

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Contribution a l'etude de l'effet du sol sur le coup de
Bélier.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0009-17

APA Citation (APA توثيق):

Youcef, Sara (2017). Contribution a l'etude de l'effet du sol sur le coup de
Bélier[Thèse 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Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...)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، مبداعات، مقالات الدوريات، كتب....) و بثه 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.

DEPARTEMENT Hydraulique Urbaine

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme du master en Hydraulique

Option : Conception des Systèmes d'Alimentation en Eau Potable

THEME :

Contribution à l'étude de l'effet du sol sur le coup de bélier

Présenté par :
Mme : YOUCEF Sara

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

| Nom et Prénom | Grade | Qualité |
|------------------------|--------------|----------------|
| Mr. SALAH Boualem | Professeur | Président |
| Mme. MOKRANE Wahiba | MAA | Membre |
| Mr. HACHEMI Abdelkader | MAA | Membre |
| Mme. TAFAT Leila | MAA | Membre |
| Mme. KADI Latifa | MAA | Promotrice |

REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie DIEU qui a illuminé mon chemin et qui m'a armée de courage pour achever mes études.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à la directrice de ce mémoire, KADI Latifa , pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion..

Ma gratitude va également aux membres du jury pour honorer ma soutenance et pour l'effort fourni afin de juger ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Qu'il me soit permis de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

DÉDICACE

À mes parents

À mes frères et sœurs

À mes amis et camaradas

À toute personne chère et proche

YOUSSEF Sara

الملخص:

تعد ظاهرة الطرق المائي أكبر خطر يؤدي إلى إتلاف الأنابيب الناقلة للماء، وهي ناتجة عن ظاهرة الجريان الانتقالي الذي يحدث جراء انقطاع التدفق. لهذا كانت هذه الظاهرة محل بحث العلماء منذ عقود من الزمن قصد منع أو التقليل من مخاطرها.

كما أن الطرق المائي يتغير حسب حالة وأبعاد الأنابيب حيث تزيد قيمته بشكل معتبر إن كانت تلك الأنابيب مغمورة، فالترربة تعد أهم عامل مؤثر على قيمته.

نهدف في هذه المذكرة إلى شرح ظاهرة الجريان الانتقالي و دراسة تأثير عامل التربة على قيمة الطرق المائي، والتعرف على القوى التي تطبقها على الأنابيب المغمورة.

Résumé :

Le phénomène de coup de bélier est considéré comme un danger causant des dommages sur les conduites véhiculant l'eau, il résulte du régime transitoire qui se produit en raison d'une discontinuité de l'écoulement. Le coup de bélier est un sujet de recherche auquel beaucoup de scientifiques ont consacré leurs études, et ce depuis des dizaines d'années, dans le but d'éviter ses effets ou au moins de les limiter.

La valeur du coup de bélier varie suivant l'état et les dimensions des conduites, elle augmente lorsque ces conduites sont enterrées puisque le sol est le facteur le plus important qui influe sur cette valeur.

Notre but dans ce mémoire est d'expliquer l'écoulement transitoire, d'étudier l'influence du sol sur la valeur du coup de bélier, et connaître les efforts appliqués par le sol sur les conduites enterrées.

Abstract:

Water hammer phenomenon is the largest risk of carrier water pipe , which is caused by the transitional phenomenon that occurs due to flow interruption. This interested researches decades ago to prevent or minimize the risks. water hummer vary according to the case and the dimensions of the pipe where the value increases considerably if those pipes buried, soils are the most important factor affecting its value. Our aim in this study is to explain the phenomenon of runoff Transitional and study the effect of soil factor on water hummer value, and to identify the forces that are applied to the buried pipes.

SOMMAIRE :

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre1-Généralités sur les écoulements transitoires | |
| 1-1.Introduction | 3 |
| 1.2.Définition de l'écoulement transitoire en charge | 3 |
| 1.3. Causes du régime transitoire..... | 3 |
| 1.4. Conséquences du phénomène transitoire | 4 |
| 1.4.1.Cas de forte pression | 4 |
| 1.4.2.Cas de pression négative | 4 |
| 1.4.3.Fatigue de la conduite | 4 |
| 1.5.Analyse physique des écoulements transitoires en charge (cas gravitaire) | 4 |
| 1.6. Analyse physique des écoulements transitoires en charge (cas de refoulement)..... | 6 |
| 1.7.Analyse mathématique du régime transitoire | 9 |
| 1.7.1. Equation de continuité | 9 |
| 1.7.2. Equation dynamique | 11 |
| 1.7.3. Equations d'Allievi | 16 |
| 1.8. Applications des équations d'Allievi à la fermeture de la vanne..... | 16 |
| 1.8.1.Manœuvre de vanne instantanée | 16 |
| 1.8.2.Manœuvre de vanne brusque | 18 |
| 1.8.3. Cas d'une fermeture lente..... | 18 |
| 1.8.4.Application des équations d'Allievi à l'arrêt brusque de la pompe..... | 20 |
| 1.9.Représentation des équations aux caractéristiques des conduite libre dans les plans (X, t) et (h, Q) | 20 |
| 1.9.1. Cas des conduites d'adductions gravitaires | 21 |
| 1.9.2.Cas des conduites d'adductions par refoulement | 23 |
| 1.9. Conclusion | 24 |

Chapitre2-Etude de la célérité d'onde du coup de bélier

| | |
|--|----|
| 2.1. Introduction | 25 |
| 2.2.Expression générale de la célérité d'onde de coup de bélier..... | 25 |
| 2.3. Détermination de la célérité d'onde dans les conduites non enterrées | 28 |
| 2.3.1. Conduites à paroi minces élastiques | 28 |
| 2.3.2. Conduites à parois épaisse élastiques | 30 |
| 2.4. Cas où le matériau de la conduite est rigide | 31 |
| 2.5. Célérité de propagation d'onde dans les galeries rocheuse..... | 31 |
| 2.5.1. Célérité de propagation dans une galerie rocheuse sans revêtement | 31 |
| 2.5.2. Célérité de propagation d'onde dans les galeries rocheuses avec revêtement double d'acier et de béton | 32 |
| 2.6. Célérité d'onde dans les conduites enterrées | 33 |
| 2.7. Conclusion | 33 |

Chapitre3-Etude de l'effet du sol sur le coup de bélier

| | |
|---|----|
| 3.1. Introduction | 35 |
| 3.2. Les efforts exercés par le sol sur une conduite enterrée..... | 35 |
| 3.3.Etude de cas d'une conduite d'adduction par refoulement | 36 |
| 3.3.1.Description du système d'adduction..... | 36 |
| 3.3.2.Calcul de la célérité d'onde du coup de bélier | 37 |
| 3.4.l'influence du sol sur le coup de bélier | 38 |
| 3.5.Présentation des équations aux caractéristiques dans les plans (x, t) et (h, Q) dans les conduites enterrées..... | 39 |
| 3.5.1. Cas d'une conduite d'adduction gravitaire enterrée | 40 |
| 3.5.2.Cas d'une conduite d'adduction par refoulement enterrée | 41 |
| 3.6. Conclusion | 41 |

Chapitre4-Protection du système d'adduction contre le coup de bélier

| | |
|---|----|
| 4.1. Introduction | 42 |
| 4.2. Moyens de protection contre le coup de bélier | 42 |
| 4.2.1. Réservoirs d'air | 42 |
| 4.2.2. Cheminée d'équilibre | 42 |
| 4.2.3. Soupape de décharge | 42 |
| 4.2.4. Volant d'inertie | 43 |
| 4.3. Protection de la conduite d'adduction contre le coup de bélier | 43 |
| 4.4. Conclusion | 47 |
| Conclusion générale | 48 |

Listes des tables

Chapitre3-Etude de l'effet du sol sur le coup de bélier

| | |
|---|----|
| Tableau 3.1. les résultats de calcul de la célérité | 38 |
|---|----|

Chapitre4-Protection du système d'adduction contre le coup de bélier

| | |
|---|----|
| Tableau 4.1. les caractéristiques de la conduite d'adduction..... | 45 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Tableau 4.2.profil en long de la conduite d'adduction..... | 46 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tableau 4.3. résultats su calcul du coefficient K | 46 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Tableau 4.4.résultats du calcul du coefficient A,B et P_{\min} | 46 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tableau 4.5.résultats du calcul des différentes volumes du réservoir d'air..... | 47 |
|---|----|

Liste des figures :

Chapitre1-Généralités sur les écoulements transitoires

| | |
|--|----|
| Figure 1.1: schéma explicatif de la première phase (cas gravitaire)..... | 5 |
| Figure 1.2: schéma explicatif de la deuxième phase (cas gravitaire)..... | 5 |
| Figure 1.3: schéma explicatif de la troisième phase (cas gravitaire)..... | 5 |
| Figure1. 4: schéma explicatif de la quatrième phase (cas gravitaire)..... | 6 |
| Figure1. 5: schéma explicatif du cas de refoulement..... | 6 |
| Figure1. 6: schéma explicatif de la première phase (cas de refoulement)..... | 7 |
| Figure1. 7: schéma explicatif de la deuxième phase (cas de refoulement)..... | 7 |
| Figure1. 8: schéma explicatif de la troisième phase(cas de refoulement)..... | 8 |
| Figure1. 9: schéma explicatif de la quatrième phase (cas de refoulement)..... | 8 |
| Figure 1.10: Déplacement de l'élément liquide..... | 9 |
| Figure 1.11: Application de l'équation de la dynamique à un petit volume..... | 12 |
| Figure 1.12: Répartition de la surpression le long d'une conduite après une fermeture brusque de la vanne..... | 18 |
| Figure1.13 : Répartition de la surpression le long d'une conduite après une fermeture lente de la vanne..... | 20 |
| Figure1.14.Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite gravitaire libre..... | 23 |
| Figure1.15. Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite de refoulement libre | 24 |

Chapitre2-Etude de la célérité d'onde du coup de bélier

| | |
|---|----|
| Figure 2.1: Déplacement d'une onde non amortie..... | 25 |
| Figure 2.2: Coupe schématique d'une galerie en rocher, revêtue (Blindée)..... | 32 |

Chapitre3-Etude de l'effet du sol sur le coup de bélier

Figure 3.1: schéma explicatif des efforts extérieurs du sol sur une conduite enterrée.....35

Figure 3.2: Déplacement d'une onde dans un plan (x,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite gravitaire enterrée.....40

Figure 3.3: Déplacement d'une onde dans un plan (x,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite de refoulement enterrée41

Chapitre4-Protection du système d'adduction contre le coup de bélier

Figure 4.1: Description de la méthode de PEUCH et MEUNIER.....45

Introduction générale

Lors du transport en charge de liquide spécialement l'eau soit gravitairement ou à l'aide d'une pompe, il arrive souvent une discontinuité de l'écoulement à cause de l'arrêt de la pompe ou la fermeture brusque de la vanne par exemple, entraînant ainsi la modification du régime d'écoulement, en effet on voit apparaître un régime appelé écoulement transitoire et qui se manifeste entre deux régimes permanents. Cet écoulement provoque de brusques variations de pression qui peuvent être dangereuses et causer des dommages matériels et peut être humains.

Dans le régime transitoire, il naît une onde de pression au niveau du lieu de discontinuité et se propage vers l'extrémité du tuyau, elle fait un mouvement d'aller-retour dans la conduite véhiculant l'eau et s'amortit à cause des pertes de charge, cette onde engendre l'augmentation ou la diminution de la pression. C'est ce qu'on appelle coup de bélier.

Le coup de bélier est la partie très importante du régime transitoire, si la nouvelle pression dans la conduite dépasse la pression maximale admissible, il y a risque de rupture de la conduite et de déboîtement des joints, et si la pression atteint la pression de vapeur saturante dans le cas de dépression, il y a risque de cavitation, d'aplatissement et la ruine de la canalisation par implosion.

La valeur du coup de bélier diffère suivant les caractéristiques du système qui transporte l'eau, comme le matériau des conduites et leur mode de pose. Il est donc important de voir l'effet de ces paramètres sur le coup de bélier surtout l'influence du sol qui exerce sur les conduites enterrées des sollicitations supplémentaires par rapport aux conduites libres.

Le but de ce travail est de comprendre le phénomène de coup de bélier et étudier l'effet du sol sur lui, ce qui est englobé dans quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous expliquons le phénomène transitoire, ses causes et conséquences, nous présentons les équations mathématiques qui permettent de déterminer la variation de pression et de vitesse, aussi dans le même chapitre nous appliquons ces équations sur les différents cas qui causent le coup de bélier.

Puis dans le deuxième chapitre, nous faisons un aperçu bibliographique sur la détermination de la célérité du coup de bélier dans les conditions les plus courantes.

Dans le troisième chapitre, nous faisons une étude de l'influence du sol sur le coup de bélier soit pour l'adduction gravitaire ou par refoulement, aussi nous faisons une comparaison entre la célérité d'onde dans les conduites en PEHD et fonte libres et enterrées.

Le but du dernier chapitre est de réaliser une étude de protection d'un système d'adduction par refoulement contre le coup de bélier, en considérant la canalisation libre et enterrée, avec deux types du matériau, afin de voir à la fois l'influence du sol entourant la conduite et du matériau qui la compose. Le calcul du réservoir d'air est fait par la méthode de Peuch et Meunier.

1.1. Introduction:

Ce premier chapitre renferme deux parties : dans la première, nous donnons une description physique du phénomène de coup de bélier qui est une phase prononcée du régime transitoire, et dans la seconde partie, nous présentons les équations mathématiques permettant la détermination de la variation de pression et de vitesse qui résulte d'un régime transitoire. L'étude des écoulements non stationnaires a pour intérêt la mise en place de solutions afin de minimiser les dommages qui leur sont liés.

1.2.Définition de l'écoulement transitoire en charge [3]:

Le phénomène transitoire résulte généralement du changement des caractéristiques hydrauliques d'un régime d'écoulement permanent que ce soit la vitesse ou bien la pression en fonction du temps. Il en résulte la création d'ondes de surpression ou de dépression qui se propagent tout au long de la conduite.

$$\frac{\partial U}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0 \quad (1.1)$$

Les régimes transitoires en charge peuvent être divisés en deux catégories principales

- Les régimes créant des ondes élastiques que l'on appelle encore « coup de bélier ».
- Les régimes créant des oscillations en masse du liquide.

Le coup de bélier est un phénomène de propagation d'ondes qui met en jeu la compressibilité de l'eau et l'élasticité de la conduite, alors que dans le mouvement en masse, la colonne liquide est assimilée à un solide monobloc, ce qui revient à supposer l'eau incompressible et la conduite infiniment rigide.

1.3. Causes du régime transitoire [17]:

Les causes les plus fréquentes du phénomène transitoire en charge sont les suivantes :

- L'ouverture ou la fermeture des vannes dans les conduites en charge à écoulement gravitaire.
- La mise en marche ou l'arrêt des pompes dans les conduites en charge par refoulement.
- Le remplissage ou la vidange d'un système d'AEP.
- Modification de la vitesse d'une pompe.
- Une variation du niveau d'un réservoir à une extrémité du réseau.
- L'interruption de l'alimentation électrique dans une station de pompage qui est la cause la plus répandue du coup de bélier.
- La mise en marche ou la modification de l'opération d'une turbine.
- Une modification de position de vanne.
- Des opérations incontrôlées.

1.4. Conséquences du phénomène transitoire [4]:

Les conséquences du phénomène transitoire sont très néfastes et dangereuses à cause de l'élévation de la pression jusqu'à des valeurs doubles ou plus.

1. 4.1.Cas de forte pression :

Si la somme de la surpression et de la pression initiale dépasse la pression maximale admissible de la conduite, il peut y avoir fissuration de cette dernière, et dislocation des joints.

1.4.2.Cas de pression négative :

Apparaît 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 10 m.c.e il y a implosion de la conduite, aspiration des joints, décollement de l'enduit interne de protection.

1.4.3.Fatigue de la conduite :

L'alternance des surpressions et des dépressions provoque la fatigue de la conduite.

L'importance du phénomène dépend de nombreux facteurs :

- Temps de fermeture des appareils.
- Longueur, diamètre et type de matériaux des canalisations
- Vitesse de l'eau.

1.5. Analyse physique des écoulements transitoires en charge (cas gravitaire) [9]:

Soit une conduite gravitaire de diamètre D , de longueur L et de débit Q qui est arrêté par une fermeture brusque de la vanne.

On admettra une élasticité de la conduite et une compressibilité de l'eau. Quatre phases peuvent alors être envisagées.

phase1 (cas gravitaire):

La vanne est fermée instantanément, elle forme un obstacle infranchissable. L'énergie cinétique des particules liquides qui sont proche de la vanne est transformée en énergie potentielle qui affecte la compressibilité du liquide et la dilatation de la conduite.

Dans cette phase une onde de surpression se produit au niveau de la vanne et se propage vers le réservoir, à $t = \frac{L}{a}$ cette onde arrive au réservoir.

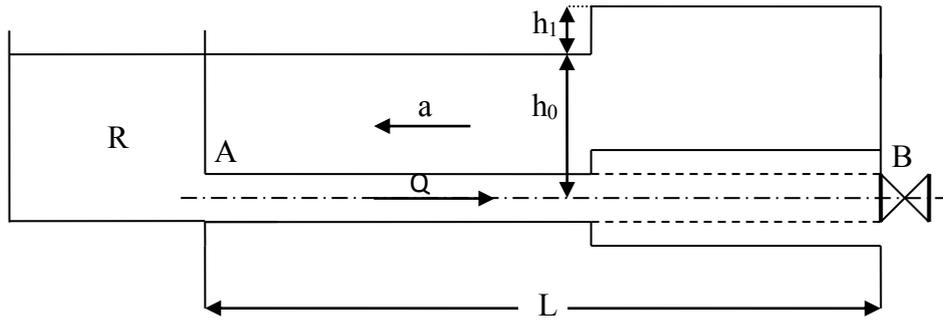


Figure 1.1: schéma explicatif de la première phase (cas gravitaire)

Phase 02 (cas gravitaire):

Au début de cette phase, la pression dans la conduite est très élevée comparée à la pression initiale, l'onde de surpression se dissipe au niveau du réservoir et une nouvelle onde d'équilibre se propage du réservoir vers la vanne et donc le diamètre reprend sa valeur initiale.

À la fin de cette phase, la pression dans la conduite est égale à la valeur initiale.

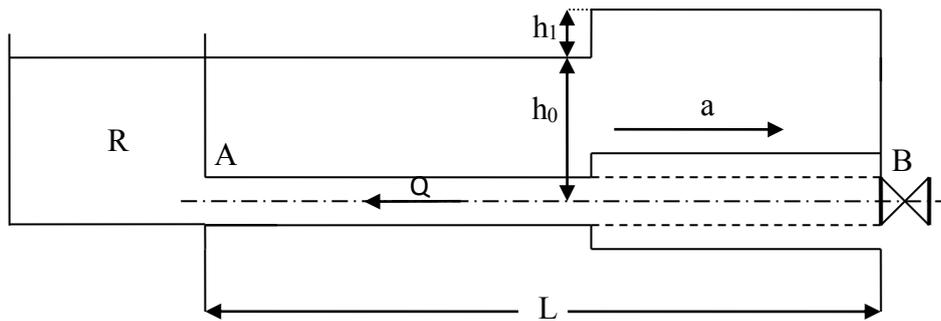


Figure 1.2: schéma explicatif de la deuxième phase (cas gravitaire)

Phase 03 (cas gravitaire):

La vitesse au niveau de la vanne s'annule, une onde de dépression remonte de la vanne vers le réservoir, et la masse volumique du liquide et le diamètre de la conduite diminuent.

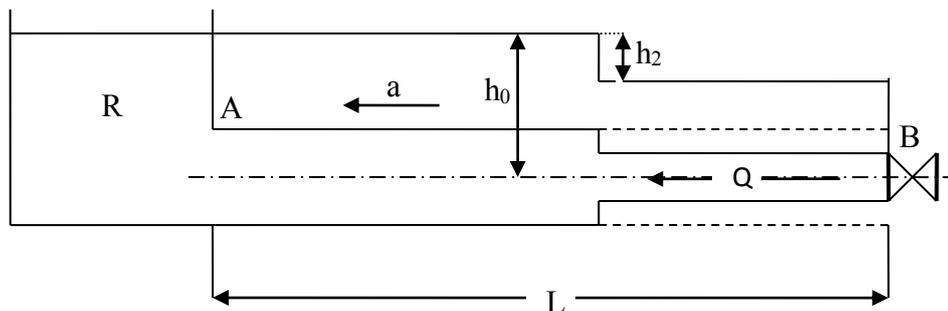


Figure 1.3: schéma explicatif de la troisième phase (cas gravitaire)

Phase 04 (cas gravitaire):

Une onde positive se dirige du réservoir vers la vanne et la conduite reprend ses caractéristiques initiales. A l'instant $t = 4 \frac{L}{a}$, cette onde positive arrive à la vanne, on retrouve les conditions de l'écoulement permanent sauf que la vitesse de l'eau est moindre que la vitesse initiale, ceci résulte des pertes d'énergie dues aux frottements ainsi qu'au travail de déformation.

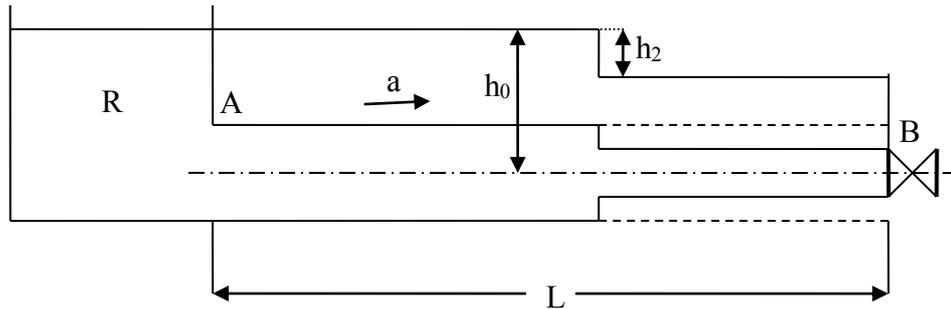


Figure1. 4: schéma explicatif de la quatrième phase (cas gravitaire)

1.6.Analyse physique des écoulements transitoires en charge (cas de refoulement) [3]:

Soit une conduite de refoulement de diamètre D et de longueur L, dont le débit Q se trouve brusquement arrêté à la suite d'une disjonction.

On admettra une élasticité de la conduite et une compressibilité de l'eau. Quatre phases peuvent alors être envisagées.

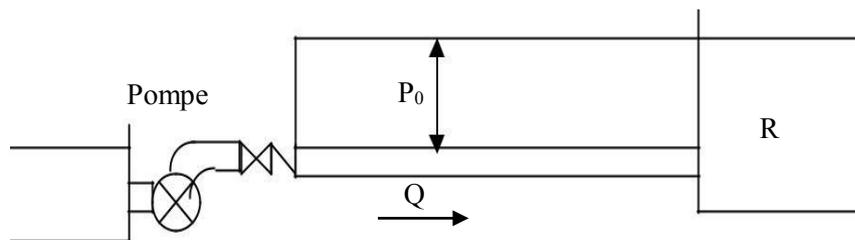


Figure1. 5: schéma explicatif du cas de refoulement

phase1(cas de refoulement):

D'abord la pompe fonctionne et refoule l'eau au haut point, l'eau donc suit un chemin ascendant, la pompe est arrêtée brusquement ce qui engendre une dépression et une onde se produit et se propage vers le réservoir avec une célérité "a". Le temps mis par cette onde pour atteindre le réservoir est $\frac{L}{a}$

Dans cette phase l'eau se dilate, la conduite se contracte par la diminution du son diamètre.

Au bout de ce temps, la conduite est totalement en dépression et l'eau est immobile.

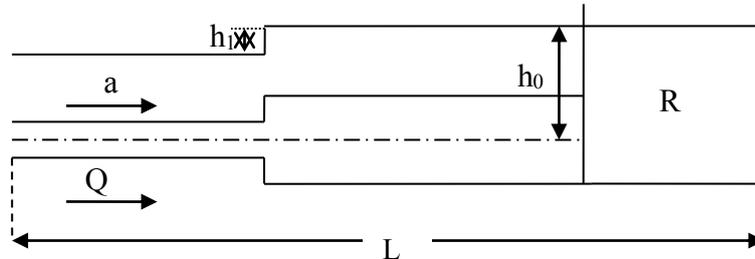


Figure1. 6: schéma explicatif de la première phase (cas de refoulement)

Phase 02 (cas de refoulement):

L'onde de dépression atteint le réservoir, elle se dissipe et une nouvelle onde d'équilibre se produit et se propage vers la pompe. Au bout d'un temps $\frac{L}{a}$, c'est-à-dire à $2\frac{L}{a}$ depuis l'origine du phénomène, toute l'eau sera redescendue mais va se trouver arrêtée par le clapet anti retour et la conduite reprend son diamètre initial.

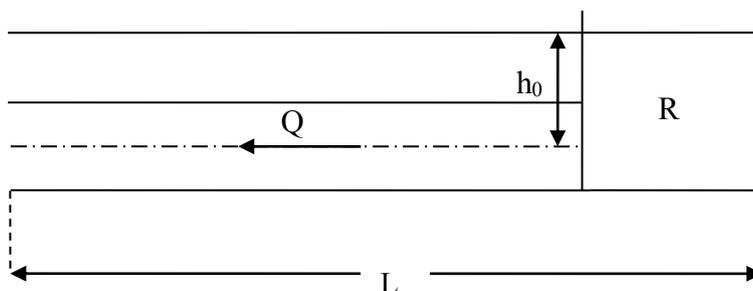


Figure1. 7: schéma explicatif de la deuxième phase (cas de refoulement)

Phase 03 (cas de refoulement):

La première tranche de fluide en contact avec le clapet va être comprimée par les tranches suivantes provoquant une dilatation de la conduite dans le sens pompe réservoir. Au bout d'un temps $3\frac{L}{a}$ toute la conduite sera dilatée avec une eau sur-pressée.

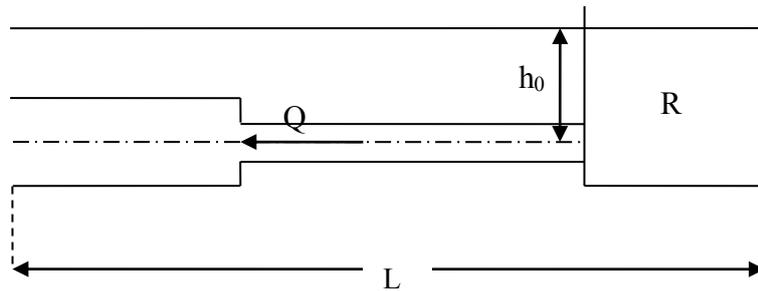


Figure1. 8: schéma explicatif de la troisième phase(cas de refoulement)

Phase 04 (cas de refoulement):

Une nouvelle onde d'équilibre se produit et se propage du réservoir vers la pompe, la conduite reprend son diamètre initial. Au bout du temps $4\frac{L}{a}$, on retrouve la même situation qu'au moment de l'arrêt brusque de la pompe. La période du mouvement est donc $4\frac{L}{a}$.

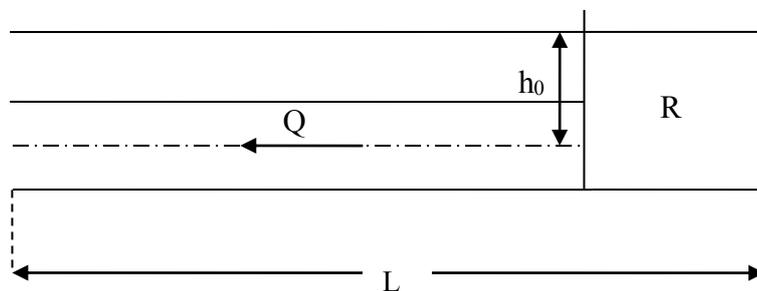


Figure1. 9: schéma explicatif de la quatrième phase (cas de refoulement)

Remarque:

Le phénomène se produirait théoriquement à l'infini, s'il n'était pas freiné et amorti par les pertes de charge résultant du frottement de l'eau dans la conduite.

Ce phénomène, pour le cas d'une conduite de refoulement est donc caractérisé, tout d'abord par une dépression, puis par une surpression.

Dans l'un comme dans l'autre cas, le coup de bélier est nul à l'extrémité du réservoir, et maximal du coté de la pompe ou de la vanne.

1.7.Analyse mathématique du régime transitoire:

1.7.1. Equation de continuité [1], [9], [12], [13]:

Nous contrôlons un volume d'eau dont la masse reste constante (figure1.10). Cette masse est :

$$m=\rho V=\rho S\Delta L \tag{1.2}$$

Avec:

- m:la masse d'un échantillon d'eau;
- ρ :la masse volumique de l'eau;
- V: volume de l'échantillon;
- S:la section transversale de la conduite;
- L: la longueur de l'échantillon.

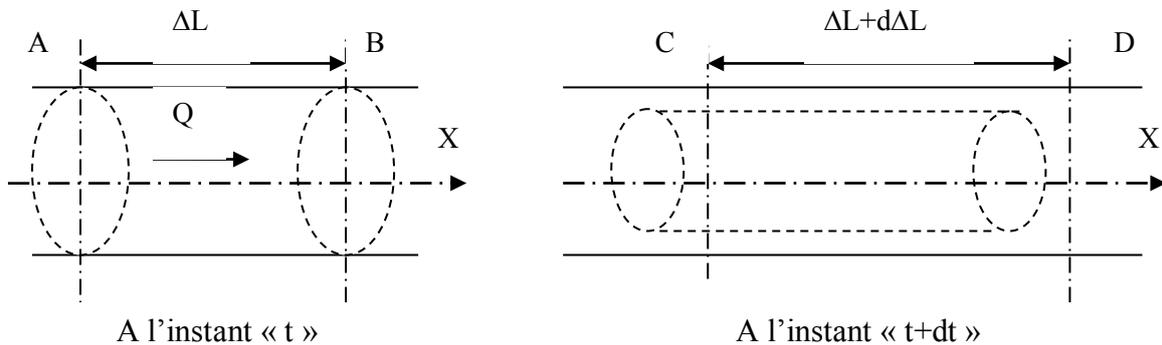


Figure 1.10: Déplacement de l'élément liquide

Puisque la masse est constante donc $dm=0$ qui nous donne la relation suivante:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{d(\Delta L)}{\Delta L} = 0 \tag{1.3}$$

Nous développons cette relation par le développement de ses termes:

- Par définition, le module d'élasticité du fluide est $K=\frac{dP}{d\rho/\rho}$ Donc nous aurons :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{K} \tag{1.4}$$

- la section d'écoulement de l'élément liquide étant la même que celle du tuyau, nous aurons :

$$\frac{dS}{S} = 2\frac{dR}{R} = 2d\varepsilon_r = \frac{2}{E}(d\sigma_r - \nu d\sigma_l) \quad (1.5)$$

Avec :

σ_l , σ_r et ε_r sont respectivement la contrainte longitudinale, la contrainte radiale et la déformation radiale;

R: rayon de la conduite;

ν : coefficient de Poisson du matériau de la conduite;

E: module de Young du matériau de la conduite

Nous avons $\sigma_l = \nu\sigma_r$ et $\nu = 1 - \mu$,

Avec:

donc nous obtenons
$$\frac{dS}{S} = \frac{2c}{E} d\sigma_r$$

D'autre part nous avons:

$$\sigma_r = \frac{PD}{2e}$$

Nous remplaçons la contrainte radiale par son expression, nous obtenons

$$\frac{dS}{S} = \frac{D}{Ee} c dP \quad (1.6)$$

P: la pression de l'eau.

- Exprimons la variation de ΔL :

D'après le schéma nous avons: $\Delta L(t) = X_B - X_A$ et $\Delta L(t+dt) = X_D - X_C$

Donc nous obtenons:

$$d(\Delta L) = (X_D - X_B) - (X_C - X_A)$$

$$d(\Delta L) = (U_B - U_A)dt$$

$$\frac{d(\Delta L)}{\Delta L} = \frac{\partial U}{\partial X} dt \quad (1.7)$$

U: la vitesse de la masse d'eau.

Nous remplaçons à présent chaque terme de l'équation (1.3) par son équivalent donné par les expressions (1.4), (1.6) et (1.7) nous trouvons:

$$\frac{\partial U}{\partial X} dt + \frac{dP}{K} + \frac{D}{Ee} c dP = 0 \quad (1.8)$$

Nous pouvons aussi écrire
$$\frac{\partial U}{\partial x} + \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{Ee}\right) \frac{dP}{dt} = 0 \quad (1.9)$$

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

Et comme
$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial t} \frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial X}$$

Nous obtenons une nouvelle expression de l'équation (1.3) de la continuité :

$$\rho \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{a^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial X} \right) = 0 \quad (1.10)$$

Cette dernière équation (1.10) de la conservation de la masse (équation de la continuité) est dite 1^{ère} équation de Saint-Venant.

1.7.2. Equation dynamique [1], [9], [12], [13]:

D'après la deuxième loi de Newton: la dérivée de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces extérieures c'est à dire:

$$\frac{d.(mU)}{dt} = \sum F_{ex} \quad (1.11)$$

Avec :

$\sum F_{ex}$: la somme des forces extérieures agissant sur l'élément liquide.

m : masse de l'élément liquide, $m = \rho.S.dX$.

U : vitesse d'écoulement de l'élément liquide.

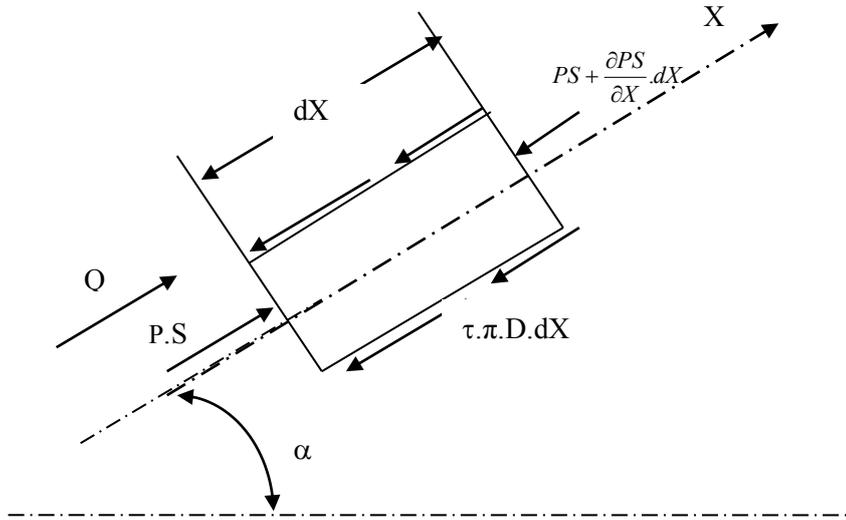


Figure 1.11: Application de l'équation de la dynamique à un petit volume

Et comme la masse d'eau est constante donc nous obtenons :

$$m \frac{dU}{dt} = \sum F_{ex}$$

Nous pouvons aussi écrire
$$\rho S dX \frac{dU}{dt} = \sum F_{ex} \quad (1.12)$$

Les forces extérieures agissant sur l'élément de petit volume sont :

- La force due à la pression sur la face amont: PS
- La force due à la pression sur la face aval: $PS + \frac{\partial P}{\partial X} S dX$
- La composante de la force de pesanteur projetée sur l'axe de l'écoulement : $-\rho g S . dX . \sin \alpha$

Où α est l'angle de l'axe de la conduite par rapport à l'horizontale.

- La force de frottement : $F_f = \tau_0 \pi D dX$

Nous aurons donc:

$$m \frac{dU}{dt} = P.S - \left(PS + \frac{\partial P}{\partial X} . S dX \right) - \tau . \pi . D . dX - \rho . g . S . \sin \alpha . dX$$

Nous pouvons calculer la force de frottement par deux formules :

$$\begin{cases} Fr = \tau \cdot \pi \cdot D \cdot L \\ Fr = \Delta P \cdot S = \Delta P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \end{cases} \quad (1.13)$$

Les frottements d'un liquide s'écoulant dans un cylindre se traduisent par une perte de charge, la formule de Darcy-Weisbach donne :

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad (1.14)$$

Nous aurons donc : $\tau \cdot \pi \cdot D = \rho \cdot g \cdot j \cdot S$

Avec:

$$j : \text{gradient hydraulique et } j = \frac{\lambda \cdot U^2}{D \cdot 2 \cdot g}.$$

Après la simplification, nous trouvons:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial X} = -g(\sin \alpha + j) \quad (1.15)$$

En exprimant « $\frac{dU}{dt}$ » en fonction de ses dérivées partielles, on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial t} \cdot \frac{\partial U}{\partial X} \\ \frac{dU}{dt} &= \frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial X} \end{aligned} \quad (1.16)$$

En écrivant « $\frac{dU}{dt}$ » en fonction de ses dérivées partielles dans l'équation (1.15), nous obtenons :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial X} = -g \cdot (\sin \alpha + j) \quad (1.17)$$

Les équations (1.10) et (1.17) représentent le système d'équations de Saint Venant décrivant les phénomènes transitoires en écoulement monophasique sous pression.

Les équations de **Saint-Venant** sont regroupées dans le système ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{a^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial P}{\partial X} \right) = 0 \dots\dots\dots (a) \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial X} = -g \cdot (\sin \alpha + j) \dots\dots\dots (b) \end{array} \right. \quad (1.18)$$

On ajoute puis on retranche membres à membres les équations de Saint-Venant, on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial t} + (U + a) \cdot \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{a \cdot \rho} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + (U + a) \cdot \frac{\partial P}{\partial X} \right) = -g \cdot (\sin \alpha + j) \dots\dots\dots (a) \\ \frac{\partial U}{\partial t} + (U - a) \cdot \frac{\partial U}{\partial X} - \frac{1}{a \cdot \rho} \left[\frac{\partial P}{\partial t} + (U - a) \cdot \frac{\partial P}{\partial X} \right] = -g \cdot (\sin \alpha + j) \dots\dots\dots (b) \end{array} \right. \quad (1.19)$$

Nous posons que: $\frac{dX}{dt} = U + a$ et $\frac{dX}{dt} = U - a$, nous trouvons:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = U + a \\ \frac{dU}{dt} + \frac{1}{a \cdot \rho} \cdot \frac{dP}{dt} = -g \cdot (\sin \alpha + j) \end{array} \right. \quad (1.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = U - a \\ \frac{dU}{dt} - \frac{1}{a \cdot \rho} \cdot \frac{dP}{dt} = -g \cdot (\sin \alpha + j) \end{array} \right. \quad (1.21)$$

d'autre part nous avons: $P = \rho \cdot g \cdot (h - Z)$

Avec:

h: la cote piézométrique;

Z: la cote géométrique.

Donc :

$$\frac{dP}{dt} = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{dh}{dt} - \frac{dZ}{dt} \right) \quad (1.22)$$

Et comme :

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dt}$$

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\partial Z}{\partial t} + \sin \alpha \cdot \frac{dX}{dt}$$

$$\frac{dZ}{dt} = \sin \alpha \cdot \frac{dX}{dt}, \quad \text{car} \ll \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \gg$$

Donc nous aurons:

$$\frac{dP}{dt} = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{dh}{dt} - \sin \alpha \cdot \frac{dX}{dt} \right) \quad (1.23)$$

En portant l'expression (1.23) dans chacun des deux systèmes (1.20) et (1.21), nous obtenons :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = U + a \dots\dots\dots(a) \\ \frac{dU}{dt} + \frac{g}{a} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{g}{a} \cdot (U + a) \sin \alpha - g \cdot (\sin \alpha + j) \dots\dots\dots(b) \end{cases} \quad (1.24)$$

Et

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = U - a \dots\dots\dots(a) \\ \frac{dU}{dt} - \frac{g}{a} \cdot \frac{dh}{dt} = -\frac{g}{a} \cdot (U - a) \sin \alpha - g \cdot (\sin \alpha + j) \dots\dots\dots(b) \end{cases} \quad (1.25)$$

On remplace « U » par « Q/S » et on multiplie la 2^{ème} équation du système précédent par « a/g », et comme « dX=± a .dt », et car a>>U, on obtient le système final des équations aux caractéristiques :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \pm a \\ \frac{a}{g \cdot S} \cdot dQ \pm dh = -j \cdot dX \end{cases} \quad (1.26)$$

En conséquence, nous obtenons :

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} + \frac{1}{\rho a} \cdot \left(\frac{dP^*}{dt} \right) = -gj \dots\dots\dots \frac{dX}{dt} = a \\ \frac{dU}{dt} - \frac{1}{\rho a} \cdot \left(\frac{dP^*}{dt} \right) = -gj \dots\dots\dots \frac{dX}{dt} = -a \end{cases} \quad (1.27)$$

Avec:

$$P^* = P + \rho \cdot g \cdot Z$$

1.7.3. Equations d'Allievi [1], [2], [9], [13]:

Les équations d'Allievi s'obtiennent également en se basant sur l'équation de continuité et l'équation dynamique sauf que les pertes de charge sont négligées.

Le système d'équations d'Allievi s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{g}{a^2} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial X} = 0 \end{cases} \quad (1.28)$$

La solution générale du système (1.28) présentée par Allievi est :

$$\begin{cases} h - h_0 = F\left(t - \frac{X}{a}\right) + f\left(t + \frac{X}{a}\right) \\ U - U_0 = -\frac{g}{a} \left[F\left(t - \frac{X}{a}\right) - f\left(t + \frac{X}{a}\right) \right] \end{cases} \quad (1.29)$$

La fonction F représente une onde de pression se propageant sans déformation avec une célérité a le long de la conduite du réservoir vers la vanne. La fonction f représente une seconde onde de pression se propageant sans déformation avec une célérité $(-a)$ le long de la conduite de la vanne vers le réservoir.

Après simplification le système devient :

$$\begin{cases} h - h_0 = F\left(t - \frac{X}{a}\right) - F\left(t - \frac{2.L - X}{a}\right) \\ U - U_0 = -\frac{g}{a} \left[F\left(t - \frac{X}{a}\right) + F\left(t - \frac{2.L - X}{a}\right) \right] \end{cases} \quad (1.30)$$

1.8. Applications des équations d'Allievi à la fermeture de la vanne:

1.8.1. Manœuvre de vanne instantanée [1], [9]:

Ce cas est considéré comme théorique puisqu'une manœuvre ne peut pas être instantanée, nous étudions la variation de la pression à l'amont de la vanne :

• A l'instant $t_1=0$, et $X=0$, nous avons $U=0$ puisque la vanne est fermée instantanément, d'après les équations d'Allievi nous trouvons:

$$h_1 - h_0 = F(t_1) - F\left(t_1 - \frac{2.L}{a}\right) \quad (1.31)$$

Et:

$$U_0 - \frac{g}{a} \left[F(t_1) + F\left(t_1 - \frac{2.L}{a}\right) \right] = 0 \quad (1.32)$$

L'onde $F\left(t_1 - \frac{2.L}{a}\right)$ est nulle puisqu'elle naîtra à l'instant $t = \frac{2L}{a}$ où l'onde $F(t_1)$ se réfléchira au niveau du réservoir et revient à la vanne nous aurons donc :

$$h_1 - h_0 = F(t_1) = F_1 = a \frac{U_0}{g} \quad (1.33)$$

Cette équation nous traduit qu'une onde de surpression apparaît à l'amont de la vanne et va au réservoir provoquant une augmentation de pression dans la conduite à une valeur de $\Delta h = \frac{aU_0}{g}$, cette onde est réfléchiée et se transforme en une onde d'équilibre qui ramène la pression à son état initial.

- A l'instant $t_2 = \frac{2L}{a}$, les équations d'Allievi nous donnent :

$$\Delta h_2 = h_2 - h_0 = F\left(\frac{2.L}{a}\right) - F(0) = F_2 - F_1 \quad (1.34)$$

Et
$$U_0 - \frac{g}{a}(F_2 - F_1) = 0 \quad (1.35)$$

Nous trouvons donc:
$$\Delta h_2 = F_2 - F_1 = -\frac{a.U_0}{g} \quad (1.36)$$

La deuxième onde provoque une dépression de la vanne vers le réservoir avec la valeur de $\Delta h = -\frac{a.U_0}{g}$, cette onde à son tour, sera réfléchiée et donne une onde d'équilibre.

- A l'instant $t_3 = 4L/a$, nous trouvons de même manière:

$$\Delta h_3 = F_3 - F_2 = F_3 \quad (\text{car: } F_2 = 0) \quad (1.37)$$

Et
$$F_3 = \frac{U_0.a}{g} \quad (1.38)$$

c'est à dire:

$$\Delta h_3 = \frac{U_0.a}{g}$$

Une onde de surpression se produit.

Il est apparent dans ce cas que les ondes de surpression et de dépression sont séquentielles jusqu'à amortissement et disparition du phénomène transitoire.

1.8.2. Manœuvre de vanne brusque [1], [2], [9]:

La vanne est à fermeture brusque, si le temps de sa fermeture est inférieur à $2\frac{L}{a}$.

Nous observons en amont de la vanne la même succession des ondes que pour le cas de fermeture instantané avec les mêmes valeurs de surpression et de dépression :

$$\Delta h = \pm \frac{aU_0}{g}$$

Puisque la fermeture de la vanne se fait en un temps inférieur à $\frac{2L}{a}$, la surpression résultante s'étend de la vanne jusqu'à un point dans la conduite entre la vanne et le réservoir, ce point est donné par:

$$\frac{L+X}{a} = T + \frac{L-X}{a}$$

(1.39)

Nous trouvons que $x = \frac{Ta}{2}$

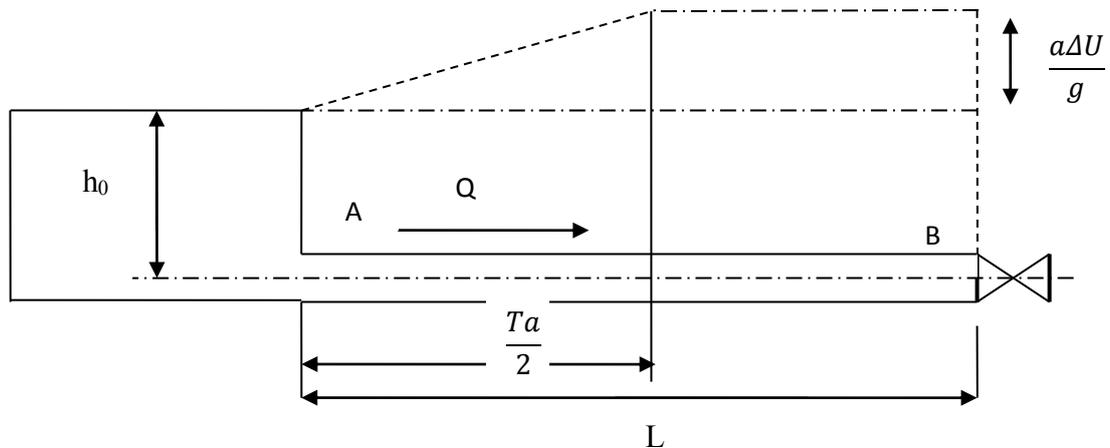


Figure 1.12: Répartition de la surpression le long d'une conduite après une fermeture brusque de la vanne

1.8.3. Cas d'une fermeture lente [1]:

La vanne est à fermeture lente, si le temps de sa fermeture est supérieur à $2\frac{L}{a}$

On suppose dans ce cas que la variation de débit suit une loi linéaire : $Q = Q_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right)$, et le phénomène transitoire n'influe pas sur la loi de variation linéaire du débit.

Nous étudions comme précédemment la pression à la section de la vanne c'est à dire $x=0$:

Chapitre1-Généralités sur les écoulements transitoires

A $t < \frac{2L}{a}$, les équations d'Allievi nous donnent :

$$\begin{cases} \Delta h_1 = h_1 - h_0 = F(t_1) = F_1 \\ U_1 - U_0 = -\frac{g}{a} \cdot F_1 \end{cases} \quad (1.40)$$

nous trouvons donc :

$$U_1 - U_0 = -\frac{g}{a} \Delta h_1 \quad (1.41)$$

nous avons aussi:

$$U_1 - U_0 = -U_0 \cdot \frac{t_1}{T} \quad (1.42)$$

nous obtenons :

$$\Delta h_1 = \frac{a}{g} \cdot \frac{U_0 \cdot t_1}{T} \quad (1.43)$$

Nous remarquons de l'expression (1.43) que la surpression augmente linéairement avec la fermeture de la vanne, et atteint sa valeur maximale quand t_1 égal $\frac{2L}{a}$, donc la surpression maximale est :

$$\Delta h_{1m} = \frac{2U_0 \cdot L}{g \cdot T} \quad (1.44)$$

- A l'instant « $t_2 = t_1 + \frac{2L}{a}$ », après que la première onde partie de la vanne ait été réfléchi, avec changement de signe, les équations d'Allievi à $x=0$ donnent alors :

$$\Delta h_2 = \frac{aU_0}{gT} \cdot \left(\frac{2L}{a} - t_1 \right) \quad (1.45)$$

Puisque: $0 \leq \frac{2L}{a} - t_1 \leq \frac{2L}{a}$, c'est à dire: $0 < \Delta h_2 \leq \frac{aU_0}{gT} \cdot \frac{2L}{a}$,

Nous trouvons:

$$\Delta h_2 \leq \frac{2U_0 \cdot L}{g \cdot T} \quad (1.46)$$

La surpression maximale est encore donnée par :

$$\Delta h_2 = \Delta h_1 = \frac{2U_0 \cdot L}{g \cdot T} \quad (1.47)$$

Donc la variation de pression maximale dans une canalisation, après la fermeture lente d'une vanne ($T > 2L/a$) est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta h_m = \frac{2U_0 \cdot L}{g \cdot T} \quad (1.48)$$

Où :

Δh_m : variation maximale de la pression (en m.c.e).

U_0 : vitesse d'écoulement en régime permanent (en m/s).

L : longueur de la conduite (en m).

g : accélération de la pesanteur (en m/s²).

T : temps de fermeture de la vanne.

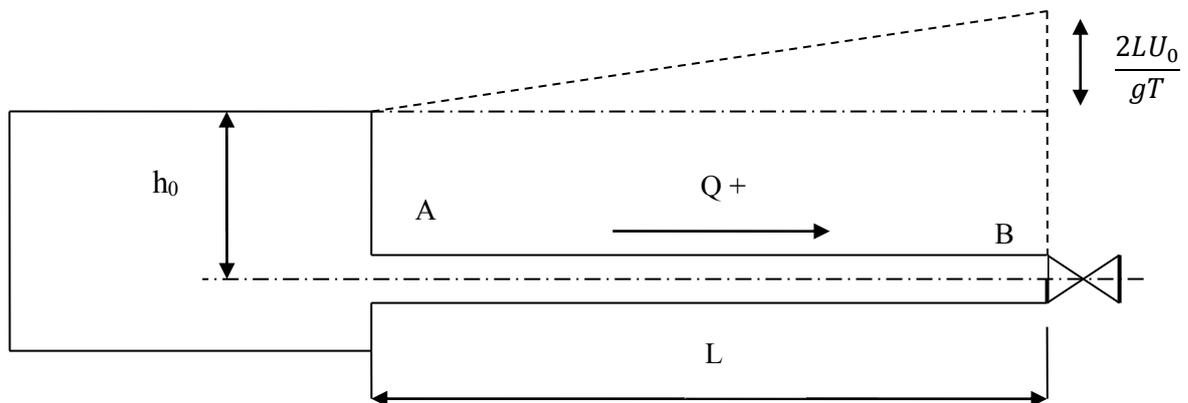


Figure1.13 : Répartition de la surpression le long d'une conduite après une fermeture lente de la vanne

1.8.4. Application des équations d'Allievi à l'arrêt brusque de la pompe [9], [10]:

Dans le cas de l'arrêt brusque de la vanne, il apparaît en premier une dépression puis une surpression, et nous avons de ce cas:

$$\Delta h = \pm \frac{aU_0}{g}$$

1.9. Représentation des équations aux caractéristiques dans les plans (X, t) et (h, Q) [9] :

Dans ce paragraphe, on présente les équations mathématiques qui traduisent le phénomène du coup de bélier graphiquement dans deux plan (X, t) et (h, Q)

D'après le premier chapitre nous avons les équations aux caractéristiques (1.27):

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} + \frac{1}{\rho a} \left(\frac{dP^*}{dt} \right) = -gj \dots \dots \dots \frac{dX}{dt} = a \\ \frac{dU}{dt} - \frac{1}{\rho a} \left(\frac{dP^*}{dt} \right) = -gj \dots \dots \dots \frac{dX}{dt} = -a \end{cases}$$

On écrit ces équations comme suit:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{aQ}{gS} + \frac{P^*}{\rho g} \right) = -aj \dots \dots \dots \frac{dX}{dt} = a \\ \frac{d}{dt} \left(-\frac{aQ}{gS} + \frac{P^*}{\rho g} \right) = -aj \dots \dots \dots \frac{dX}{dt} = -a \end{cases} \quad (1.49)$$

On néglige les pertes de charge dans le système (3.1), on obtient après l'intégrale le système suivant:

$$\begin{cases} \frac{aQ}{gS} + \frac{P^*}{\rho g} = cst \dots \dots \dots X - X_0 = +a.(t - t_0) \\ -\frac{aQ}{gS} + \frac{P^*}{\rho g} = cst \dots \dots \dots X - X_0 = -a.(t - t_0) \end{cases} \quad (1.50)$$

C'est à dire les quantités $\left(\pm \frac{aQ}{gS} + \frac{P^*}{\rho g} \right)$ restent constantes dans la période du phénomène transitoire.

Dans cette partie, on présente ces équation dans deux plans (x, t) et (h,Q) pour faciliter le contrôle du phénomène au niveau de chaque point de la conduite, leur développement dans le temps et l'espace est comme suit:

- Le plan (X, t) : on se déplace sur les droites $X - X_0 = \pm a.(t - t_0)$, et comme nous avons noté précédemment les quantités $h \pm \frac{a}{g.S} . Q$ sont constantes le long de ces droites.
- Le plan (h,Q) : contrôlons la variation de la hauteur piézométrique par rapport au débit, on se déplace sur les droites $h - h_0 = \pm \frac{a}{g.S} . (Q - Q_0)$, le long de la conduite étudiée.

1.9.1. Cas des conduites d'adductions gravitaires [9] :

Dans le système d'adduction gravitaire, la conduite reliant entre le réservoir et la vanne véhicule un débit Q_0 dans le sens positif (du réservoir à la vanne), on ferme la vanne à l'instant $t=0$.

Chapitre1-Généralités sur les écoulements transitoires

A l'instant $t=0$, l'onde de surpression se produit et part de la vanne suivant le sens négatif, elle atteindra le réservoir à l'instant $t=\frac{L}{a}$, parcourant le chemin reliant entre la vanne et le réservoir

Si on traduit cette information dans le plan (x, t) , c'est la droite passant par les points $(V,0)$ et $(R, \frac{L}{a})$ suivant l'équation linéaire $X - X_0 = -a.(t - t_0)$.

Puis à l'instant $t=\frac{L}{a}$, l'onde d'équilibre part du réservoir vers la vanne au sens positif suivant le chemin qui relie entre les deux suivant l'équation $X - X_0 = a.(t - t_0)$, elle atteindra la vanne à l'instant $t=2\frac{L}{a}$.

Avec le même principe, on présente toutes les phases du phénomène dans le plan (x, t) .

Concernant la présentation dans le plan (h, Q) , à $t=-\frac{L}{a}$ le régime dans la conduite relie le réservoir et la vanne est permanent, la charge piézométrique au niveau du réservoir est H_0 et le débit transporté est Q_0 , à $t=0$ le débit s'annule et la charge augmente, mais nous avons montré précédemment que $h \pm \frac{a}{g.S}.Q$ est constant, donc on trace la droite de la pente $\frac{a}{g.S}$ qui passe par les points (h_0, Q_0) pour $(R, -\frac{L}{a})$ et $(h_1, 0)$ pour $(V, 0)$.

Nous avons $h_0 + \frac{a}{g.S} Q_0 = h_1 + \frac{a}{g.S} * 0 = h_1$ ça veut dire que à l'instant $t=0$, l'annulation du débit génère une augmentation de pression d'une valeur de $\frac{a}{g.S} Q_0$

Avec se principe on trace toutes les droites qui présente le phénomène dans le plan (h, Q) .

La présentation des équations aux caractéristiques est la suivante:

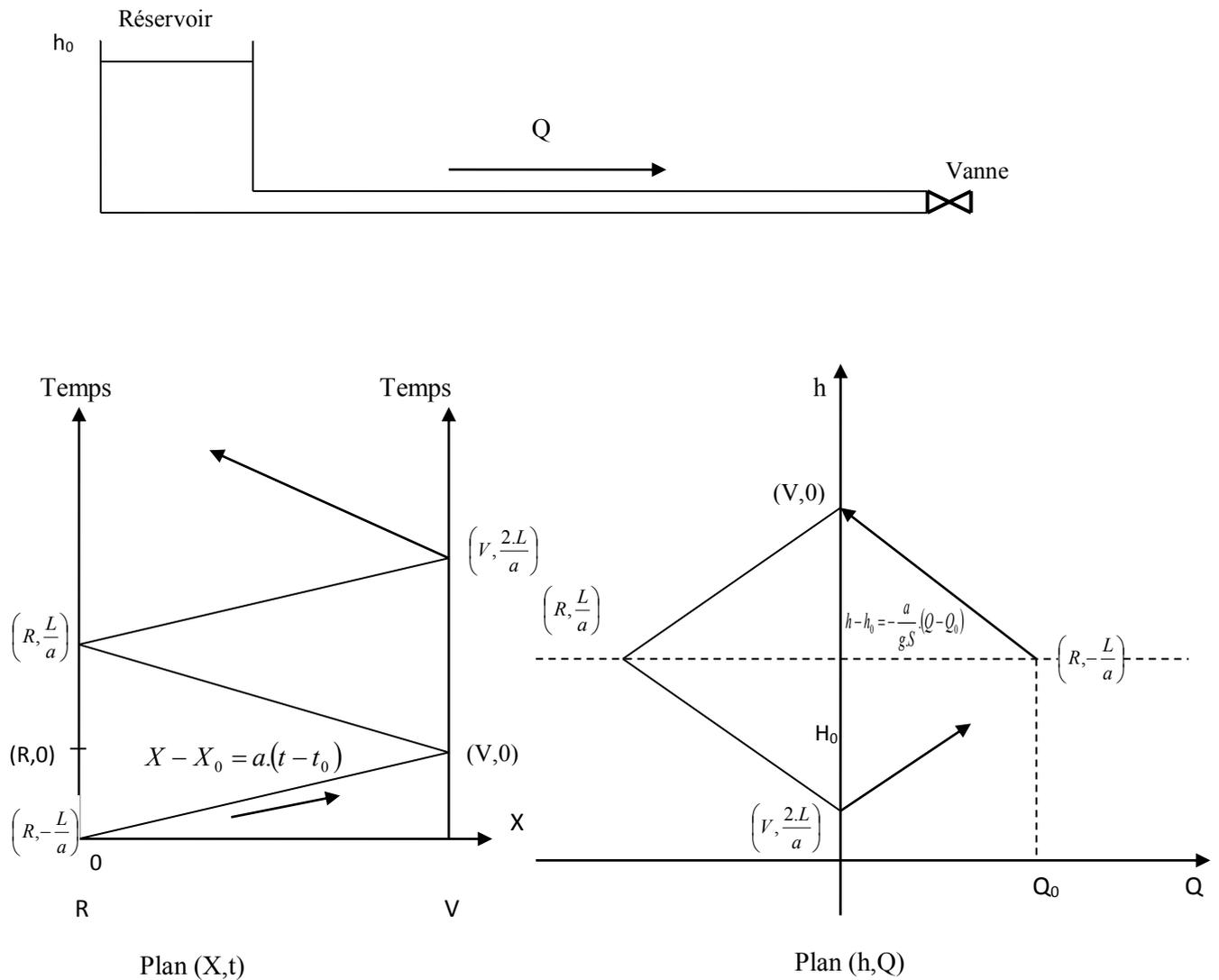


Figure 1.14 : Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite gravitaire libre.

1.9.2.Cas des conduites d'adductions par refoulement [9] :

Concernant la présentation du coup de bélier dans le cas de refoulement dans le plan (x, t) , le principe est le même que pour le cas gravitaire sauf qu'au début il y a apparition d'une dépression.

Pour la présentation du phénomène sur le plan (h, Q) , on suit les mêmes étapes que le cas gravitaire.

A $t=0$, la pompe s'arrête, l'onde de dépression se propage vers le réservoir, $h_0 - \frac{a}{gS} Q_0 = h_1$, la dépression qui se produit est $-\frac{a}{gS} Q_0$, on trace la droite de la pente $-\frac{a}{gS}$ passant par les point $(P, 0)$ et $(R, \frac{L}{a})$

La représentation des équations aux caractéristiques pour le cas de refoulement donne :

2.1. Introduction:

Le coup de bélier engendre la propagation d'une onde qui cause une surpression et une dépression dans la conduite ainsi qu'une modification de son diamètre.

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'évolution de l'expression de la célérité de cette onde pour pouvoir calculer au mieux le coup de bélier et protéger les organes du système d'alimentation en eau potable contre ce phénomène.

2.2.Expression générale de la célérité d'onde de coup de bélier [1], [2], [9], [12]:

Dans une conduite de refoulement en charge, nous définissons un paramètre quelconque F du liquide qui est l'un de six paramètres (ρ , Q, U, P, ε_r et ε_L).

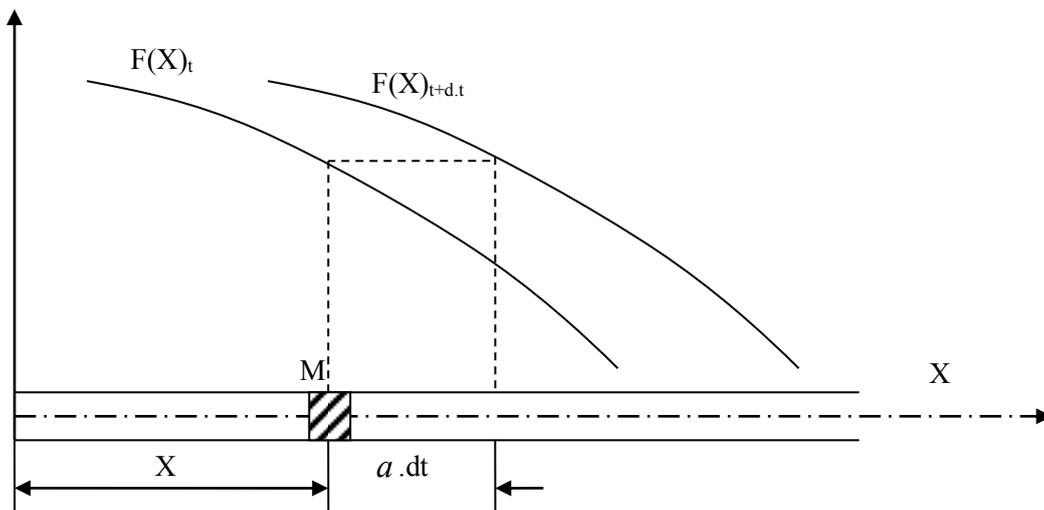


Figure 2.1: Déplacement d'une onde non amortie

Si une onde se produit dans le liquide et se déplace sans être amortie, le paramètre F se déplace avec elle sans modification c'est à dire:

$$\frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial X} dX_{onde} = 0 \quad (2.1)$$

D'autre part, pour une particule liquide « M » d'abscisse « X_M » le paramètre F est modifié pendant un temps « dt » donc :

$$\frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial X} dX_M \neq 0 \quad (2.2)$$

Nous savons que: $dX_{onde} = a dt$ et $dX_M = U dt$

En portant l'équation. (2.1) dans l'équation (2.2) et en remplaçant dX_{onde} et dX_M par leurs valeurs, nous trouvons que:

$$\frac{dF}{dt} = (U - a) \frac{\partial F}{\partial X} \quad (2.3)$$

Chapitre2-Etude de la célérité d'ondes du coup de bélier

Reprenant l'équation de la continuité sous la forme donnée par l'expression (1.3), nous avons :

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{d(\Delta L)}{(\Delta L)} = 0$$

Nous savons de l'équation (1.7) que:

$$\frac{d(\Delta L)}{\Delta L} = \frac{\partial U}{\partial X} dt$$

Donc, nous trouvons:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{\partial U}{\partial X} dt = 0 \quad (2.4)$$

c'est à dire:

$$\frac{\partial U}{\partial X} = - \left(\frac{d\rho}{\rho dt} + \frac{dS}{S dt} \right)$$

- Nous définissons le paramètre F par la vitesse, nous obtenons :

$$\frac{dU}{dt} = (U - a) \frac{\partial U}{\partial X} \quad (2.5)$$

Et:

$$\frac{dU}{dt} = -(U - a) \left(\frac{d\rho}{\rho dt} + \frac{dS}{S dt} \right) \quad (2.6)$$

- Si nous définissons le paramètre F par la pression, comme le cas précédent nous obtenons:

$$\frac{dP}{dt} = (U - a) \frac{\partial P}{\partial X} \quad (2.7)$$

En considérant que la conduite est horizontale et les forces de frottement sont négligeables, l'équation (b.1.18) de la dynamique s'écrit :

$$\frac{dU}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X}$$

Donc:

$$\frac{\partial P}{\partial X} = -\rho \frac{dU}{dt}$$

On remplace dans l'équation (2.7), On trouve:

$$\frac{dP}{dt} = -\rho.(U - a) \frac{dU}{dt} \quad (2.8)$$

En combinant entre les équations (2.6) et de (2.8) de manière à éliminer le terme « dU/dt », on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \rho.(U - a)(U - a) \left(\frac{d\rho}{\rho dt} + \frac{dS}{S dt} \right) \\ \frac{1}{(U - a)^2} &= \rho \left(\frac{d\rho}{\rho dP} + \frac{dS}{S dP} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Nous remarquons que le terme de gauche dans cette dernière expression représente le l'inverse du carré de la vitesse relative de l'écoulement par rapport à celle de l'onde, sachant que dans notre cas nous pouvons négliger « U » devant « a ». Nous pouvons donc écrire pour les conduites rigides et peu déformables (élastiques) [11]:

$$\frac{1}{a^2} = \rho \left(\frac{d\rho}{\rho dP} + \frac{dS}{S dP} \right) \quad (2.10)$$

Nous avons du premier chapitre: $\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{K}$

c'est à dire: $\frac{d\rho}{\rho dP} = \frac{1}{K}$

nous avons aussi: $\frac{dS}{S} = \frac{D}{Ee} c dP$

donc: $\frac{dS}{S dP} = \frac{D}{Ee} c$

On remplace les termes au dessus par leurs équivalents, nous trouvons l'expression de la célérité d'onde :

$$a = \left[\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} c \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

Avec:

D:diamètre de la conduite;

ρ :la masse volumique de l'eau;

$\frac{1}{K}$:module de compressibilité de l'eau;

e:l'épaisseur de la conduite;

E:module de Young de la conduite;

c:coefficient d'ancrage dépend de la constante de Poisson .

Cette expression nous montre que la célérité d'onde dépend de:

- Le paramètre K c'est à dire la compressibilité de l'eau;
- Le paramètre E c'est à dire la composition du matériau de la conduite;
- Le rapport $\frac{D}{e}$ c'est à dire les démentions de la conduite.
- Le terme c qui dépend du mode d'ancrage de la conduite.

2.3 .Détermination de la célérité d'onde dans les conduites non enterrées:

La célérité d'onde dans les conduites non enterrées est donnée par la relation suivante [14]:

$$a = \left[\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} c \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

2.3 .1. Conduites à paroi minces élastiques:

- Si on néglige l'influence des contraintes axiales c'est à dire, on met le coefficient c égal à 1, on retrouve la relation développée par **Allievi [18]**:

$$a = \left[\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

- **Parmakian** à son tour a déterminé une expression de la célérité d'onde, il introduisit dans la formule générale un terme supplémentaire qui représente l'allongement de la conduite $\frac{dL}{L.dP}$, et ce pour tenir compte de l'influence des contraintes et déformations longitudinales de la conduite sur la célérité, l'expression générale de la célérité devient alors [16]:

$$\frac{1}{a^2} = \rho \cdot \left(\frac{d\rho}{\rho.dP} + \frac{dS}{S.dP} + \frac{dL}{L.dP} \right)$$

Parmakian a supposé que $\frac{dS}{SdP} + \frac{dL}{L.dP} = c_1 \frac{D}{e.E}$, donc il a trouvé l'expression suivante:

$$a = \left[\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} c_1 \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Avec :

c_1 : coefficient exprimé en fonction du module de Poisson.

Pour les conduites en acier, en fonte et en amiante-ciment, le coefficient c_1 prend les valeurs suivantes:

- Si la conduite est ancrée à son extrémité supérieure, dépourvue de joints de dilatation:

$$c_1 = \frac{5}{4} - \nu$$

- Pour une conduite ancrée tout au long de sa longueur contre tout mouvement longitudinal:

$$c_1 = 1 - \nu^2$$

- Pour une conduite munie de joints de dilatation:

$$c_1 = 1 - \frac{\nu}{2}$$

• **Halliwell** a repris les travaux de **Parmakian**, il a étudié la célérité de propagation dans les conduites minces, épaisses et composites, il a pris en compte l'allongement de la conduite en introduisant le terme de la déformabilité longitudinale $\frac{dL}{L.dP}$ dans l'expression générale de la célérité, mais il a défini un nouveau paramètre adimensionnel ψ tel que [16]:

$$\psi = \frac{D}{e} c_1$$

L'expression de la célérité d'onde développée par **Halliwell** donc est:

$$a = \left[\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{\psi}{E} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Tel que:

- Conduite ancrée uniquement à son extrémité amont : $\psi = \frac{D}{e} \left(\frac{5}{4} - \nu \right)$
- Conduite ancrée tout au long de sa longueur ne subissant pas de déplacement longitudinal : $\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2)$
- Conduite munie de plusieurs joints de dilatation : $\psi = \frac{D}{e}$

On voit d'après les travaux de ces trois auteurs que **Allievi** contrairement avec **Halliwell** et **Parmakian** a négligé la contrainte axiale ainsi l'allongement de la conduite à paroi mince

élastique. Par ailleurs la différence entre **Halliwell** et **Parmakian** est dans le cas d'une conduite munie de joints de dilatation où le premier auteur a négligé le coefficient de poisson devant le rapport $\frac{D}{e}$.

2.3 .2. Conduites à parois épaisses élastiques :

- **Jaeger** a considéré que la sollicitation sur la conduite est de deux dimensions, où les tensions et les déformations longitudinales sont négligées [19].

La formule développée par **Jaeger** est:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1}{K} + \frac{2(r^2 + R^2)}{E(R^2 - r^2)}}} \quad (2.15)$$

Avec:

r: rayon interne de la conduite.

R: rayon externe de la conduite.

- **Massouh** a démontré que dans le cas où $\frac{P.D}{e.E} \ll 1$, ce qui est pratiquement vérifié dans toutes le conduites industrielles, la formule du coefficient d'ancrage s'écrit [2]:

$$c = \left[(1 - \nu.n) \frac{D}{D + e} + 2(1 + \nu) \frac{e}{D} \right]$$

Avec:

D:diamètre intérieur de la conduite;

e:l'épaisseur de la conduite;

ν :coefficient de poisson.

Conduite ancrée à une seule extrémité:

$$c = \left[\left(1 - \frac{\nu}{2} \right) \frac{D}{D + e} + 2(1 + \nu) \frac{e}{D} \right]$$

Conduite ancrée à ses deux extrémités :

$$c = \left[(1 - \nu^2) \frac{D}{D + e} + 2(1 + \nu) \frac{e}{D} \right]$$

Conduite dotée de plusieurs joints :

$$c = \left[\frac{D}{D+e} + 2(1+\nu) \frac{e}{D} \right]$$

2.4. Cas où le matériau de la conduite est rigide [15] :

Les conduites rigides gardent leur forme et leur taille, elles ne se déforment pas, la célérité d'onde dépend seulement du liquide véhiculé. L'expression de la célérité est dans ce cas :

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.16)$$

Avec:

K : Coefficient d'élasticité de l'eau ;
 ρ : Masse volumique de l'eau ;

2.5. Célérité de propagation d'onde dans les galeries rocheuse:

2.5.1 Célérité de propagation dans une galerie rocheuse sans revêtement [1], [12]:

Dans le cas d'une galerie simple sans revêtement, **Halliwell** a considéré le cas d'une galerie creusée dans une roche comme un cas particulier de celui d'une conduite épaisse avec un rayon externe tendant vers l'infini, il a proposé l'expression de la célérité suivante:

$$a = \left[\rho \cdot \left(\frac{1}{K} + 2 \cdot \frac{1+\nu}{E} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

Avec:

K : Coefficient d'élasticité de l'eau ;
 ρ : Masse volumique de l'eau ;
E : module de Young de la roche;
 ν : coefficient de poisson de la roche.

La célérité est donc dépend des propriétés de la roche, son module de Yong et son coefficient de poisson.

2.5.2 Célérité de propagation d'onde dans les galeries rocheuses avec revêtement double d'acier et de béton[1]:

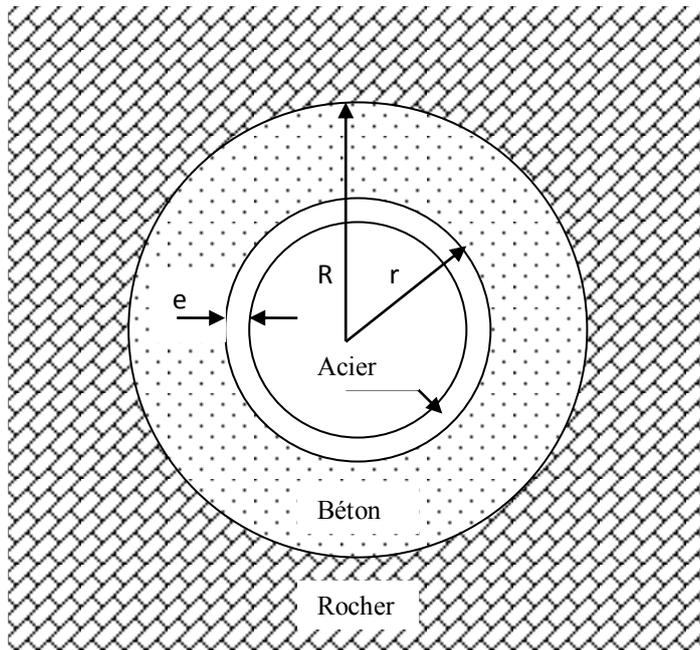


Figure 2.2: Coupe schématique d'une galerie en rocher, revêtue (Blindée)

La célérité d'onde dans ce cas est donné par la formule suivante:

$$a = \left[\rho \cdot \left(\frac{1}{K} + (1 - \lambda') \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{2 \cdot r}{e \cdot E} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

Avec:

$$\lambda' = \frac{(1 - \nu) \cdot r}{(1 - \nu) \cdot r + \frac{E \cdot e}{E_b} \cdot \left[\frac{E_b \cdot [R^2 + r^2 \cdot (1 - 2\nu)] + E_R \cdot (1 - 2\nu) \cdot (R^2 - r^2)}{E_b \cdot (R^2 - r^2) + E_R \cdot [r^2 + R^2 \cdot (1 - 2\nu)]} \right]} \quad (2.19)$$

Tel que:

- E : module de Young de la roche;
- ν : coefficient de poisson de la roche;
- r: le rayon intérieur;
- R:le rayon extérieur;
- E_b : module de Young du béton;
- E_R : coefficient de Yong de l'acier;
- e:l'épaisseur du revêtement d'acier.

2.6. Célérité d'onde dans les conduites enterrées[11], [1], [2]:

Dans la pratique, les conduites d'eau sont le plus souvent enterrées ce qui engendre de nouvelles sollicitations sur les conduites (exercées par le sol), et donc influe sur la célérité d'onde de coup de bélier.

Salah, en considérant tout comme **Halliwel** et **Jaeger** que la déformation de la conduite ne se faisait pas librement, mais qu'elle était soumise à l'action de l'élément qui l'entoure, a déterminé la célérité d'onde dans les conduites enterrées. L'effet du sol entourant la conduite a été introduit par l'auteur de deux manières : la première en considérant que le sol se comporte comme un ressort autour de la conduite, là le sol est supposé avoir une épaisseur infinie, la seconde en tenant compte de la hauteur du remblai au-dessus de la conduite.

L'expression générale de la célérité du coup de bélier dans le cas enterré développé par Salah est [11]:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K * 2 * r * (1 - \nu_m^2) * (1 - \nu_s)}{(1 - \nu_m^2) * r * E_s + E_m * e_m * (1 - \nu_s)}}} \quad (2.20)$$

Avec :

K : Coefficient d'élasticité de l'eau ;

ρ : Masse volumique de l'eau ;

E_m : module de Young du matériau de la conduite ;

E_s : module de Young du sol $E_s = 2 * 10^8$;

ν_m : coefficient de poisson du matériau, $\nu_m = 0.3$ pour la fonte, $\nu_m = 0.46$ pour le PEHD,

ν_s : coefficient de poisson du sol entourant la conduite $\nu_s = 0.33$.

e_m : Epaisseur de la conduite (m).

r : rayon intérieur de la conduite (m).

On voit dans cette expression l'apparition du coefficient de poisson et le module de Young du sol qui entour la conduite, ça traduit l'influence du sol sur la célérité du coup de bélier.

Cette expression est valable pour toutes les conduites enterrée métalliques ou plastiques, minces ou épaisses.

2.7.Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons déterminé l'expression générale de la célérité d'onde du coup de bélier, nous avons aussi présenté des formules développées par différents auteurs qui se

Chapitre2-Etude de la célérité d'ondes du coup de bélier

sont basés sur des hypothèses tenant compte, par exemple, de l'épaisseur des conduites ou de la présence d'une couche de sol autour de la conduite.

3.1.Introduction :

Dans le cas d'une conduite enterrée, le sol exerce une force supplémentaire qui n'existe pas lorsque la conduite est libre. Dans ce chapitre nous citons les sollicitations que supporte une conduite enterrée et nous analysons l'effet du sol sur le coup de bélier, aussi nous réalisons un calcul de la célérité d'onde pour une conduite libre et enterrée afin de voir la différence entre les deux possibilités.

3.2.Les efforts exercés par le sol sur une conduite enterrée[2], [5] :

Les conduites d'eau potable sont souvent enterrées, ce qui engendre de nouvelles sollicitations qui influent sur la valeur et la durée du coup de bélier.

Les différents efforts exercés sur une conduite du fait de la présence du remblai sont:

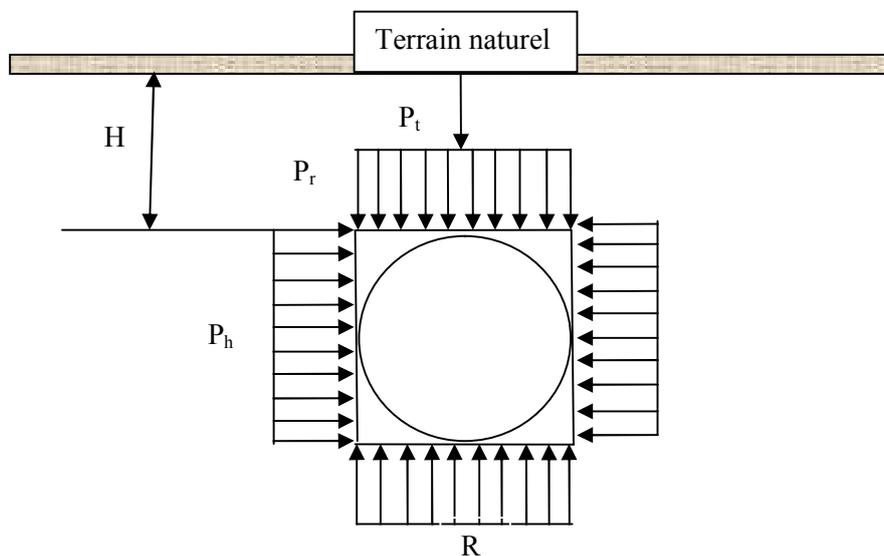


Figure 3.1: schéma explicatif des efforts extérieurs du sol sur une conduite enterrée

- L'effort vertical, supposé uniforme appliqué sur la génératrice supérieure de la conduite engendré par la pression du remblai de terre au dessus de la conduite (P_r) :

$$P_r = C \gamma_s H \quad (3.1)$$

Tel que:

P_r : la pression du remblai,

C : coefficient de concentration, intégrant l'effet des efforts de frottement,

γ_s : poids volumique du remblais,

H : hauteur du remblai.

L'expression de l'effort du remblai en présence de la nappe phréatique est:

$$P_r = C \gamma_s (H - H_e) + C \gamma' H_e \quad (3.2)$$

Tel que:

H_e : hauteur de la nappe phréatique,

Chapitre3-Etude de l'effet du sol sur le coup de bélier

γ' : poids volumique déjaugé du sol

- Les charges de surface (P_t) constituent les charges permanentes (exemple les charges des bâtiments ,de la route) et d'exploitation (exemple la charge dû au chantier, véhicules..)

- La pression horizontale appliquée par la terre sur la conduite(P_h) ,

L'expression de la pression horizontal est égal à:

$$P_h = k P_t \quad (3.3)$$

Tell que :

P_h : la pression horizontal,

k : coefficient qui dépend des caractéristiques du sol et de sa profondeur.

- La pression d'appui vertical (R) qu'exerce du sol sur la conduite,

- La pression hydrostatique extérieure due à la présence d'une nappe phréatique répartie uniformément autour de la conduite: lorsque le niveau de la nappe passe au dessus de la conduite, l'expression de cette pression est:

$$P_e = \gamma_e \left(H_e + \frac{D}{e} \right) \quad (3.4)$$

Tel que:

P_e : la pression hydrostatique.

H_e : hauteur de la nappe phréatique,

γ_e : poids volumique de l'eau.

D :diamètre intérieur de la conduite,

e :épaisseur de la conduite.

3.3.Etude du cas d'une conduite d'adduction par refoulement :

Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'expression de la célérité d'onde diffère dans le cas enterré par rapport à celui non enterré, et d'après le travail de Salah concernant la célérité d'onde de coup de bélier sous l'effet du sol , nous avons remarqué l'apparition de paramètres dépendant du sol : l'élasticité et le coefficient de Poisson du sol notamment, ce qui devrait engendrer une augmentation de la valeur de cette célérité.

Dans ce paragraphe, nous allons analysé l'influence du sol et aussi du matériau constituant la conduite sur l'augmentation de la valeur de la célérité du coup de bélier par son calcul sur un système d'adduction réel.

3.3.1.Description du système d'adduction[6]:

La conduite d'adduction étudiée relie deux réservoirs, la station de pompage refoule du réservoir d'Akbou de cote de radier 200m vers le réservoir de Sidi Ali de cote de trop plein 250m, les deux réservoirs sont semi enterrés et se trouvent à Bejaia.

Chapitre3-Etude de l'effet du sol sur le coup de bélier

La station de pompage refoule un débit $Q = 0,08264 \text{ m}^3/\text{s}$ par l'intermédiaire d'une conduite enterrée en fonte de diamètre 300 mm et d'épaisseur de 7,2 mm.

3.3.2.Calcul de la célérité d'onde du coup de bélier:

Dans ce paragraphe, on fait le calcul de la célérité d'onde du coup de bélier de la conduite d'adduction. Nous considérons toutefois deux types de matériaux pour une étude comparative : la fonte et le PEHD, pour le cas libre et enterré.

a. Cas d'une conduite non enterrée:

Pour calculer la célérité dans ce cas, on applique la formule d'**Allievi** :

$$a = \left[\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Avec:

D:diamètre de la conduite;

ρ :la masse volumique de l'eau;

$\frac{1}{K}$: module de compressibilité de l'eau: $K=2,07 \cdot 10^9 \text{ Pa}$;

e:l'épaisseur de la conduite;

E:module de Young de la conduite: $E= 1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$ pour la fonte, $E= 1,2 \cdot 10^{10}$ pour le PEHD;

b.cas d'une conduite enterrée:

Pour tenir compte de l'effet du sol sur le coup de bélier, on calcule la célérité par la formule de **Salah** comme suivant:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K * 2 * r * (1 - \nu_m^2) * (1 - \nu_s)}{(1 - \nu_m^2) * r * E_s + E_m * e_m * (1 - \nu_s)}}$$

Avec :

a: célérité d'onde en (m/s)

K : Coefficient d'élasticité de l'eau ;

ρ : Masse volumique de l'eau ;

E_m : module de Young du matériau de la conduite ;

E_s : module de Young du sol $E_s= 2 \cdot 10^8$;

ν_m : coefficient de poisson du matériau, $\nu_m=0.3$ pour la fonte, $\nu_m=0.46$ pour le PEHD,

Chapitre3-Etude de l'effet du sol sur le coup de bélier

ν_s : coefficient de poisson du sol entourant la conduite $\nu_s=0.33$.

e_m : Epaisseur de la conduite (m).

r : rayon intérieur de la conduite (m).

les résultats de calcul sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.1. les résultats de calcul de la célérité

| Configuration | Conduite en Fonte | Conduite en PEHD |
|-------------------------------|-------------------|------------------|
| Conduite non enterrée | 1054.23 | 502.82 |
| Conduite enterrée | 1089.83 | 641.96 |
| Pourcentage d'augmentation(%) | 4 | 28 |

Interprétation:

On remarque d'après les résultats que la célérité d'onde est plus grande dans le cas du matériau formé par la fonte, et cela est lié au module de Young comme le montre la relation d'**Allievi**. La fonte est un matériau rigide et a un module de Young élevé, cela augmente la valeur du coup de bélier tandis que le PEHD est un matériau souple et flexible facilement déformable, ce qui diminue la célérité d'onde et par conséquent le coup de bélier.

Les résultats de calculs montrent également l'influence du sol sur le coup de bélier, les valeurs de la célérité augmente avec la présence du sol, cette augmentation est vraiment considérable lorsque le matériau est souple étant donné que le conduit ne peut plus déformer librement, le sol l'en empêchant.

3.4.l'influence du sol sur le coup de bélier:

Comme nous avons vu précédemment, les sollicitations dues à la présence du sol autour de la conduite enterrée, causent une augmentation la célérité de l'onde par rapport à celle d'une conduite libre c'est à dire:

$$a_e > a_l$$

Donc cette onde dans ce cas nécessite un temps d'aller retour moins qu'une onde dans la conduite libre,

$$4\frac{L}{a_e} < 4\frac{L}{a_l}$$

à l'instant $t=0$ la vanne se ferme, la masse d'eau rencontre un obstacle devant elle, la vitesse s'annule et l'onde de surpression se produit en ce moment et se propage vers le réservoir en un temps égale à $\frac{L}{a_e}$ qui est inférieur à $\frac{L}{a_l}$.

Chapitre3-Etude de l'effet du sol sur le coup de bélier

A $t = 2 \frac{L}{a_e}$ l'onde de dépression se propage du réservoir vers la vanne dans un même temps, et ainsi de suite jusqu'à $t = 4 \frac{L}{a_e}$ où l'onde termine sa période.

Nous pouvons donc dire que le phénomène transitoire dans les conduites enterrées se caractérise par une période inférieure à celle des conduites non enterrées.

D'autre part, nous avons du chapitre précédent que:

$$\Delta h = \pm \frac{a.U_0}{g}$$

Cette relation nous montre que la valeur du coup de bélier est liée directement à la valeur de la célérité d'onde.

C'est à dire que la surpression et la dépression du phénomène de coup de bélier sont plus grandes lorsque ces conduites sont enterrées dans le sol et subissent différentes sollicitations du fait de la présence de ce dernier.

3.5.Présentation des équations aux caractéristiques dans les plans (X, t) et (h, Q) dans les conduites enterrées:

La présentation dans le cas enterré se fait de la même manière que pour le cas libre, c'est que la valeur du coup de bélier est plus importante.

3.5.1. Cas d'une conduite d'adduction gravitaire enterrée[9] :

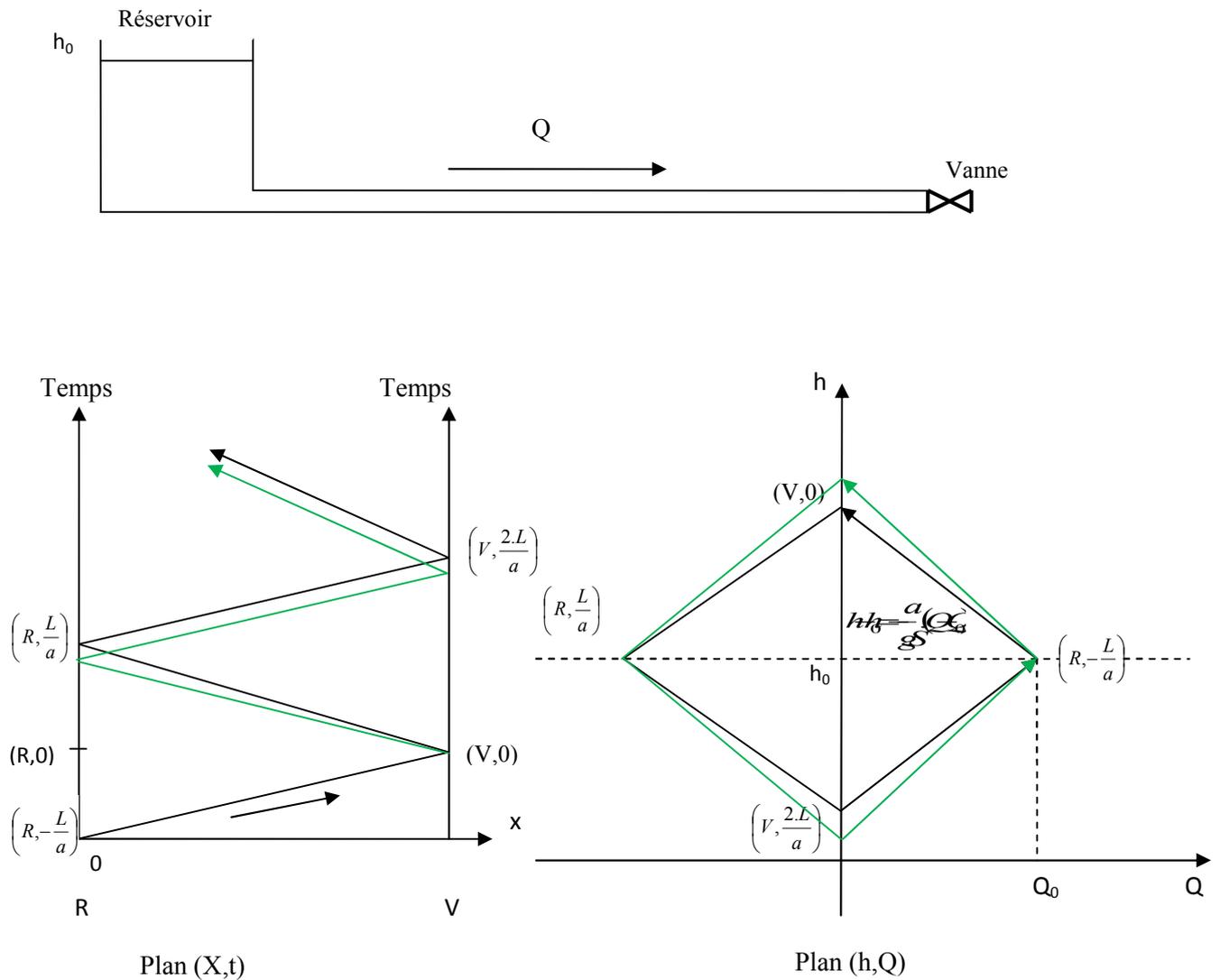


Figure 3.2: Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite gravitaire enterrée.

3.5.2.Cas d'une conduite d'adduction par refoulement enterrée[9] :

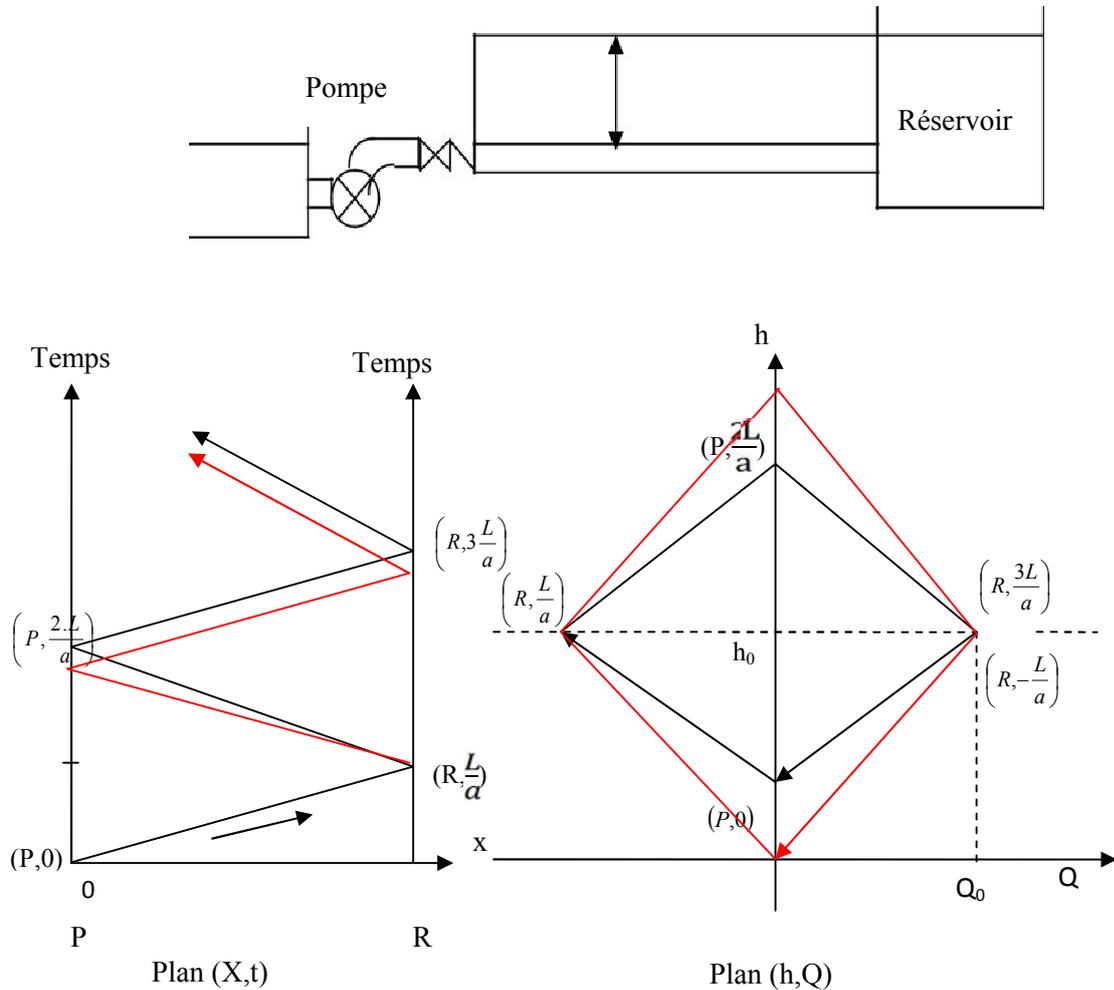


Figure 3.3:Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite de refoulement enterrée

3.6.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes sollicitations dues à la présence du sol et leur influence sur la valeur et la durée du coup de bélier, aussi nous avons montré que la célérité d'onde est plus grande dans les conduites enterrées par rapport à celles qui ne sont pas soumises à l'action du sol, et dans les conduites rigides par rapport aux conduites flexibles.

Et pour contrôler la gravité du phénomène transitoire en tous points de la conduite d'adduction, nous avons représenter les équations aux caractéristiques pour des conduites enterrées dans les plans (X, t) et (h,Q).

4.1.Introduction:

Etant donné les effets néfastes et les conséquences négatives du coup de bélier sur les systèmes hydrauliques, il est nécessaire de protéger les canalisations contre les surpressions et les dépressions en installant des dispositifs spéciaux. Dans ce chapitre nous étudions la protection d'une conduite d'adduction par refoulement en considérant deux matériaux différents PEHD et fonte avec l'hypothèse d'une conduite enterrée et non enterrée.

4.2.Moyens de protection contre le coup de bélier[6],[8]:

Il existe en pratique plusieurs dispositifs contre le coup de bélier, leur rôle dans les installations hydrauliques est de:

- Limiter la dépression.
- Limiter la surpression.

Les appareils les plus utilisés sont les suivants :

4.2.1. Réservoirs d'air :

Le réservoir d'air ou la cloche 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.

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 est réduite suite à la variation graduelle de la vitesse d'écoulement dans la conduite.

4.2.2. Cheminée d'équilibre :

C'est un réservoir à l'air libre sous forme d'un tube piézométrique vertical. Il permet de transformer les surpressions et les dépressions en variation de hauteur de colonne d'eau. Dans les cas de refoulement sur des dénivellations importantes, l'utilisation de cheminées d'équilibre devient impraticable puisque leurs hauteurs seraient trop grandes. Sur une conduite de refoulement, cependant, une cheminée peut être placée en cours de parcours pour contrer les effets de la cavitation. La hauteur de la cheminée sera alors réduite et son emplacement, son niveau d'entretien étant réduit, ne pose pas de problème.

4.2.3. Soupape de décharge :

Ce sont des appareils dits équipements mécaniques qui s'ouvrent pour réduire la surpression à une valeur acceptable. Ordinairement ces dispositifs sont généralement

Chapitre4-Protection du système d'adduction contre le coup de bélier

constitués d'un ressort à boudin, qui à sa compression obture en exploitation normale un orifice placé sur la conduite au point à protéger, c'est-à-dire où la surpression à craindre est maximale et libère le cas échéant, le débit de retour de conduite correspondant à la valeur de la surpression admissible.

Il y a lieu de prévoir l'évacuation vers l'extérieur, de l'eau ainsi libérée.

Ce dispositif est inefficace pour protéger les conduites contre les dépressions et les cavitations.

4.2.4. Volant d'inertie :

La spécificité de ce moyen est qu'il continue à assurer l'alimentation de la veine liquide, et ce malgré l'arrêt du moteur actionnant la pompe. Ce volant, qui est placé sur l'arbre du groupe, restitue l'énergie cinétique accumulée pendant la marche en régime normal au moment de la disjonction et permet ainsi de prolonger le temps d'arrêt de l'ensemble du groupe, et donc, de diminuer l'intensité du coup de bélier. En d'autres termes, la vitesse de rotation diminue lentement et il en est de même de son débit. La masse du volant est généralement accumulée près de la périphérie. Le volant d'inertie est généralement peu ou non utilisable, pour les raisons suivantes :

- Ce procédé est utilisé seulement pour limiter les dépressions.
- Dans le cas d'une conduite de refoulement assez grande, il faut envisager des volants avec des poids considérables, et par conséquent le système ne sera en aucun cas économique.
- Par ailleurs, plus le volant est lourd, plus le moteur doit être puissant pour pouvoir vaincre, au démarrage, l'inertie de ce volant, ce qui peut conduire à des appels d'intensité de courant inadmissibles.
- Ce procédé est finalement utilisé pour la protection des conduites à longueurs de refoulement faibles ou moyennes et qui n'excèdent pas quelques centaines de mètres.

4.3. Protection de la conduite d'adduction contre le coup de bélier [12]:

Dans ce projet, on propose comme moyen de protection de notre système d'adduction le réservoir d'air, on utilise la méthode de **Peuch** et **Meunier** pour le dimensionner.

La méthode de **Peuch** et **Meunier** utilise trois nombres adimensionnels qui sont :

K : caractérise les pertes de charge ;

$$K = \frac{H_{\text{abs}} - H_0}{H_0} \quad (4.1)$$

Chapitre4-Protection du système d'adduction contre le coup de bélier

A : caractérise la conduite de refoulement ;

$$A = \frac{a \cdot V_0}{g \cdot H_0} \quad (4.2)$$

B : caractérise le volume d'air du réservoir anti-bélier.

$$B = \frac{V_0^2}{g \cdot H_{abs}} \times \frac{L \cdot S}{U_0} \quad (4.3)$$

Tel que:

a : célérité d'onde de coup de bélier (m/s) .

V_0 : vitesse d'écoulement en régime permanent (m/s).

H_0 : pression statique absolue (m)

$$H_0 = H_g + 10 \quad (4.4)$$

H_{abs} : la pression de service absolue (m)

Tel que :

$$H_{abs} = H_g + \sum \Delta h + 10 = H_{mt} + 10 \quad (4.5)$$

L : longueur totale de la conduite de refoulement (m) ;

S : section de la conduite de refoulement (m) ;

U_0 : volume d'air initial (m³)

g : accélération de pesanteur (m/s²).

Ayant calculé K et A, nous superposerons la famille de courbe B au profil en long de la conduite, et 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 U_0 .

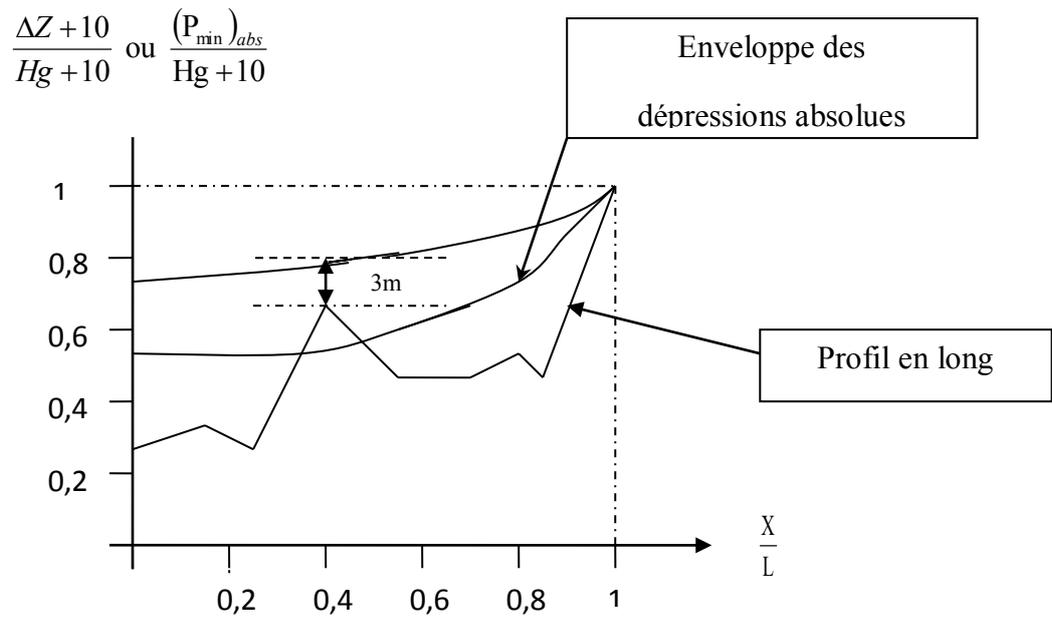


Figure 4.1: Description de la méthode de Peuch et Meunier

Nous avons les caractéristiques de notre conduite d'adduction:

Tableau 4.1. les caractéristiques de la conduite d'adduction

| Q (m ³ /s) | D(mm) | V ₀ (m/s) | L _{ref} (m) | e (m) | Hg (m) |
|-----------------------|-------|----------------------|----------------------|--------|--------|
| 0,08264 | 300 | 1.17 | 4114 | 0.0072 | 50 |

Nous traçons d'abord le profil en long de la conduite d'adduction comme montre le tableau suivant:

Tableau 4.2.profil en long de la conduite d'adduction

| Points | Z (m) | X (m) | $\frac{\Delta Z + 10}{H_g + 10}$ | $\frac{X}{L}$ |
|--------|-------|-------|----------------------------------|---------------|
| 1 | 200 | 0 | 0,16 | 0 |
| 2 | 202 | 600 | 0,2 | 0,15 |
| 3 | 204.4 | 1200 | 0,24 | 0,29 |
| 4 | 210.4 | 1800 | 0,34 | 0,44 |
| 5 | 218.2 | 2400 | 0,47 | 0,58 |
| 6 | 227.8 | 3000 | 0,63 | 0,73 |
| 7 | 228.6 | 3600 | 0,81 | 0,88 |
| 8 | 250 | 4114 | 1,00 | 1,00 |

Puis nous calculons les paramètres qui nous aident à déterminer les coefficient A et K

Tableau 4.3. résultats su calcul du coefficient K

| | H ₀ | H _{mt} | H _{abs} | K |
|-------------------|----------------|-----------------|------------------|-----|
| Conduite en fonte | 60 | 82.90 | 92.90 | 0.6 |
| Conduite en PEHD | 60 | 79,21 | 89,21 | 0,4 |

Les résultats de calcul après extraction du coefficient B sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 4.4. résultats du calcul du coefficient A,B et P_{min}

| | A | B | $\frac{P_{min}}{H_0}$ | P _{min} |
|--------------------------------|-----|-----|-----------------------|------------------|
| Conduite non enterrée en fonte | 2 | 1 | 0.5 | 30 |
| Conduite enterrée en fonte | 2 | 1 | 0.5 | 30 |
| Conduite non enterrée en PEHD | 0.5 | 0.4 | 0.72 | 43.2 |
| Conduite enterrée en PEHD | 1 | 0.6 | 0.61 | 36.6 |

Finalement, nous calculons les différents volumes du réservoir d'air comme suit:

1- Calculer U₀, tel que

$$U_0 = \frac{V_0^2}{gH_{abs}} \frac{LS}{B} \quad (4.6)$$

- 2- 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}/H_0 ,

$$U_{\max} = U_0 \left(\frac{H_{abs}}{P_{\min}} \right)^{\frac{1}{1,2}} \quad (4.7)$$

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 :

$$U_{\text{réel}} = (1,2 \text{ à } 1,3) U_{\max} \quad (4.8)$$

Tableau 4.5. résultats du calcul des différentes volumes du réservoir d'air

| | $U_0(\text{m}^3)$ | $U_{\max}(\text{m}^3)$ | $U_{\text{réel}}(\text{m}^3)$ |
|--------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| Conduite non enterrée en fonte | 0.6 | 1.06 | 1.4 |
| Conduite enterrée en fonte | 0.6 | 1.06 | 1.4 |
| Conduite non enterrée en PEHD | 1,65 | 2.17 | 2.82 |
| Conduite enterrée en PEHD | 1.1 | 1.66 | 2.16 |

Interprétation:

Nous remarquons d'après le tableau que le volume du réservoir d'air est plus grand dans le cas de la conduite non enterrée en PEHD où la valeur de la célérité est la plus petite, et il est plus petit dans les cas de la conduite en fonte où la valeur de la célérité est plus grande.

Nous constatons donc d'après ces calculs que le volume du réservoir est inversement proportionnel à la célérité d'onde et donc à la valeur du coup de bélier.

4.4. Conclusion:

Nous avons vu dans ce chapitre les moyens les plus connus pour la protection des conduites de refoulement contre le phénomène du coup de bélier, et nous avons choisi le réservoir d'air pour protéger notre conduite d'adduction et nous l'avons dimensionné par la méthode de **Peuch** et **Meunier**. Les résultats de calcul ont montré que le volume de ce réservoir est plus grand dans la conduite en PEHD comparée à la conduite en fonte, cette différence est plus importante dans les conduites enterrées.

Conclusion générale

Il ne nous échappe certainement pas que le coup de bélier est un phénomène qui engendre des effets néfastes sur les systèmes hydrauliques, tels que la fatigue, l'aplatissement ou l'implosion des canalisations, surtout si ces canalisations sont enterrées. C'est pour cela que nous avons réalisé cette étude dont le but est de voir l'effet du sol sur le coup de bélier.

D'abord, nous avons expliqué le phénomène transitoire, par une description physique et une analyse mathématique, et nous avons vu l'application des équations **d'Allievi** sur la fermeture de la vanne et l'arrêt brusque de la pompe.

Nous avons vu aussi le développement de l'expression de la célérité d'onde de coup de bélier selon plusieurs auteurs. Cette célérité dépend du diamètre, de l'épaisseur et du matériau de la conduite et diffère entre une canalisation libre ou enterrée. La célérité d'onde peut être beaucoup plus grande dans une conduite enterrée.

L'augmentation de la célérité d'onde dans les conduites enterrées entraîne une augmentation de la valeur de coup de bélier.

La protection des systèmes hydrauliques contre le coup de bélier est indispensable, c'est pour cela que nous avons étudié dans le quatrième chapitre la protection d'une conduite d'adduction par refoulement en utilisant un réservoir d'air. Nous avons vu que le volume de ce dernier diminue lorsque la célérité d'onde est augmentée, ce qui donne pour une conduite de refoulement enterrée un volume de réservoir d'air inférieur au cas couramment appliqué où la conduite est supposée non enterrée.

BIBLIOGRAPHIE

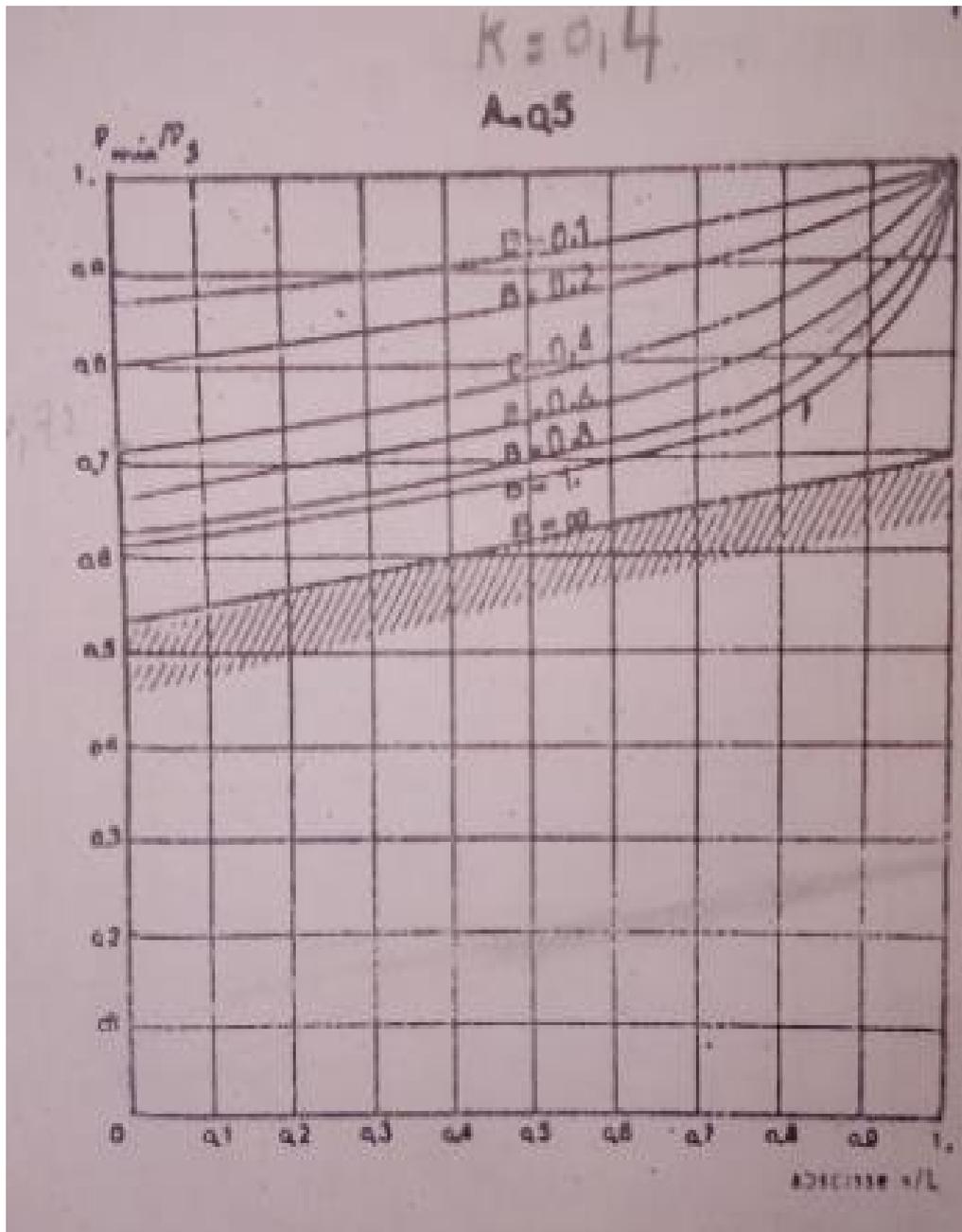
- [1] **BOUKHELIFA, M.** Coup de bélier en cas gravitaire en charge avec influence du sol et loi de manœuvre. mémoire fin d'étude ,ENSH :Blida ,2006.
- [2] **KADI, L.** Effet du sol sur les lois de manœuvre des robinets-vannes en coup de bélier parfait. thèse de magistère ,ENSH :Blida ,2012.
- [3] **CHAOUI, S.** Contribution à l'étude des écoulements transitoires en charge .thèse magister, Université Hadj Lakhdar: Batna,2010.
- [4] **SALAH, B.** Cours d'alimentation en eau potable des agglomérations, polycopie ensh,2014.
- [5] **JACOB S.** Le dimensionnement mécaniques des tuyaux d'assainissement, CERIB France 2006.
- [6] **CHIKH, A.** Etude d'adduction pour l'alimentation en eau potable et industrielle des différentes localités situées sur le Couloir Akbou-Bejaia a partir du barrage de Tichy-haf, ENSH: Blida ,2011.
- [7] **FERROUDJ, T.** Etude du transfert des eaux du barrage de Tabellout (w.Jijel) vers le barrage de draa-diss (w.Setif), ENSH: Blida ,2011.
- [8] **BERREKSI, A.** Cours d'hydraulique général, Université Abderrahmane MIRA Bejaia.
- [9] **PERNES, P.** Hydraulique unidimensionnelle partie2,éd. Cemagref, France 2001.
- [10] **BENNIS, S.** Hydraulique et hydrologie, éd. université du Québec, Québec 2001.
- [11] **SALAH, B. , KETTAB A. et MASSOUH F.** Coup de bélier dans un réseau ramifié enterré en refoulement, Larhyss Journal, Juin 2003.
- [12] **MEUNIER, M.** "Le coup de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression", ed. Dunod, Paris 1980.
- [13] **LOGANATHAN G.V., VINOD L., KIBLER D. F.** Water Hammer: An Analysis of Plumbing Systems, Intrusion, and Pump Operation, polycopié de l'école polytechnique de Virginia, Virginia 2006.
- [14] **ATEF, M. et KASSEM, B.** Design for protection against, water hummer in pump, discharge line, thèse de master d'ingénierie, université de Mc master, Hamilton 1976.
- [15] **BERGANT, A.** Water hummer analysis of pumping systems for control of water in underground mines, university of Adelaide, South Australia, 2012.
- [16] **PARMAKIAN, J.** Water hummer analysis , Dover publications INC, New York, 1955.

[17] **CHAUDHRY, H.** Applied hydraulic transients , Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1979.

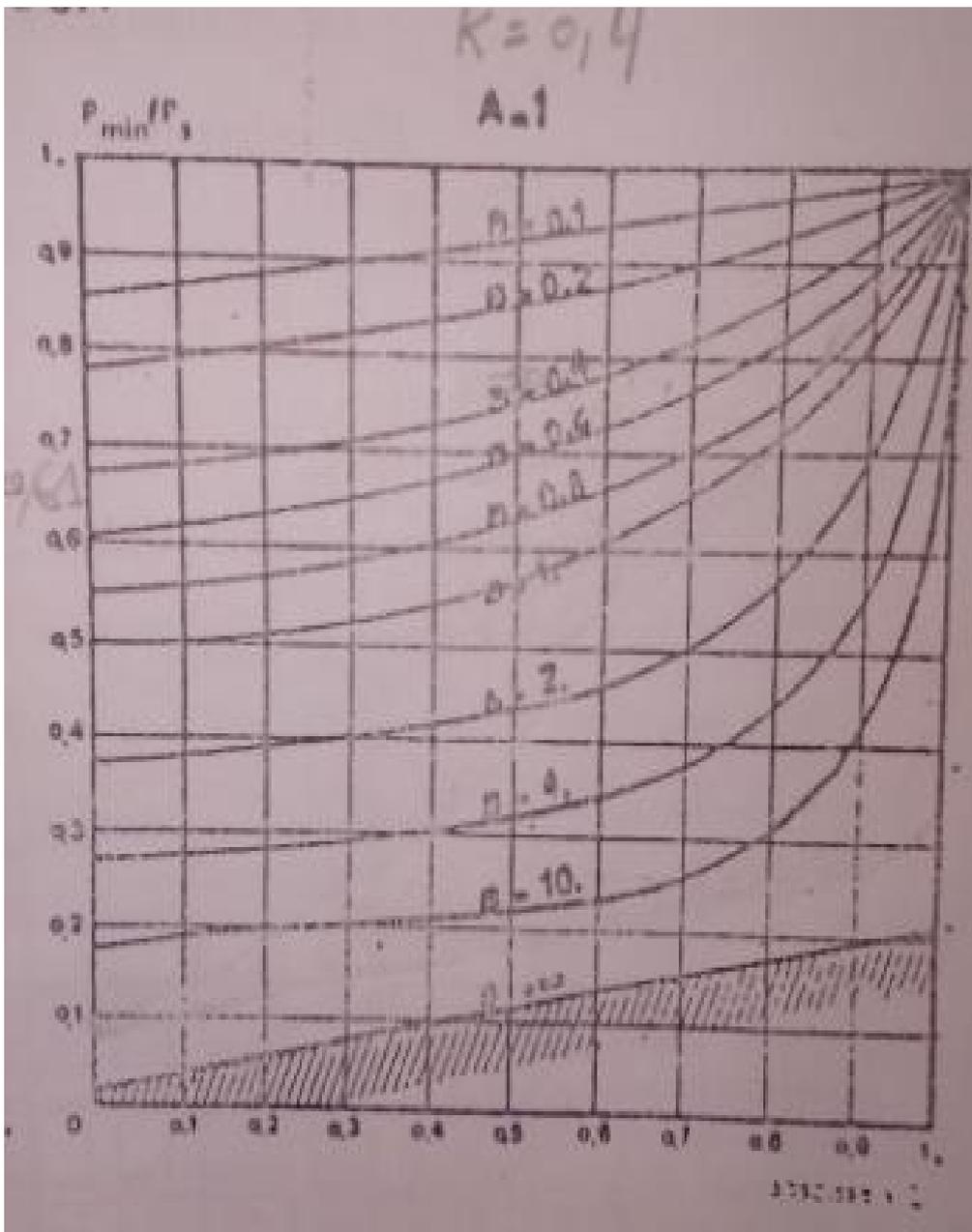
[18] **ALLEIVI, L.** Théorie du coup de bélier , Bulletin technique de la Suisse romande, suisse, 1913.

[19] **JAEGER, C.** Théorie générale du coup de bélier, thèse de doctorat, école polytechnique,Zurich, Paris, 1933.

Annexe (I):Abaque de Meunier (K=0.4 et A=0.5).



Annexe (II):Abaque de Meunier (K=0.4 et A=1).



Annexe (III):Abaque de Meunier (K=0.6 et A=2).

