainsi, il a lié l'élasticité des parois du tuyau directement aux variations de pression et de rayon. Cela a été trouvé nécessaire dans l'étude récente des surtensions dans les tuyaux en caoutchouc et en plastique. [6]

Weber semble avoir été le premier à développer les deux premiers ordres des équations pour l'élasticité des parois de la tuyauterie et l'accélération de la colonne d'eau. Ce sont la base de toutes nos études théoriques impliquant les grandeurs de la pression et la vitesse dans un coup de bélier [6]

Dr. Marey, a publié en 1875 un compte rendu de son travail expérimental sur la propagation des ondes d'eau (et de mercure) [8]. Il a conduit une recherche médicale sur l'écoulement du sang chez les petits animaux (tortues, grenouilles) et a essayé de développer une théorie, il a mis en place des expériences dans son laboratoire hydraulique et comptes rendus publiés de ses recherches sur une période de plusieurs années.

Il avait un tuyau de caoutchouc avec six branches courtes espacées uniformément sur toute sa longueur et menant à ses six chronographes. Celles-ci enregistrées en continu les oscillations de pression causées par le fonctionnement d'un piston à une extrémité. Ce piston pourrait appliquer une injection impulsive de fluide ou, alternativement, il pourrait fonctionner dans sens inverse. La quantité d'injection et le taux peuvent tous les deux être modifiés, avec de l'eau ou du mercure. Sa technique de laboratoire était excellente. En fait, il a critiqué le travail des expérimentateurs précédents (Newton, Weber, Poisson, Biot) en disant que leurs méthodes et instruments étaient imparfaits et leurs résultats parfois contradictoires.

Il n'avait pas les connaissances mathématiques pour développer résultats analytiques, mais son contemporain **Resal** (éditeur du Journal de Math.pures et appliquées) a vérifié ses résultats expérimentaux en développant sa théorie de la propagation. [6]

Resal, II. Dans son article dans le Journal développe la continuité et les équations d'accélération, en supposant un fluide incompressible et un tuyau élastique. Il trouve donc la vitesse de l'onde identique à celle de Weber [7] mais exprimé en termes de module d'Young.

Rayleigh, J.W.S., Lord (1842-1919) publié son texte en 1877 sur la théorie du son, qui mis à jour le résultat de toutes les études du passé, et de sa propre recherche. [6]

Korteweg, D.J. a été le premier à résoudre pour la vitesse de l'onde tenant compte de l'élasticité de la paroi du tuyau et du fluide [9] Ceux qui l'ont précédé ont considéré l'un ou l'autre des deux inélastique ou incompressible. Son développement est très proche de l'analyse actuelle, à la fois dans la pensée et procédure. Cependant, il ne s'intéressait qu'à la vitesse de propagation et non pas avec la relation de vitesse de pression transitoire.

Il a négligé -

- l'effet de frottement, car, comme tous les autres écrivains, il traitait des tuyaux dans lesquels n'existaient que les vibrations dues à la propagation du son et des ondes, et aucune étude de l'effet du changement d'écoulement ;
- les contraintes longitudinales dues à la flexion des tuyaux, car il considère que la longueur d'onde est considérable par rapport au diamètre du tuyau ;
- variation du module d'élasticité avec la pression, [6]

Lamb, Horace en 1878 a publié son livre de texte " Motion of Fluids " qui est similaire à celle de Lord Rayleigh. Plus tard en 1910, il publié sa "théorie du son" qui est une révision du précédent travail. [6]

Michaud, Jules en 1878 a publié un article traitant le problème du coup de bélier. Il ne développe pas ou n'utilise aucune des solutions théoriques pour propagation des ondes (à ce moment-là aucune relation entre la pression et les surtensions ont été découvertes) mais il étudie conception et utilisation de chambres à air et de soupapes de sécurité dans les canalisations améliorer les effets des fermetures soudaines et graduelles des portes et des valves. [6]

Gromeka, V.I. En mai 1883, il présente un document sur le coup de bélier et semble être le premier à considérer l'effet de frottement, à part des expériences de Marey et de ses conclusions générales. [6]

Gromeka a critiqué une grande partie du travail précédent, principalement parce qu'ils négligeaient le frottement. Cependant, il existe plusieurs de ses hypothèses qui sont ouvertes à la critique aussi. Il a basé son étude d'abord sur l'hypothèse que les parois des tuyaux sont minces et agissent comme une membrane cylindrique. Ensuite, il a appliqué la théorie des membranes pour déterminer ses oscillations. Il a supposé que le liquide est incompressible

et aussi la force de frottement est proportionnelle à la vitesse (c.-à-d. les vitesses sont faibles et le flux est laminaire). En conclusion, il a déclaré que les termes dépendant du frottement rendaient les équations trop difficiles à résoudre et il s'est limité à l'effet de l'inertie de la paroi de tuyaux. Il est en train de penser à deux ondes se propageant, l'une dans les parois du tuyau et l'autre, dépendante de la première, dans le fluide, et qu'il doit y avoir un équilibre entre ces "impulsions internes et externes". Et quand il a réduit sa formule au cas de négligence de l'inertie du tuyau, il obtient la solution de **Resal** [6]

Au cours des années 1885 à 1899, plusieurs ingénieurs du États-Unis ont entrepris des expériences dans le coup de bélier avec et sans chambres à air, et certains ont tenté de développer une relation théorique entre la réduction de la vitesse et l'augmentation de la pression correspondante. Il y avait peu de succès. Dans de nombreux cas, cela était dû à la brièveté des canalisations et la fermeture lente des vannes. Trois des plus remarquables de ces ingénieurs étaient -

(1) Weston, E.B. à Providence, R.I.

(2) Église, I.P. à Cornell, et

(3) Carpenter, R.C. à Cornell, qui a travaillé avec deux étudiants diplômés.

Dans sa discussion, Carpenter a tenté une théorie basée sur l'élasticité de l'eau et des parois des tuyaux. Il a également utilisé des tuyaux relativement courts, avec ou sans chambres à air. [6]

Frizell, J.P. A présenté un document en Octobre 1897 qui a donné le premier traitement analytique connu de pression et de coup de bélier. Cet article était le résultat de ses études en tant qu'ingénieur-consultant pour le développement hydro-électrique.

Frizell a développé les formules fondamentales pour la vitesse de l'onde de choc et de l'intensité de la pression due à une réduction instantanée du débit. [6]

Joukowski, N. Au cours de l'été 1897 et l'hiver suivant, à presque identiquement en même temps que les études de **Frizell**, **Joukowski** a fait de vastes expériences à Moscou. À la suite de ces tests et de ses études théoriques, il a publié un rapport [10] dans le printemps de 1898 sur la théorie de base du coup de bélier. Ceci est un travail classique car il vérifie la théorie les relations entre la pression et la vitesse change pendant les surtensions avec des tests expérimentaux. Malheureusement, l'auteur n'a à portée de main que la traduction de ce document, de sorte qu'il peut y avoir des détails importants et éclairants dans le texte original dont il ignore **Joukowski** connaissait très bien le travail qui avait été déjà fait, comme il le mentionne le travail antérieur de **Marey**, **Gromeka** et **Korteweg**, ainsi que les expériences des ingénieurs aux États-Unis, y compris l'article le plus récent de **Frizell** (c.-à-d. la traduction de 1904)

Il a développé indépendamment la formule pour la vitesse d'onde, en tenant compte de l'élasticité de l'eau et de la paroi des tuyaux. Ses accords sont identiques à ceux de **Korteweg** et **Frizell**. Il a également développé la relation entre la vitesse et surpressions, en utilisant

deux méthodes, l'une sur la conservation de l'énergie et l'autre sur la condition de continuité. Ce dernier est donné dans la traduction et est identique à la formule de **Frizell**,

Dans son travail expérimental, il a utilisé le chronographe de **Marey** pour mesurer le temps à 0,01 secondes et indicateurs Crosby pour enregistrer les pressions. Ces deux ensembles d'instruments ont été corrélés au moyen d'un pendule qui faisait un contact électrique toutes les demi-secondes. [6]

Joukowski montre très clairement comment l'onde de pression se déplace le long du tuyau et la nature des réflexions à la fin. Ainsi, pour une fermeture soudaine de la porte, il montre que la vague de la pression positive et la vitesse nulle atteint la partie supérieure (réservoir) fin à temps et pour la vague de retour, la pression est revenue à la normale et la vitesse devient entièrement négative, c'est-à-dire que le débit est de nouveau dans le réservoir.

Du côté du réservoir du front de montée, les pressions sont normales, comme imposé par le réservoir, et les vitesses alternent entre positive et négative que la montée est réfléchi. Un cycle complet de surtensions se produit dans deux périodes, i.e. Dans un intervalle de temps de $4L / a$

Parmi les phénomènes étudiés par **Joukowski** et ses conclusions étaient :

- (a) Passage de l'onde de pression dans un tuyau plus petit avec une impasse.
- (b) Réflexion de l'onde de pression à partir d'une extrémité ouverte d'un tuyau de dérivation.
- c) La détection des fuites dans le système pourrait être détectée par des dépressions dans le diagramme de pression et situé par la position de ces gouttes dans le tableau.
- d) l'effet des chambres à air et des soupapes de sécurité et s'est intéressé à l'effet de la variation du système de fermeture et a trouvé que la surpression était maximale pour les temps de fermeture inférieurs à $\frac{2L}{a}$. [4]

Ces deux ingénieurs, **Frizell** et **Joukowski**, ont développé la théorie pratique de la pression augmente pour deux raisons différentes. **Frizell** était préoccupé par la sécurité et la régulation de la vitesse des centrales hydroélectriques. **Joukowski** était préoccupé par la sécurité et les aqueducs. [6]

Allievi, L. en 1902 et 1913 a publié ses textes sur la théorie générale, Ils ont tous deux été traduits en français et en anglais. Dans son 1902 papier, il a développé la théorie des premiers principes, similaires à **Korteweg**. Cependant, il a obtenu une base plus précise, équation du premier ordre pour l'accélération. [6]

Le travail d'**Allievi** est trop monumental pour être étudié dans les moindres détails ici. Il couvre l'ensemble du domaine d'activité, y compris fermetures de portes, et ses tableaux sont complets. Ce fait est peut-être un inconvénient dans le sens où l'on doit devenir immergé dans le travail afin de tirer pleinement avantage. [6]

En 1902, **Alliévi** publia sa théorie générale sur les coups de bélier. Il présenta des diagrammes permettant de déterminer facilement les extrêmes de pression suite à une ouverture ou fermeture linéaire de l'obturateur. **Alliévi** est considéré comme étant le fondateur de la théorie du coup de bélier. [6] La solution définitive du problème du coup de bélier a été donnée avec rigueur mathématique par l'italien **Lorenzo Alliévi** dans un mémoire magistral publié en décembre 1901 dans les annales de la Société des Ingénieurs et Architectes Italiens. [1]

L'étude du coup de bélier a maintenant assumé un aspect plus large dans le monde entier, porté principalement par des ingénieurs et avec son importance pratique. Les domaines d'études sont devenus plus spécialisés et les méthodes sont plus précises et plus détaillées, avec des tests expérimentaux et la détermination des caractéristiques hydrauliques des différents composants jouant un rôle important. [6]

Il devient de plus en plus difficile de considérer toutes les études spécialisées menées dans le monde entier. Nous allons maintenant nous limiter à la poursuite du développement des idées fondamentales et de leur utilisation pratique dans les différents domaines. L'originalité du développement sera la clé à la reconnaissance, bien qu'une énorme partie de travail a été réalisée par des ingénieurs exceptionnels dans domaines spécialisés, une grande partie de ce travail étant de nature consultative indisponible pour la publication. Au cours des vingt premières années du siècle, il y avait une grande quantité de travail dans l'application de la théorie développée et publiée par **Joukowski** et **Allievi** à la conception pratique d'ouvrages hydrauliques et les centrales hydroélectriques. En Europe, l'autorité était **Allievi**, en raison principalement aux traductions françaises. En Amérique du Nord, le texte **Joukowski** était la clé, en partie parce que la traduction de Mlle **Simin** était disponible en 1904, alors que la traduction de **Halmos Allievi** n'a pas apparu jusqu'en 1925. [6]

Ces premières conceptions concernaient principalement les conduites forcées et réservoirs de surpression. Par exemple, **Warren, M.M.** a présenté un document important sur les problèmes de conduites d'eau et de réservoirs de surpression [11].

Constantinescu, G., en 1920 a décrit son invention d'un mécanisme pour transmettre de l'énergie mécanique en utilisant l'onde de choc d'eau. L'énergie impliquée pourrait être grande et la distance de transmission long, pour de très petits déplacements du liquide (habituellement une huile). [6]

Gibson, N.R. présenté un document en 1920 sur les ondes de pression dues à des fermetures graduelles de vannes, basant son étude sur **Joukowski**.

En 1923, **Gibson** a inventé un appareil pour mesurer la décharge de turbines hydrauliques, en utilisant les surtensions de pression-temps causées par la fermeture des portes. Il l'a utilisé pour l'efficacité de fonctionnement des essais sur de nouvelles centrales électriques. Une autre méthode inventée par le professeur **Allen** est connue sous le nom de "salt velocity", qui était également précise et ces deux méthodes étaient généralement utilisées en Amérique du Nord au cours de la 1920 et plus tard. [6]

Strowger et **Kerr** en 1926 ont présenté un document sur la vitesse régulation des turbines hydrauliques, en utilisant la méthode de calcul de montée de pression, donnée par Gibson [12].

Löwy, R. en 1928 a publié son texte sur le coup de bélier qui couvre la solution analytique step-by-step des surtensions dans le pipeline. [6]

En 1929 **Schnyder, O.** a appliqué la méthode graphique à l'étude de conduites raccordées à des pompes centrifuges, utilisant toutes les caractéristiques d'une pompe déterminées par des tests [13]

En 1931 **Bergeron, Louis** dans un article, a étendu la méthode graphique pour exprimer une relation analytique entre les pressions et vitesses à deux points sur la ligne de conduite. Son traitement est un modèle de clarté. [6]

En 1932 **Schnyder** dans son article était le premier, (en utilisant la méthode graphique) pour permettre le frottement le long de la conduite. Sa méthode était approximative de frottement localisée, et est l'équivalent graphique de la solution de Gibson [12]. Schnyder, dans cet article, a également étudié les surtensions dans les tuyaux composés.

Symposium en 1933. Lors de la réunion de l'ASME et de l'ASCE pendant "Engineering week "à l'Exposition de Chicago plusieurs articles ont été présentés par ingénieurs d'Amérique du Nord et du Sud, et des discussions par des ingénieurs en Europe aussi. Un résumé de la théorie existante pour les lignes simples de pipe a été donné. Les documents présentés portaient sur des conduites forcées, réservoirs de surpression et installations de pompes centrifuges, équipés de chambres à air et de soupapes de décharge. [6]

Jaeger (1933) a présenté une thèse éditée dans un papier récapitulatif. Une généralisation de l'approche d'**Allievi** a semblé importante pour un réseau de canalisation relié à un réservoir d'air. [6]

En 1935 **Angus, R.W.** présente un document couvrant la théorie de base et certaines applications de la méthode graphique, y compris l'utilisation du frottement "localisé" et l'étude des installations de pompes.

En Juillet, août 1937 **Bergeron** a écrit un document général couvrant toute la théorie des ondes élastiques planes dans divers médias, barres longitudinales, cordes vibrantes, oscillations de torsion avec et sans masses auxiliaires et roues volantes, lignes de transmission électrique. Cela a été suivi en 1938 par un document d'une nature similaire au 5ème Congrès International de Mécanique Appliquée. [6]

En décembre 1937. Deuxième Symposium Water-Hammer ASCE et AWWA, tenu à la réunion annuelle de l'ASME à New York. De nombreux papiers étaient présentés par des ingénieurs d'Amérique et d'Europe. [6]

Saint-Venant a aussi utilisé une méthode graphique avant celles de **Schnyder** (1932) -**Bergeron** (1935)

Allievi a présenté un document par défaut sur l'utilisation des chambres à air dans des lignes de décharge [14]. C'était son dernier article (traduit par **Halmos**).

Angus a présenté un document sur l'effet des chambres à air et des valves dans des conduites de pompes de refoulement [15].

De Juhasz, K.J. a présenté un article dans Fuel Injection Systems. C'était très instructif, en utilisant la méthode graphique, avec des stéréogrammes pour illustrer le fonctionnement des ondes. [6]

Knapp, F. présente un document sur les robinets d'arrêt d'urgence [16]

Knapp, R. T. présenté un document dans lequel il a discuté de caractéristiques des pompes centrifuges. Ce document est similaire à, mais beaucoup plus en détail que le document précédent de Schnyder [13] et indique comment les caractéristiques de la pompe peuvent être liées aux surtensions en cours.

Schnyder a présenté un autre document comparant les résultats calculés et les résultats des tests sur les surtensions du coup de bélier sur des pompes en ligne [17]

Strowger a présenté un document sur le coup de bélier dans une usine hydro-électrique avec soupape de décharge contrôlée par le gouverneur, à la fois avec et sans tolérance pour le frottement. [6]

En 1938 **Angus** a étudié les brèches de la colonne d'eau dans la pompe lignes, et l'effet de frottement, suggérant, pour une plus grande précision, divisant la longueur du tuyau en plusieurs sections et en utilisant le frottement "localisé" dans chaque section. [6]

En 1940 Projet de **Boulder Canyon**. Le rapport a comparé la théorie avec les résultats des tests de surtensions du coup de bélier dans les conduites forcées.

Rich, G.R. (1944) a présenté un document pour résoudre en particulier le cas du frottement en utilisant une approximation linéarisée et lignes de tuyaux composées et ramifiées. La solution pour le cas de frottement était dans les fonctions de **Bessel** et leurs intégrales. [6]

Lupton, H.R.(1953) a présenté un article dans lequel il a étudié surtensions dans les lignes de refoulement de la pompe en référence à la séparation de la colonne d'eau.

Paul Bergeron (1949) a présenté un document traitant la complexité des phénomènes du coup de bélier sur les installations de pompage et a essayé de classer des solutions générales pour y remédier.

Bergeron (1950) a proposé la méthode graphique pour d'autres phénomènes physiques telles que des vagues sur les lignes électriques.

En Novembre 1955. Plusieurs communications ont été présentées au jubilé de diamant Réunion annuelle à Chicago, où l'ASME, l'ASCE et l'AWWA ont participé, comme lors des premiers symposiums de 1933 et 1937. [6]

Richards, R.T. a comparé la théorie avec des tests dans plusieurs pompes en ligne de décharge, en particulier en ce qui concerne la séparation de l'eau. L'exemple le plus simple, impliquant une ligne de conduite pratiquement horizontale, a montré une poussée théorique de 4% en plus de la surtension d'essai, lorsque l'espace vide s'est effondré après la première séparation, et l'essai a montré une baisse rapide avec le temps. La théorie était basée sur Angus et Bergeron. [6]

Duc, F. a publié un article en 1959 avec des tests sur un tuyau transparent de 3300 pieds de long. Il a trouvé que là où la gravité pourrait exercer son influence dans les sections escarpées de la ligne. [6]

Sharp, B.B. effectue un travail récent dont l'auteur a juste pris conscience. Il a présenté un document en 1966 dans lequel il a discuté des effets de la séparation de la colonne d'eau. [6]

Malgré tous les efforts fournis par les chercheurs le problème de calcul demeure compliqué pour les réseaux à tronçons nombreux.

Pour ce fait en 1967 **R.Chappey** élabore un simple programme pour les calculateurs électroniques. Après étude, il a été constaté que la méthode de **Bergeron** semble la plus adaptée pour la réalisation de programme de calcul du phénomène pour les 2 types de réseau. [3]

Cheeseman (1970) a discuté l'effet des coupures rapides de pression qui sont rapidement réduites par le frottement. Il existe plusieurs études expérimentales sur ces coupures plus lentes malgré qu'elles se produisent en raison des fluctuations de la demande.

Yong W. SHIN et **William L.CHEN** (1975) ont décrit la méthode des caractéristiques pour calculer des problèmes de coup de bélier dans les réseaux complexes. La formulation est basée sur l'équation **Navier-Stokes** unidimensionnelle qui comporte la limite visqueuse exprimée comme le frottement de la paroi des conduites. [3]

En 1985 **Ruus** et **Carney** ont présenté un abaque qui permet de déterminer les variations de pression résultant d'un arrêt brusque de la pompe.

Jvarsheishvili et **Namgaladze** (1991) ont traité le problème du coup de bélier dans une canalisation principale équipée d'un dispositif de sécurité contre la pression. Une transformation de **Fourier** en sinus a été employée pour réaliser la solution sous forme de série infinie et rapidement convergente. Ils ont considéré des cas avec deux soupapes de

sûreté ou plus installées dans une canalisation ou une fermeture de vanne glissante selon une certaine loi. Les auteurs ont conclu que leur méthode de calcul était avantageuse en raison du temps plus court exigé pour le procédé que pour les solutions numériques des équations d'origine. [5]

Rehymer (1993) et **Thorley** (1989) ont analysé les clapets anti-retour dans des conditions passagères et ont désigné des lignes guidant pour choisir le type de clapet anti-retour pour une application spécifique. [5]

Mitosek et **Roszkowski** (1998) ont discuté les problèmes de l'écoulement transitoire dans des pipes de plastique. Ils ont analysé des vitesses de vague de pression, des cavitations et l'influence de l'évacuation de l'air. Des expériences ont été entreprises sur les pipes en plastique fabriquées généralement de PVC, PEMD et PEHD. Ils ont constaté que les vitesses de vague mesurées dans des pipes de polyéthylène étaient beaucoup plus hautes que prévues de la formule de **Zukovski**. Les pipes de polyéthylène moyen et haute densité ont montré une résistance plus élevée aux changements soudains de la pression. La rigidité accrue a permis une pression maximum plus élevée mais se peut également être une source de cavitation locale pendant de grandes diminutions de pression. Les essais ont prouvé que la variation de la pression due au coup de bélier a une nature de vague. Des changements caractéristiques de pression avec de la période du coup de bélier ont été établis. [5]

C.V.kameswara Rao, K. Eswaran (1999) ont étudié ces coupures dans les systèmes d'écoulement du liquide incompressible et ont développé un programme informatique. Ce programme incorpore largement la méthode des caractéristiques pour le calcul de la charge et de la vitesse dépendant du temps à un point quelconque dans une canalisation complexe sur le début de n'importe quel événement tel que l'échec de pompe, la réduction de charge sur une turbine, etc.

Plus tôt, un code informatique a été développé par les auteurs **Eswaran et Kameswara Rao**, (1991) suivant la méthode des caractéristiques (MOC) pour les réseaux complexes avec un liquide compressible. [5]

En 1980 M. Meunier a présenté des courbes expérimentales pour illustrer l'effet de l'enterrement des conduites sur la célérité d'onde de coup de bélier. Afin de confirmer ces courbes et en se basant sur les travaux de Jaeger et Halliwel, B. Salah et al. En 2001 ont développé une formule de la célérité d'onde introduisant les caractéristiques mécaniques du sol environnant, et les efforts longitudinaux en analysant l'effet de la charge externe exercé par le remblai qui surmonte une conduite enterrée. [4]

En 2003, afin de montrer l'effet du sol sur le coup de bélier, **B.Salah, A. Kettab** et **F Massouh** ont utilisé la méthode des caractéristiques appliquée à un réseau simple, ramifié de rang 2, divergent, libre, enterré et en refoulement. Ils ont étudié des conduites de différents matériaux libres et enterrés dans un sol de caractéristiques connues. [5]

Covas et autres (2005) ont présenté un nouveau modèle mathématique développé pour calculer les régimes transitoires hydrauliques des systèmes de conduites pressurisées en polyéthylène (PE). Ce modèle hydraulique (nommé HTS). [6]

Szymkiewicz et **Mitosek** (2005) ont comparé une solution théorique de coup de bélier suivant une méthode modifiée d'éléments finis aux résultats expérimentaux pour un système de canalisation simple. [5]

Algirdas et al (2005) ont présenté des simulations du phénomène du coup de bélier en utilisant le code RELAP5. Une comparaison entre RELAP5, CWHTF et AEKI et des mesures sur des valeurs transitoires après une ouverture rapide de valve générant l'aspect du coup de bélier induit par une condensation. Un coup de bélier fort semblable à celui observé dans l'expérience du moyen d'AEKI n'a pas été obtenu en simulation RELAP5. Les résultats de cette analyse ont prouvé que le code RELAP5 ne pourrait pas capturer le phénomène de condensation. [5]

A.S. Tijsseling (2007) a présenté un modèle mathématique unidimensionnel qui décrit le comportement des canalisations remplies de liquide à parois épaisses avec un rapport plus petit que deux fois de rayon/épaisseur. Le modèle est basé sur des théories conventionnelles du coup de bélier. L'interaction de fluide-structure est tenue compte également.

L'entreprise **Fraunhofer Gesellschaft** en Allemagne a inventé une méthode pour diminuer des coups de béliers et qui consiste à fermer la vanne lentement. Le centre de recherche a développé un système appelé ABS qui diminue l'amplitude des coups de bélier dans les canalisations et qui ne nécessite pas d'apport d'énergie. L'avantage de cette technique repose sur le fait que le temps de fermeture de la vanne est directement adapté à l'amplitude du coup de bélier et ne nécessite pas d'apport d'énergie supplémentaire. [6]

Les modèles classiques du coup de bélier, qui assument normalement le comportement linéaire élastique des parois de conduite et des pertes de frottement quasi-stationnaires d'état, ont été employés couramment et sont présentés en littérature (**Chaudhry**, 1987 ; **Almeida** et **Koelle**, 1992 ; **Wylie** et **Streeter**, 1993). Cependant, récemment le travail de recherches a changé cette tendance. [5]

La comparaison entre les résultats expérimentaux et informatiques basés sur la méthode des caractéristiques (MOC) montre une augmentation de quelques effets pouvant être identifiés comme sources principales d'atténuation de montée subite. Il existe des types de modèles en littérature pour décrire des événements passagers rapides et pour aider l'identification des effets dynamiques parmi ces modèles :

- Le modèle quasi-stationnaire de l'état 1D avec une distribution de vitesse de pseudo-uniforme dans chaque comportement élastique linéaire du matériel de pipe et la contrainte de pipe de tous les mouvements axiaux ou latéraux, est bien connu pour sous-

estimer des forces de frottement et surestimer des oscillations de pression [**Chaudhry** (1987) ; **Almeida et Koelle**(1992) ; **Wylie et Streeter** (1993)] ;

- Le modèle équivalent du précédent avec une modification dans le facteur de frottement est mis en application en ajoutant l'effet frottement instable dû aux irrégularités des profils de vitesse qui inclut les effets de l'inertie locale et l'effort de cisaillement instable de mur sur l'écoulement. Plusieurs formules approximatives ont été présentées **Zeilke** (1968) ; **Trikha** (1975) ; **Hino** et autres (1977).

Massimo Greco, Armando Carravetta ont étudié le coup de bélier concernant le réseau le plus simple composé de bifurcation simple. Ils ont utilisé les équations en forme sans dimensions. Négligeant le frottement et considérant seulement les fermetures instantanées, ils ont prouvé que des valeurs de surpression sont deux fois plus grandes que celles prévues dans une conduite unique. En outre, le changement énergétique des surpressions peut apparaître avec de petits changements de diamètre, de vitesse de vague ou de longueur de pipe. [5]

I.3. Conclusion :

Ce chapitre s'est basée sur l'élaboration d'un aperçu historique sur le phénomène appelé « coup de bélier » en collectant toutes les informations nécessaires.

Nous avons conclu qu'au fil du temps le développement de l'outil informatique a apporté une précision et une facilité de calcul surtout dans les cas complexes.

Le phénomène du coup de bélier est la cause de plusieurs dégâts comme la rupture ou fissuration des conduites, implosion des conduites... dans les installations en refoulement. Pour ce fait nous devons veiller à ce que nos systèmes soient protégés donc nous sommes appelés à déterminer la célérité d'onde provoquée par ce régime transitoire afin d'assurer un bon dimensionnement des dispositifs de protection.

CHAPITRE 2 :

Etude du régime transitoire..

II .1. Introduction :

L'objectif du présent chapitre l'analyse du régime transitoire du point de vue physique. Cette analyse se base sur les équations des écoulements non permanents telles que l'équation de continuité et l'équation dynamique, celles-ci nous permettent de quantifier le phénomène de coup de bélier pour mieux dimensionner une protection anti bélier.

II.2. Analyse du régime transitoire :

Afin de suivre l'évolution des variables telles que la vitesse et pression au cours du temps et dans l'espace ; il est nécessaire de faire un bilan de masse et de quantité de mouvement.

II.2.1. Equation de continuité :

Afin d'illustrer cette équation, nous prenons comme exemple une conduite de longueur BC ayant une longueur ΔL à un instant « t » et comme axe « x ». Cette conduite de section « S » véhicule un liquide de masse volumique « ρ ». (Figure II.1)

Nous allons exprimer l'équation de continuité en analysant les déformations à masse constante d'un volume de liquide entre les instants « t » et « t+dt ». Nous considérons que cette masse exprimée par $\rho v = \rho.S.\Delta L$ reste constante.

Soit :

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{d(\Delta L)}{\Delta L} = 0 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- ρ : la masse volumique du liquide.
- S : la section radiale.
- ΔL : la variation de longueur de l'élément liquide.

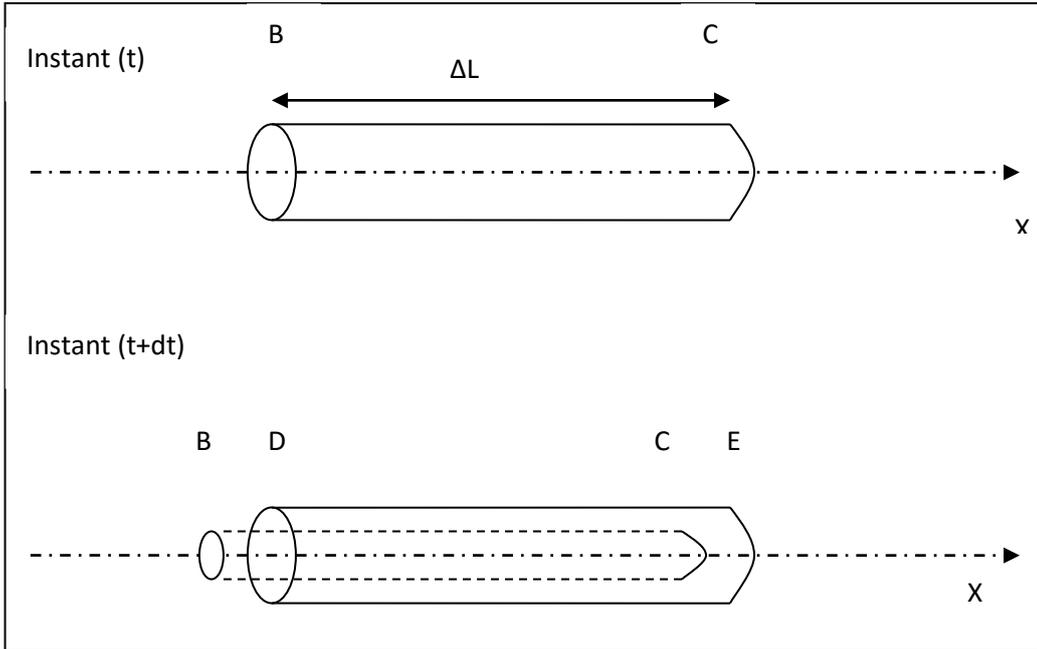


Figure II.1 : Déplacement d'un élément liquide suivant l'axe « x ».

A-Variation de longueur de l'élément liquide

Au cours d'un régime transitoire prépondérant, il en résulte une déformation de la conduite du côté longueur et section transversale en fonction du temps et de l'espace. Pour l'instant nous nous intéressons à celle longitudinale temporelle comme suit suivant 'axe « x ». Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{aligned} \Delta L (t) &= X_C - X_B \\ \Delta L (t + dt) &= X_E - X_D \\ d(\Delta L) &= (X_E - X_C) - (X_D - X_B) \\ d(\Delta L) &= U_C \cdot dt - U_B \cdot dt = (U_C - U_B) dt \\ d(\Delta L) &= \frac{\partial U}{\partial X} \cdot \Delta L \cdot dt \end{aligned}$$

D'où $\frac{d(\Delta L)}{\Delta L} = \frac{\partial U}{\partial X} \cdot dt$ (II.2)

L'expression 2.2 nous renseigne sur le rapport de variation de la longueur de cette conduite en fonction du temps et du gradient de la vitesse.

B-Variation de la masse volumique de l'élément liquide :

Dans notre raisonnement, nous considérons que le liquide véhiculé est peu compressible et varie à la limite en fonction de la pression. Ainsi, nous pouvons écrire que le module d'élasticité du fluide ε est égal à $dP / (d\rho/\rho)$. Nous pouvons donc écrire :

$$\boxed{\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{\varepsilon}} \quad (\text{II.3})$$

La section de l'écoulement liquide reste en permanence égale à celle de l'élément de tuyau qui l'entoure. On a donc :

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r} = 2d\zeta_2 = \frac{2}{E} (d\sigma_2 - \nu d\sigma_1)$$

Sachant que :

L'expression de la contrainte radiale est donnée par: $\sigma_2 = \frac{P \cdot D}{2e}$

L'expression de la contrainte longitudinale est donnée par : $\sigma_1 = K_c \sigma_2$

ζ_2 Déformation qui correspond à la contrainte radiale.

Avec

- K_c coefficient d'ancrage, qui nous renseigne sur trois cas à savoir :
 - $K_c=1/2$ ➔ Conduite sans joints, libre à une extrémité ;
 - $K_c=\nu$ ➔ Conduite sans joints, ancrée aux deux extrémités ;
 - $K_c=0$. ➔ Conduite avec de nombreux joints.
- ν : coefficient de Poisson
Si on pose $f = 1 - K_c \nu$, on obtient :

$$\boxed{\frac{dS}{S} = \frac{2f}{E} d\sigma_2 = \frac{D}{E \cdot e} f dP} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- S : La section de la conduite,
- E : Module de Young du matériau,
- e : Epaisseur de la conduite,
- D : Diamètre de la conduite.

Si nous remplaçons chaque terme de l'équation (II.1) par les expressions données dans les équations (II.2, II.3 et II.4), on obtient l'équation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E \cdot e} f \right) \frac{dP}{dt} = 0 \quad (\text{II.5})$$

L'expression $\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E \cdot e} f \right)$ dépend d'une part de la compressibilité de l'eau (ε), d'autre part des caractéristiques de la conduite $\left(\frac{D}{E \cdot e} \right)$ et de son mode d'assemblage (f). Nous posons donc :

Ce terme est donc en général une caractéristique de l'installation sur laquelle on étudie le coup de bélier. On pose donc :

$$\frac{1}{C^2} = \rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E \cdot e} f \right) \quad (\text{II.6})$$

Ce qui donne comme nouvelle expression de l'équation de continuité :

$$\rho \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{C^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial p}{\partial X} \right) = 0 \quad (\text{II.7})$$

Avec :

C : célérité d'onde de propagation en m/s

Nous aboutissons ainsi à la première équation de type Saint-Venant qui est l'équation (II.7). [18], [20], [21]

II.2.2. Equation dynamique

En considérant la figure (II.1), Nous appliquons le théorème des quantités de mouvement à un petit élément de volume en mouvement :

$$\frac{d(mU)}{dt} = \sum F_{ex} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- $\sum F_{ex}$: La somme des forces extérieures.
- m : La masse de la tranchée liquide.
- U : La vitesse d'écoulement.

Qui indique que la dérivée de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces extérieures appliquées à l'élément fluide.

$$\frac{d(mU)}{dt} = \frac{dm}{dt}U + m \frac{dU}{dt}$$

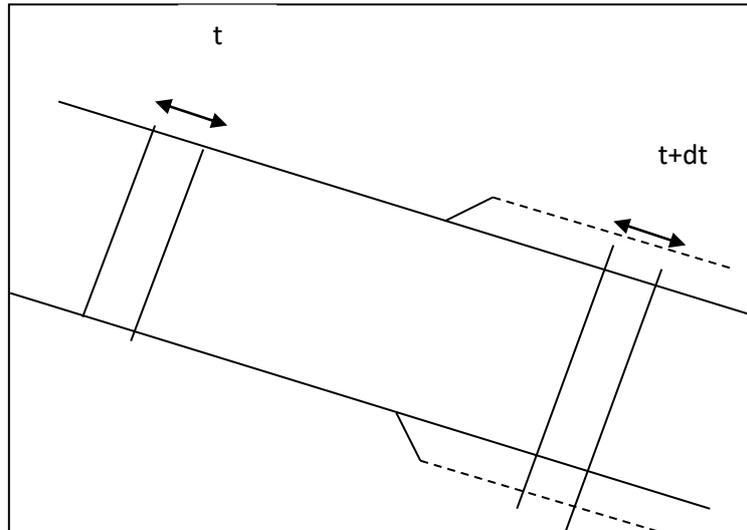


Figure II.2 : théorème des quantités de mouvement.

La masse de l'élément liquide ne varie pas dans son déplacement.

D'ou: $\frac{dm}{dt} = 0$

Donc :

$$\boxed{\frac{d(mU)}{dt} = m \frac{dU}{dt} = \rho \cdot S \cdot dx \cdot \frac{dU}{dt}} \quad (\text{II.9})$$

Les forces extérieures appliquées et projetées sur l'axe de la conduite pour une couche d'eau d'épaisseur dX , (figure II.4) sont :

- La pression sur une face de la tranche dX : $P S$
- La pression sur l'autre face : $- \left(PS + \frac{\partial P}{\partial X} S dX \right)$

Remarque: la section S est supposée constante sur toute la longueur de la conduite donc nous négligeons le terme $\frac{\partial S}{\partial X}$.

- La composante du poids : $- \rho g S dX \sin \alpha$

Où α : l'angle entre l'axe de la conduite et l'horizontal.

- Les frottements du liquide avec les parois de la conduite : $\tau \cdot \pi \cdot D \cdot dx$

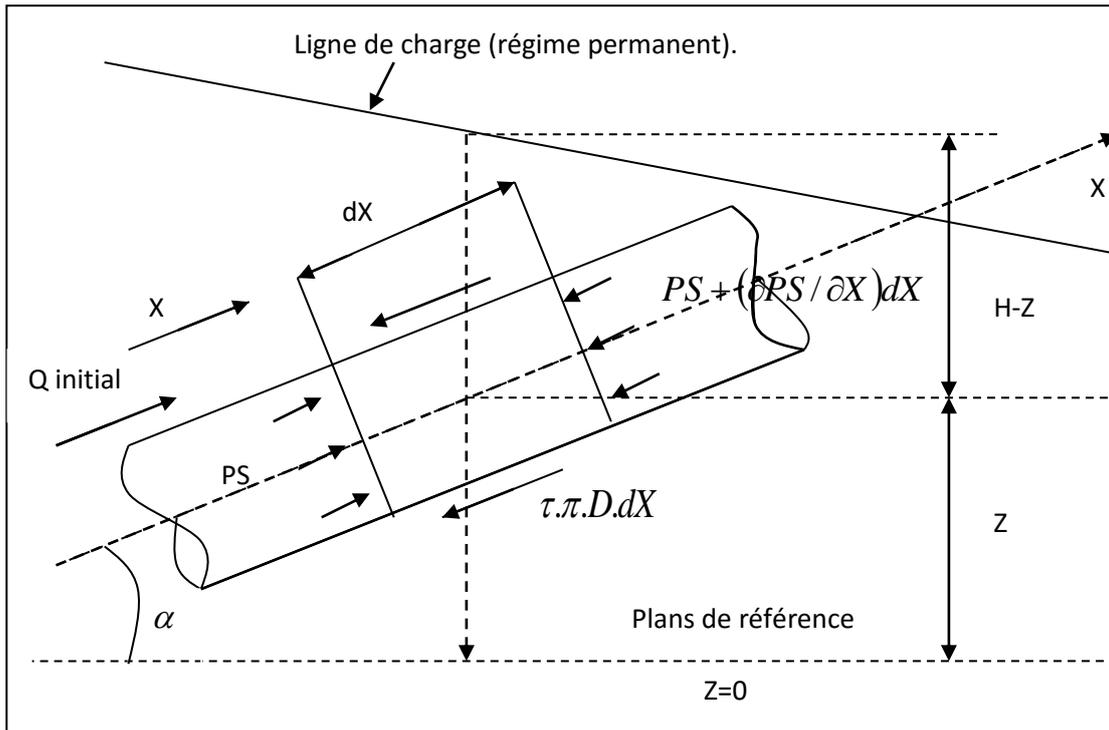


Figure II.3 : forces exercées sur une tranche liquide.

Avec

- τ : Contrainte de cisaillement entre le liquide et la paroi de la conduite

Nous remarquons que: $\frac{dZ}{dX} = \sin \alpha$ et $P = \rho g(H - Z)$

A partir de la figure II.3 on a :

$$\sum F_{ex} = PS - \left(-PS - SdX \frac{\partial P}{\partial X} \right) - \rho g S dX \sin \alpha - \tau \pi D \cdot dX \quad (II.10)$$

On détermine d'abord le terme $\tau \cdot \pi \cdot D$. Les pertes de charge étant représentées par ΔP donnée par la formule de Darcy Weisbach :

$$\Delta P = \rho g \lambda \frac{L U^2}{D 2g}$$

On peut écrire alors que la force de frottement Fr se calcule par l'une des deux formules suivantes :

$$Fr = \tau \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad \text{ou} \quad Fr = \Delta P \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

D'où l'on déduit :

$$\tau \cdot \pi \cdot D = \frac{\pi D^2}{4} \rho g \frac{\lambda U^2}{2gD} = j \rho g S \quad (\text{II.11})$$

Avec

- $j = \frac{\lambda U^2}{2gD}$ (Gradient hydraulique de perte de charge).

On injecte l'expression $\tau \cdot \pi \cdot D$ dans l'équation (II.10), on aura :

$$\sum F_{ex} = -\frac{\partial P}{\partial X} S dX - \rho g S \sin \alpha dX - j \rho g S dX \quad (\text{II.12})$$

En portant l'équation (II.12) dans l'équation (II.9) on obtient après simplification par $\rho \cdot S \cdot dX$:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} - g(\sin \alpha + j)$$

Ou bien :

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} = -g(\sin \alpha + j) \quad (\text{II.13})$$

L'expression (II.13) est la seconde équation de SAINT-VENANT

On sait que :

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial t} \frac{\partial U}{\partial X} \\ \frac{dU}{dt} &= \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} \end{aligned}$$

D'où on aura :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} = -g(\sin \alpha + j) \quad (\text{II.14})$$

L'équation (II.14) représente la 2^{ème} équation de SAINT-VENANT.

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \frac{\partial U}{\partial X} &= -\frac{1}{C^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial p}{\partial X} \right) \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} &= -g(\sin \alpha + j) \end{aligned} \right. \quad (\text{II.15})$$

Par conséquent les équations (II.7) et (II.14) représentent le système (II.15) des équations de SAINT-VENANT. [18], [20], [21]

II.2.3. Les équations aux caractéristiques :

Les deux équations de SAINT-VENANT établies permettent de traduire tous les mouvements transitoires. Nous allons les transformées pour obtenir des équations plus maniables et ayant un sens physique plus évident.

A partir du système (II.15) on a :

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{C^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial X} \right) = 0 & (a) \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} = -g(\sin \alpha + j) & (b) \end{cases} \quad (II.16)$$

En multipliant (a) par $\frac{C}{\rho}$ on obtient :

$$\begin{cases} C \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho C} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial X} \right) = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} = -g(\sin \alpha + j) \end{cases} \quad (II.17)$$

Ajoutons-les d'abord puis retranchons la première de la deuxième. On obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial X} + (C + U) \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho C} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + (C + U) \frac{\partial P}{\partial X} \right) = -g(\sin \alpha + j) \\ \frac{\partial U}{\partial t} + (U - C) \frac{\partial U}{\partial X} - \frac{1}{\rho C} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + (U - C) \frac{\partial P}{\partial X} \right) = -g(\sin \alpha + j) \end{cases} \quad (II.18)$$

La première équation du système (II.18) montre que si on se place sur un trajet tel que $\frac{dX}{dt} = U + C$, la quantité $\frac{\partial U}{\partial t} + (U + C) \frac{\partial U}{\partial X}$ exprime sur ce trajet la dérivée totale par rapport au temps de la vitesse $\frac{dU}{dt}$ de même pour la pression, on aura donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = U + C \\ \frac{dU}{dt} + \frac{1}{\rho C} \left(\frac{dP}{dt} \right) = -g(\sin \alpha + j) \\ \frac{dX}{dt} = U - C \\ \frac{dU}{dt} - \frac{1}{\rho C} \left(\frac{dP}{dt} \right) = -g(\sin \alpha + j) \end{array} \right. \quad (\text{II.19})$$

En utilisant les expressions suivantes :

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial X} \frac{dX}{dt} = \frac{dX}{dt} \sin \alpha \quad \left(\text{car } \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \right)$$

$$P = \rho g(H - Z)$$

Il vient donc :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d[\rho g(H - Z)]}{dt} = \rho g \left[\frac{dH}{dt} - \frac{dZ}{dt} \right]$$

$$\frac{dP}{dt} = \rho g \left[\frac{dH}{dt} - \frac{dX}{dt} \sin \alpha \right]$$

D'où les équations du système (II.16) et leurs conditions respectives s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = U + C \\ \frac{dU}{dt} + \frac{g}{C} \frac{dH}{dt} = \frac{g}{C} (U + C) \sin \alpha - g(\sin \alpha + j) \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = U - C \\ \frac{dU}{dt} - \frac{g}{C} \frac{dH}{dt} = -\frac{g}{C} (U - C) \sin \alpha - g(\sin \alpha + j) \end{array} \right. \quad (\text{II.21})$$

Les équations aux caractéristiques sont représentées par les deux premières équations des systèmes (II.20), et (II.21) quant aux deux dernières équations des mêmes systèmes, elles sont dites de compatibilité.

En général, on a toujours $C \gg U$ d'où il vient :

$$1) \quad \text{Pour } \frac{dX}{dt} = U + C \approx C$$

$$\text{On a : } \frac{dU}{dt} + \frac{g}{C} \frac{dH}{dt} = -gj$$

$$2) \quad \text{Pour } \frac{dX}{dt} = -C$$

$$\text{On a : } \frac{dU}{dt} - \frac{g}{C} \frac{dH}{dt} = -gj$$

Ou autrement écrites :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = \pm C \\ \frac{g}{C} \frac{d}{dt} \left(\frac{C}{g} U \pm H \right) + gj = 0 \end{array} \right.$$

On introduit le débit $Q = U.S$ dans cette dernière expression tout en la multipliant par $\frac{C}{g}$:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C}{gS} Q \pm H \right) + Cj = 0$$

Comme $dX = \pm Cdt$ on aura donc le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = \pm C \\ d \left(\frac{C}{gS} Q \pm H \right) + j dX = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.22})$$

Le système (II.22) représente les équations aux caractéristiques.

[18], [20], [21]

Remarque : Rappelons que le signe (+) doit être pris si $dX = +Cdt$ et le signe (-) n'est valable que dans le cas ou $dX = -Cdt$.

L'interprétation des équations aux caractéristiques :

La figure (II.4) explique bien la première équation du système (II.23) qui représente deux droites sous la forme $dX = Cdt$.

D'autre part, on constate que pour une onde se déplaçant le long d'un trajet vérifiant $dX = Cdt$, il y a conservation de la deuxième équation. La pression se transforme donc en débit (et vice-versa) suivant l'expression :

En d'autres termes, un observateur se déplaçant à la vitesse C selon le sens positif adopté voit se conserver le long de son déplacement la quantité $H + \frac{C}{gS}Q$ aux pertes de charge près.

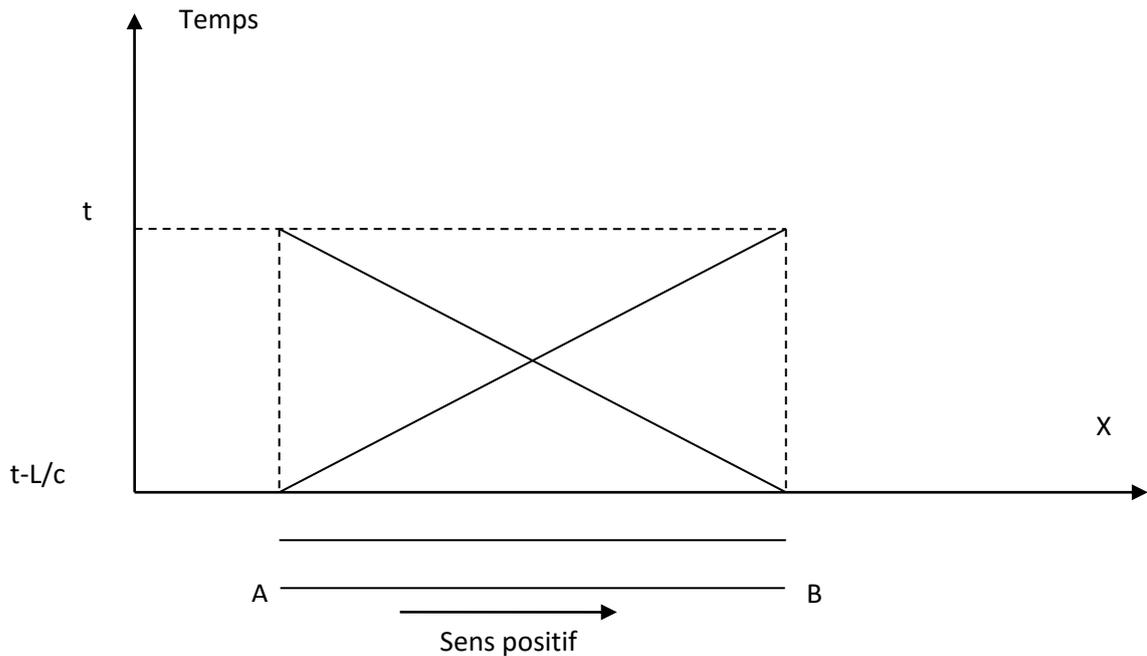


Figure II.4 : Déplacement d'une onde dans le plan (X, t).

II.2.4. Les équations d'ALLIEVI : [18]

Les équations (II.16a) et (II.16b) de SAINT-VENANT sont générales et traduisent tous les mouvements transitoires. On peut donc les simplifier en rétrécissant le champ de leur validité. Négligeons par exemple les pertes de charge et admettons qu'on ne s'intéresse qu'aux variations telles que $U \cdot \frac{\partial U}{\partial X}$ soit négligeable devant $\frac{\partial U}{\partial t}$. ceci est souvent vrai en hydraulique sous pression puisqu'en front d'onde $\frac{\partial U}{\partial t}$ est égal à $(-C \frac{\partial U}{\partial t})$ et que U est faible devant C , on peut également négliger $(U \frac{\partial U}{\partial X})$ devant $\frac{\partial P}{\partial t}$.

Le système des équations (II.16) devient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{C^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} = -g \sin \alpha \end{array} \right. \quad (\text{II.23})$$

Comme : $\sin \alpha = \frac{\partial Z}{\partial X}, \frac{\partial Z}{\partial t} = 0$ et $P^* = P + \rho g Z$

On peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{C^2} \left(\frac{\partial P^*}{\partial t} \right) = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial X} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

Ces deux équations s'intègrent pour donner le système de solutions :

$$\left\{ \begin{array}{l} P^* = P^*_0 + F\left(t - \frac{X}{C}\right) + f\left(t + \frac{X}{C}\right) \\ U = U_0 + \frac{1}{\rho C} \left[F\left(t - \frac{X}{C}\right) - f\left(t + \frac{X}{C}\right) \right] \end{array} \right. \quad (\text{II.25})$$

Où F et f représentent des fonctions quelconques des variables $\left(t - \frac{X}{C}\right)$ et $\left(t + \frac{X}{C}\right)$.

C'est à partir de ces équations que sont établies les solutions analytiques pour les cas simples, en faisant intervenir les conditions aux limites.

On peut écrire le système (2.26) sous forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} P^* - P^*_0 = F + f \\ U - U_0 = \frac{1}{\rho C} (F - f) \end{array} \right.$$

Effectuons les opérations suivantes :

1. Division de la première équation par ρg
2. multiplication du terme de droite de la deuxième équation par ρg , puis divisons (F-f) de ce même terme par (ρg) .
3. Faire sortir le signe moins (-) du terme (F-f).

Le système devient alors :

$$\begin{cases} \frac{P^*}{\rho g} - \frac{P^*_0}{\rho g} = \frac{F}{\rho g} + \frac{f}{\rho g} \\ U - U_0 = -\frac{g}{C} \left(\frac{f}{\rho g} - \frac{F}{\rho g} \right) \end{cases}$$

En développant les termes : $\frac{P^*}{\rho g}$ et $\frac{P^*_0}{\rho g}$

Nous retrouvons : $H = \frac{P^*}{\rho g}$ et $H_0 = \frac{P^*_0}{\rho g}$

Posons en suite : $F' = \frac{f}{\rho g}$ et $f' = \frac{F}{\rho g}$

Il vient alors :

$$\begin{cases} H - H_0 = F' + f' \\ U - U_0 = -\frac{g}{C} (F' - f') \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Enfin nous aurons :

$$\begin{cases} b = H - H_0 = F' \left(t - \frac{X}{C} \right) + f' \left(t + \frac{X}{C} \right) \\ U - U_0 = -\frac{g}{C} \left[F' \left(t - \frac{X}{C} \right) - f' \left(t + \frac{X}{C} \right) \right] \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Le système (II.27) représente les équations d'ALLIEVI.

Avec :

$b = |H - H_0|$: Valeur du coup de bélier,

F' et f' : sont des signes fonctionnels qui dépendent des conditions aux limites.

II.3. Conclusion :

Nous avons obtenu les deux équations de Saint-Venant qui nous permettent de traduire tous les mouvements transitoires. Leur transformation à des équations aux caractéristiques donne un sens physique plus évident au problème. Les équations d'Alliévi représentent un cas simple des équations de Saint-Venant.

CHAPITRE 3 :

Etude de la célérité d'onde de propagation en régime transitoire.

III.1. Introduction :

Le but de ce chapitre est l'étude et l'analyse de la célérité d'onde de propagation générée par la perturbation du régime permanent à la suite d'une manœuvre d'un robinet vanne placé soit en extrémité de la conduite ou au milieu. La détermination de la célérité d'onde est d'un intérêt primordial pour l'étude du comportement mécanique d'une conduite vu que le coup de bélier engendre des dégâts matériels importants en pratique.

III.2. Types d'écoulements :

III.2.1. Ecoulement permanent :

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0, \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \dots \text{etc} \quad \text{Avec un liquide supposé peu compressible}$$

- **U**: vitesse d'écoulement,
- **P** : la pression interne,
- **Q** : le débit .

III.2.2. Ecoulement transitoire

L'écoulement est dit transitoire lorsque les paramètres hydrauliques à savoir la vitesse, la pression et les propriétés du fluide varient dans le temps et dans chaque point de l'espace. Nous écrivons donc

$$\frac{\partial U}{\partial X} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \dots \text{etc}$$

Donc l'écoulement transitoire est un écoulement non permanent, dans notre travail nous nous intéresserons uniquement au phénomène du coup de bélier qui est une phase du régime transitoire où la variation des paramètres hydraulique est prépondérante.

III.3. Détermination théorique de l'expression générale de la célérité d'onde de coup de bélier :

La majorité des formules de calcul de célérité d'onde du coup de bélier sont développées à base de l'hypothèse d'une conduite à parois simples non soumise à une pression externe.

Afin de calculer la célérité d'onde dans les conduites libres et enterrées on se réfère à la formule établie par Alliévi.

$$\frac{1}{C^2} = \rho \left(\frac{d\rho}{\rho \cdot dP} + \frac{dS}{S \cdot dP} \right) \tag{III.1}$$

Où : $\frac{d\rho}{\rho dP}$ et $\frac{dS}{S dP}$ représentent respectivement la compressibilité du liquide et la déformabilité de la conduite.

Avec :

- C : Célérité d'onde,
- ρ : La masse volumique de l'eau,
- S : la section du liquide au régime transitoire.

On peut développer l'expression (III.1) pour un fluide peu compressible et une conduite élastique à paroi mince pour obtenir l'expression suivante :

$$\frac{1}{C^2} = \rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E \cdot e} f \right) \tag{III.2}$$

Avec :

- ε : Elasticité du fluide,
- D : Diamètre intérieur du tuyau,
- E : Module de YOUNG du tuyau,
- e : Epaisseur du tuyau,
- f : Traduit l'influence de la contrainte longitudinale. [3], [18]

III.3.1. Calcul de la célérité d'onde dans les conduites non enterrées

L'expression (III.2) sert de base pour la détermination de la formule suivante donnant la célérité d'onde dans les conduites libres c'est-à-dire non enterrées .

La célérité d'onde C peut être exprimé par :

$$C = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon}{E} \frac{D}{e} f}} \tag{III.3}$$

Pour l'eau on a :

- $\varepsilon = 2,07 \cdot 10^9$ Pascal

- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$,

Donc la célérité prend la forme :

$$C = \frac{1430}{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot 10^9}{E} \frac{D}{e} f}} \quad (\text{III.4})$$

Où E est exprimée en pascal.

La célérité ne peut donc dépasser 1430 m/sec, célérité du son dans l'eau, et s'en rapproche pour les matériaux très rigides (E très grand).

Elle ne dépend plus que :

- du rapport $\frac{f}{E}$ donc du matériau qui compose la conduite,
- du rapport $\frac{D}{e}$ donc des dimensions de la conduite,
- Du terme f qui traduit l'influence de la contrainte longitudinale de la conduite.

Et on conclut pour l'eau, que la célérité se trouve aussi souvent sous la forme suivante :

$$C = \frac{9900}{\sqrt{50 + k \frac{D}{e}}} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

- **D** : diamètre de la conduite,
- **e** : épaisseur de la conduite.

Le coefficient « k » tient compte de la nature du matériau de la canalisation. On note que :

Coefficient k	0.5	1	5	33	83	300
Nature du matériau	Acier ,fer	fonte	Plomb	PVC	PEHD	PEBD

Tableau n° III.1 : Coefficient K selon la nature du matériau.

La relation (III.5) exprime l'ancien système (M.U.S), et suppose certaines hypothèses à savoir :

- Conduites à parois minces et élastiques,
- Conduites comportant plusieurs joints, avec effort longitudinal nul,

- Température de l'eau est supposé constante.

III.3.2. Calcul de la célérité d'onde dans les conduites composites [20]

Dans le calcul de la célérité d'onde de coup de bélier dans les conduites composites, on considère trois cas à savoir :

- Galerie en rocher brut ;
- Galerie en rocher revêtue ;
- Célérité d'onde dans les conduites en béton armé.

III.3.2.1. Galerie en rocher brut

L'expression de la célérité telle qu'elle est donnée par l'équation (III.12) ne peut être utilisée telle quelle en faisant tendre e vers l'infini. Il faut alors revenir aux définitions des termes qui figurent dans la célérité, notamment utiliser la déformabilité de l'enveloppe sous la forme $\frac{dS}{SdP}$ et non $\frac{D}{E.e} f$.

On obtient alors comme expression de la célérité :

$$\frac{1}{C^2} = \rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{2(1+\nu)}{E} \right) \quad (\text{III.6})$$

Avec :

- ν : Coefficient de Poisson du rocher,
- ε : Elasticité du fluide.

III.3.2.2. Galerie en rocher revêtue

On distingue deux types de galeries en rocher revêtues :

A. Galerie avec deux revêtements

Selon JAEGER et tenant compte de la théorie des cylindres épais en résistance des matériaux, la célérité d'onde a été déterminée par considération de la déformabilité de la conduite en négligeant le coefficient de Poisson.

Les efforts ont été négligés dans le sens longitudinal de la conduite. En rejoignant l'idée d'ALLIEVI, JAEGER propose pour les conduites épaisses la relation suivante :

$$C = \left[\rho \left(\frac{1}{k_e} + \frac{2}{E} \frac{r^2 + R^2}{R^2 - r^2} \right) \right]^{-1/2} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

- **R, r** : respectivement les rayons intérieur et extérieur de la canalisation,

Donnons le résultat fourni par HALLIWELL pour une galerie ayant deux revêtements : le premier, interne, est une tôle d'épaisseur « e » et de module d'YOUNG « E », le deuxième est un revêtement en béton, de module d'YOUNG « E_b », qu'on considère cylindrique de rayons intérieur et extérieur « r » et « R ». Enfin du rocher, d'épaisseur supposée infinie et de module d'YOUNG « E_r ». [3], [18]

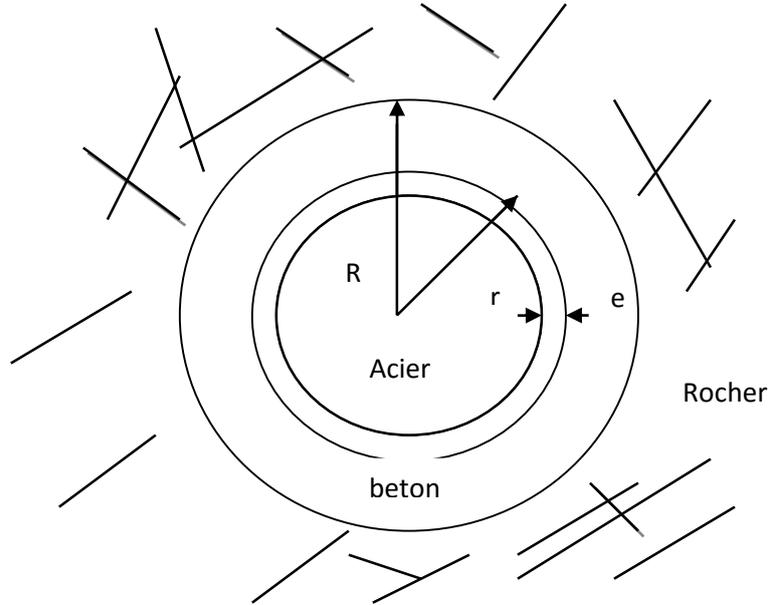


Figure III.1 : coupe schématique d'une galerie en rocher revêtue.

La célérité peut alors être mise sous la forme générale :

$$C = \left[\rho \left(\frac{1}{k_e} + \frac{2r}{E.e} f \right) \right]^{-1/2} \tag{III.8}$$

Avec :

$$f = (1 - \nu^2)(1 - \lambda)$$

Et

$$\lambda = \frac{(1 - \nu)r}{(1 - \nu)r + \frac{Ee}{E_B} \left[\frac{E_B(R^2 + r^2(1 - 2\nu)) + E_r(1 - 2\nu)(R^2 - r^2)}{E_B(R^2 - r^2) + E_r(r^2 + R^2(1 - 2\nu))} \right]} \tag{III.9}$$

Avec,

- ν : coefficient de poisson du rocher.

On voit qu'il y a seul module de Poisson dans cette expression. C'est en effet l'hypothèse faite par HALLIWELL pour établir ce résultat. JAEGGER lui n'a tenu compte que du module d'YOUNG du rocher, alors que HALLIWELL a introduit celui du béton. [3], [18]

B. Galerie avec un seul revêtement.

- **Revêtement en acier :**

Il suffit de faire $R = r$ dans l'équation (III.9) car nous aurons qu'un seul matériau formant la conduite pour obtenir la valeur du terme correctif λ d'où on déduit :

$$f = \frac{(1 - \nu^2) + E.e}{E_r(1 - \nu)r + E.e} \quad (\text{III.10})$$

Si on adopte pour E_r la valeur de E_b , qui représentent les modules de Young, ce qui suppose le rocher amélioré par injections.

- **Revêtement en béton :**

Le même raisonnement que celui effectué dans le cas de deux revêtements sauf que dans ce cas nous n'avons qu'un seul revêtement, nous conduit à l'expression suivante du terme correctif f :

$$f = \frac{(1 + \nu)(R - r)}{r} \frac{E_b(R^2 + r^2(1 - 2\nu)) + E_r(1 - 2\nu)(R^2 - r^2)}{E_b(R^2 - r^2) + E_r(r_2 + R^2(1 - 2\nu))} \quad (\text{III.11})$$

Ce terme intervient dans l'expression suivante de la célérité :

$$\frac{1}{C^2} = \rho \frac{1}{k_e} + \frac{2r}{E_b(R - r)} f \quad (\text{III.12})$$

III.3.2.3. Célérité d'onde dans les conduites en béton armé :

A/ méthode de l'épaisseur équivalente :

Dans cette méthode :

L'expression de la célérité est celle d'une conduite simple.

L'hypothèse considère que le béton et l'acier ont la même déformation.

La force « F » provoquant une déformation ζ d'un élément de béton armé soumis à l'équilibre de la largeur unitaire et de section (e_b+e_m) sera donnée par :

$$F = e_b \sigma_b + e_a \sigma_a \quad (\text{III.13})$$

Avec :

- e_b : est l'épaisseur du béton,
- e_a : est l'épaisseur du métal suppose uniformément répartie sur la longueur,
- σ_a, σ_b : sont respectivement les contraintes dans le béton et dans l'armature.

Selon la loi de HOOKE, on peut écrire :

$$F = \varepsilon . E_a (e_b + \eta . e_a) = \sigma_b e_{eq}^b \quad (\text{III.14})$$

Où bien :

$$F = \varepsilon . E_a \left(e_a + \frac{e_b}{\eta} \right) = \sigma_a e_{eq}^a \quad (\text{III.15})$$

- η : Rapport entre les modules d'élasticité du métal et du béton, variant entre 8 et 15,
- E_a : module d'élasticité du métal.

On propose une solution approchée par détermination d'une épaisseur équivalente, puisqu'on a une conduite en béton avec des couches d'armatures. [3], [18]

- Epaisseur équivalente en béton :

$$E_{eq.b} = e_b + \eta e_a \quad (\text{III.16})$$

-Epaisseur équivalente en armature :

$$E_{eq.a} = e_a + \frac{e_b}{\eta} \quad (\text{III.17})$$

III.3.3. Calcul de la célérité d'onde dans les conduites enterrées

B. SALAH a étudié plusieurs cas complexes qu'on rencontre en pratique. Nous allons exposer les résultats auxquels il a abouti en se basant sur deux hypothèses celle de la raideur du sol et l'hypothèse de la charge de la précontrainte. [3], [18]

III.3.3.1. Hypothèse de la raideur du sol :

B. SALAH a élaboré un modèle mathématique qui permet de calculer la célérité d'onde dans les conduites enterrées avec l'hypothèse en question, en tenant compte des caractéristiques mécaniques du sol environnement. Ce modèle est à la fois valable pour les conduites simples et les conduites blindées. [3], [18]

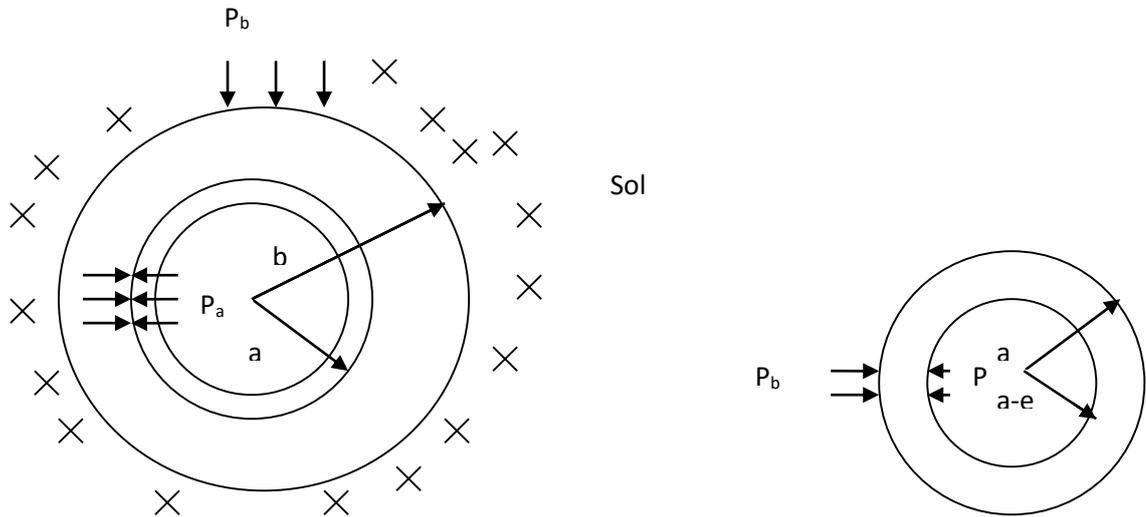


Figure III.2 : les forces appliquées sur les conduites enterrées.

Avec :

- **P** : la pression hydrostatique (Pa),
- **P_a**: la charge engendrée par la raideur du sol (Pa),
- **P_b**: la charge extérieure des terres du remblai (Pa).

D'après les résultats obtenus par l'auteur le sol impose une raideur supplémentaire réduisant la déformabilité de la conduite et augmentant ainsi la célérité. Le modèle présente l'avantage de la prise en compte du module de poisson des différents matériaux (blindage, conduite, sol) ce qui n'est pas le cas dans les formules déjà existantes de JAEGER et HALLIWELL. [3], [18]

L'auteur a exprimé la célérité d'onde d'ordre général comme suit :

$$C = \left[\frac{\rho}{ke} \left(1 + K_e \frac{2a(1-\nu_m^2)G}{(1+\nu_m)aE_c + E_m e_m G} \right) \right]^{-1/2} \tag{III.18}$$

où :

$$(III.19) \quad G = \frac{E_c(1-\nu_c)(1-\nu_s)(b^2 + a^2(1-2\nu_c)) + E_s(1-\nu_c)^2(1-2\nu_c)(b^2 - a^2)}{E_c(b^2 - a^2)(1-\nu_m)(1-\nu_s) + E_s(1-\nu_c)(1-\nu_m)(a^2 + b^2(1-2\nu_c))}$$

L'expression (III.18) est générale, elle permet de déterminer la célérité de l'onde dans les conditions enterrées et les galeries rocheuses.

Il y a deux cas qui peuvent se présenter :

- Dans le cas d'une conduite simple enterrée et à paroi mince, il suffit de faire tendre b vers a dans l'expression précédente :

$$(III.20) \quad C = \left[\frac{\rho}{k_e} \left(1 + k_e \frac{2a(1-\nu_m^2)(1-\nu_s)}{(1-\nu_m^2).a.E_s + E_m.e_m(1-\nu_s)} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Avec :

- E_s, E_c : module de YOUNG du sol et du béton (Pa),
 - E_m : module de YOUNG du matériau (Pa),
 - ν_s, ν_c, ν_m : coefficients de POISSON du sol, de l'anneau en béton et du métal,
 - e_m : épaisseur du matériau (m),
 - k_e : module d'élasticité de l'eau [Pa],
 - ρ : masse volumique de l'eau [kg/m³],
 - a : rayon de la conduite (m).
- Dans le cas d'une conduite en PVC, il suffit de remplacer les caractéristiques du métal par celles du PVC dans l'expression (III.20).
 - Dans le cas d'une conduite simple enterrée, mais à paroi épaisse, il suffit de mettre $e_m=0$ et $\nu_m=0$ dans les expressions (III.18) et (III.19), et on aboutit à :

$$(III.21) \quad C = \left[\frac{\rho}{K_e} \left[1 + K_e \frac{2G}{E_c} \right] \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Avec :

$$(III.22) \quad G = \frac{E_c(1-\nu_s)(1-\nu_c)[b^2 + a^2(1-2\nu_c)] + E_s(1-\nu_c)^2(1-2\nu_c)(b^2 - a^2)}{E_c(1-\nu_s)(b^2 - a^2) + E_s(1-\nu_c)[a^2 + b^2(1-2\nu_c)]}$$

Il est à signaler que l'expression (III.18) s'applique dans le cas des galeries rocheuses blindées ou non, ceci à condition de remplacer les propriétés du sol par celles du rocher. Cette expression porte plus de précision que les formules proposées par JAEGER et HALLIWELL. L'expression présente l'avantage de tenir compte du module de poisson, le milieu externe et des différents matériaux constituant la paroi. Rappelons que JAEGER considère uniquement le module de poisson du milieu externe et néglige ceux de la conduite et du blindage. Aussi HALLIWELL simplifie la formulation en prenant une valeur unique pour le coefficient de poisson pour les différents matériaux : $\nu = \nu_m = \nu_c = \nu_s$. [3], [18]

III.3.3.2. Hypothèse de la charge de la précontrainte

B. SALAH a déterminé l'expression de la célérité d'onde dans le cas des conduites enterrées comme suit :

$$\frac{1}{C_1^2} = \frac{\rho}{k_e} \left[1 + k_e (1 - \nu_m^2) \frac{2a}{E_m \cdot e_m} [1 + B(P - P_a)] \right] \quad (\text{III.23})$$

D'où :

$$B = \frac{(1 + \nu_m^2) a^2}{E_m \cdot e_m^2} (1 - 2\nu_m) \quad (\text{III.24})$$

Avec :

- C_1 : la célérité d'onde (m/s),
 - E_m : le module de YOUNG du métal (Pa),
 - ν_m : le coefficient de POISSON du métal,
 - e_m : l'épaisseur du blindage (m),
 - K_e : le module d'élasticité de l'eau [Pa],
 - ρ : la masse volumique de l'eau [kg/m³],
 - a : le rayon de la conduite (m),
 - P : la pression hydrostatique (Pa),
 - P_a : la charge des terres de remblai (Pa).
- [3], [18]

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons cité quelques travaux concernant la détermination de la célérité d'onde du coup de bélier dans les différentes conduites libres, enterrées ainsi que dans les galeries rocheuses. Pour les conduites enterrées nous avons exprimé les deux hypothèses élaborées par B. Salah qui sont celle de la raideur du sol et de la charge de précontrainte cette dernière sera la base de nos calculs dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 4 :

Calcul du coup de bélier dans les conduites enterrées.

IV.1. Introduction :

Les appareils anti-bélier devront avoir essentiellement pour effet : limiter la surpression et la dépression. Dans ce chapitre nous allons calculer la célérité d'onde par différentes formules et pour différents types de remblais et dimensionner l'anti bélier pour une meilleure protection de notre conduite à titre comparatif. Nous prenons comme exemple un cas de refoulement.

IV.2. Systèmes de protection contre le coup de bélier :

IV.2.1. Les soupapes de décharge

Le rôle d'une soupape consiste à dévier un certain débit à l'extérieur de la conduite à protéger, dès que la pression atteint une certaine valeur de réglage estimée généralement à environ 1.04 à 1.10 de la pression maximale admissible. L'ouverture doit pouvoir s'effectuer très rapidement pour que l'opération soit efficace.

- Les soupapes permettent la protection contre les surpressions uniquement.
- Le nombre de soupapes dépend de l'importance de l'installation.
- L'utilisation des soupapes nécessite une surveillance attentive et un entretien continu.
- Il faut aussi prévoir l'évacuation vers l'extérieur de l'eau libérée. [19]

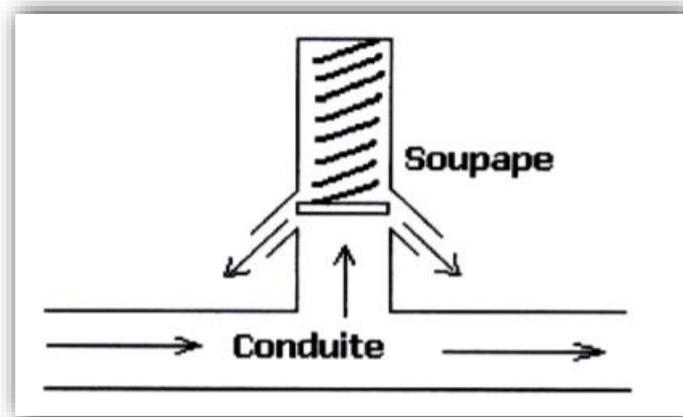


Figure IV.1 : soupape de décharge.

IV.2.2. Les ventouses (Les reniflards)

On distingue des ventouses à trois fonctions à savoir, l'évacuation de l'air contenu dans les conduites, l'admission de l'air dans ces conduites lorsqu'on procède à leur vidange et l'élimination des poches d'air qui se manifestent aux points hauts du circuit (qui peuvent

provoquer des coups de bélier), d'où leur installation en des points hauts. Il y a également des ventouses à fonction unique, en l'occurrence, l'évacuation des poches d'air seulement. Une ventouse est constituée en principe d'un flotteur sphérique en caoutchouc logé dans un corps en fonte. [19]

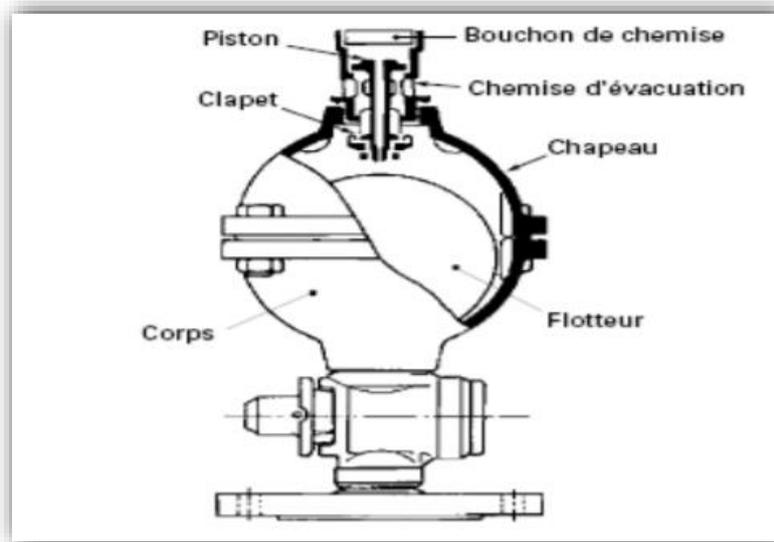


Figure IV.2 : ventouse à fonction unique.

IV.2.3. Les réservoirs d'air

Le réservoir d'air est l'appareil le plus utilisé pour la protection contre le coup de bélier. C'est un récipient contenant de l'air comprimé dans sa partie supérieure et de l'eau dans sa partie inférieure. Ces appareils sont aussi appelés "accumulateur, cloche à air, ballon d'air, réservoir anti-bélier...etc. Par ailleurs, un compresseur d'air est habituellement utilisé pour garder le volume d'air dans certaines limites (à cause des fuites) d'une part, et d'autre part, un clapet anti-retour est souvent prévu entre la pompe et le ballon d'air. Ce dispositif est très simple et protégera l'installation aussi bien contre les dépressions que contre les surpressions. Suite à une disjonction, le clapet se ferme et à ce moment-là, la pression de l'air de la cloche est encore supérieure à celle qui s'exerce à l'autre extrémité de la conduite ; ainsi, une partie de l'eau de la cloche est chassée dans la conduite. Après diminution progressive, puis annulation de sa vitesse, l'eau de la conduite revient en arrière et remonte dans la cloche, et ainsi de suite. La dissipation de l'énergie de l'eau peut être obtenue par le passage de celle-ci à travers un organe d'étranglement disposé à la base de la cloche. A cause du remplissage ou de la vidange du réservoir anti-bélier, l'air dans ce dispositif se comprime ou se dilate, et

l'amplitude de la surpression et de la dépression seront réduites suite à la variation graduelle de la vitesse d'écoulement dans la conduite. [19]

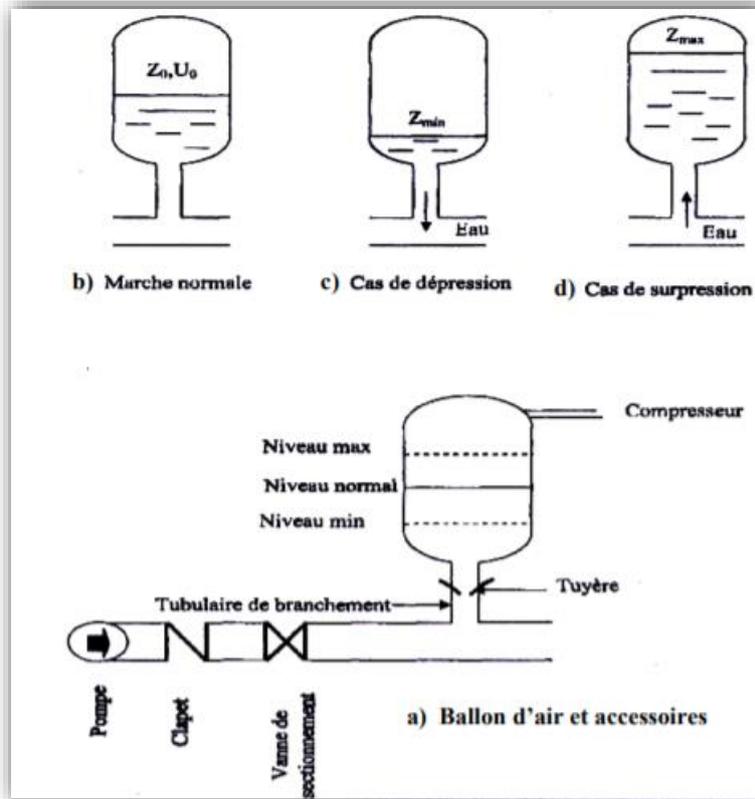


Figure IV.3 : réservoir d'air

Remarque : dans notre étude nous proposons le réservoir d'air comme moyen de protection.

IV.3. Présentation du langage MATLAB :

La plate-forme MATLAB est optimisée pour résoudre les problèmes scientifiques et techniques. Le langage MATLAB, basé sur les matrices, est le moyen le plus pour exprimer les mathématiques computationnelles. Les graphiques intégrés permettent de visualiser facilement les données afin d'en dégager des informations. [22]

Dans notre cas, nous allons établir un programme qui nous permettra de calculer la célérité d'onde pour différents types de sols et différentes hauteurs du remblai dans le but de voir l'influence du sol sur la valeur de la célérité de propagation d'onde.

IV.4. Calcul de la célérité par la méthode de la charge de précontrainte :

Nous allons nous appuyer sur la formule de la charge de précontrainte dans notre programme, qui est donnée par :

$$\frac{1}{C_1^2} = \frac{\rho}{k_e} \left[1 + k_e (1 - \nu_m^2) \frac{2a}{E_m \cdot e_m} [1 + B(P - P_a)] \right] \quad (IV.1)$$

Et :

$$B = \frac{(1 + \nu_m^2) a^2}{E_m \cdot e_m^2} (1 - 2\nu_m) \quad (IV.2)$$

Avec :

- C_1 : la célérité d'onde (m/s),
- E_m : le module de YOUNG du matériau (Pa),
- ν_m : le coefficient de POISSON du matériau,
- e_m : l'épaisseur de la conduite (m),
- K_e : le module d'élasticité de l'eau [Pa],
- ρ : la masse volumique de l'eau [kg/m³],
- a : le rayon de la conduite (m),
- P : la pression hydrostatique (Pa),
- P_a : la charge des terres de remblai (Pa).

$$P_a = K \cdot \gamma \cdot H \quad (IV.3)$$

Avec :

$$K = \frac{L}{2k \mu H} \left[1 - \exp\left(\frac{-2k \mu H}{L}\right) \right] \quad (\text{IV.4})$$

- γ : Poids volumique du sol
- **H** : Hauteur du remblai
- **k μ** : Coefficient représentatif du matériau de remblaiement.
- **L** : Largeur de la tranchée

$$L = D + 0.6 = 0.315 + 0.6 = 0.915 \text{ m}$$

$P = (H_g + \Delta H_t) \cdot \rho \cdot g = (130 + 4.414) \cdot 1000 \cdot 9.81 = 131860.34 \text{ Pa}$ (valeur déjà calculé : référence [23]).

Exemple d'application

Soit à protéger une conduite de refoulement de diamètre $D = 315 \text{ mm}$ ($D_{\text{int}} = 277.6 \text{ mm}$) et qui s'étend sur un linéaire de 1601.95 m (exemple pris du mémoire de la référence [23]) et dont les caractéristiques sont les suivantes :

- **Les propriétés de l'eau :**

La masse volumique de l'eau : $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$

Le module d'élasticité de l'eau : $k_e = 2.10^9 \text{ Pa}$.

- **Les propriétés du sol :**

Le module d'élasticité du sol : $E_s = 2.10^8 \text{ Pa}$

Le poids volumique du sol Kg/m^3

La hauteur maximale du remblai : $H = 1,5 \text{ m}$

La hauteur minimale du remblai : $H_{\text{min}} = 0,5 \text{ m}$

La largeur du remblai : $L = 1 \text{ m}$.

- **Les propriétés de la conduite :**

Matériau : PEHD

Le diamètre intérieur de la conduite : $D_{ext} = 315 \text{ mm}$

L'épaisseur de la conduite : $e = 18.7 \text{ mm}$

Le module de YOUNG du matériau (Pa), $E_m = 1.2 \times 10^9$

Le coefficient de poisson : $\nu_m = 0,45$

À l'aide du langage MATLAB nous avons élaboré un programme permettant de calculer la célérité d'onde en variant les valeurs du poids volumique et celles du coefficient représentatif du matériau de remblaiement c'est-à-dire calculer la célérité d'onde pour différents types de sols tout en changeant la hauteur du remblai afin de voir l'influence de la nature du sol et de la hauteur du remblai sur la valeur de la célérité d'onde et enfin sur le ballon d'air.

Les détails du programme sont dans l'**Annexe IV.1**

Voici ci-dessous les résultats obtenus :

H=0.7m

Pour : $\gamma_s = 19200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 12001 \text{ Pa}$	la célérité est	310.7560 m/s
Pour : $\gamma_s = 21200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 13431 \text{ Pa}$	la célérité est	310.7572 m/s
Pour : $\gamma_s = 23200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 14898 \text{ Pa}$	la célérité est	310.7584 m/s
Pour : $\gamma_s = 25200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 16405 \text{ Pa}$	la célérité est	310.7596 m/s

H=1m

Pour : $\gamma_s = 19200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 16354 \text{ Pa}$	la célérité est	310.7595 m/s
Pour : $\gamma_s = 21200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 18403 \text{ Pa}$	la célérité est	310.7612 m/s
Pour : $\gamma_s = 23200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 20527 \text{ Pa}$	la célérité est	310.7629 m/s
Pour : $\gamma_s = 25200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 22730 \text{ Pa}$	la célérité est	310.7647 m/s

H=1.3m

Pour : $\gamma_s = 19200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 20296 \text{ Pa}$	la célérité est 310.7627 m/s
Pour : $\gamma_s = 21200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 22961 \text{ Pa}$	la célérité est 310.7649 m/s
Pour : $\gamma_s = 23200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 25749 \text{ Pa}$	la célérité est 310.7672 m/s
Pour : $\gamma_s = 25200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 28669 \text{ Pa}$	la célérité est 310.7695 m/s

H=1.5m

Pour : $\gamma_s = 19200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 23867 \text{ Pa}$	la célérité est 310.7656 m/s
Pour : $\gamma_s = 21200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 27139 \text{ Pa}$	la célérité est 310.7683 m/s
Pour : $\gamma_s = 23200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 30594 \text{ Pa}$	la célérité est 310.7711 m/s
Pour : $\gamma_s = 25200 \text{ N/m}^3$	$P_a = 34245 \text{ Pa}$	la célérité est 310.7741 m/s

La figure 1 représente la variation de la célérité d’onde en fonction de la hauteur du remblai pour un poids volumique du sol $\gamma = 25200 \text{ N/m}^3$.

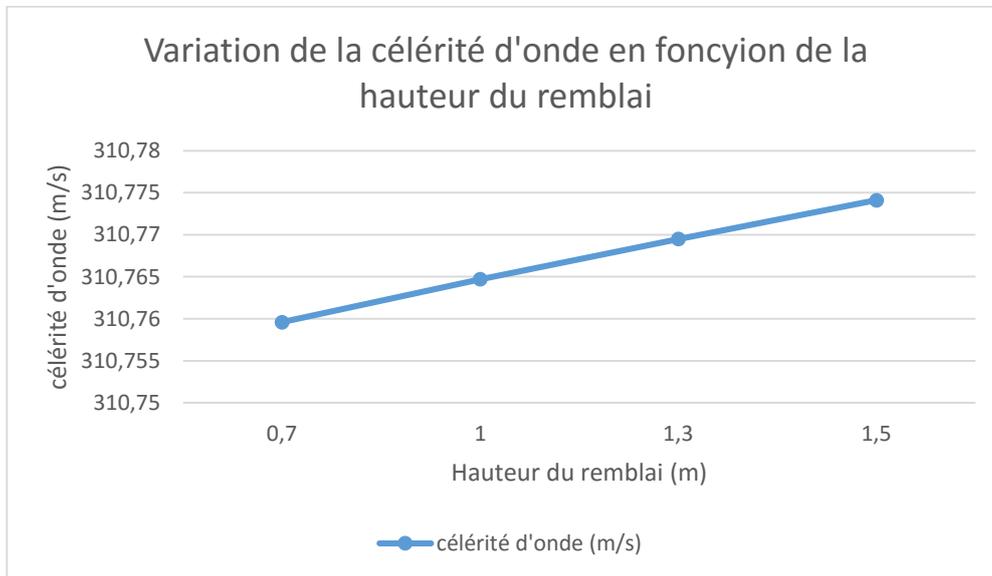


Figure IV.6 : variation de C en fonction de H

La figure 2 représente la variation de la célérité d'onde en fonction du poids volumique pour une hauteur $H=1.5m$

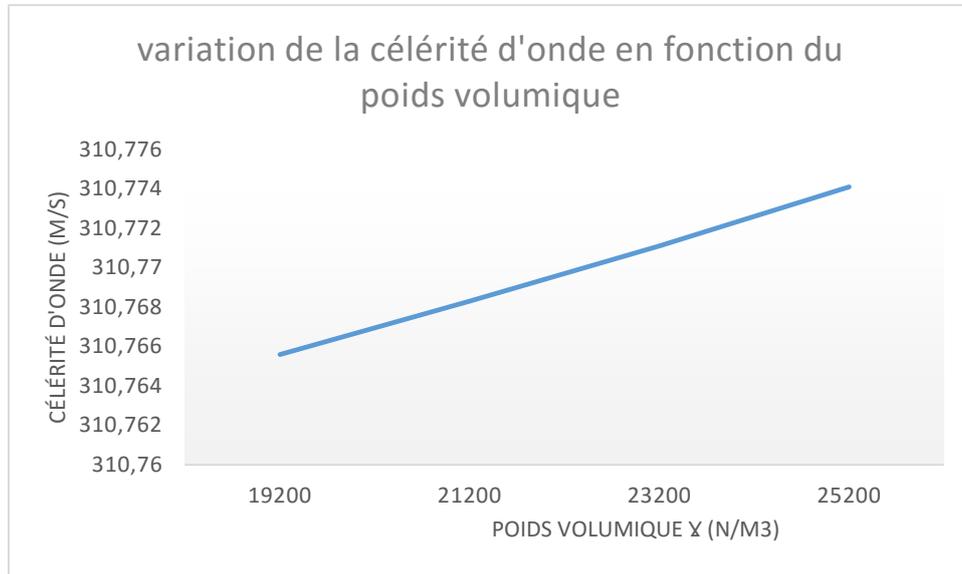


Figure IV.7 :variation de C en fonction de γ_s

Nous remarquons que la valeur de célérité d'onde varie avec la variation de la hauteur du remblai mais aussi elle est liée à la nature du sol car elle change pour chaque valeur de poids volumique.

IV.5. Calcul du volume d'air anti bélier :

IV.5.1. Méthodes de calcul des réservoirs d'air

Nous avons utilisé la méthode de **PEUTCH** et **MEUNIER** pour le calcul du volume d'air de l'anti bélier :

➤ Principe de la méthode

Afin de déterminer le volume du réservoir d'air U_0 , on doit utiliser les abaques de PEUTCH et MEUNIER qui ont les trois nombres adimensionnels suivants :

$$K = \frac{H_{abs} - H_0}{H_0} \quad : \text{ qui caractérise les pertes de charge,}$$

$$A = \frac{CV_0}{gH_0} \quad : \text{ qui caractérise la conduite de refoulement,}$$

$$B = \frac{V_0^2}{gH_{abs}} \frac{LS}{U_0} \quad : \text{ qui caractérise le volume d'air du réservoir anti-bélier.}$$

Avec :

C : La célérité d'onde de coup de bélier,

V_0 : La vitesse de l'écoulement en régime permanent,

H_0 : La pression statique absolue, $H_0 = H_g + 10$

H_{abs} : La pression de service absolue, $H_{abs} = H_g + 10 + \Delta h$

Δh : Les pertes de charge,

L : La longueur de la conduite,

S : La section de la conduite.

La méthode se résume dans les étapes suivantes :

- Calculer la célérité d'onde C et la vitesse de l'écoulement en régime permanent V_0 .
- Calculer les paramètres A et K,
- Tracer le profil en long de la conduite de refoulement, comme suite :

Tableau N° IV.1 : Profil en long général de la conduite.

Z (m)	Z ₀	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
X	0	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
$\frac{\Delta Z + 10}{H_g + 10}$	$\frac{Z_0 - Z_0 + 10}{H_g + 10}$	$\frac{Z_1 - Z_0 + 10}{H_g + 10}$	$\frac{Z_2 - Z_0 + 10}{H_g + 10}$	$\frac{Z_3 - Z_0 + 10}{H_g + 10}$	$\frac{Z_4 - Z_0 + 10}{H_g + 10}$
$\frac{X}{L}$	$\frac{X}{L} = 0$	$\frac{X_1}{L}$	$\frac{X_2}{L}$	$\frac{X_3}{L}$	$\frac{X_4}{L}$

Avec :

Z : La pression totale,

$\frac{X}{L}$

: Le rapport entre les abscisses de différents points et la longueur totale.

Dans les abaques, les courbes de dépression sont en fonction de P_{min}/H₀ et X/L.

- Ayant calculé K et A, nous superposons la famille de courbes B au profil en long. Nous choisirons la courbe qui laisse au moins une sécurité de 3m de pression absolue au-dessus du point le plus défavorable du profil ; la valeur de B permet de calculer U₀ .

$$U_0 = \frac{V_0^2}{gH_{abs}} \frac{LS}{B}$$

- Calculer U₀,
- Déterminer le volume d'air maximum qui correspond à la pression minimale P_{min}, cette dernière est tirée de l'abaque par l'intersection de la courbe B et l'axe des ordonnées P_{min}/H₀,

$$U_{amx} = U_0 \left(\frac{H_{abs}}{P_{min}} \right)^{\frac{1}{1,2}} \tag{IV.5}$$

Ce volume est majoré de 20 à 30%, pour assurer un certain volume d'eau dans le réservoir. Le volume réel du réservoir d'air anti bélier sera donc :

$$U_{\text{réel}} = (1,2 \text{ à } 1,3) U_{\text{max}}$$

(IV.6)

IV.5.2. Premier cas, avec l'hypothèse de la charge de précontrainte :

$C=310.774\text{m/s}$ (une des valeurs calculées)

Dans notre cas

$K=0.03$

$A=0.26$

Tableau N° IV.2 : calcul de différents paramètres.

Calcul de paramètres	
V_0 (m/s)	1.172
Perte de charge(m)	4.414
Hg (m)	130
H_0 (m)	140
H_{abs} (m)	144,414

Tableau N° IV.3 : Profil en long de la conduite de refoulement.

Z (m)	82	130	170	190	212
Longueur de la conduite	0	610.2	302.1	203.4	486.25
ΔZ	0	48	40	20	22
$\frac{\Delta Z + 10}{H_g + 10}$	0.071429	0.414286	0.285714	0.142857	0.157143
X	0	610.2	912.3	1115.7	1601.95
$\frac{X}{L}$	0	0.38	0.57	0.7	1

Après superposition du profil en long sur l'abaque de **Puech** et **Meunier** , Nous obtenons $B=1$ la conduite est entièrement protégée et laisse au-dessus du point le plus défavorable du profil une pression absolue de plus de presque 5m d'eau. Cette valeur de B nous permet de calculer le volume comprimé U_0 :

$$U_0 = [V_0^2 / (g \cdot H_{abs})] \times L \cdot S / B \text{ [m}^3\text{]} \tag{IV.7}$$

Depuis l'abaque $P_{min} / H_0 = 0,41$ [24]

Le volume d'air maximal sera calculé en considérant une loi intermédiaire entre les lois isothermes et adiabatiques :

$$H_{abs} \cdot U_0^{1,2} = P_{min} \cdot U_{max}^{1,2} \tag{IV.8}$$

$$U_{max} = U_0 [H_{abs} / P_{min}]^{1/1,2} \text{ [m}^3\text{]}$$

Ce volume est majoré de 30%, pour assurer un certain volume d'eau dans le réservoir. Le volume réel du réservoir d'air anti bélier sera donc :

$$U_{réel} = (1,2-1.3) * U_{max}$$

Tableau N° IV.4 Calcul du volume du réservoir avec l'hypothèse de la charge de précontrainte.

Calcul	
C (m/s)	310.77
A	0.26
K	0,03
Depuis l'abaque B=1	
U_0 (m ³)	0.092
Depuis l'abaque $P_{min}/H = 0,41$	
P_{min}	57,4



$U_{max} (m^3)$	12,19
Volume (m³)	14.628

IV.5.3. Deuxième cas, avec la formule usuelle :

➤ **Calcul de la vitesse de célérité avec la formule usuelle :**

$$c = \frac{\left(\frac{k}{\rho}\right)^{0.5}}{\left(1 + \frac{k \times D}{E \times e}\right)^{0.5}} \tag{IV.9}$$

Avec :

- **K** : Coefficient d'élasticité de l'eau avec $K = 2,07 \times 10^3$ Mpa;
- **ρ** : Masse volumique de l'eau avec $\rho = 1000$ kg / m³ ;
- **E**: Module de Young du matériau de la conduite avec $E_m = 1.2 \times 10^3$ Mpa pour le PEHD ;
- **e**: Epaisseur de la conduite avec $e = 18.7$ mm ;
- **D** : Diamètre de refoulement avec $D = 277.6$ mm ;

$$c = \frac{\left(\frac{2.07 \times 10^3}{1000}\right)^{0.5}}{\left(1 + \frac{2.07 \times 10^3 \times 277.6}{1.2 \times 10^3 \times 18.7}\right)^{0.5}} = 278.92 \text{ m/s.}$$

Tableau N°VI.5 : Calcul du volume du réservoir avec la formule usuelle.

Calcul	
C (m/s)	310.77
A	0.23
K	0,03
Depuis l'abaque B=1	
U₀ (m³)	0.092
Depuis l'abaque P_{min}/H = 0,41	
P_{min}	57,4
U_{max} (m³)	12,19
Volume (m³)	15.84

Nous constatons d'après les calculs réalisés que le sol influe sur la valeur de la célérité d'onde de par sa nature et par sa hauteur de remblaiement. Nous avons aussi remarqué que la nature du sol agit sur le ballon d'air en réduisant son volume.

Les volumes doi

IV.6. Conclusion :

A travers ce chapitre nous avons calculé la célérité d'onde par deux formules afin de déterminer volume du réservoir d'air anti bélier usuellement utilisé dans le domaine pratique.

Nous avons élaboré un programme de calcul à l'aide du logiciel MATLAB qui nous donne la valeur de célérité en variant le type du sol, ainsi que la hauteur de remblaiement. Après analyse des résultats nous constatons que la célérité d'onde change lors de la variation des paramètres :

- γ_s : poids volumique du sol ;
- H : hauteur du remblai ;
- $k\mu$: Coefficient représentatif du matériau de remblaiement.

Nous avons ensuite calculé le volume du réservoir d'air de notre système en s'appuyant sur deux valeurs de célérité obtenues de deux formules distinctes. Nous avons remarqué que le volume d'air obtenu par la formule de charge de précontrainte est le plus petit. De là on déduit que le sol agit sur l'anti bélier en réduisant le volume d'air comparativement à la formule usuelle.

CONCLUSION GENERALE :

Il ne nous échappe certainement pas que le coup de bélier est un phénomène transitoire qui peut causer des effets très néfastes à notre système, tels que la fatigue de la conduite, l'implosion, dislocation de joints et des cassures franches. C'est pour cela que la détermination la plus exacte possible de sa valeur reste importante dans notre étude.

A l'issue de ce travail, nous avons pu comprendre le phénomène du coup de bélier, car nous avons formulé les équations de Saint-Venant qui prennent en ligne de compte l'équation de continuité et l'équation dynamique, après présentation des travaux antérieurs et leur développement qui nous ont permis de mieux nous approcher du phénomène. Nous avons fait appel au langage MATLAB afin de calculer la célérité d'onde qui a été examinée sous l'aspect de l'influence du type de sol et de la hauteur du remblaiement, le programme que nous avons conçu nous a procuré plusieurs valeurs de célérité pour des hauteurs différentes et des poids volumiques variables selon le type du sol. Nous avons pu constater que ces deux paramètres influent sur la valeur de célérité d'onde.

Après avoir choisi le réservoir d'air comme moyen de protection de notre système, car il semble être le plus adéquat, nous avons calculé le volume d'air nécessaire à cette installation en utilisant deux formules celle de la charge de précontrainte et la formule usuelle. Une analyse des résultats nous a permis de déduire que le sol influe sur l'anti bélier en réduisant son volume d'air.

Pour finir, nous pouvons dire qu'il faut maîtriser et connaître les écoulements non permanents afin de savoir limiter les dégâts engendrés, nous espérons aussi que notre travail sera utile aux étudiants chercheurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] **CARLIER, M. (1972)**. Hydraulique générale et appliquée, Eyrolles, Paris.
- [2] **NONCLERCQ, P. (1982)**. Hydraulique urbaine appliquée, 1^{ère} partie, Principes fondamentaux et compléments d'hydraulique", ed. Cebedoc, Liège,
- [3] **SALAH, B. (1994)**. Polycopie d'alimentation en eau potable, ENSH.
- [4] **KADI, L. (2012)**. Effet du sol sur les lois de manœuvre des robinets-vannes en coup de bélier parfait, ENSH.
- [5] **HOCEINI, T. (2014)**. Modélisation du coup de bélier dans un réseau ramifié en refoulement, ENSH.
- [6] **WOOD, F, M. (1970)**. History of water-hammer, Research report N°65, Canada.
- [7] **WEBER, (1865)**. Propagation of waves through water or other incompressible fluids in elastic pipes, Académie de Wissembourg. Leipzig Berichte.
- [8] **MAREY, M. (1875)**. Mouvement des Ondes Liquides pour servir à la Théorie du Pouls, Travaux du Laboratoire de M. Marey,
- [9] **KORTEWEG, D, J. (1878)**. A propos de la vitesse de propagation du son dans les tubes élastiques, Annale de Physique et Chimie.
- [10] **JOUKOWSKI, N. (1898)**. Paper to Polytechnic Soc. Moscow. (Traduction en anglais par Mlle O. Simin. Proc. AWWA, 1904)
- [11] **WARREN, (1915)**. Penstock and Surge Tank Problems, Trans. ASCE American Society of Civil Engineers
- [12] **GIBSON, N.R. (1920)**. Pressures in Penstocks caused by gradual closing of turbine gates, Trans. ASCE. American Society of Civil Engineers
- [13] **SCHNYDER, O. (1929)**, Surtensions dans les colonnes montantes de la pompe, Schweizerische Bauzeitung.
- [14] **ALLIEVI, L. (1937)**. Air Chambers for Discharge Pipes, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers pp 651_659
- [15] **ANGUS, R.W. (1937)**. Air Chambers and Valves in relation to water-hammer , ASME American Society of Mechanical Engineers.
- [16] **KNAPP, F. (1937)**. Operation of emergency shut-off valves in pipe lines, Transactions ASME American Society of Mechanical Engineers.
- [17] **SCHNYDER, O.** Comparison between calculated and test results on water-hammer in Pumping Plants, Trans ASME American Society of Mechanical Engineers.
- [18] **CHERFAOUI, I. (2005)**, Effet du remblai sur les réservoirs d'air anti belier, ENSH.

- [19] **BERRESKI, A.** Hydraulique urbaine L3, LRHAE, Bejaia.
- [20] **MEUNIER, M. (1980).** Les coups de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression, ENGREF, Paris 1980.
- [21] **OURAGH, Y. (1986).** Ecoulement forcé en Hydraulique" Tome II OP.
- [22] <https://matlabpourtous.com/presentation/presentation-de-matlab/> ,Matlab Pour Tous, consulté en Avril 2018.
- [23] **BELKACEMI, B. (2017).** Conception du système d'alimentation en eau potable de la commune de Benairia de la wilaya de Chlef.
- [24] **MICHEL, A.MOREL.** Exercices de mécanique des fluides.Tome2, Eyrolles, Paris.

ANNEXE IV.1

%%%%%%%% Calcul de la célérité d'onde %%%%%%%%%

%%%%%%%% LES DONNEES

Em=1.2*10^9 %%module de young
Vm=0.45 %%coefficient de poisson
em=0.0187 %%Epaisseur de la conduite
Ke=2.07*10^9 %%coefficient d'élasticité de l'eau
R=1000 %%masse volumique
a=0.1388 %%rayon de la conduite
P=131860 %%pression hydrostatique
B=5.48*10^-9
L=1 %%Largeur de la tranchée
Pp=[131860;131860;131860;131860]%%Charge des terres du remblai

H=0.7:0.3:1.6 %% Valeur de la hauteur allant de 0.7m jusqu'à 1.5m

y1=19200:2000:25200%% VALAEUR DE GAMA
y=[19200;21200;23200;25200]
ku=0.165:-0.02:0.105%% VALAEUR DE Ku

ku=[0.165;0.145;0.125;0.105]

%%%%%%%% DEBUT DU CALCUL

G=2*ku*H

KK=L*(1-exp(-2*ku*H/L))

K=KK./G

KK1=K*[1;0;0;0]

Pa=K*y*H
K1=K*[1;0;0;0]
K2=K*[0;1;0;0]
K3=K*[0;0;1;0]
K4=K*[0;0;0;1]

J=y.*K1

Pa1=0.7*y.*K1
Pa2=1*y.*K2
Pa3=1.3*y.*K3
Pa4=1.6*y.*K4

%%

%%Pour H=0.7m

PP1=Pp-Pa1
Vmm=1-Vm^2
D1=Ke*Vmm*2*a/(Em*em)
DD1=1+B*PP1
DDD1=D1*DD1
DDDD1=1+DDD1

invCC1=R*DDDD1/Ke
CC1=invCC1.^-1
C1=sqrt(CC1)
%%%%%%%%%%%%%Pour H=1m
PP2=Pp-Pa2
Vmm=1-Vm^2
D2=Ke*Vmm*2*a/(Em*em)
DD2=1+B*PP2
DDD2=D2*DD2
DDDD2=1+DDD2

invCC2=R*DDDD2/Ke
CC2=invCC2.^-1
C2=sqrt(CC2)
%%%%%%%%%%%%% Pour H=1.3m
PP3=Pp-Pa3
Vmm=1-Vm^2
D3=Ke*Vmm*2*a/(Em*em)
DD3=1+B*PP3
DDD3=D3*DD3
DDDD3=1+DDD3

invCC3=R*DDDD3/Ke
CC3=invCC3.^-1
C3=sqrt(CC3)
%%%%%%%%%%%%% Pour H=1.5m
PP4=Pp-Pa4
Vmm=1-Vm^2
D4=Ke*Vmm*2*a/(Em*em)
DD4=1+B*PP4
DDD4=D4*DD4
DDDD4=1+DDD4

invCC4=R*DDDD4/Ke
CC4=invCC4.^-1
C4=sqrt(CC4)
%%%%%%%%%%%%%

CH07=sqrt(CC1)
CH1=sqrt(CC2)
CH13=sqrt(CC3)
C15=sqrt(CC4)

Les résultats de calcul sont les suivants

Em =1.2000e+09
 Vm =0.4500
 em =0.0187
 Ke =2.0700e+09
 R =1000
 a =0.1388
 P =131860
 B =5.4800e-09
 L =1
 Pp =
 131860
 131860
 131860
 131860
 H =
 0.7000 1.0000
 1.3000 1.6000
 y1 =
 19200
 21200 23200
 25200
 y =
 19200
 21200
 23200
 25200
 ku =
 0.1650 0.1450
 0.1250 0.1050
 ku =
 0.1650
 0.1450
 0.1250
 0.1050
 G =
 0.2310 0.3300
 0.4290 0.5280
 0.2030 0.2900
 0.3770 0.4640
 0.1750 0.2500
 0.3250 0.4000
 0.1470 0.2100
 0.2730 0.3360
 KK =
 0.2063 0.2811
 0.3488 0.4102
 0.1837 0.2517
 0.3141 0.3712
 0.1605 0.2212
 0.2775 0.3297
 0.1367 0.1894
 0.2389 0.2854
 K =

 0.8929 0.8517
 0.8131 0.7769
 0.9050 0.8681
 0.8331 0.8001
 0.9174 0.8848
 0.8538 0.8242
 0.9300 0.9020
 0.8751 0.8493
 KK1 =
 0.8929
 0.9050
 0.9174
 0.9300
 Pa =
 1.0e+05 *
 0.5155 0.7364
 0.9574 1.1783
 0.5269 0.7527
 0.9785 1.2043
 0.5386 0.7695
 1.0003 1.2312
 0.5508 0.7868
 1.0229 1.2589
 K1 =
 0.8929
 0.9050
 0.9174
 0.9300
 K2 =
 0.8517
 0.8681
 0.8848
 0.9020
 K3 =
 0.8131
 0.8331
 0.8538
 0.8751
 K4 =
 0.7769
 0.8001
 0.8242
 0.8493
 J =
 1.0e+04 *
 1.7144
 1.9187
 2.1283
 2.3435
 Pa1 =
 1.0e+04 *

 1.2001
 1.3431

 1.4898
 1.6405
 Pa2 =
 1.0e+04 *
 1.6354
 1.8403
 2.0527
 2.2730
 Pa3 =
 1.0e+04 *
 2.0296
 2.2961
 2.5749
 2.8669
 Pa4 =
 1.0e+04 *
 2.3867
 2.7139
 3.0594
 3.4245
 PP1 =
 1.0e+05 *
 1.1986
 1.1843
 1.1696
 1.1546
 Vmm =0.7975
 D1 =20.4220
 DD1 =
 1.0007
 1.0006
 1.0006
 1.0006
 DDD1 =
 20.4354
 20.4352
 20.4351
 20.4349
 DDDD1 =
 21.4354
 21.4352
 21.4351
 21.4349
 invCC1 =
 1.0e-04 *

 0.1036
 0.1036
 0.1036
 0.1036
 CC1 =
 1.0e+04 *

 9.6569
 9.6570

9.6571	D3 =20.4220	21.4329
9.6572	DD3 =	invCC4 =
C1 =	1.0006	1.0e-04 *
310.7560	1.0006	0.1035
310.7572	1.0006	0.1035
310.7584	1.0006	0.1035
310.7596	DDD3 =	0.1035
PP2 =	20.4345	CC4 =
1.0e+05 *	20.4342	1.0e+04 *
1.1551	20.4338	9.6575
1.1346	20.4335	9.6577
1.1133	DDDD3 =	9.6579
1.0913	21.4345	9.6581
Vmm =0.7975	21.4342	
D2 =20.4220	21.4338	
DD2 =	21.4335	
1.0006	invCC3 =	
1.0006	1.0e-04 *	
1.0006	0.1035	
1.0006	0.1035	
DDD2 =	0.1035	
20.4349	CC3 =	
20.4347	1.0e+04 *	
20.4344	9.6573	C4 =
20.4342	9.6575	310.7656
DDDD2 =	9.6576	310.7683
21.4349	9.6578	310.7711
21.4347	C3 =	310.7741
21.4344	310.7627	CH07 =
21.4342	310.7649	310.7560
invCC2 =	310.7672	310.7572
1.0e-04 *	310.7695	310.7584
0.1036	PP4 =	310.7596
0.1035	1.0e+05 *	CH1 =
0.1035	1.0799	310.7595
0.1035	1.0472	310.7612
CC2 =	1.0127	310.7629
1.0e+04 *	0.9761	310.7647
9.6571		CH13 =
9.6573		310.7627
9.6574	Vmm =0.7975	310.7649
9.6575	D4 =20.4220	310.7672
C2 =	DD4 =	310.7695
310.7595	1.0006	C15 =
310.7612	1.0006	310.7656
310.7629	1.0006	310.7683
310.7647	1.0005	310.7711
PP3 =	DDD4 =	310.7741
1.0e+05 *	20.4341	
1.1156	20.4337	
1.0890	20.4333	
1.0611	20.4329	
1.0319	DDDD4 =	
	21.4341	
	21.4337	
Vmm =0.7975	21.4333	