

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'enseignement Supérieur et de la**

**Recherche Scientifique**

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**Faculté du Génie de la Construction**

**Département de Génie Civil**



*Mémoire de fin d'études*

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en  
Hydraulique*

*Option : Ouvrages Hydrauliques*

**Thème**

***Étude du coup de bélier dans une  
conduite en refoulement***

**Proposé et dirigé par :**

**Professeur KHATTAOUI Mohammed**

**Réalisé par :**

**AIT MOUSSA Mourad**

**AIT IZEM Said**

**Présenté devant membres de jury :**

**GABI  
BOUZELHA**

**Smail  
Karima**

**Grade :**

**Professeure  
Professeure**

***Promotion : 2019/2020***

## **Résumé**

Dans le domaine pratique, 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.

Ce phénomène est connu sous le nom du coup de bélier qu'est un phénomène de surpression qui apparaît au moment de la variation brusque de la vitesse d'un liquide, par suite d'une fermeture/ouverture rapide d'une vanne, d'un robinet ou du démarrage/arrêt d'une pompe.

Dans ce Travail nous allons faire une analyse théorique du coup de bélier avec différentes formules et la représentation graphique de Bergeron du phénomène. Puis nous aborderons les moyens de protection contre le phénomène.

Vers la fin nous allons appliquer les les formules et lois citer sur un cas réel.

## **Remerciements**

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté de réaliser ce travail.*

*On tient tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude et un grand respect à notre promoteur le professeur **KHATTAOUI Mohammed**, pour la qualité de son encadrement, ses conseils précieux et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*À l'ensemble des enseignants du département de génie civil.*

*A l'ensemble des ingénieurs de la direction d'hydraulique de T.O en particuliers Mr **HADJ HAMOU Ameziane** et **KISSOUM Madjid**.*

*A l'architecte **AIT RAMDANE Abderrazak**.*

*Nos vifs remerciements aux membres de jury pour avoir accepté de juger notre modeste travail.*

*Nous remercions très chaleureusement toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*À la mémoire de ma grand mère*

*À mes très chers parents qui m'ont toujours  
poussé, motivé dans mes études et veillés sur ma  
réussite*

*À mon frère, à mes sœurs, à ma nièce et mon  
neveu.*

*À toute ma famille, ainsi tous mes amis en général,  
mon binôme en particulier et à toutes personnes  
qui ont contribué à la réussite de ce travail.*

*Said*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*À la mémoire de ma grand mère*

*À mes très chers parents qui m'ont toujours  
poussé, motivé dans mes études et veillés sur ma  
réussite*

*À mes frères, à ma sœur, à mes oncles, mes cousins  
et mes cousines*

*À tous mes amis en général, mon binôme en  
particulier et à toutes personnes qui ont contribué  
à la réussite de ce travail.*

*Mourad*

## SOMMAIRE

### CHAPITRE I Généralités sur le coup de bélier

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>I.1. Introduction</b> .....	<b>2</b>
<b>I.2. Adduction</b> .....	<b>2</b>
I.2.1. Adduction par refoulement.....	2
I.2.2. Adduction gravitaire.....	3
<b>I.3. Description du phénomène transitoire</b> .....	<b>5</b>
<b>I.4. Coup de bélier</b> .....	<b>5</b>
I.4.1. Définition du phénomène de coup de bélier.....	5
I.4.2. Causes du coup de bélier .....	7
I.4.3. Conséquences du coup de bélier .....	7
I.4.3.1. Suppressions excessives.....	7
I.4.3.2. Très basses pressions.....	8
I.4.3.3. Inversion de l'écoulement .....	8
I.4.3.4. Mouvements et vibrations des conduites.....	8
<b>I.5. Conclusion</b> .....	<b>9</b>

### CHAPITRE II Etude théorique du coup de bélier

<b>II.1. Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>II.2. Généralités sur les ondes</b> .....	<b>9</b>
II.2.1. Conservation de la masse pour un écoulement dans lequel se propage une onde .....	9
II.2.2. Oscillation en masse ou montée subite .....	10
II.2.3. Oscillations de la pression ou résonance.....	11
II.2.4. Oscillations de la structure.....	11
II.2.5. Relation entre l'onde élastique et l'oscillation en masse.....	11
<b>II.3. Etude des ondes élastiques</b> .....	<b>12</b>
II.3.1. Description d'un guide d'ondes élastiques .....	12
II.3.2. Présentation des ondes des écoulements transitoires .....	12
II.3.3. Propagation des ondes des écoulements transitoires.....	14
<b>II.4. Équations d'Allievi</b> .....	<b>16</b>
<b>II.5. Etude sommaire du coup de bélier</b> .....	<b>17</b>
II.5.1. Représentation graphique du phénomène .....	20
II.5.2 Analyse physique du phénomène du coup bélier en refoulement .....	24

II.5.3. Valeur numérique du coup de bélier .....	25
II.5.3.1. Cas de la fermeture brusque.....	25
II.5.3.2. Cas de la fermeture lente.....	27
<b>II.6. Répartition du coup de bélier le long de la conduite.....</b>	<b>29</b>
<b>II.7. Méthode de PEUCH et MEUNIER.....</b>	<b>32</b>
<b>II.8. Méthode de calcul de perte de charges.....</b>	<b>32</b>
II.8.1. Pertes de charges.....	32
II.8.1.1. Pertes de charge linéaires ( $\Delta H_L$ ) .....	33
II.8.1.1.2. Pertes de charge singulières ( $\Delta H_S$ ).....	33
<b>II.9. Prise en compte des pertes de charge dans la conduite .....</b>	<b>33</b>
<b>II.10. Conclusions .....</b>	<b>38</b>
<b>CHAPITRE III Moyens de protection contre le phénomène</b>	
<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>38</b>
<b>III.2. Les volants d'inertie .....</b>	<b>38</b>
III.2.1. Principe.....	38
III.2.2. Calcul de l'amortissement du coup de bélier grâce au volant .....	39
III.2.3. Limite pratique d'utilisation des volants .....	43
<b>III.3. Les soupapes de décharge .....</b>	<b>43</b>
<b>III.4. Les réservoirs d'air .....</b>	<b>45</b>
III.4.1. Principe.....	45
III.4.2. Calcul simplifié d'un réservoir d'air.....	45
III.4.3. Calcul normal d'un réservoir d'air.....	50
III.4.4.Principe du calcul .....	51
<b>III.5. Les cheminées d'équilibre .....</b>	<b>53</b>
III.5.1 Définition et dispositions constructives.....	53
III.5.2. Types de cheminées d'équilibre .....	53
III.5.2.1. Cheminée déversante.....	53
III.5.2.2. Cheminée à épanouissement.....	53
III.5.2.3. Cheminée à étranglement .....	54
III.5.2.4. Cheminée différentielle .....	54
III.5.3.5. Etude qualitative .....	55
<b>III.6. Les clapets.....</b>	<b>57</b>
<b>III.7. Valves à air .....</b>	<b>58</b>

<b>III.8. Valve de surpression</b> .....	<b>59</b>
<b>III.9. Conduite de retour</b> .....	<b>60</b>
<b>III.10. Les ventouses</b> .....	<b>62</b>
<b>III. Conclusion</b> .....	<b>64</b>
<b>CHAPITRE IV Etude d'un cas réel</b>	
<b>IV.1. Introduction</b> .....	<b>65</b>
<b>IV.2. Présentation du projet</b> .....	<b>65</b>
IV.2.1 Situation géographique.....	65
IV.2.2. Situation géologique.....	65
IV.2.3. La sismicité .....	66
IV.2.4. Situation topographique .....	66
<b>IV.3. Calcule du coup de bélier dans le tronçon (SR1 VERS SR2)</b> .....	<b>67</b>
<b>IV.4. Conclusion</b> .....	<b>78</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>79</b>

## Liste des figures

<b>Figure I. 1</b> schéma explicatif des types d'adductions .....	4
<b>Figure I. 2</b> Schéma explicatif du phénomène du coup de bélier .....	6
<b>Figure I. 3</b> Joint de dilatation détruit par un coup de bélier .....	8
<b>Figure I. 4</b> Effet d'un coup de bélier sur une conduite. ....	9
<b>Figure II. 1</b> Schéma de la propagation d'une onde .....	10
<b>Figure II. 2</b> Schéma d'illustration des variations de pressions .....	13
<b>Figure II. 3</b> Schéma de dilatation de la conduite.....	15
<b>Figure II. 4</b> Conduite issue d'un réservoir avec un robinet en A.....	18
<b>Figure II. 5</b> Caractéristiques de la conduite en régime transitoire.....	21
<b>Figure II. 6</b> Principe de la détermination du régime au temps 1 pour le point A .....	22
<b>Figure II. 7</b> cas de la conduite de refoulement.....	23
<b>Figure II. 8</b> cas de la conduite d'adduction réglée en A .....	25
<b>Figure II. 9</b> cas de la fermeture brusque.....	26
<b>Figure II. 10</b> cas de la fermeture lente .....	27
<b>Figure II. 11</b> Répartition du coup de bélier (fermeture brusque) .....	30
<b>Figure II. 12</b> Répartition du coup de bélier (fermeture lente) .....	31
<b>Figure II. 13</b> Répartition du coup de bélier (fermeture lente) .....	31
<b>Figure II. 14</b> Prise en compte des pertes de charges .....	34
<b>Figure II. 15</b> Prise en compte des pertes de charges dans la représentation graphique .....	35
<b>Figure II. 16</b> PLANCHE I Epure de Bergeron.....	37
<b>Figure III. 1</b> Volant d'inertie .....	39
<b>Figure III. 2</b> Section du volant. ....	40
<b>Figure III. 3</b> Principe de la construction dans le cas de volant.....	42
<b>Figure III. 4</b> Soupape de décharge anti-bélier.....	44
<b>Figure III. 5</b> Principe de la disposition du réservoir d'air anti-bélier.....	45
<b>Figure III. 6</b> Variation du volume d'air au cours des phases de fonctionnement du réservoir. 46	
<b>Figure III. 7</b> Planché II Abaque de Vibert .....	48
<b>Figure III. 8</b> Étranglement au moyen d'une tuyère .....	50

<b>Figure III. 9</b> Étranglement au moyen d'un clapet à battant percé .....	51
<b>Figure III. 10</b> Principe de la construction de l'épure.....	52
<b>Figure III. 11</b> Principe de la construction de l'épure.....	54
<b>Figure III. 12</b> Cheminée à étranglement .....	54
<b>Figure III. 13</b> Cheminée différentielle .....	55
<b>Figure III. 14</b> Cheminée d'équilibre en conduite forcée (Gravitaire) Etude quantitative.....	55
<b>Figure III. 15</b> Cheminée d'équilibre sur refoulement .....	56
<b>Figure III. 16</b> Coupe d'une cheminée d'équilibre .....	57
<b>Figure III. 17</b> Clapet .....	58
<b>Figure III. 18</b> Valve à air dans une conduite .....	59
<b>Figure III. 19</b> Valve de surpression .....	60
<b>Figure III. 20</b> Vanne by-pass sur détendeur-régulateur de pression .....	61
<b>Figure III. 21</b> Ventouse à trois fonctions .....	63
<b>Figure III. 22</b> Ventouse à une seule fonction .....	63
<b>Figure III. 23</b> Le fonctionnement de la ventouse .....	64
<b>Figure IV. 1</b> Plan de situation des communes concernées par le projet.....	66
<b>Figure IV. 2</b> Abaques de <i>Puech</i> et <i>Meunier</i> pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon d'air pour $K=0.2$ et $A=0.5$ .....	69
<b>Figure IV. 3</b> Abaques de <i>Puech</i> et <i>Meunier</i> pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon d'air pour $K=0.2$ et $A=1$ .....	70
<b>Figure IV. 4</b> Abaques de <i>Puech</i> et <i>Meunier</i> pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon d'air pour $K=0.4$ et $A=0.5$ .....	70
<b>Figure IV. 5</b> Abaques de <i>Puech</i> et <i>Meunier</i> pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon d'air pour $K=0.4$ et $A=1$ .....	71
<b>Figure IV. 6</b> Abaque de <i>Dubin</i> et <i>Guéneau</i> donnant la surpression d'une conduite protégée par un ballon d'air.....	72
<b>Figure IV. 7</b> l'épure de <i>Bergeron</i> .....	77

### **Liste des tableaux**

<b>Tableau IV. 1</b> Listes des données du tronçon (SR1-SR2) .....	67
<b>Tableau IV. 2</b> Profil en long .....	69
<b>Tableau IV. 3</b> Calculs inhérents au tracé de l'épure de Bergeron .....	76
<b>Tableau IV. 4</b> Rapport vitesse-débit- section.....	77

## Liste des symboles :

- $H_{MT}$  : Hauteur manométrique totale  
 $H_{abs}$  : Hauteur absolu  
 $H_g$  : Hauteur géométrique  
 $H_0$  : La hauteur géométrique de refoulement  
 $I_f$  : La pente du fond  
 $P_{min}$  : Pression minimum  
 $U_{max}$  : Volume maximal  
 $V_f$  : La vitesse finale  
 $V_m$  : Vitesse moyen  
 $V_0$  : Vitesse initial  
 $e_b$  : Épaisseur du béton,  
 $e_m$  : Épaisseur équivalente à la section totale du métal dans une section normal de tuyau  
 $n_c$  : Nombre de carreaux  
 $\sigma'$  : Le coefficient de Poisson  
 $\frac{1}{\varepsilon}$  : Le coefficient de compressibilité de l'eau.  
 $\emptyset$  : Diamètre de la conduite  
 $\Delta h$  : une variation de hauteur,  
 $a$  : Célérité d'onde  
 $b$  : La valeur du coup de bélier,  
 $c$  : la vitesse du son dans l'eau.  
 $dp$  : Une variation de la pression  
 $dt$  : déférence de Temps  
 $dw$  : la variation du volume w  
 $e$  : Épaisseur de la paroi  
 $E$  : le module d'élasticité du matériau constituant la conduite  
 $g$  : L'accélération de la gravité ;  
 $I$  : Moment d'inertie  
 $K$  : coefficient dépendant du matériau constituant la canalisation.  
 $L$  : longueur  
 $N$  : Le nombre de tours/minute de la pompe  
 $N_0$  : Niveau correspondant à la ligne de charge  
 $P$  : La puissance  
 $Q$  : Le débit  
 $R$  : Le rayon de la section de base du cylindre  
 $R$  : Réservoir  
 $S$  : Section  
 $t$  : Temps

**T** : La période des oscillations,  
 **$u_0$**  : La vitesse initiale dans la conduite  
**V** : Vitesse d'écoulement  
**Z** : Côte  
 **$\mu$**  : Viscosité dynamique  
 **$\nu$**  : Viscosité cinématique  
 **$\rho$**  : Masse volumique du fluide  
**Re** : Nombre de Reynolds  
**J** : La perte de charge  
 **$\epsilon$**  : Module d'élasticité volumétrique  
 **$\lambda$**  : Coefficient de perte de charge  
 **$\rho$**  : La masse volumique du fluide  
 **$\sigma$**  : Contrainte  
 **$\tau$**  : Volume final  
 **$\omega$**  : La vitesse angulaire

# Introduction Générale

---

## Introduction générale

Les changements du régime d'écoulement d'un fluide contenu à l'intérieur d'une conduite entraînent souvent de brusques variations de pression, ces écarts seront plus importants si le fluide est un liquide et si la modification du débit a été brutale. Par rapport au régime permanent, les pressions peuvent atteindre des valeurs excessives.

Les phénomènes transitoires, appelés aussi « coup de bélier » surviennent dans les réseaux sous pressions par la modification du régime permanent, suite à un incident électrique provoquant l'arrêt brutale d'une ou plusieurs pompes, au démarrage d'une pompe et par des manœuvres de fermeture ou d'ouverture des vannes. Cette modification du régime permanent de l'écoulement engendre des perturbations énormes qui s'avèrent dangereuses et causent d'énormes dégâts sur les équipements hydrauliques (Bergeron, 1950). Ceci intervient lorsque les surpressions et les dépressions générées pendant ses perturbations dépassent les limites des pressions maximales et minimales admissibles du réseau en régime permanent.

Il est donc capital de prévoir et d'étudier ce phénomène afin de réduire son effet par l'utilisation de dispositifs spéciaux et le dimensionnement correct des différents composants d'une installation.

Dans le travail qui suit nous allons traiter dans le premier chapitre le phénomène par une présentation générale du régime transitoire, les causes et les conséquences du coup de bélier.

Ensuite, dans le deuxième chapitre nous allons présenter les méthodes d'estimation et d'évaluation du phénomène, on abordant les formules, les équations qui régissent sur ce phénomène et les méthodes de résolution de ces équations.

Dans le troisième chapitre, nous proposons des solutions adoptées pour lutter contre les dégâts causés par le coup de bélier, en précisant les avantages et les inconvénients de chaque technique de lutte ainsi que leur limite d'utilisations.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous allons étudier un cas réel d'une adduction par refoulement en dimensionnant un réservoir d'air utilisé comme un anti-bélier.

***CHAPITRE I***  
***GÉNÉRALITÉS SUR LE***  
***COUP DE BÉLIER***

## **I.1. Introduction**

Dans la plupart des conduites en charge, il se présente un phénomène extrêmement dangereux, Il cause des endommagements directement liées aux conduites et aux pompes.

Dans ce premier chapitre nous allons définir le coup de bélier et ses principales causes ainsi que ses conséquences sur les réseaux d'alimentation en eau potables.

## **I.2. Adduction**

### **I.2.1. Adduction par refoulement**

Dans une adduction par refoulement, le captage se situe à un niveau inférieur à celui du réservoir d'accumulation.

Les eaux de captage se relèvent par une station de pompage dans cette conduite de refoulement.

En vue de l'établissement de la conduite de refoulement, il y aura lieu de tenir compte de certains impératifs que l'on s'efforcera, dans la mesure du possible, de respecter.

Tout d'abord, il est important de chercher un profil en long aussi régulier que possible, établi de préférence avec une rampe toujours dans le même sens vers le réservoir d'accumulation.

Il y a lieu d'éviter, en effet, les contre-pentes qui au droit du point haut ainsi formé, peuvent donner lieu en exploitation à des cantonnements d'air plus ou moins difficiles à évacuer.

De plus, en cas d'arrêt inopiné et si les dispositions prises pour s'opposer aux effets du coup de bélier n'ont pas été suffisantes, il peut apparaître en ces points hauts, en régime transitoire, par suite de la dépression régnant dans la conduite, une cavitation entraînant une rupture de la veine liquide pouvant occasionner des éclatements de canalisation au cours de la phase de surpression qui succède.

En conséquence, la présence de points hauts sur un refoulement peut faire craindre de graves incidents d'exploitation ou peut entraîner des frais supplémentaires (construction de cheminées d'équilibre) pour y pallier. Il y a donc tout intérêt de les éviter.

Le tracé en plan sera conçu compte tenu de la possibilité de réaliser le profil en long idéal, avec des coudes largement ouverts afin d'éviter les butées importantes. A cet effet, on sera peut-être amené à emprunter un parcours qui ne suivra pas forcément les accotements de routes et sera parfois nécessaire d'acquérir des terrains particuliers.

Par ailleurs, dans un but d'économie du projet, il sera tenté d'allier au meilleur profil en long le tracé en plan le plus court. On y gagnera en trais de premier établissement, mais aussi en exploitation de la station, car les pertes de charge, donc nous le verrons la hauteur d'élévation et partant l'énergie consommée croissent avec la longueur.

Il est bien certain que les impératifs ci-dessus ne pourront pas toujours être observés en raison de la topographie des lieux.

Le tracé idéal est celui qui correspond à une rampe régulière de la station de pompage vers le réservoir.

Quand a un tracé comme le précédent succède une partie subhorizontale, c'est-à-dire à pente très faible ou légèrement descendante, des cantonnements d'air seront à craindre en A. Un dispositif anti-bélier pourra être éventuellement disposé pour lutter contre les effets de la cavitation possible en ce point. La nécessité de cet appareil découlera de l'étude du coup de bélier.

Enfin, si le tracé ne peut être accepté que moyennant une succession de points hauts, des cantonnements d'air seront à craindre en A et B et un ou plusieurs dispositifs anti-bélier pourront être éventuellement installés comme dans le cas précédent, si l'étude montre la possibilité d'une cavitation en ces points.

Dans certains cas, la topographie des lieux imposera une adduction mixte refoulement-gravitaire. Ce pourra être le cas lorsque la distance entre le point de puisage et le réservoir est importante, ce qui suppose un profil accidenté.

En conclusion, comparé à l'étude du tracé d'une conduite gravitaire, où le profil est établi selon le plan de l'adduction, le tracé en plan d'une conduite de refoulement résultera du meilleur profil qui pourra être réalisé pour cette canalisation.

### **I.2.2. Adduction gravitaire**

Dans une adduction gravitaire, le point de captage se situe à une altitude supérieure à celle du réservoir de desserte de l'agglomération.

L'adduction gravitaire se présente également lorsqu'un bassin d'accumulation intermédiaire reçoit dans un premier temps, l'eau refoulée par une usine et que dans un deuxième temps, l'eau se trouve évacuée par gravité jusqu'au réservoir de la ville, situé à un niveau plus bas. Cette disposition commandée par la configuration des lieux ou par la conception même de l'installation, constitue une adduction mixte refoulement-gravitaire. L'adduction gravitaire s'effectue, soit par aqueduc, soit par conduite forcée.

Avec les aqueducs, il est fait appel à l'écoulement libre de l'eau, c'est-à-dire sans pression, grâce à la pente ordinairement uniforme sur tout le parcours que l'on aura étudiée pour pouvoir transiter le débit voulu. Avec les conduites forcées, il est fait appel à l'écoulement sous pression.

Or, pour l'écoulement d'un même débit, les pertes de charge seront plus importantes dans une conduite forcée que dans un aqueduc à faible pente, présentant le même diamètre quand le plan d'eau correspond au passage du débit maximal.

En conséquence, si la pente disponible est très faible et surtout, s'il s'agit d'un débit important à transiter, l'aqueduc apparaîtra a priori comme étant la solution la plus indiquée [1].

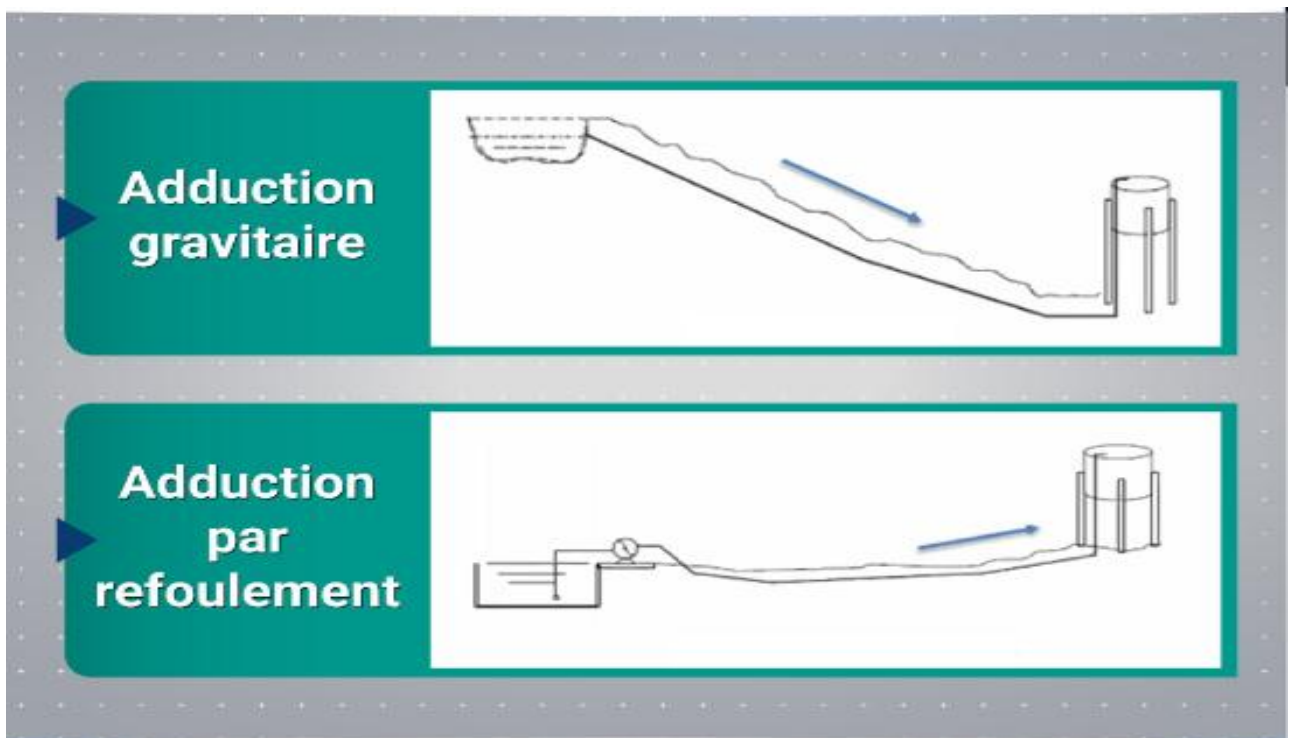


Figure I. 1 schéma explicatif des types d'adductions

### I.3. Description du phénomène transitoire

On appelle régime transitoire toute modification de l'écoulement permanent. Lorsqu'il se produit, les grandeurs physiques (débit, vitesse, pression, charge) caractérisant l'écoulement en tout point du réseau varient en fonction du temps. Cette modification de l'écoulement initial engendre des variations brusques de la pression dans le réseau donnant naissance au phénomène du coup de bélier [2].

Quand le régime d'écoulement dans une conduite fermée se trouve modifié brusquement, il se produit une série d'ondes de pressions, qui se propagent sur toute la longueur de la conduite et qui s'amortissent progressivement en raison des pertes d'énergie dues aux forces de frottement. Ainsi toute phase d'opération produisant des modifications de la pression dynamique du fluide ou plus précisément créant des trains d'ondes de pressions peut présenter un risque de « coup de bélier ». Les trains d'ondes se réfléchissent aux extrémités et se propagent dans un sens puis dans un autre. Ces trains d'ondes successifs créent des pressions et des dépressions suivant leur sens de propagation et suivant les différents points considérés de la conduite. Les variations de pression qui s'ajoutent algébriquement à la pression normale qui règne peuvent en résulter des surpressions qui peuvent devenir dangereuses, conduisant à la formation d'occlusions gazeuses dont la résorption peut amplifier dangereusement l'onde de surpression au moment de son retour. L'écoulement transitoire est dit unidimensionnel quand les composantes verticale et transversale de la vitesse par rapport à la composante longitudinale sont négligeables [3].

#### **I.4. Coup de bélier**

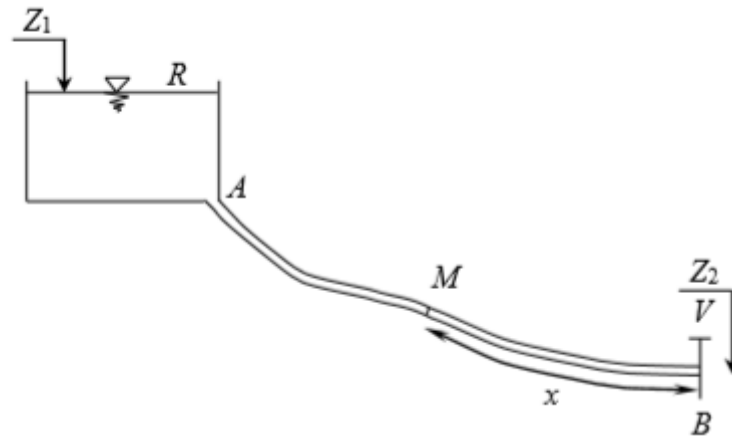
##### **I.4.1. Définition du phénomène de coup de bélier**

Le coup de bélier étant un cas particulier du régime transitoire, c'est un phénomène oscillatoire qui se manifeste dans les conduites en charge à écoulement gravitaire ou par refoulement. Il est caractérisé par une onde de pression, positive (surpression) ou négative (suppression), provoquée par une variation du régime hydraulique et se propageant dans le milieu constitué par l'eau et par la conduite qui la contient. Cette onde est caractérisée par une vitesse de propagation ou célérité, qui ne dépend pas en première approximation de l'amplitude de l'onde lorsque celle-ci est faible. Elle se réfléchit sur les obstacles, et en particulier sur les extrémités de la conduite, en changeant de signe ou non suivant les conditions physiques qui y sont rencontrées [4].

Supposons une canalisation fonctionnant en régime permanent et comportant en un point une vanne V (Figure.I.2).

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 "coup de bélier"



**Figure I. 2** Schéma explicatif du phénomène du coup de bélier

Autrement dit, pour une différence de cote ( $Z_1 - Z_2$ ) constante et la vanne complètement ouverte, il s'établit un débit  $Q_0$  permanent. Supposons qu'à l'instant  $t = 0$  nous fermons la vanne instantanément, la colonne liquide lancée à la vitesse  $V_0$  va trouver la vanne fermée et sera obligée de s'arrêter. Ceci aura quatre effets combinés :

- Annulation de la vitesse.
- Augmentation de la pression.
- Dilatation (éventuellement allongement) de la conduite dans les limites élastiques.
- Compressibilité du liquide [5].

#### I.4.2. Causes du coup de bélier

Les principales causes sont :

- Fermeture ou l'ouverture instantanée (trop rapide) d'un robinet vanne placé au bout d'une conduite d'adduction.
- Arrêt brutal par disjonction inopinée d'un ou de plusieurs groupes de pompes, alimentant une conduite de refoulement débitant dans un réservoir.
- Démarrage d'un groupe d'électropompes à vanne ouverte.
- Démarrage ou arrêt d'une pompe débitant dans une conduite déjà alimentée.
- La mise en marche ou la modification de l'opération d'une turbine.
- Variation d'un plan d'eau relié à un réseau en charge.

- Vibration des accessoires de contrôle comme les vannes.
- Vidange ou remplissage inadéquat de la conduite en charge.
- Implosion des poches d'air suite à une cavitation.
- Modification de la vitesse angulaire d'une pompe.

Le phénomène du coup de bélier est caractérisé principalement par l'apparition de surpressions et/ou de dépressions qui peuvent atteindre des grandeurs assez considérables, ce qui aura pour conséquence la rupture des conduites soit par éclatement ou aplatissement [6].

### **I.4.3. Conséquences du coup de bélier**

Potentiellement, le coup de bélier peut poser de graves conséquences pour les installations hydrauliques. Les risques et avaries causés par ce régime transitoire sont de plusieurs ordres nous citons :

#### **I.4.3.1. Surpressions excessives**

Ces surpressions conduisent à des déformations permanentes à la rupture des conduites, ainsi que ses organes hydrauliques de contrôle, déboîtement de joints, fuites massives et désordres d'infrastructures. Ceci peut arriver si la pression totale, c'est-à-dire la pression en régime permanent majorée de la valeur de surpression due au coup de bélier dépasse la pression maximale admissible des canalisations.



**Figure I. 3** Joint de dilatation détruit par un coup de bélier [7]

#### **I.4.3.2. Très basses pressions**

Elles peuvent causer l'aplatissement des conduites et aspiration des joints, contamination du fluide si en un point de la conduite la pression atteint le vide barométrique

---

(-10 m.c.e), alors une cavitation (libération de gaz dissous + vapeur d'eau) se produirait, ce qui donne lieu à une séparation de la veine liquide. En ayant un profil en long tourmenté, lors de la phase de surpression, la poche de vapeur se résorbe engendrant une pression atteignant jusqu'à quatre fois la pression de service. Donc, c'est un risque à éviter à tout prix.

#### **I.4.3.3. Inversion de l'écoulement**

L'inversion du sens d'écoulement conduit à un fonctionnement en dévirage de la pompe, si cette dernière est démunie de clapet de retenue (comme c'est le cas de certaines grandes stations de pompage), causant ainsi des dégâts au groupe motopompe. Notons aussi que cette situation de fonctionnement entraînerait la vidange des réservoirs de stockage et d'accumulation.

#### **I.4.3.4. Mouvements et vibrations des conduites**

Elles ont pour conséquence la surcharge et sollicitation dynamique des supports d'ancrage et butées conduisant par conséquent à la rupture de ces derniers et de la conduite elle-même. Ce phénomène se manifeste généralement quand la conduite entre en état de résonance [8].



**Figure I. 4** Effet d'un coup de bélier sur une conduite. [9]

**I.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons abordé brièvement certaines notions relié au phénomène du coup de bélier qui vont nous initier et nous aideront à le mieux comprendre dans les chapitre suivant.

**CHAPITRE II**  
***ÉTUDE THÉORIQUE DU***  
***COUP DE BÉLIER***

### II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va étudier la célérité d'onde générée par le coup de bélier et sa propagation au long de la conduite, en tenant compte de tous les paramètres qui peuvent être rencontrés ainsi que les pertes de charges.

Cette étude est basée sur les équations d'Allievi d'une part, et la méthode graphique de Bergeron d'autre part.

### II.2. Généralités sur les ondes

L'étude théorique de la propagation d'ondes de pression d'amplitudes infiniment petites dans des conduits unidimensionnels à section constante (tuyaux), se ramène à la recherche des solutions d'équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants, laquelle conduit à des combinaisons de fonctions sinusoïdales. Il n'en est plus de même en général lorsque les équations de propagation, tout en restant linéaires, cessent d'être à coefficients constants et cette circonstance apparaît déjà dans la théorie des pavillons (conduits unidimensionnels dont la section varie avec l'abscisse). Dans ce dernier cas, des solutions propagées peuvent encore exister, mais, si elles sont périodiques par rapport au temps, elles ne sont plus qu'oscillatoires par rapport à l'abscisse (sans période spatiale définie), ce qui revient à dire que pour de telles ondes, la longueur d'onde varie à chaque période temporelle au cours de la propagation. L'auteur étudie de telles ondes, qu'il appelle ondes propagées oscillatoires. Il étudie leurs conditions de propagation, ainsi que les conditions dans lesquelles elles dégénèrent en ondes sinusoïdales propagées. Ces ondes propagées oscillatoires peuvent présenter une fréquence de coupure, et l'étude des conditions dans lesquelles l'oscillation spatiale cesse conduit l'auteur à définir les conditions nécessaires et suffisantes d'existence d'une fréquence de coupure dans la théorie des pavillons, qu'il s'agisse d'ondes propagées sinusoïdales ou oscillatoires [10].

#### II.2.1. Conservation de la masse pour un écoulement dans lequel se propage une onde

Soit un écoulement permanent dans une conduite. Suite à la fermeture brutale d'une vanne, un coup de bélier d'ondes se produit : une onde de célérité prend naissance au niveau de la vanne et se propage vers l'amont. En assimilant l'onde à une surface de discontinuité, la conduite se divise en deux domaines distincts, comme illustré sur la Figure (II.1). Le domaine 1 se situe entre l'extrémité aval de la conduite (la vanne fermée située sur la gauche de la Figure II.1) et le front de l'onde. Dans ce domaine, la vitesse de l'écoulement est nulle ;

La masse volumique du fluide est  $\rho + d\rho$  (II.1)

La section de la conduite est  $s + ds$  (II.2)

Le domaine 2 est constitué de la partie complémentaire de la conduite. Dans la mesure où le domaine 2 n'a pas encore été atteint par l'onde, les conditions suivantes y règnent :

La vitesse de l'écoulement vaut  $U$  ;

La masse volumique de l'eau,  $\rho$  ;

La section de la conduite,  $S$  [1]

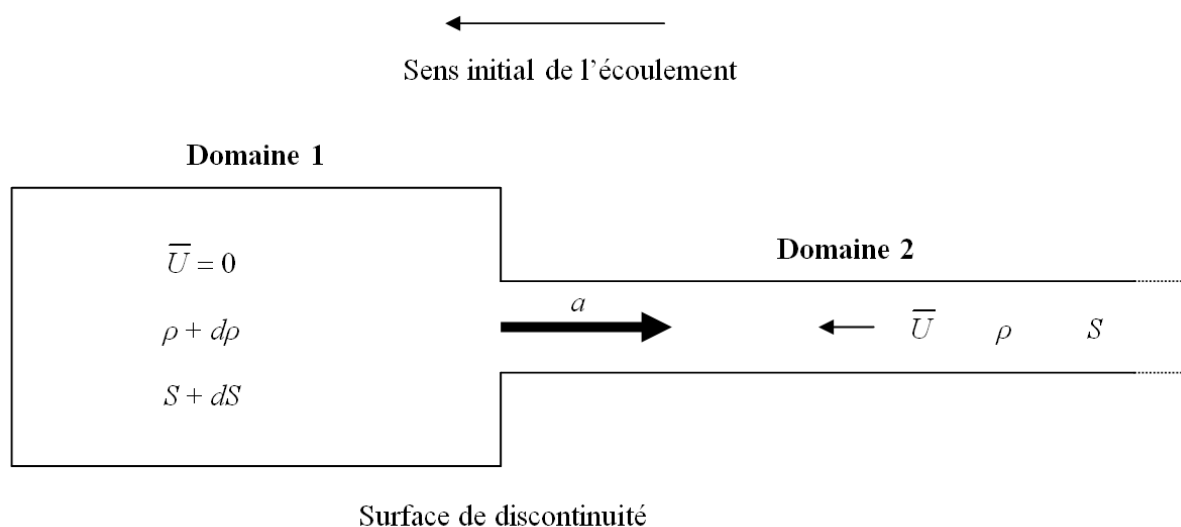


Figure II. 1 Schéma de la propagation d'une onde

### II.2.2. Oscillation en masse ou montée subite

Ce terme se réfère à des situations d'écoulements instationnaires, où le changement initial du mouvement du fluide est lisse et où le temps pour que les conditions importantes imposées changent est lent, comparé avec le temps mis par une onde de pression pour passer à travers la colonne de fluide. Dans les stations de pompes cette situation peut être provoquée par exemple, par l'installation des chambres à air (pour protéger la ligne de charge) ou des réservoirs de montée subite (pour protéger la conduite d'aspiration). Dans ces systèmes les effets élastiques sont petits comparés aux effets d'inertie de la colonne liquide. Un changement du mouvement régulier du fluide causera des oscillations de masse avec un long temps d'oscillation. Le comportement de la colonne liquide dans un système de montée subite peut être évalué en utilisant la théorie de la colonne rigide (théorie d'écoulement incompressible). La théorie de la colonne rigide considère que toute la colonne du fluide en s'accélération ou en ralentissant à la même valeur dans toute sa longueur et se comporte comme un solide incompressible et considère le système de conduites comme non élastique.

### **II.2.3. Oscillations de la pression ou résonance**

Le terme de résonance se réfère à un phénomène oscillatoire, dans les systèmes de conduites dans lesquels l'amplitude des oscillations instationnaires s'accumule avec le temps jusqu'à ce qu'une défaillance se produise ou jusqu'à ce que l'écoulement oscillatoire stationnaire atteigne une amplitude considérable. La résonance se produit seulement dans des périodes normales, fondamentales ou harmoniques d'un système. Il doit y avoir un mécanisme imposé qui produit un afflux d'énergie pendant chaque cycle par des oscillations d'écoulements ou de pressions induites. L'amplitude des oscillations excitées peut être très petite, mais si la fréquence rencontre une des périodes normales du système, il se produit une amplification des perturbations et une résonance rapide. Plusieurs excitations sont bien connues par exemple oscillation de la vanne automatique de contrôle d'écoulement ou de pression, sortie de palpitation d'une pompe à mouvement alternatif, fonctionnement d'une turbopompe dans la partie instable de la courbe caractéristique de la pompe, vibration des ailettes de guidage. Les études sur les écoulements oscillatoires peuvent être effectuées par la méthode d'impédance, qui utilise des fonctions de transfert pour la pression, l'écoulement, et l'impédance. Cette méthode comporte l'utilisation de l'arithmétique complexe

### **II.2.4. Oscillations de la structure**

Sous les conditions de l'écoulement transitoire des effets alternatifs entre le fluide et le système de conduites peuvent causer les mouvements axiaux et radiaux instables de la structure. Des forces dans la fondation peuvent se produire selon les conditions statiques du système de conduites, qui dépassent les forces durant les conditions d'écoulements stationnaires. En particulier, les fluctuations de l'oscillation stationnaire peuvent être dangereuses.

### **II.2.5. Relation entre l'onde élastique et l'oscillation en masse**

Les variations de régime dans un système sous pression peuvent adopter deux comportements différents. Si le système est fermé, c'est-à-dire qu'il ne contient pas d'endroit où il est possible d'accumuler de l'eau en grande quantité, nous observerons une variation locale importante de la pression, c'est le coup de bélier par onde élastique. Dans le cas où l'eau peut être accumulée dans un réservoir ou une cheminée d'équilibre nous parlerons plutôt d'oscillation en masse. Donc les régimes transitoires en charge peuvent être divisés en deux

catégories principales (Les facteurs déterminant la célérité de la propagation de l'onde du coup de bélier sont :

- La vitesse d'écoulement en régime initial (généralement le régime est permanent) dans la conduite.
- Le module d'élasticité du matériau constituant la conduite.
- Le module d'élasticité de l'eau.
- Le diamètre intérieur de la conduite.
- L'épaisseur des parois de la conduite.
- La durée de fermeture de la vanne.
- La longueur de la conduite.

### **II.3. Etude des ondes élastiques**

#### **II.3.1. Description d'un guide d'ondes élastiques**

Lorsque le milieu de propagation considéré est borné dans au moins une direction et invariant dans une direction perpendiculaire à la première, ce dernier constitue ce que l'on appelle un guide d'ondes. Les ondes vont subir des réflexions successives sur la frontière du guide et engendrer des ondes guidées. La direction de propagation de ces ondes s'appelle l'axe de propagation et correspond à une direction d'invariance du milieu. En élastodynamique, il existe donc deux types de géométrie susceptibles de guider les ondes, qui sont les cylindres et les plaques. Le cylindre est obtenu par extrusion d'une surface quelconque fermée (non nécessairement circulaire), la résonance transverse s'effectuant dans la section et la propagation dans la direction d'extrusion. Dans le cas de la plaque, la résonance a lieu dans l'épaisseur et la propagation peut avoir lieu dans n'importe quelle direction perpendiculaire à l'épaisseur. Précisons que lorsque nous parlons de direction d'invariance, cela signifie que aussi bien la géométrie que la composition du milieu de propagation doit rester invariante. Ainsi, un guide peut être hétérogène si cette hétérogénéité est constante dans la direction de propagation. De même, la condition sur le bord du guide doit rester la même tout le long du guide.

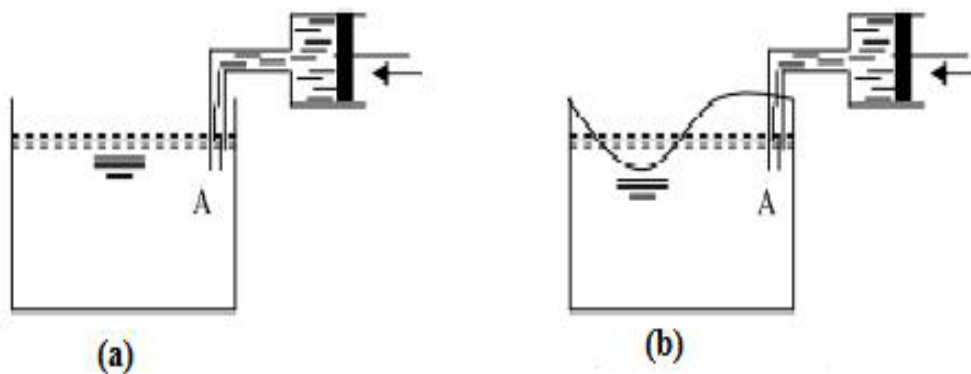
#### **II.3.2. Présentation des ondes des écoulements transitoires**

Les liquides sont considérés comme étant incompressibles. Mais dans les milieux réels là où nous avons de rapides variations de pression ils présentent une certaine compressibilité dont nous devons tenir compte. Quand un milieu matériel subit des variations de pression

d'origine quelconque, nous obtenons une propagation de la perturbation dans toutes les directions. Cette vitesse de propagation n'est pas infinie mais :

- \_ Si les variations de pression sont lentes nous admettons qu'elles se distribuent à travers tout le milieu offert immédiatement.
- \_ Si au contraire les variations de pression sont rapides, ici nous aurons une répartition des pressions dans le milieu non uniforme, à chaque instant. Naturellement les expressions variations lentes ou rapides n'ont pas de signification absolue, elles n'ont de sens que si nous considérons simultanément les dimensions du milieu affecté par l'onde de coup de bélier et la célérité de ces ondes.

Pour illustrer ces variations, nous considérons un réservoir contenant de l'eau au repos et nous supposons qu'au moyen d'une pompe par exemple, en un point A de la surface libre nous pouvons ajouter ou retirer une certaine quantité de l'eau comme dans la figure



**Figure II. 2** Schéma d'illustration des variations de pressions

(a) Pompe à rythme lent.

(b) Pompe à rythme rapide.

- \_ Si le rythme de la pompe est lent, comme nous pouvons le voir la surface libre de l'eau s'élève ou s'abaisse lentement tout en restant pratiquement horizontale à chaque instant.
- \_ Si le rythme de la pompe est rapide, nous constatons au contraire une intumescence naître en A et se propager à la surface libre, celle-ci ne restera plus horizontale.

### II.3.3. Propagation des ondes des écoulements transitoires

La propagation d'une onde des écoulements transitoires en charge est un processus de transport d'énergie. Ce sont les phénomènes de compressibilité qui permettent d'expliquer la

propagation des ondes élastiques dans les milieux matériels. La compressibilité d'un milieu fluide, peut être définie au moyen de son module d'élasticité  $e$  donné par la relation suivante :

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

Ou bien :

$$\frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{d\rho}{d\rho} \quad (\text{II.4})$$

Entre la variation relative  $\frac{dp}{\rho}$  la masse et la variation  $d\rho$  qui la produit nous pouvons arriver à cette expression :

$$\varepsilon = -\frac{dp}{\frac{dw}{w}} \quad (\text{II.5})$$

**$dw$**  : étant la variation du volume  $w$  produite par une variation de la pression  $dp$ . Le signe moins est dû à la diminution volume spécifique engendré par l'augmentation de la pression.

Nous remarquons que le rapport donné par la formule  $\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0$  ;  $\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0$  ;  $\frac{\partial P}{\partial t} \neq 0 \dots$  a les dimensions du carré de la vitesse du son dans le fluide considéré.

$$c^2 = \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (\text{II.6})$$

Ou :

$$c = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \quad (\text{II.7})$$

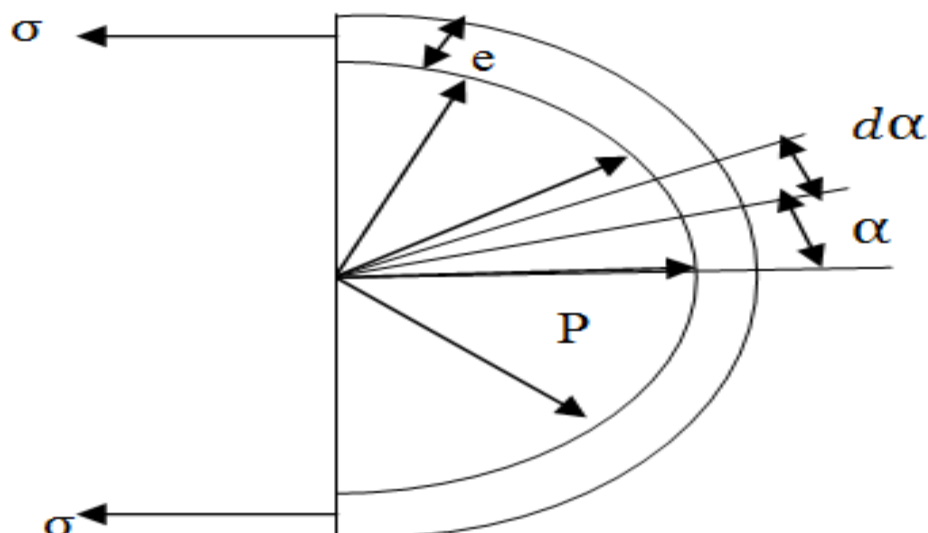
$c$  : étant la vitesse du son dans l'eau.

Nous introduirons également le module de compressibilité  $K$  qui est égal à l'inverse de  $\varepsilon$

$$K = \frac{1}{\varepsilon} \quad (\text{II.8})$$

Sous l'action de la pression  $p$ , la matière de la canalisation est soumise à une contrainte  $\sigma$ .

Soit une conduite de longueur  $L$  et d'épaisseur  $e$  soumise à la pression  $p$ .



**Figure II. 3** Schéma de dilatation de la conduite

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p \cos \alpha ds - 2\sigma Le = 0, \text{ puisque: } ds = Lr d\alpha \quad \text{Équation d'équilibre} \quad (\text{II.9})$$

Nous aurons :

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p Lr \cos \alpha d\alpha - 2\sigma Le = 0 \quad (\text{II.10})$$

D'où

$$\sigma = \frac{pD}{2e} \quad \text{Le résultat du bilan des forces} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

D : diamètre de la conduite.

e : épaisseur de la paroi

La variation de la pression dp entraîne une variation de la contrainte d  $\sigma$  nous obtenons alors :

$$d\sigma = \frac{D}{2e} dp \quad (\text{II.12})$$

L'augmentation de la contrainte d  $\sigma$  c'est un effort qui entraîne une variation du diamètre donc une déformation qui est évaluée par la loi de Hooke.

$$d\sigma = E \frac{dD}{D} \quad (\text{II.13})$$

E : étant le module d'élasticité de la paroi (module de Young).

Comme nous pouvons le remarquer nous avons ici la dilatation transversale et pas la manifestation de la dilatation longitudinale.

Les modules  $\epsilon$  et E sont liés par la relation :

$$\varepsilon = \frac{E}{3(1-2\sigma')} \quad (\text{II.14})$$

Où :  $\sigma'$  est le coefficient de Poisson, il est toujours inférieur à 0,5 et qui dépend du solide envisagé.

L'accroissement du diamètre d'une valeur de  $dD$  entraîne un accroissement de la section  $ds$  tel que:

$$\frac{ds}{s} = 2 \frac{dD}{D} \quad (\text{II.15})$$

Donc :

$$\frac{ds}{s} = \frac{2dD}{D} = \frac{D}{eE} dp \quad (\text{II.16})$$

Les phénomènes de compressibilité et de dilatation nous permettent d'expliquer la propagation des ondes de coup de bélier dans les milieux matériels et que le postulant déjà annoncé associé à ces phénomènes suffit pour trouver, sans aucun autre appareil mathématique les lois fondamentales des variations de régimes en faisant appel uniquement aux principes élémentaires de la mécanique physique [2].

#### II.4. Équations d'Allievi

L'application du théorème de la quantité de mouvement à un tronçon de conduite horizontal, et en admettant que les pertes de charge sont nulles, permet d'aboutir facilement à la première équation du mouvement) équation de la dynamique:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.17})$$

Où  $U$  est la vitesse

$h$  : la cote piézométrique dans la conduite; ( $h = \frac{p}{\omega} + z$ )

$x$  : la variable, mesurée le long de l'axe de la conduite.

L'équation de continuité s'écrit:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{g}{c^2} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.18})$$

Dérivant les équations par rapport à  $x$  et par rapport à  $t$ , on obtient le système d'équations différentielles suivant:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{II.19})$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{II.20})$$

Connu sous le nom de système de l'équation des cordes vibrantes. L'intégration du système précédent conduit aux équations suivantes:

$$h - h_0 = F\left(t - \frac{x}{c}\right) + f\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (\text{II.21})$$

$$U - U_0 = \frac{g}{c} \left[ F\left(t - \frac{x}{c}\right) + f\left(t + \frac{x}{c}\right) \right] \quad (\text{II.22})$$

$F$  et  $f$  sont deux fonctions, dont l'expression dépend de la loi de variation des débits et des conditions aux limites.

L'interprétation de ces équations est facile, si l'on admet qu'un observateur se déplace le long de la conduite, dans le sens de l'écoulement, à la vitesse  $c$  ; l'espace parcouru par cet observateur sera  $x = ct + b$ , d'où  $t - x/c = -b/c = \text{constante}$ .

Dans ces conditions, pour cet observateur, si  $(t - x/c)$  est constant, on aura également  $F'(t - x/c)$  constant. Considérons un autre observateur qui se déplace dans le sens contraire à celui de l'écoulement, à une vitesse  $-c$  ; pour cet observateur, on aura suivant un raisonnement identique,  $f = \text{constante}$ .  $F$  et  $f$  représentent donc deux ondes, la première s'acheminant dans le sens de l'écoulement et la seconde s'acheminant dans le sens contraire.

Dans la plupart des cas pratiques, la fin de la conduite est un réservoir,  $R$ , dont les dimensions sont suffisamment grandes par rapport aux conduites, de telle sorte que la cote de l'eau dans ce réservoir ne se modifie pas, durant le phénomène du coup de bélier. La courbe caractéristique du réservoir, c'est-à-dire la courbe qui relie, dans le réservoir au débit écoulé dans la conduite, est alors  $h = h_0$  (constante). Autrement dit, au point  $B$  ( $x = l$ ), on aura toujours  $h = h_0$ , d'où, pour la première équation,

$$F\left(l - \frac{l}{c}\right) = -f\left(t + \frac{l}{c}\right) \quad (\text{II.23})$$

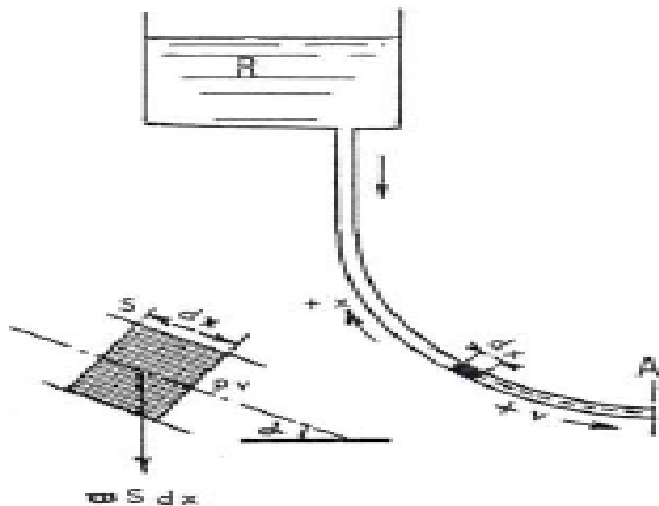
Cette équation prouve que l'onde  $F$  est totalement réfléchié dans le réservoir donnant origine à une onde  $J$  égale et de signe contraire, comme l'avait d'ailleurs montré l'analyse qualitative du phénomène [11].

## II.5. Etude sommaire du coup de bélier

Soit (la figure II.4) un réservoir  $R$  et une conduite sous pression issue de ce réservoir et susceptible d'être obturée en  $A$  par un robinet-vanne.

L'écoulement s'effectue de  $R$  vers  $A$ .

Analytiquement, appliquons le théorème des projections sur l'axe de la conduite des quantités de mouvement d'une tranche d'eau d'épaisseur  $dx$ . La projection sur cet axe, dont le sens positif est donné par  $Ax$ , des forces extérieures, comprend :



**Figure II. 4** Conduite issue d'un réservoir avec un robinet en A

- \_ La composante du poids :

$$\omega S dx \sin \alpha$$

- \_ La pression sur une face de la tranche  $dx$  :

$$pS$$

- \_ La pression sur l'autre face :

$$-\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} dx\right) S$$

Supposons  $S$  constant sur toute la longueur de la conduite. Puisque  $m = \frac{\omega}{g} S dx$ , nous arrivons à l'équation suivante, si  $v$  est la vitesse de l'eau comptée positivement dans le sens d'écoulement,

$$\frac{dv}{dt} = g\left(\sin \alpha + \frac{dz}{dx}\right) \tag{II.24}$$

Avec :

**X** : angle d'inclinaison de la tranche d'eau considérée

**Z** : pression dans la conduite au point considéré :

$$z = \frac{p}{\omega} \tag{II.25}$$

Si l'eau est considérée incompressible et la conduite non élastique, on arrive à une solution approchée du problème. On a affaire alors à une oscillation en masse dont le principe sera utilisé plus loin pour le calcul simple de petites installations anti-bélier sur la conduite de refoulement.

Mais, en est fait il faut tenir compte d'une compressibilité de l'eau et de l'élasticité de la conduite. Il n'est plus question d'oscillation en masse mais d'un régime dit transitoire, où la pression et le débit varient à la fois dans le temps et en chaque point de la conduite.

Le calcul conduit alors à des équations étudiées par ALLIEVI, d'une résolution numérique fastidieuse et pouvant se mettre sous la forme :

$$b = F\left(t - \frac{x}{\alpha}\right) + f\left(t + \frac{x}{\alpha}\right) \quad (\text{II.26})$$

$$-\alpha \frac{(v-v_0)}{g} = F\left(t - \frac{x}{\alpha}\right) - f\left(t + \frac{x}{\alpha}\right) \quad (\text{II.27})$$

Où

$b$  : est la valeur du coup de bélier,

$F$  : et étant des signes fonctionnels.

Imaginons un observateur mobile, se déplaçant à la vitesse constante selon la loi:

$$x = at + C^{te} \quad (\text{II.28})$$

D'après les conventions ci-dessus,  $x$  étant positif dans le sens contraire à l'écoulement, d'observateur remonte le courant, et, d'après (II.28).

$$\left(t - \frac{x}{a}\right) = C^{te} \quad (\text{II.29})$$

En conséquence, pour cet observateur,  $F\left(t - \frac{x}{a}\right)$  représente toujours la même valeur, où qu'il se trouve.  $F$  caractérise donc une onde qui se propagerait dans la conduite avec une vitesse  $a$ .

Nous verrions, de même, que pour un observateur se déplaçant à une vitesse  $a$ , c'est-à-dire dans le sens du courant,  $f\left(t + \frac{x}{a}\right)$  représenterait une onde qui se propagerait en sens inverse de la première.

ALLIEVI donne pour la vitesse  $a$  de l'onde, ou célérité, la valeur suivante:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K \frac{D}{e}}} \quad (\text{II.30})$$

Où

$D$  : diamètre intérieur de la conduite, en mètres,

$e$  : épaisseur au tuyau, en mètres,

$K = 0,5$  (acier), 1 (fonte), 4,4 (amiante-ciment), 5 (plomb, béton).

Pour le béton armé ( $K = 0,5$  avec une épaisseur fictive)

Où

$e_b$  Épaisseur du béton,

$e_m$  Épaisseur équivalente à la section totale du métal dans une section normal de tuyau

### II.5.1. Représentation graphique du phénomène

En additionnant et en retranchant membre à membre les équations (II.33) et (II.34) ci-dessus, on obtient :

$$b - \frac{a}{g}(v - V_0) = 2F \quad (\text{II.31})$$

$$b + \frac{a}{g}(v - V_0) = 2f \quad (\text{II.32})$$

Appelons :

$S$  : la section de la conduite,

$Q_0, V_0$  : Le débit et la vitesse en régime permanent,

$q, v$  : le débit et la vitesse à un instant quelconque.

Les équations ci-dessus peuvent s'écrire comme suit

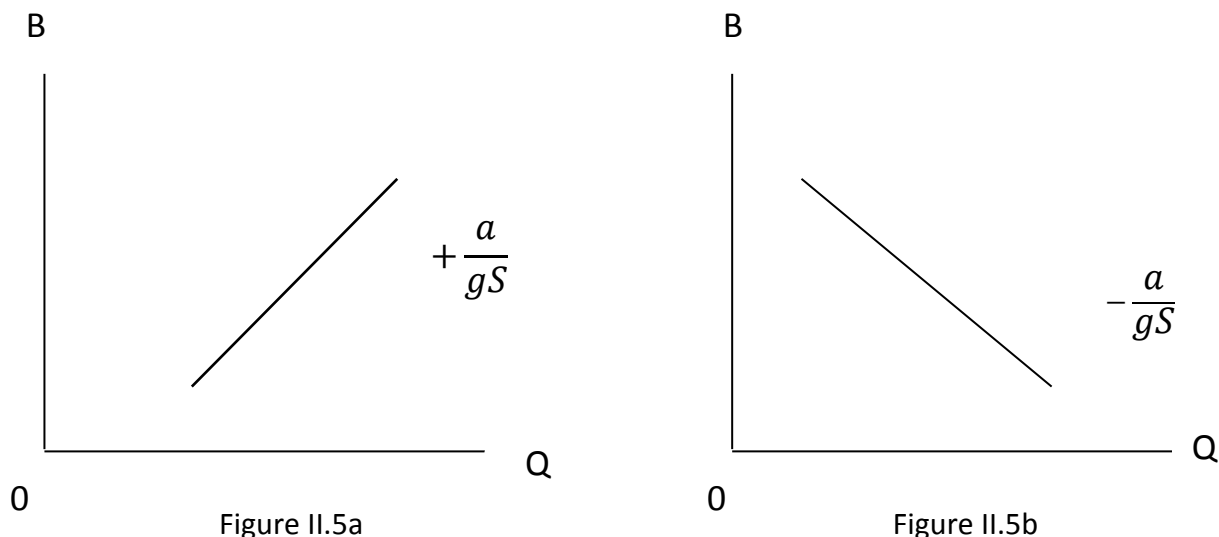
$$b = \frac{a}{gS}(q - Q_0) + 2F \quad (\text{II.33})$$

$$b = \frac{a}{gS}(q - Q_0) = 2f \quad (\text{II.34})$$

Or, nous venons de voir que, pour un observateur se déplaçant en sens inverse du courant, à la vitesse  $a$ , la valeur de  $F$  restait toujours la même.

En conséquence, si l'on rapporte  $g$  et  $b$  a deux axes  $OB$  et  $OQ$ . (II.33)

Pour une valeur de  $F$ , est l'équation d'une droite de pente  $+\frac{a}{gS}$



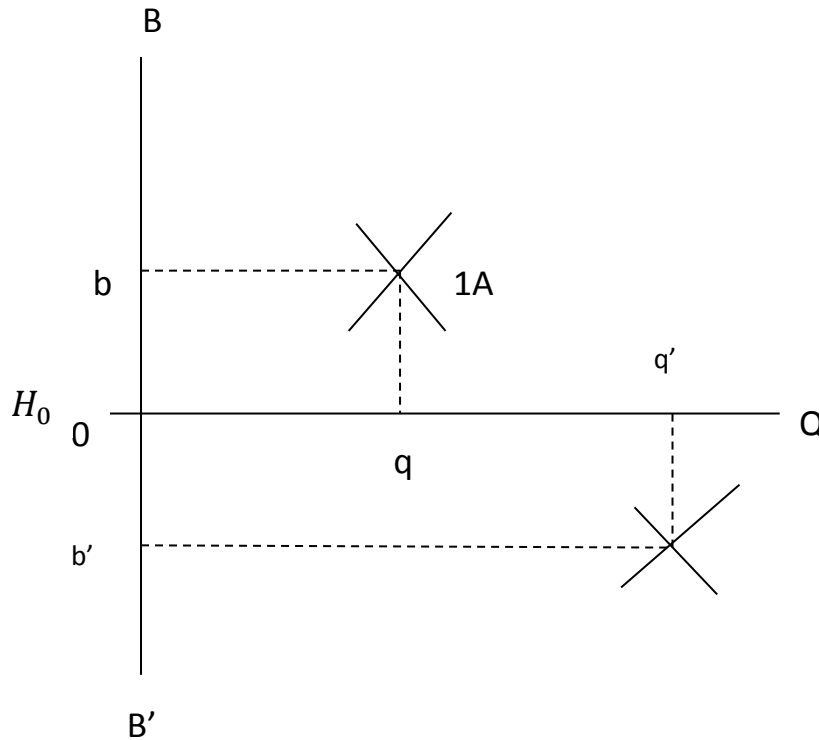
**Figure II. 5** Caractéristiques de la conduite en régime transitoire

valeur de  $f$  reste constante et, dans le même système de coordonnées, (II.34) pour une valeur de  $f$  est l'équation d'une droite de pente.  $-\frac{a}{gS}$  (fig II.5b)

Cette représentation est la base de la méthode graphique de BERGERON qui exprime que, pour un observateur se déplaçant à la vitesse  $a$  des ondes parti d'un point donné à un temps donné où les caractéristiques  $Q_0H_0$  du régime sont connues, la pression et le débit sont liés par une loi linéaire.

Si on imagine alors deux observateurs partant à la rencontre l'un de l'autre des extrémités d'un tronçon de conduite, ils verront les points du régime se déplacer sur des droites  $+\frac{a}{gS}$  pour l'un et pour l'autre  $-\frac{a}{gS}$  de sorte qu'à leur rencontre, c'est-à-dire à l'intersection des droites, ils ne pourront constater que le même débit et la même pression.

On a coutume de désigner ce point par un chiffre et une lettre (ex :1A) qui donnent les caractéristiques  $qh$  du régime au temps pour le point A (fig II.6).



**Figure II. 6** Principe de la détermination du régime au temps 1 pour le point A

L'horizontale passant par O n'est autre que celle correspondant à la pression statique  $H_0$ . Le point A, qui est au-dessus de  $H_0$  correspond à une sur pression et nous avons

Pression totale dans la conduite =  $H_0 + Ob$

S'il était au-dessous de  $H_0$  il correspondrait à une dépression et nous aurions pression restante dans la conduite =  $H_0 - Ob'$

Pour tracer une droite  $+ \frac{a}{gS}$  il suffira de connaître le point figuratif du régime correspondant à l'instant et au lieu de départ de l'observateur mobile, par exemple au moment où l'on passe du régime permanent au régime transitoire, C'est-à-dire le point  $Q_0 H_0$  du régime permanent.

En ce qui concerne le tracé pratique de cette droite, il faut tenir compte de l'échelle des b et des q.

Exemple : conduite  $\varnothing = 0.600\text{m}$  ,  $S = 0.2827 \text{ m}^2$  ,  $a = 950 \text{ m/s}$

$$\frac{a}{gS} = \frac{950}{9.81 \times 0.2827} = 342.6 \quad \text{dimension TL}^{-2}$$

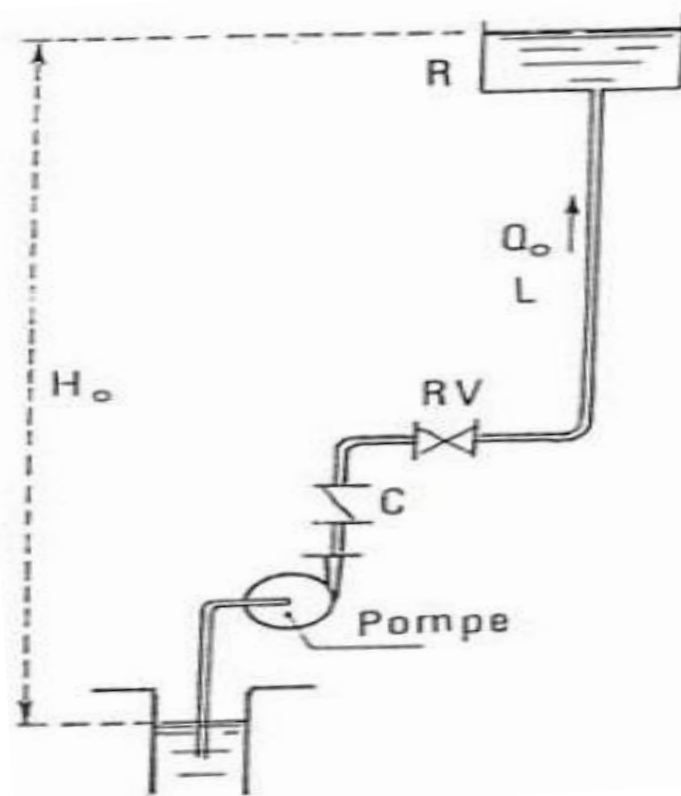
$$\frac{a}{gS} = \frac{b}{q} = 342.6$$

Puisque  $\frac{b}{q}$  a aussi pour dimension  $TL^{-2}$  on peut écrire :

$$\frac{b}{q} = \frac{342.6\text{m}}{1\text{m}^3/\text{s}} \text{ de meme dimension}$$

Si l'échelle des  $b$  est graduée à raison de 1 cm pour 2 m, 342.6 seront représentées par 171.3 cm, si l'échelle des débits est graduée à raison de 1 cm pour 50 m<sup>3</sup>/s ou 0.0139 m<sup>3</sup>/s, 1 m<sup>3</sup>/s sera représenté par 72 cm. Donc, la pente de  $\frac{a}{gS}$  sera  $\frac{171.3}{72} = 2.38$  à l'échelle de l'épure.

Au lieu de considérer deux observateurs, nous pouvons n'en considérer qu'un seul qui ferait la navette entre les extrémités du tronçon étudié et qui constaterait, à chaque fois, l'état qh du régime en chacun de ses points extrêmes. Nous retrouvons ainsi les droites  $+\frac{a}{gS}$  et  $-\frac{a}{gS}$  puisque le parcours s'effectue dans les deux sens.



**Figure II. 7** cas de la conduite de refoulement

Le point de rebroussement des droites  $+\frac{a}{gS}$  est alors donné par l'intersection de l'une de ces droites avec une autre caractéristique telle qu'une courbe caractéristique de fermeture de vanne, un lieu de débit nul (verticale OB), un lieu de coup de bélier nul (horizontale OQ).

**II.5.2 Analyse physique du phénomène du coup bélier en refoulement**

Après avoir donné une vue mathématique du phénomène, nous en donnerons une analyse physique en nous plaçant dans le cas d'une conduite de refoulement dont le débit  $Q_0$  se trouve brusquement arrêté à la suite d'une disjonction. Nous admettrons une élasticité de la conduite et une compressibilité de l'eau (fig II.7).

Supposons la colonne liquide constituée de tranches infiniment rapprochées. Survient l'arrêt brusque et instantané. Quatre phases peuvent alors être envisagées.

**1er phase :** Par suite de son inertie, la colonne va poursuivre son chemin ascendant, mais, n'étant plus alimentée, il va en résulter, derrière elle une dépression l'eau se déprime. Chaque tranche considérée de la conduite se contracte successivement par diminution élastique du diamètre. Une onde de dépression prend naissance au départ de la pompe et se propage jusqu'au réservoir à une vitesse, ou célérité désignée comme ci-dessus par  $a$ .

Si la distance entre la pompe et le réservoir est  $L$ , le temps mis par cette onde pour atteindre le réservoir est  $\frac{L}{a}$ . Au bout de ce temps, la conduite est en dépression sur toute sa longueur et l'eau est alors immobile.

**2ème phase :** Par suite de son élasticité, la conduite reprend son diamètre primitif et, cela de proche en proche, en considérant les tranches successives à partir du réservoir. L'eau revient alors dans la conduite et au bout d'un nouveau temps  $\frac{L}{a}$  c'est-à-dire à  $\frac{2L}{a}$  depuis l'origine du phénomène, toute l'eau est redescendue mais va se trouver arrêtée par le clapet de la pompe, qui, entre temps, s'est fermé.

**3ème phase :** En raison de cet arrêt, la 1er tranche en contact avec le clapet va se trouver comprimée, entraînant une dilatation de la conduite.

Les tranches qui suivent vont subir le même sort avec les mêmes conséquences pour la conduite, l'onde de pression gagnant de proche en proche, dans le sens pompe-réservoir, toute la canalisation. Au bout d'un nouveau temps  $\frac{L}{a}$ , c'est-à-dire à  $\frac{3L}{a}$  depuis l'origine, toute la conduite sera dilatée avec une eau surpressée, immobile.

**4ème phase :** Grâce à l'élasticité de la conduite, celle-ci, agissant à la manière d'un ressort, reprend de proche en proche, à partir du réservoir et en allant vers la pompe, son diamètre primitif les tranches d'eau successives reprenant leurs dimensions premières. Au

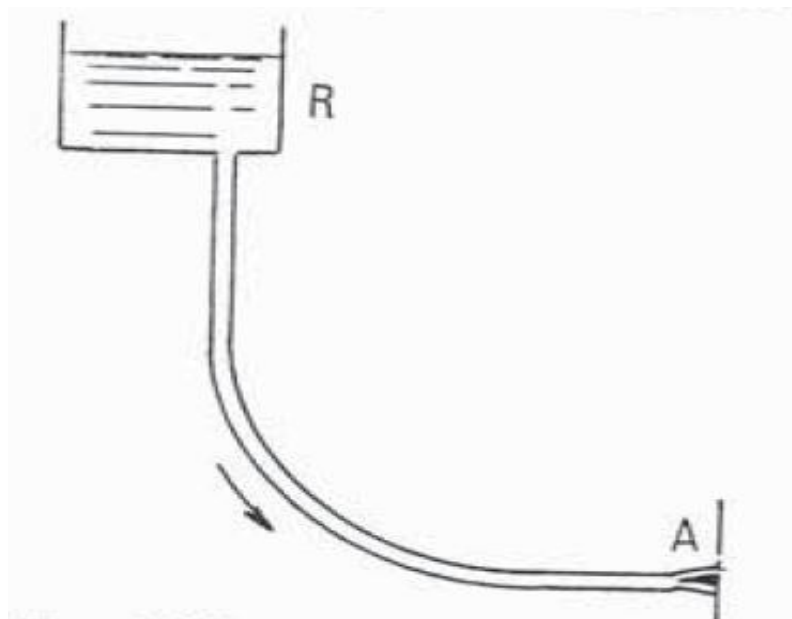
bout d'un nouveau temps  $\frac{L}{a}$  C'est-à-dire à  $\frac{4L}{a}$  depuis l'origine, nous nous retrouverons dans la même situation qu'au moment de l'arrêt brusque de la pompe. La période du mouvement est donc  $\frac{4L}{a}$ .

Le phénomène se reproduirait indéfiniment s'il n'était pas freiné, 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.

L'analyse du phénomène, dans le cas d'un arrêt brusque en A (fermeture rapide d'une vanne) d'un écoulement dans une conduite et d'adduction en provenance d'un réservoir est exactement la même sauf, toutefois qu'il commence par une surpression, puis s'achève par une dépression (fig II.8), il suffirait de reprendre les explications données ci-dessus pour l'arrêt d'une pompe en commençant à la 3<sup>ème</sup> phase (3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> puis 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup>).

Dans l'un comme dans l'autre cas, le coup de bélier est maximal à la pompe (conduite de refoulement) ou au robinet d'arrêt A (conduite a adduction) et nul à l'autre extrémité.



**Figure II. 8** cas de la conduite d'adduction réglée en A

### II.5.3. Valeur numérique du coup de bélier

#### II.5.3.1. Cas de la fermeture brusque

Considérons une conduite issue d'un réservoir et comportant un robinet en A. Soit L la longueur de la conduite (fig II.9).

Prenons comme unité de temps la valeur est  $\frac{L}{a}$ ,  $a$  étant la célérité des ondes,  $\frac{L}{a}$  le temps mis par une onde pour aller de R à A.

La fermeture brusque en A est celle qui se produit aussitôt après le temps zéro, à  $0 + \varepsilon$ . Mais au temps 0 le régime, au départ du réservoir,

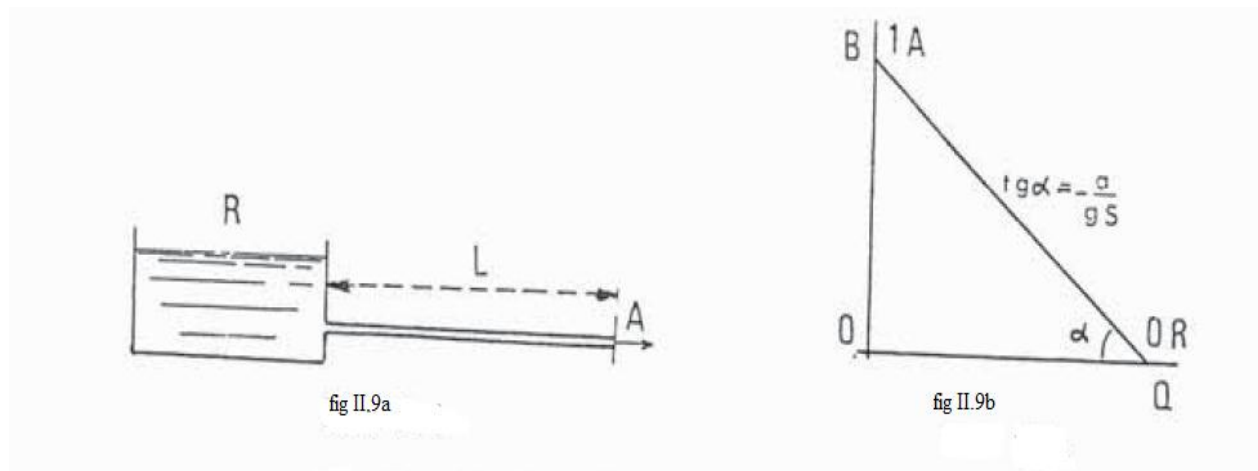


Figure II. 9 cas de la fermeture brusque.

Est caractérisé, dans le système de coordonnées QB par un point OR sur l'axe OQ (fig II.9b).

En effet, Juste avant la fermeture brusque le coup de bélier n'existe pas ( $B=0$ ) et le débit est celui  $Q_0$  du régime permanent.

Imaginons un observateur partant à ce temps 0 de R, allant vers A. Il descend le courant, donc voit les points du régime sur la droite est  $-\frac{a}{gS}$ .

A son arrivée en A, C'est-à-dire au temps 1, il trouve la vanne fermée. Or, le régime au temps 1 a également pour lieu la droite OB ( $Q=0$ ).

Le point figuratif du régime au temps I sera en conséquence donne par l'intersection des deux caractéristiques et on aura :

$$OB = Q_0 t g \alpha$$

$$OB = Q_0 \frac{a}{gS} \tag{II.35}$$

Remplaçons  $Q_0$  par  $SV_0$ ,  $V_0$  étant la vitesse initiale de l'eau dans la conduite :

$$OB = SV_0 \frac{a}{gS}$$

$$OB = \frac{aV_0}{g} \tag{II.36}$$

Etant au-dessus de OQ, le point B correspond à une surpression. La valeur maximale du coup de bélier peut donc atteindre  $B = \frac{aV_0}{g}$ .

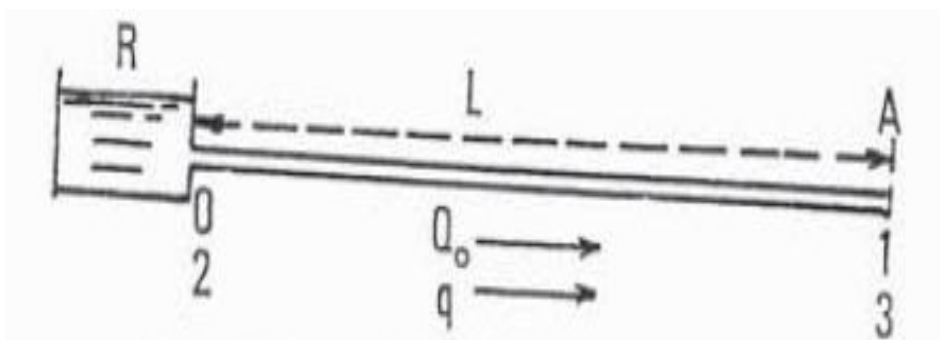
**Remarque :**

On en déduit une conséquence pour le tracé pratique d'une droite  $\frac{a}{gS}$  il suffit de joindre le point de départ de l'observateur en régime permanent à la valeur  $\frac{aV_0}{g}$  calculée pour la valeur maximale du coup de bélier.

**II.5.3.2. Cas de la fermeture lente**

Elle est caractérisée par un temps de fermeture supérieur à  $\frac{2L}{a}$  c'est-à-dire supérieur à un aller et retour d'onde.

Si  $Q_0$  est le débit au temps 0, il passera encore, après un temps  $\frac{2L}{a}$  un débit  $q$  (fig II.10). En conséquence, la valeur de la surpression sera d'après (II.28)



**Figure II. 10** cas de la fermeture lente

$$b = \frac{a}{gS} (Q_0 - q)$$

Supposons que le temps de fermeture soit  $t = n \frac{2L}{a}$  et que pendant ce temps le débit varie linéairement. Nous aurons

$$(Q_0 - q) = \frac{Q_0}{n}$$

On déduit :

$$\frac{Q_0}{n} = Q_0 \frac{2L}{at}$$

D'où

$$b = \frac{2Q_0L}{gSt}$$

Ou, puisque  $Q_0 = SV_0$

$$b = \frac{2SV_0L}{gSt} = \frac{2LV_0}{gt}$$

C'est la formule dite de MICHAUD.

Remarquons que si dans cette formule, on fait  $t = \frac{2L}{a}$  on retrouve la valeur du coup de bélier par fermeture brusque.

En conclusion.

Si  $t \leq \frac{2L}{a}$  le coup de bélier a pour valeur maximale (en mètres d'eau)

$$B = \frac{av_0}{g}$$

Si  $t > \frac{2L}{a}$  le coup de bélier est moins important et a pour valeur (en mètres d'eau):

$$b = \frac{2Lv_0}{gt}$$

Ceci montre l'intérêt :

- \_ Pour les conduites d'adduction, d'adopter des robinets à fermeture lente, pour tomber dans le cas de la formule de MICHAUD

A cet effet, nous rappelons qu'un robinet-vanne ordinaire n'est efficace qu'en fin de course de fermeture ou qu'en début d'ouverture. En conséquence, ce sont les tout derniers ou les tout premiers tours qui sont dangereux. Pratiquement donc un tel robinet peut se fermer assez rapidement, à condition de ralentir beaucoup la manœuvre en fin de fermeture, manœuvre dont la durée devra, en tout état de cause, être nettement supérieure à  $\frac{2L}{a}$ .

Les conclusions seraient analogues pour la manœuvre d'ouverture

D'abord très lente, puis éventuellement plus rapide.

- \_ Pour les conduites de refoulement, de connaître le temps mis par un groupe pour s'arrêter et qui devra, si possible, être supérieur à  $\frac{2L}{a}$

Nous verrons plus loin les artifices employés pour prolonger ce temps d'arrêt.

Par ailleurs nous constatons que le coup de bélier est :

- \_ Proportionnel à la vitesse de l'eau dans la conduite.

- \_ Proportionnel à la longueur de la conduite.

Il est toutefois, indépendant de la pression statique.

Il est donc possible d'avoir comme valeur maximale de la pression dans une conduite, exprimée en mètres d'eau, et si  $H_0$  est la pression avant l'apparition du coup de bélier :

$$H_0 + B \quad \text{Ou} \quad H_0 + \frac{aV_0}{g} \quad \text{cas de la surpression} \quad (\text{II.37})$$

Et comme valeur minimale (en mètres d'eau)

$$H_0 - B \quad \text{Ou} \quad H_0 - \frac{aV_0}{g} \quad \text{cas de la dépression} \quad (\text{II.38})$$

Les maximum et minimum ci-dessus ont lieu, soit au droit du robinet de réglage (conduite d'adduction), soit au droit de la pompe (conduite de refoulement).

L'expression (II.37) montre que la pression maximale pouvant régner dans une conduite peut atteindre facilement et même dépasser plusieurs fois

$H_0$  (Cas des réseaux à basse pression). En effet  $\frac{aV_0}{g}$  pour une vitesse courante de 1 m/s, est égal à environ 100 m d'eau ou 10 bars.

L'expression (II.38) montre qu'une conduite peut être mise facilement sous vide avec toutes les conséquences que cela peut comporter (aplatissement, poche de vapeur saturante etc..).

C'est ainsi que lorsque l'on examine le comportement d'une conduite en régime transitoire dépression, il ne faut pas que la valeur éventuellement négative trouvée pour la pression restante dépasse en valeur absolue celle de la pression atmosphérique, soit 10 m d'eau environ. Il sera plus prudent de rester en deçà de 8,00 m.

## II.6. Répartition du coup de bélier le long de la conduite

En cas d'arrêt brusque  $t \leq \frac{2L}{a}$  le coup de bélier, maximal près de la pompe (cas de la conduite de refoulement), ou près du robinet de réglage d'extrémité (cas de la conduite d'adduction) conserve sa valeur maximale  $\frac{aV_0}{g}$  jusqu'à une distance égale à  $(L - \frac{at}{2})$  puis décroît pour devenir nul à l'autre extrémité.

Nous pourrions donc avoir les cas représentés par la figure II.11 les pertes de charge dans la conduite étant négligées.

Nous remarquons, notamment, que si la conduite de refoulement présente un point haut P, il y aura risque de cavitation c'est-à-dire formation d'une poche de vide, si

$$h - (H_0 - B) > 8.00m.$$

En cas d'arrêt lent ( $t > \frac{2L}{a}$ ) le coup de bélier décroît linéairement depuis sa valeur maximale  $\frac{2Lv_0}{gt}$  jusqu'à zéro, à l'autre extrémité.

Ce sera la répartition qui sera admise dans l'étude des installations équipées en vue d'atténuer les effets du coup de bélier. On pourra ainsi tracer la ligne piézométrique en régime transitoire et examiner si certains points du tracé en profil ne risquent pas d'être soumis à la cavitation.

En fait, cette répartition linéaire n'est qu'approchée et l'on démontre qu'elle n'est rigoureusement applicable que si le problème est considéré sous sa forme simplifiée d'oscillation en masse. Elle est néanmoins suffisante pour les cas courants.

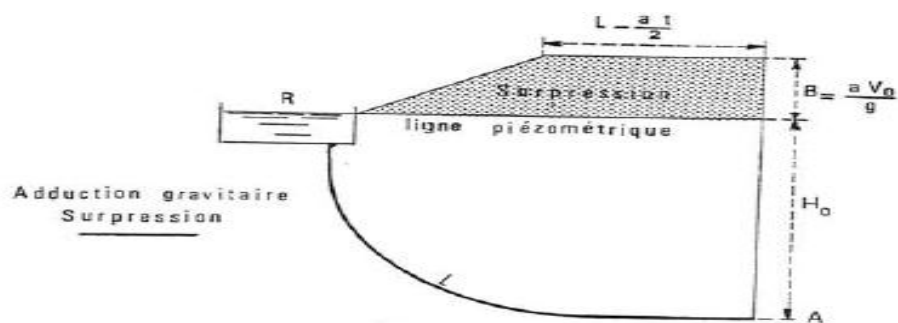


Figure II.11a

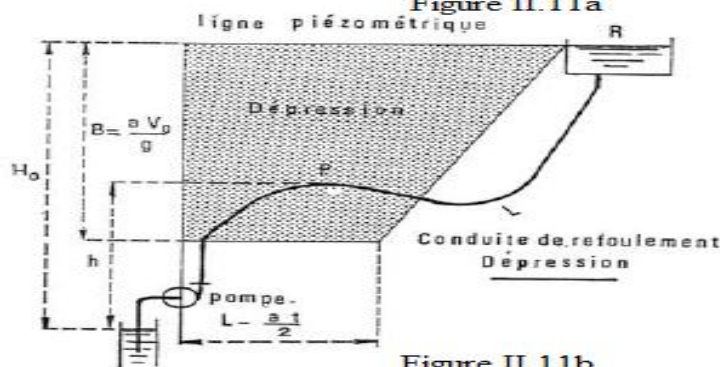
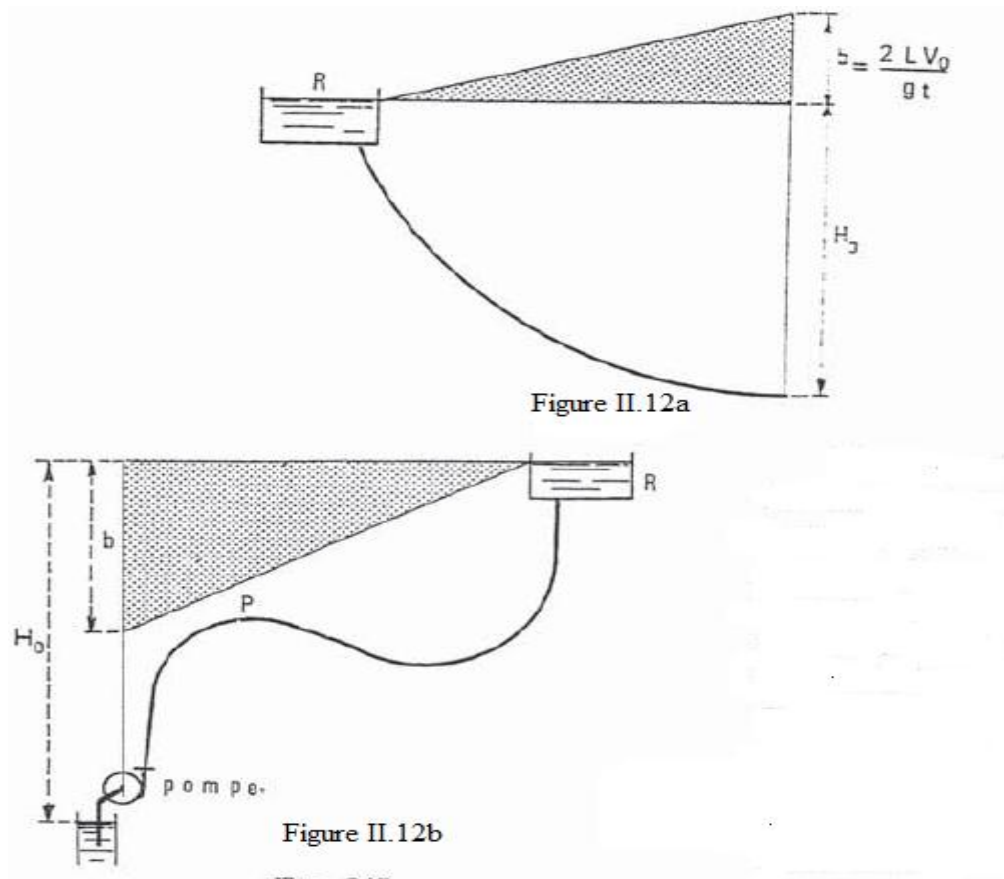


Figure II.11b

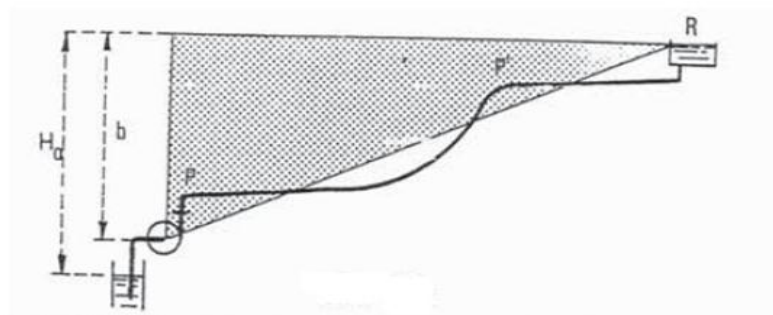
**Figure II. 11** Répartition du coup de bélier (fermeture brusque)

Dans les cas envisagés, on aura les diagrammes donnés par la figure II.12



**Figure II. 12** Répartition du coup de bélier (fermeture lente)

Nous pouvons constater l'avantage retiré, dans le cas du refoulement, pour le point haut P qui bénéficie encore d'une pression positive. Mais, si le profil du refoulement est celui représenté sur la (figure II.13) et que la dépression soit importante au départ, il y aura tout intérêt à protéger cette conduite plus efficacement [1].



**Figure II. 13** Répartition du coup de bélier (fermeture lente)

**II.7. Méthode de PEUCH et MEUNIER**

C'est la méthode qu'on va l'utilisée dans notre projet pour la détermination du volume du réservoir d'air. L'étude comparative faite par MM. PEUCH et MEUNIER sur tous les abaques existants montre que tous les résultats sont compris dans une fourchette de 10%. Cette précision est suffisante pour faire un dimensionnement industriel et nous choisirons la méthode la plus simple à appliquer. La méthode de PEUCH et MEUNIER utilise trois nombres adimensionnels qui sont :

K : qui caractérise les pertes de charge ;

A : qui caractérise la conduite de refoulement ;

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

Tell que :

$$K = \frac{H_{abs} - H_0}{H_0}$$

$$A = \frac{aV_0}{gH_0}$$

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

a : célérité d'onde de choc (m/s) ;

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

$H_0$  : Pression statique absolue =  $H_g + 10$  (m) ;

$H_{abs}$  : La pression de service absolue tq

$H_{abs} = H_g + \Sigma\Delta h + 10 = HMT + 10$  (m)

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

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

$U_0$ : Volume d'air initial (m<sup>3</sup>)

g : accélération de pesanteur (m/s<sup>2</sup>).

**II.8. Méthode de calcul de perte de charges****II.8.1. Pertes de charges**

On rencontre deux types de pertes de charge dans les conduites d'adduction.

- Pertes de charge linéaires ;

- Pertes de charge singulières.

$$\Delta H_f = \Delta H_L + \Delta H_s$$

### II.8.1.1. Pertes de charge linéaires ( $\Delta H_L$ )

Sont dues aux frottements de l'eau contre les parois de canalisations elles sont déterminées par la formule de DARCY-WEISBACH suivante :

$$j = \frac{\lambda \times l \times v^2}{D \times 2g}$$

g : accélération de la pesanteur  $g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$  ;

D : diamètre en (m) ;

L : La longueur de la conduite de refoulement ;

$\lambda$ : coefficient de frottement adimensionnel qui dépend de la nature du régime d'écoulement.

En ce qui concerne le coefficient de pertes de charge linéaire ( $\lambda$ ) il sera déterminé à partir de la résolution de l'équation de Collebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \text{Log} \left( \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} + 0.27 \frac{\varepsilon}{d} \right)$$

### II.8.1.1.2. Pertes de charge singulières ( $\Delta H_s$ )

Les pertes de charge singulières sont occasionnées par les vannes, robinets, ventouses, changement de direction, ou de section ...etc. Sont estimées à 15% de pertes charges linéaires.

$$\Delta H_s = 15\% \Delta h_l = 0.15\Delta H_L \text{ donc } \Delta H_T = \Delta H_L + 0.15 \Delta H_s = 1.15\Delta H_L \quad [12].$$

## II.9. Prise en compte des pertes de charge dans la conduite

Jusqu'à maintenant, les pertes de charge dans la conduite ont été négligées.

La prise en compte de ces pertes de charge quand elles sont importantes, intervient favorablement pour diminuer la valeur du coup de bélier en raison de la dissipation d'énergie engendrée par le frottement de l'eau le long des parois.

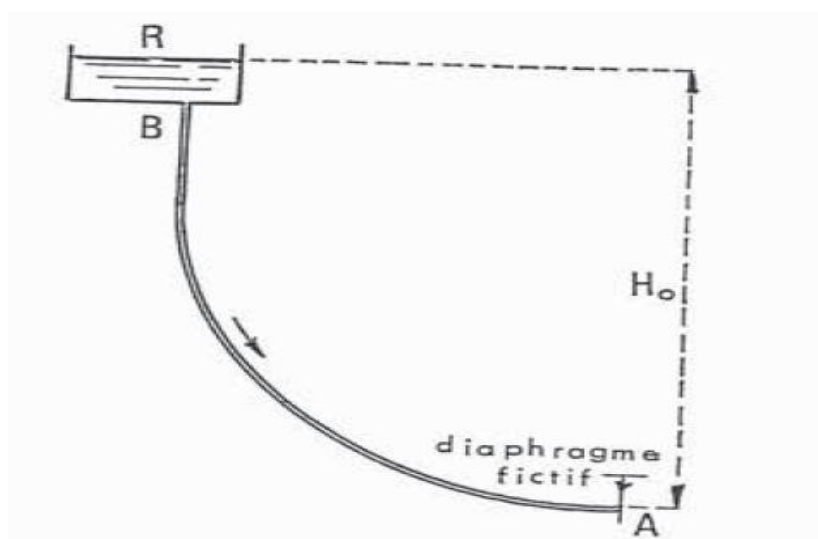
Pour simplifier la résolution du problème et le ramener au problème simple où l'on ne tient pas compte de ces pertes de charge, on suppose que toutes ces pertes sont concentrées en un seul point, comme si un diaphragme existait en ce point, l'extrémité A de la conduite, par exemple, et créait une perte de charge analogue.

La perte de charge étant proportionnelle au carré du débit, ses variations sont représentées par une parabole.

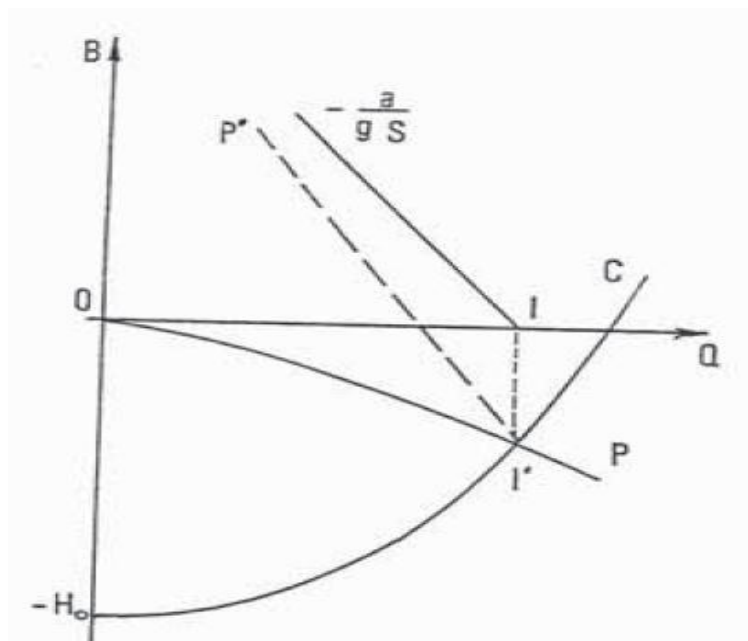
Dans l'hypothèse envisagée ci-dessus et pour le sens d'écoulement de B vers A, on peut dire qu'avant le diaphragme (fig II.14) la pression est  $H_0$  dans la conduite puis, en A, elle diminue brusquement à :  $(H_0 - \text{pertes de charge})$  du fait du diaphragme.

Les conséquences pour la représentation graphique sont les suivantes :

Si, dans le diagramme classique (fig II.15) on représente la parabole P des pertes de charge tangente en O et que C soit la caractéristique, pour



**Figure II. 14** Prise en compte des pertes de charges



**Figure II. 15** Prise en compte des pertes de charges dans la représentation graphique

Le régime normal, de la vanne (supposée associée au diaphragme) située en A, le point figuratif du régime en A, sitôt le diaphragme franchi, est en I', à l'intersection des courbes P et C. Mais, en amont du diaphragme fictif, nous sommes dans le cas où la perte de charge n'existe pas et le point figuratif est en I, projection de I' sur OQ, ce qui permet d'avoir le point de départ en I de la droite caractéristique  $-\frac{a}{gS}$  (l'écoulement se fait de B vers A), tout comme s'il n'était pas tenu compte des pertes de charge.

II' représente la perte de charge dans le diaphragme, c'est-à-dire dans la conduite pour le passage du débit du régime normal. Si l'on déduit de la droite  $-\frac{a}{gS}$  les ordonnées successives de la parabole P on obtient une parabole P' qui sera utilisée pour la détermination des points tels que I' et I.

L'exemple suivant nous montrera l'application de ces conclusions.

Soit une conduite de  $\varnothing = 0.500m$  de  $1000m$  de longueur débitant  $400 \text{ l/s}$ . La fermeture est assurée par une vanne-papillon qui opère ce travail en 8 secondes. Quelle sera la valeur de la surpression si la célérité  $a=1000 \text{ m/s}$  ?

Il sera tenu compte des pertes de charge, la charge statique est de 50 m d'eau (voir planche D). Fermeture linéaire en fonction du temps.

Prenons pour unité de temps  $\frac{L}{a} = \frac{1000}{1000} = 1s$  et traçons les huit paraboles caractéristiques de fermeture, la parabole 0 étant celle du régime de marche normale et la droite OB étant le lieu de débit nul. C'est donc Sur OB que se fera la construction géométrique.

Traçons, en outre, la parabole des pertes de charge.

Pour la clarté de la figure, on ne considérera que le cas de l'observateur partant de R au temps 1, c'est-à-dire à un temps correspondant encore au régime initial pour le réservoir.

Le point (1 R)' est déterminé par l'intersection de la parabole 0 et de la parabole des pertes de charge. Rapporté aux axes OB, OQ, le point correspondant 1R est sur OQ.

En traçant la droite  $-\frac{a}{gS}$  à partir de (1R) et en déduisant de cette droite les ordonnées de la parabole des pertes de charge on obtient la parabole-lieu des points tels que (2A)', intersection de cette parabole et de la parabole de fermeture 2. Le point 2 A correspondant se trouve sur la verticale de (2A) à la rencontre avec  $-\frac{a}{gS}$

Il suffit ensuite de considérer l'observateur remontant le courant vers le réservoir (droite  $+\frac{a}{gS}$  menée de 2A), ce qui détermine le point (3 R).

Puis, l'observateur descendant le courant (droite  $-\frac{a}{gS}$  menée de 3R) arrive en A sur la position de fermeture 4. Pour déterminer la position de (4A), intersection de la parabole-lieu et de la parabole de fermeture 4, il est procédé ainsi:

Traçons sur papier calque l'axe OB, la parabole-lieu et la droite  $-\frac{a}{gS}$  déplaçant le calque de façon à superposer les axes OB, d'une part, ainsi que  $-\frac{a}{gS}$  et la droite passant par 3R d'autre part. Il reste à pointer le point (4A') à la rencontre de la parabole lieu tracée sur le calque et de la parabole de fermeture 4. On rappelle lors (4A') sur la droite  $-\frac{a}{gS}$  passant par 3R pour avoir 4A.

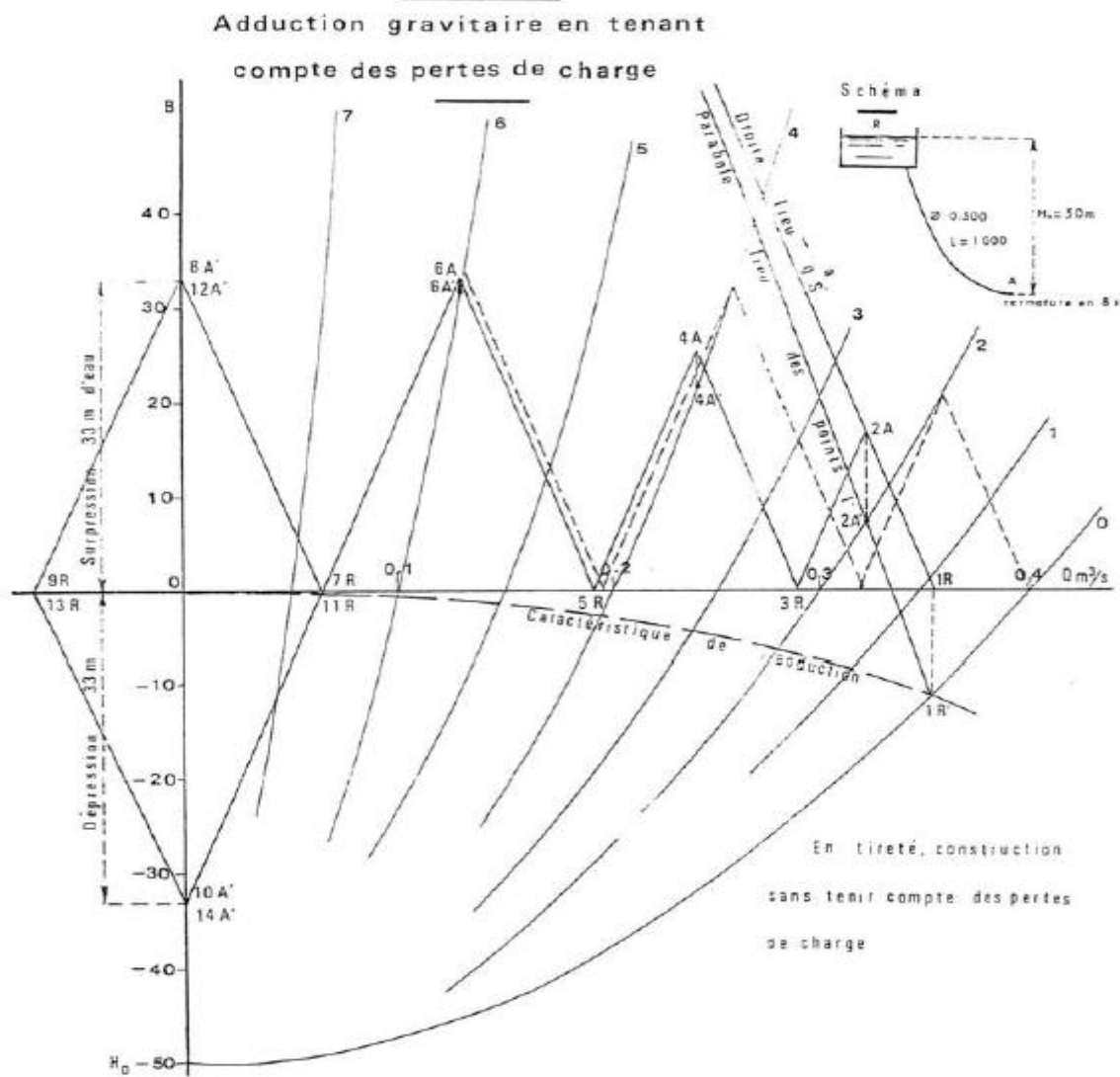


Figure II. 16 PLANCHE I Epure de Bergeron

A partir de 4A la même construction est effectuée.

Nous arrivons finalement sur l'axe OB où s'opère la fermeture. On voit que les oscillations de pression en A à la fermeture se reproduiraient indéfiniment si l'on ne tenait pas compte des amortissements dus au frottement.

Nous pouvons lire que la surpression et dépression seront égales à 33m c'est-à-dire que la pression totale oscillera entre  $50 + 33 = 83m$  et  $50 - 33 = 17m$  d'eau.

Une fermeture brusque aurait donné une surpression et une dépression égales à

$$+ \frac{aV_0}{g} = \frac{1000 \times 2}{9.8} = 200 \text{ m Environ, c'est-à-dire inacceptable [1].}$$

## II.10. Conclusions

Nous venons de dégager les notions essentielles concernant d'une part, le phénomène du coup de bélier et, d'autre part, sa représentation.

Nous en avons vu toute l'importance et la nécessité d'étudier à chaque fois la question de très près.

## **CHAPITRE III**

# ***MOYENS DE PROTECTIONS CONTRE LE PHÉNOMÈNE***

### III.1. Introduction

Nous avons vu que, pour une conduite d'adduction gravitaire, il suffit ordinairement de disposer un robinet-vanne manœuvré lentement pour limiter comme on le désire, la surpression à des valeurs convenables. Le cas n'est pas aussi simple pour une conduite de refoulement, car l'arrêt de la pompe peut survenir brutalement par disjonction du courant alimentant le moteur.

De plus, le phénomène nous le savons débute par une dépression. Cette dépression résulte d'une part de la montée de la colonne liquide qui continue son chemin grâce à son inertie or, d'autre part, du défaut d'alimentation de cette colonne derrière la dernière tranche refoulée par la pompe avant son arrêt.

La dépression peut conduire à un aplatissement de la conduite si celle-ci ne présente pas une épaisseur suffisante. Toutefois, pour une conduite en acier il est admis que cet aplatissement ne peut se produire si l'épaisseur exprimée en millimètres, est égale ou supérieure à 8 fois le diamètre de la conduite exprimé en mètres (pour  $D = 1,00$  m,  $e_{\text{minimal}} = 8$  mm).

Mais nous avons relaté plus haut, à propos de la répartition du coup de bélier le long de la conduite, les ennuis qui peuvent résulter pour les points hauts d'une dépression trop grande. Si la dépression est telle que le vide absolu s'instaure en ces points, il peut en résulter une rupture de la veine liquide, chaque tronçon étant le siège d'oscillations. Au moment du retour de l'eau, la fermeture de ces poches peut entraîner des éclatements de conduite.

En conséquence, il faudra déterminer la valeur de la dépression à admettre de manière qu'avec un seul appareil anti-bélier, si possible, la pression totale dans la conduite puisse être tenue entre un maximum et un minimum convenables.

### III.2. Les volants d'inertie

#### III.2.1. Principe

Il faut trouver le moyen de continuer à assurer l'alimentation de la veine liquide, malgré l'arrêt du moteur actionnant la pompe.

Le volant d'inertie, calé sur l'arbre du groupe constitue l'un de ces moyens. Grâce à l'énergie qu'il accumule pendant la marche normale, le volant la restitue au moment de la

disjonction et permet ainsi d'allonger le temps d'arrêt de l'ensemble, donc, de diminuer l'intensité du coup de bélier.



**Figure III. 1** Volant d'inertie [13]

### III.2.2. Calcul de l'amortissement du coup de bélier grâce au volant

Le calcul de l'amortissement du coup de bélier, grâce à l'adjonction, au groupe électropompe, d'un volant d'inertie, s'effectue en se donnant, au départ les dimensions possibles de ce volant compte tenu de l'encombrement qui en résulte en fonction de la place dont on dispose.

On vérifie, ensuite si l'inertie du volant est suffisante, c'est-à-dire si en définitive, la dépression obtenue est acceptable en tous les points du tracé. Cette vérification s'effectuera par l'épure classique selon la méthode graphique de BERGERON.

Nous donnerons ci-après des indications pour l'établissement de cette épure.

Il y a toujours intérêt à accumuler la masse du volant près de la périphérie, donc de se rapprocher de la section type donnée par la (figure III.2.)

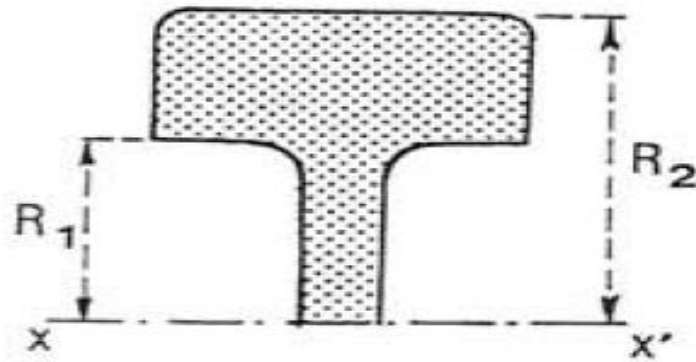


Figure III. 2 Section du volant.

Le moment d'inertie  $I$  de ce volume de révolution par rapport à l'axe de rotation  $xx'$  est donné par la relation :

$$I = mk^2$$

Où  $m$  est la masse du volant

$k$  : le rayon de giration.

$I$  : est exprimé en  $\text{Kg.m}^2$

Pour un cylindre

$$k^2 = \frac{R^2}{2}$$

Si  $R$  est le rayon de la section de base du cylindre.

Pour la section donnée sur la figure III.2 :

$$k^2 = \frac{R_1^2 + R_2^2}{2}$$

Appelons alors :

- \_  $H_0 Q_0$  et  $p$  les caractéristiques hauteurs d'élévation, débit et rendement correspondant au point de fonctionnement de la pompe en régime normal,  $H_0$  étant exprimé en m et en  $Q_0$   $\text{m}^3/\text{s}$ .
- \_  $N$  le nombre de tours/minute de la pompe pour ce régime

La vitesse angulaire  $\omega$  en  $\text{rd/s}$  est donnée par:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

Et la puissance absorbée par la pompe, en watts :

$$P = 1000 H_0 Q_0 \times \frac{9.81}{\rho}$$

Le couple  $C$  exprimé en  $\text{mN}$  vaut

$$C = \frac{p}{\omega} = \frac{1000H_0Q_0 * 9.81}{\omega\rho}$$

Au moment de l'arrêt brusque du moteur, le volant a accumulé une certaine énergie cinétique égale à:

$$\frac{1}{2}I\omega^2$$

Et l'on sait que la différentielle de l'énergie cinétique est égale au travail élémentaire des forces appliquées.

Or, pendant le temps  $dt$ , le travail de ces forces est :

$$C\omega dt$$

En conséquence :

$$d\left(\frac{1}{2}I\omega^2\right) = C\omega dt$$

Ou :

$$I\omega d\omega = C\omega dt$$

Donc :

$$d\omega = \frac{C}{I} dt$$

Des différentielles, passons aux différences finies:

$$\Delta\omega = \frac{C}{I} \Delta t \quad (\text{III.1})$$

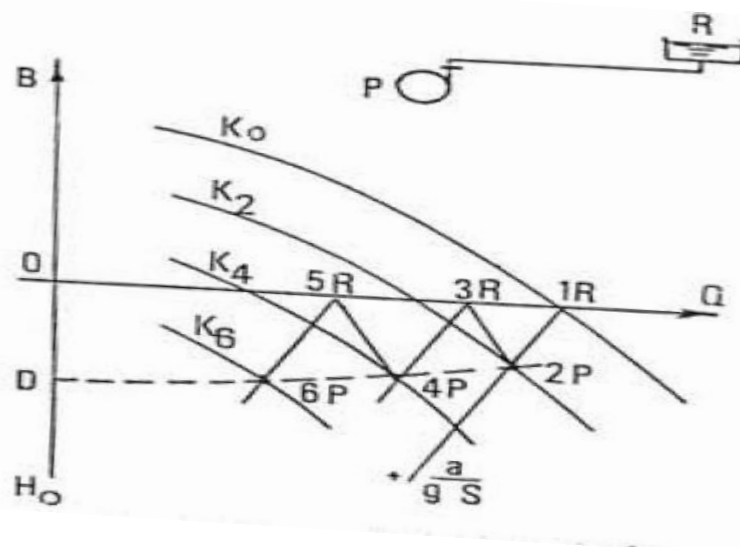
Par conséquent, à partir de la vitesse angulaire  $\omega$  (ou du nombre  $N$  de tours/minute) au moment de la disjonction, il est possible de calculer:

- \_ en ce qui concerne le volant : les vitesses successives décroissantes telles que  $(\omega - \Delta\omega)$  à des temps tels que  $(t - \Delta t)$ ;
- \_ en ce qui concerne la pompe : pour les vitesses successives ci-dessus du volant, les caractéristiques  $H$ ,  $Q$  et  $P$  de la pompe puisque l'on sait d'après les lois de variations des pompes centrifuges :
  - \_ que les débits varient dans le rapport des vitesses,
  - \_ que les hauteurs varient dans le rapport du carré des vitesses.

Quant au rendement, il découle de la courbe du rendement, donnée par le constructeur, pour les points QH considérés à chaque fois.

Si nous choisissons pour  $\Delta t$  la valeur du temps d'un aller-retour de l'onde entre pompe et réservoir, Soit  $\Delta t = \frac{2L}{a}$ , C'est-à-dire si nous considérons, selon BERGERON, les régimes dits à rythmes entiers, l'épure du coup de bélier s'établira suivant le schéma ci-après (fig.III.3) en prenant  $\frac{L}{a}$  comme unité de temps.

Au temps zéro, il y a disjonction à la pompe mais au réservoir, au temps  $1l$  le régime est encore le régime initial et il est donné par le point 1R, Intersection de la caractéristique  $K_0$  de la pompe pour la vitesse de régime normal avec l'horizontale passant par la hauteur géométrique d'élévation (on néglige les pertes de charge dans la conduite).



**Figure III. 3** Principe de la construction dans le cas de volant

L'observateur partant du réservoir et allant vers la pompe remonte le courant, donc parcourt la droite  $+\frac{a}{gS}$  Arrivé à la pompe au temps 2, c'est-à-dire après un temps

$\Delta t = \frac{2L}{a}$  depuis l'arrêt brusque, il trouve la pompe avec sa nouvelle caractéristique  $K_2$  résultant de sa nouvelle vitesse ( $\omega - \Delta\omega$ ), ce qui donne le point 2 P.

L'observateur rebrousse alors chemin jusqu'au réservoir (droite  $-\frac{a}{gS}$  point 3R) puis revient à nouveau vers la pompe (droite  $+\frac{a}{gS}$ )

Ou il arrive après un nouveau temps  $\Delta t$ , trouvant une nouvelle caractéristique  $K_4$  donc un point 4 P, etc...

En poursuivant l'épure, nous obtenons une suite de points 2 P, 4 P, 6 P etc..., qu'il suffit de joindre par une ligne continue qui coupera l'axe en un point D, (la pompe possède un clapet de retenue).

OD sera la dépression finale obtenue par l'adjonction du volant dont on se sera fixé a priori les dimensions, donc la masse et le moment d'inertie.

Il ne restera plus qu'à examiner si, avec le profil en long de la conduite de refoulement et la valeur de OD (la pression positive restante étant  $(H_0 - OD)$  au départ de la pompe, certains points du profil ne sont pas le siège de dépressions trop importantes. On supposera une répartition linéaire du coup de bélier le long de la conduite.

### III.2.3. Limite pratique d'utilisation des volants

Malgré l'apparence de simplicité du procédé, il faut remarquer cependant, que l'utilisation des volants reste assez limitée. En effet, dès que la longueur de la conduite augmente, on arrive rapidement à des poids de volant énormes et le système n'est plus économique.

C'est ce que montre effectivement l'épure. Si le point de recoupement de l'axe des ordonnées donne une valeur acceptable pour la dépression, c'est que les droites successives  $+ \frac{a}{gS}$  ont pu se réfléchir sur des courbes K suffisamment proches les unes des autres. Or pour satisfaire cette condition, il faut que  $\Delta\omega$  ne prenne pas de trop grandes valeurs. Mais  $\Delta\omega$  varie comme  $\frac{\Delta t}{I}$  (expression III.1). En conséquence, si la longueur de la conduite augmente  $\Delta t$  augmente aussi, puisque  $\Delta t = \frac{2L}{a}$  Afin de conserver au rapport  $\frac{\Delta t}{I}$  sa même valeur, il sera donc nécessaire d'augmenter L.

C'est-à-dire d'envisager un volant plus lourd. Or, plus le volant est lourd plus le moteur doit être puissant pour vaincre, au démarrage l'inertie de ce volant, ce qui peut conduire à des appels d'intensité de courant inadmissibles.

Pour ces diverses raisons, l'utilisation du volant reste limitée à la protection de conduites dont la longueur n'excède pas quelques centaines de mètres.

De toute manière, le volant n'intervient que pour limiter la dépression. Pour protéger également l'installation contre les surpressions, il peut être nécessaire de la compléter par la mise en place d'une décharge, en aval du clapet, bien entendu, qui évacue l'eau au cours de la phase de surpression et se referme ensuite, ou d'un clapet à battant percé [1].

### III.3. Les soupapes de décharge

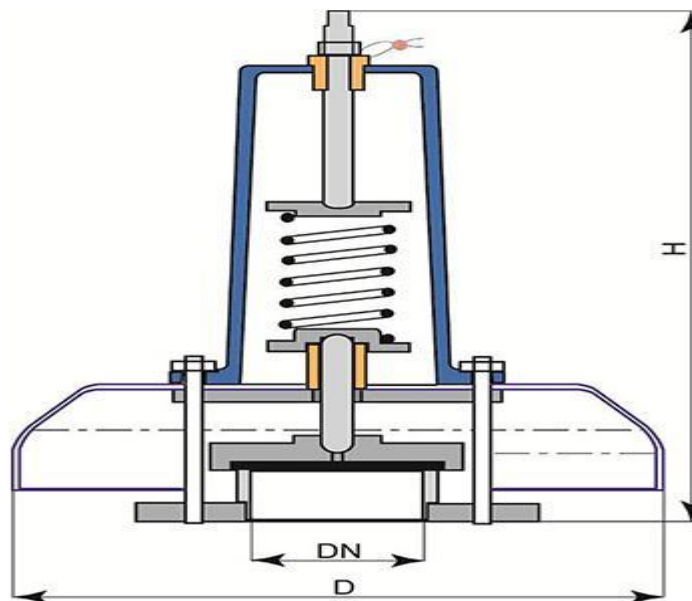
Ces appareils font intervenir un organe mécanique, un ressort a boudin ordinairement qui par sa compression obture, en exploitation normale un orifice placé sur la conduite au

point à protéger, c'est-à-dire où la surpression à craindre est maximale et libre, le cas échéant le débit de retour de la conduite correspondant à la valeur de la surpression admissible.

Cette soupape ne doit s'ouvrir que sous une pression déterminée, légèrement supérieure (5 % environ) à la pression maximale de fonctionnement normal. L'ouverture doit pouvoir s'effectuer très rapidement pour que l'opération soit efficace. Il importe donc de réduire à l'extrême l'inertie de ces appareils et c'est sur ce point que les efforts des constructeurs ont particulièrement porté. Il y a lieu, par ailleurs de prévoir l'évacuation vers l'extérieur de l'eau ainsi libérée.

L'utilisation des soupapes de décharge nécessite un entretien suivi une surveillance attentive.

Enfin, en vue de leur parfaite adaptation au cas de protection envisagé, il est très important que l'étude et la fabrication de ces appareils soient confiées à des spécialistes éprouvés [1].



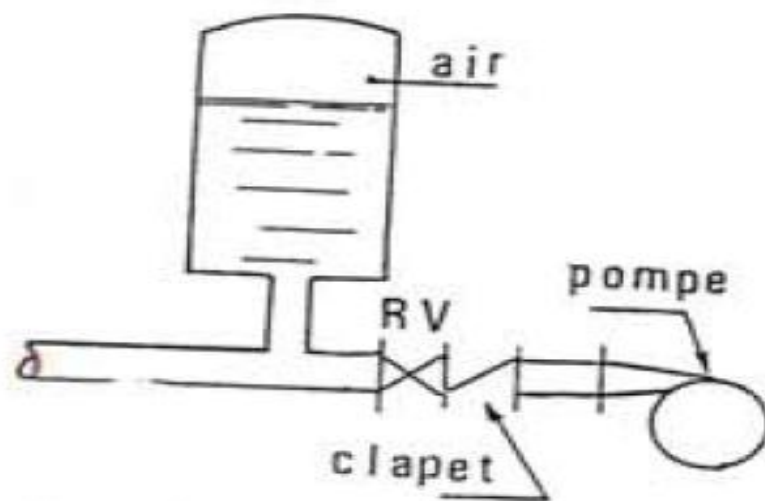
**Figure III. 4** Soupape de décharge anti-bélier

### III.4. Les réservoirs d'air

#### III.4.1. Principe

L'alimentation continue de la veine liquide après disjonction du groupe peut être effectuée à l'aide d'une réserve d'eau accumulée sous pression dans une capacité métallique disposée à la station de pompage et raccordée au refoulement, immédiatement à l'aval du clapet (Fig.III.5).

Cette capacité contient de l'eau et de l'air et, en marche normale, la pression de cet air équilibre la pression dans la conduite au point considéré.



**Figure III. 5** Principe de la disposition du réservoir d'air anti-bélier

A la disjonction, le clapet se ferme, puisque la pompe ne fournit plus de pression: Une partie de l'eau de la cloche est chassée dans la conduite. En effet, à ce moment, la pression de l'air de la cloche est encore supérieure à celle qui s'exerce à l'autre extrémité de la conduite, au réservoir. Après diminution progressive, puis annulation de sa vitesse, l'eau de la conduite revient en arrière et remonte dans la cloche, augmentant la pression dans la conduite de refoulement. Dissipation de l'énergie de l'eau peut être obtenue par le passage de celle-ci au travers d'un organe d'étranglement disposé à la base de la cloche.

Ce dispositif est excessivement simple et protégera l'installation aussi bien contre les dépressions que contre les surpressions.

#### III.4.2. Calcul simplifié d'un réservoir d'air

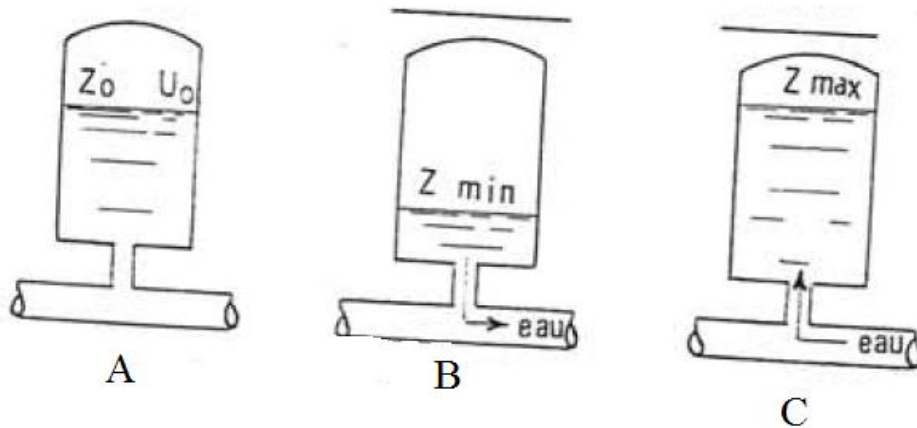
En faisant abstraction des pertes de charge dans la conduite de refoulement et en considérant le phénomène comme une oscillation en masse, c'est-à-dire en négligeant

l'élasticité de la conduite et la compressibilité de l'eau, on arrive à un calcul simplifié qui peut suffire pour des installations modestes (30 l/s) environ; 1000 à 1200 m de longueur de refoulement). De plus, il est supposé que le dispositif ne comporte pas d'organe d'étranglement.

M. VIBERT arrive à une expression relativement simple qui donne le volume  $U_0$  de l'air contenu dans la cloche sous un régime de marche à la vitesse  $V_0$

En marche normale, les caractéristiques de l'air dans le réservoir d'air sont données par  $Z_0$ , et  $U_0, Z_0$ , étant la pression absolue exprimée en mètres d'eau, c'est-à-dire pratiquement égale, si l'on néglige la hauteur de l'eau dans le réservoir d'air au-dessus de l'axe de la conduite, à la hauteur géométrique de refoulement + 10 m (fig.III.6.A), hauteur que nous avons désignée plus haut par  $H_r$  [7].

A la fin de la dépression, première phase du phénomène, l'air occupe un volume plus grand et sa pression sera donc la plus faible; Soit  $Z_{min}$  cette pression absolue (fig.III.6.B). A la fin de la surpression, (deuxième phase), l'air occupe un volume plus petit qu'en marche normale et sa pression sera  $Z_{max}$  (fig.III.6.C).



**Figure III. 6** Variation du volume d'air au cours des phases de fonctionnement du réservoir.

L'expression donnant  $U_0$  est la suivante:

$$U_0 = \frac{V_0^2}{2gZ_0} \frac{LS}{f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

$U_0$  : Volume de l'air en m',

L : longueur de la conduite en m,

S : section de la conduite en m.

$$f\left(\frac{Z}{Z_0}\right) = \left[ \frac{Z_0}{Z_{min}} - 1 - \frac{\log Z_0}{Z_{min}} \right]$$

L'expression donnant  $U_0$ , a fait l'objet d'un abaque de M. VIBERT et qui est donné planche II.

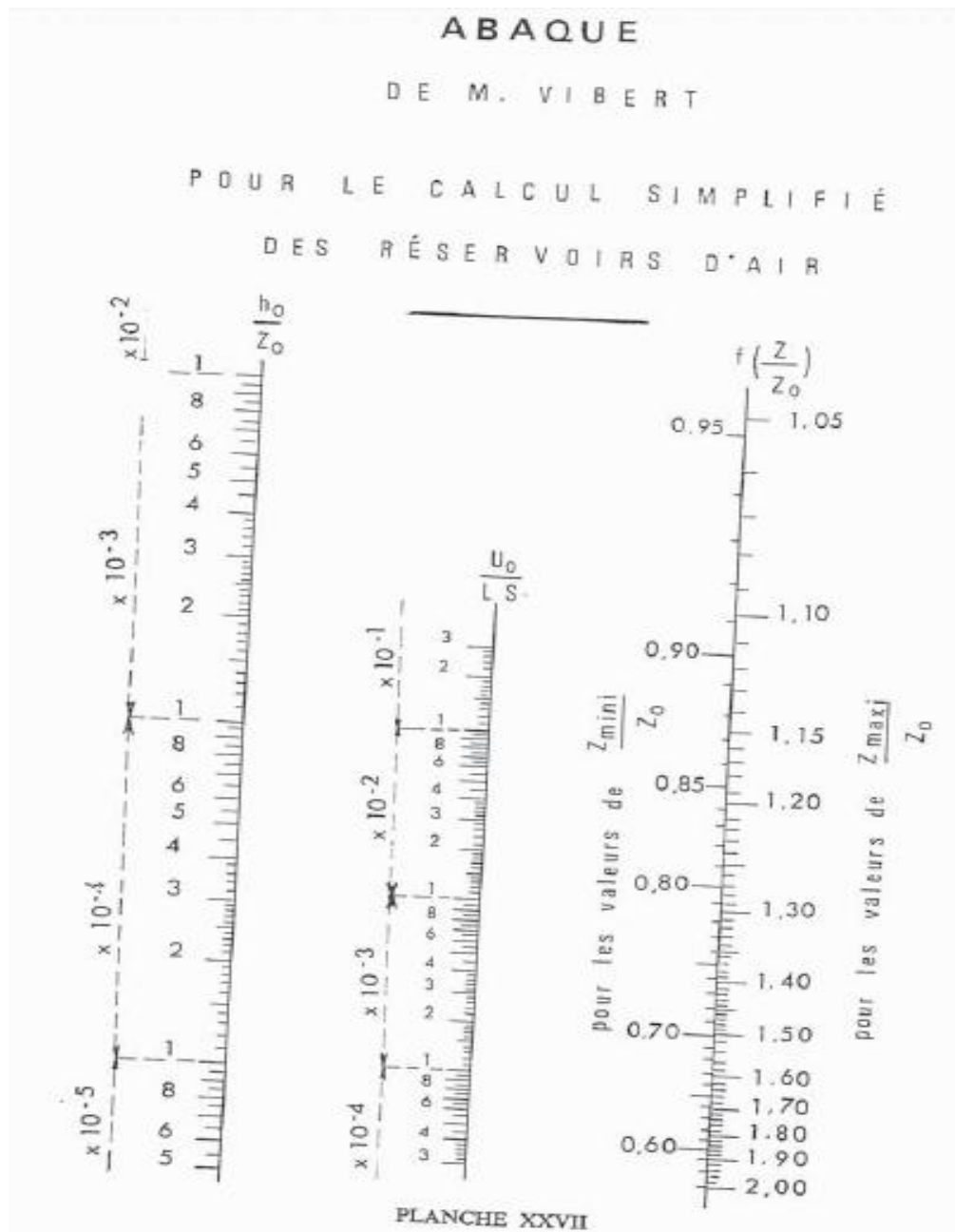
Pour l'établissement de cet abaque, la formule a été mise sous la forme suivante :

$$\frac{U_0}{LS} = \frac{V_0^2}{2g} \frac{1}{Z_0} \frac{1}{f \frac{Z}{Z_0}}$$

En posant  $\frac{V_0^2}{2g} = h_0$  :

$$\frac{U_0}{LS} = \frac{h_0}{Z_0} \frac{1}{f \frac{Z}{Z_0}}$$

Ces expressions se retrouvent sur les trois échelles de l'abaque.



**Figure III. 7 Planché II Abaque de Vibert**

Un exemple fera mieux comprendre le maniement de celui-ci. Soit une conduite présentant les caractéristiques suivantes :

Longueur : 1 200 m.

Diamètre: 0,200 m.

Section: 0,0314 m<sup>2</sup>.

Volume: 1200 × 0,0314 = 38 m<sup>3</sup>

Débit: 0,031 m<sup>3</sup>/s.

Vitesse moyenne: 1,00 m/s.

Hauteur géométrique de refoulement: 60 m.

Conduite en fonte épaisseur: 10 mm

Profil de la conduite régulièrement ascendant.

La valeur de la célérité

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + \frac{0.2}{0.01}}} = 1200 \text{ m/s}$$

Montre que le coup de bélier peut atteindre la valeur:  $\frac{aV_0}{g} = \frac{1200 \times 1}{9.8} = 122 \text{ m d'eau}$  sorte qu'au moment du retour de l'onde, la pression peut atteindre  $60 + 122 = 182 \text{ m d'eau}$  soit 18 bars environ.

Si l'on s'impose de ne pas dépasser pour la conduite une pression de 12 bars ou 120 m d'eau, le calcul du réservoir s'effectuera comme suit

$$Z_0 = 60 + 10 = 70 \text{ m}$$

$$Z_{max} = 120 + 10 = 130 \text{ m}$$

$$\frac{Z_{max}}{Z_0} = \frac{130}{70} = 1.85$$

$$h_0 = \frac{V_0^2}{2g} = \frac{1}{19.6} = 0.051 \text{ et } \frac{h_0}{Z_0} = \frac{0.051}{70} = 0.0007$$

Les alignements 1,85 lu sur l'échelle  $\frac{Z_{max}}{Z_0}$  et 0,0007 lu sur l'échelle  $\frac{Z_{max}}{h_0}$  donnent sur l'abaque

$$\frac{U_0}{LS} = 0.0045 \text{ et } \frac{Z_{min}}{Z_0} = 0.60$$

Comme  $LS = 38 \text{ m}^3$

$$U_0 = 0.0045 \times 38 = 0.171 \text{ m ou } 171 \text{ litres}$$

Afin qu'il reste encore de l'eau dans ce réservoir, même quand aura atteint sa valeur maximale, il sera calculé pour une capacité d'environ 350 l. Ainsi, en fonctionnement normal, le volume d'air (171 L) sera environ, la moitié de la capacité totale de la cloche.

La considération de la valeur  $\frac{Z_{min}}{Z_0}$  permet de trouver la valeur de la dépression à l'origine du refoulement.

$$\frac{Z_{min}}{Z_0} = 0.60$$

$Z_{min} = 0,60 \times 70 = 42 \text{ m d'eau}$  absolu La pression restante est donc encore de  $42 - 10 = 32 \text{ m d'eau}$  et la dépression de  $60 - 32 = 28 \text{ m d'eau}$ , donc  $> 0$ .

Il suffira d'examiner si, en raison du profil en long de la conduite, cette dépression ne conduit pas à une cavitation en certains points.

### III.4.3. Calcul normal d'un réservoir d'air

Les hypothèses simplificatrices introduites ci-dessus ne peuvent s'appliquer pour des installations très importantes. D'ailleurs, on arriverait rapidement à des volumes de réservoir énormes. Il y a donc lieu de tenir compte de la réalité du phénomène et de sa propagation ondulatoire.

Par ailleurs, le fait de raccorder la cloche à air sur le refoulement sans interposer d'organe de freinage entraînerait une succession d'oscillations qui ne seraient pas, ou que très peu amorties (le seul amortissement ne venant que des pertes de charge dans la conduite).

Il sera donc nécessaire de disposer à la base de la cloche un étranglement qui amortira rapidement les oscillations et permettra aussi de réduire le volume de la cloche.

Cet étranglement sera constitué :

- \_ soit par un diaphragme,
- \_ soit par une tuyère,
- \_ soit par un clapet à battant percé.

L'expérience montre qu'il y a intérêt à avoir une plus grande perte de charge au retour de l'eau dans le réservoir d'air qu'à l'aller, dans le sens réservoir d'air-conduite.

La tuyère, fonctionnant au retour de l'eau comme un ajutage rentrant de BORDA, permet, théoriquement, d'avoir une perte de charge quatre fois plus grande au retour qu'à l'aller (fig.III.6).

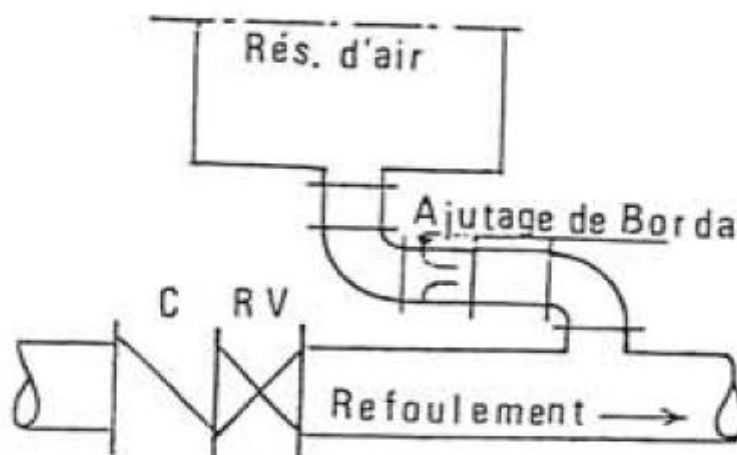
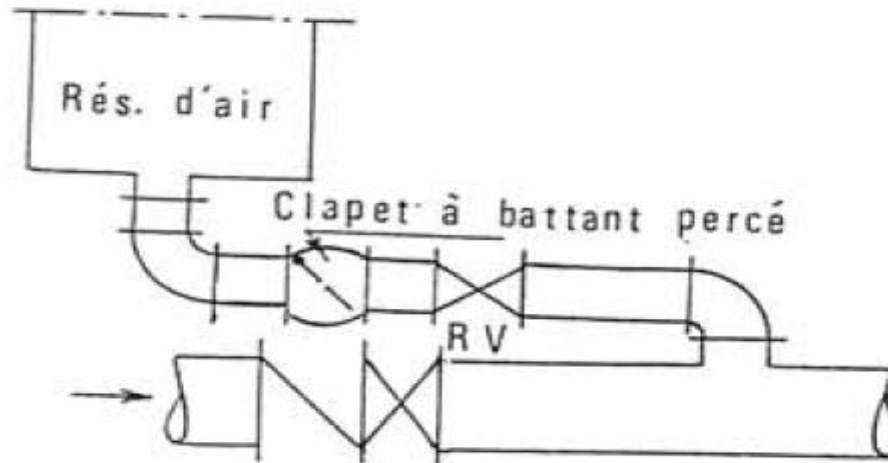


Figure III. 8 Étranglement au moyen d'une tuyère



**Figure III. 9** Étranglement au moyen d'un clapet à battant percé

Le clapet à battant percé permet une plus grande latitude encore, puisque, à l'aller le battant laisse passage à travers toute la section de la tubulure, tandis qu'au retour le battant se fermant, l'eau ne peut passer que par le petit orifice de diamètre voulu qu'on y aura ménagé (fig. III.9).

Les organes d'étranglement sont disposés sur une tubulure reliant le réservoir à air à la conduite. Ils sont montés avec des brides, ce qui permet de les rectifier au besoin si les résultats obtenus ne sont pas corrects.

Un robinet-vanne permet d'isoler le réservoir d'air de la conduite, en cas de besoin.

#### III.4.4.Principe du calcul

C'est par l'épure de BERGERON que seront déterminées les valeurs de la dépression et de la surpression maximales dans la conduite après être fixé, au préalable les caractéristiques du réservoir d'air (volume  $U_0$ , d'air en régime normal) et de son dispositif d'étranglement.

Le premier essai conduira peut-être à des valeurs inadmissibles pour la dépression ou pour la surpression, ou pour les deux à la fois. Les calculs seront alors recommencés à partir de nouvelles caractéristiques du réservoir, ou de l'étranglement, ou des deux.

Cette méthode nécessitera donc quelques tâtonnements; mais, en fait, ils resteront très limités et la précision sera bonne. Le principe en est le suivant, une fois fixées a priori les dimensions du réservoir d'air et celles de l'étranglement

1° Il sera fait application du diagramme de BERGERON où l'on aura toutefois gradué les abscisses selon les vitesses de l'eau dans la conduite au lieu de prendre les débits comme il

est pratiqué ordinairement. Comme la conduite est supposée présenter un diamètre uniforme, ce n'est là qu'un changement d'appellation.

2° Comme pour le volant d'inertie, les régimes seront considérés à rythmes entiers où  $\Delta t = \frac{2L}{a}$  en prenant  $\frac{L}{a}$  comme unité de temps (fig. III.10).

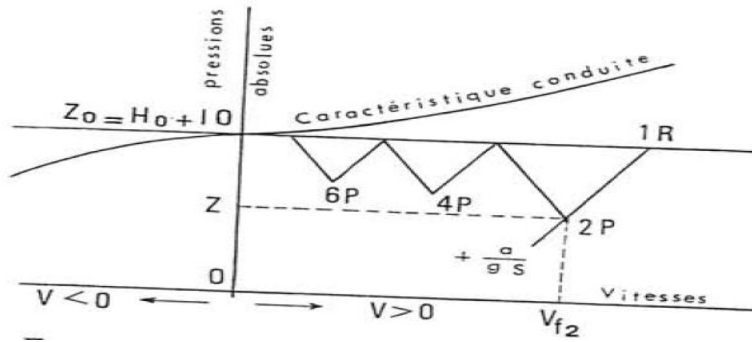


Figure III. 10 Principe de la construction de l'épure

Au temps zéro survient la disjonction et commence le régime transitoire.

Au temps 1, au réservoir, le régime est encore le régime initial et le point 1R de départ de l'observateur vers la pompe est donné par l'intersection de la vitesse  $V_0$  l'horizontale passant par la valeur  $H_0$  de la hauteur géométrique de refoulement. En est fait, nous considérons la pression absolue  $Z_0 = H_0 + 10$ . L'observateur remontant le courant verra les points du régime se déplacer sur la droite  $+\frac{a}{gS}$  et au temps 2, nous obtiendrons un point 2 P à l'intersection de cette droite et de l'horizontale passant par la valeur de la pression régnant dans la conduite. En négligeant la distance entre le plan d'eau dans le réservoir d'air et l'axe de la conduite de refoulement, cette pression sera celle de l'air du réservoir d'air au moment considéré, compte tenu des pertes de charge dans les organes d'étranglement (fig.III.10).

Pour que ce point convienne, il faut qu'il corresponde. En fait à la vitesse finale  $V_f$  de l'eau dans la conduite pour l'intervalle de temps considéré. Cette construction ne peut s'effectuer que par approximations successives.

Ensuite, chaque droite  $-\frac{a}{gS}$  se réfléchit sur l'horizontale passant par la valeur de  $Z_0$ . En effet, cette horizontale correspond au niveau immuable d'arrivée de l'eau dans le réservoir d'eau.

3° Il sera tenu compte des pertes de charge dans l'organe d'étranglement, lesquelles, on l'a vu plus haut, auront des valeurs différentes selon que l'eau monte vers le réservoir d'eau ou descend vers le réservoir d'air,

4° Il sera tenu compte des pertes de charge dans la conduite, qui seront supposées concentrées en un point, au départ de la pompe, comme s'il existait à cet emplacement un diaphragme fictif donnant la même perte de charge.

Ces pertes de charge sont représentées, sur l'épure de BERGERON par la parabole classique, qui n'est autre que la caractéristique de la conduite.

### **III.5. Les cheminées d'équilibre**

#### **III.5.1 Définition et dispositions constructives**

- Une cheminée d'équilibre est constituée d'un réservoir cylindrique à l'air libre et à axe vertical. Elle joue le même rôle que les réservoirs d'air, mais malheureusement on arrive à des ouvrages de dimensions assez considérables dans le cas des hauteurs de refoulement moyennes et grandes.
- Une cheminée d'équilibre est généralement aménagée en dérivation à la jonction d'une galerie d'amenée en charge et d'une condition forcée dans le but de réduire la valeur des surpressions produites par le coup de bélier.
- La cheminée d'équilibre est aussi utilisée sur le tracé de refoulement qui comporte des points hauts où peut survenir une cavitation en régime transitoire.

Les cheminées d'équilibre doivent être établies de façon à remplir les conditions suivantes :

- L'amortissement des oscillations doit être aussi important et aussi rapide que possible.
- Leur volume doit être aussi petit que possible pour préserver le coté économique [1].

#### **III.5.2. Types de cheminées d'équilibre**

##### **III.5.2.1. Cheminée déversante**

Elle comporte en sa partie supérieure un déversoir qui évacue une partie de l'eau mise en oscillation. Il en résulte une réduction de la surpression due à l'oscillation en masse dans la galerie.

##### **III.5.2.2. Cheminée à épanouissement**

Appelée aussi cheminée à sections multiples (Fig.III.11), elle présente quelques avantages dont : une réduction de la montée lors de la fermeture et un amortissement des oscillations par les pertes de charge dues aux changements de sections.

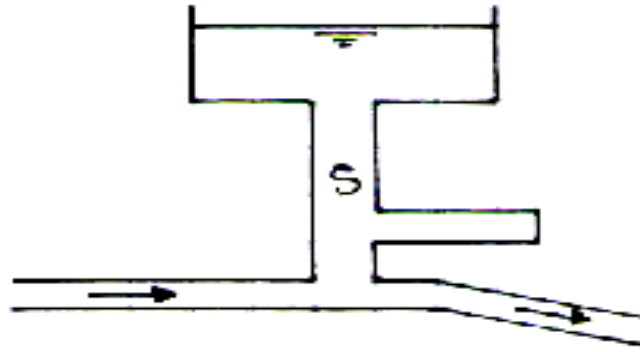


Figure III. 11 Principe de la construction de l'épure

### III.5.2.3. Cheminée à étranglement

L'étranglement à la base de la cheminée produit des pertes de charge importantes (Fig.III.12), il en résulte d'une part, une réduction de l'amplitude des oscillations et par suite, de la hauteur atteinte par l'eau dans la cheminée et d'autre part, un accroissement de l'amortissement des oscillations qui s'ajoute à celui créé par les pertes de charge dans la galerie d'amenée.



Figure III. 12 Cheminée à étranglement

### III.5.2.4. Cheminée différentielle

Elle comporte deux chambres  $C_1$  et  $C_2$  de sections différentes  $S_1$  et  $S_2$  (Fig.III.13). Les périodes d'oscillations des deux chambres sont différentes, il se produit ainsi un courant d'eau qui circule d'une chambre à une autre, ceci entraînera des pertes de charge supplémentaires qui accroissent l'amortissement.

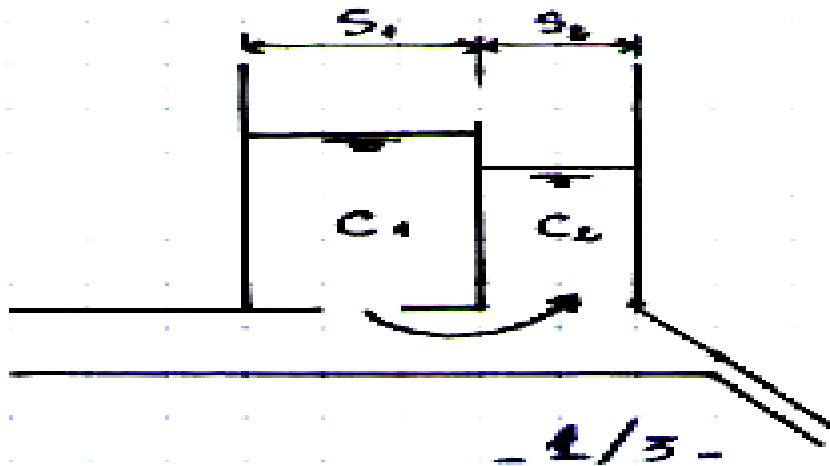


Figure III. 13 Cheminée différentielle

### III.5.3.5. Etude qualitative

Considérons une conduite de section  $S_1$  et de longueur  $L$  entre un réservoir de grandes dimensions et une cheminée d'équilibre de section  $S_2$  (Fig.III.14). On appelle  $Z$  la cote du niveau instantané de la cheminée par rapport au niveau statique. Supposons que la vanne ( $V$ ) de la conduite forcée soit brusquement fermée ; le débit à travers la conduite s'annule, engendrant l'apparition du phénomène du coup de bélier. L'eau en mouvement dans la galerie ne trouve pas d'autre exutoire que la cheminée d'équilibre, et elle pénètre dans celle-ci en faisant monter le niveau de  $N_0$  (niveau correspondant à la ligne de charge relative au débit  $Q_0$ ) jusqu'à  $N_2$ , d'où une transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle. Lorsque le niveau  $N_2$  est atteint, cette énergie potentielle se transforme en énergie cinétique : l'eau contenue dans la galerie est mise en mouvement en sens contraire du sens initial, et ainsi de suite. Le système "Réservoir-Galerie-Cheminée" est le siège d'une oscillation en masse.

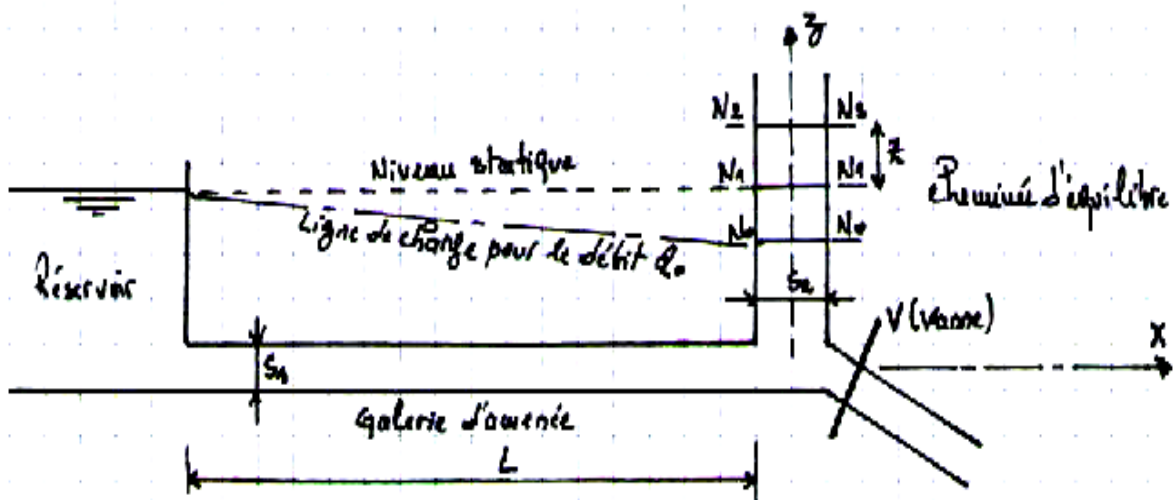


Figure III. 14 Cheminée d'équilibre en conduite forcée (Gravitaire) Etude quantitative

On considère un système idéal, dont les hypothèses de base sont les suivantes :

- \_ La section de la cheminée est constante.
- \_ Le réservoir est de très grandes dimensions (niveau invariable).
- \_ Les pertes de charge dans la conduite et la cheminée sont négligeables (le niveau  $N_0 \approx N_1$ ).
- \_ La fermeture de la vanne est supposée complète et instantanée.

L'amplitude  $Z$  est donnée par l'expression suivante :

$$Z = u_0 \sqrt{\frac{L S_1}{g S_2}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (\text{III.2})$$

Où :  $u_0$  est la vitesse initiale dans la conduite ;  $L$  est la longueur de la conduite ;  $g$  est l'accélération de la gravité ;  $S_1$  est la section de la conduite ;  $S_2$  est la section de la cheminée ;  $T$  est la période des oscillations, telle que :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L S_1}{g S_2}} \quad (\text{III.3})$$

Soit alors :

$$Z = u_0 \sqrt{\frac{L S_1}{g S_2}} \sin\left(\sqrt{\frac{g S_1}{L S_2}} t\right) \quad (\text{III.4})$$

L'amplitude maximale est :

$$Z = u_0 \sqrt{\frac{L S_1}{g S_2}} \quad (\text{III.5})$$

Les figures (III.15) et (III.16) ci-dessous donnent la disposition d'une cheminée d'équilibre sur refoulement et une coupe d'une cheminée d'équilibre [6].

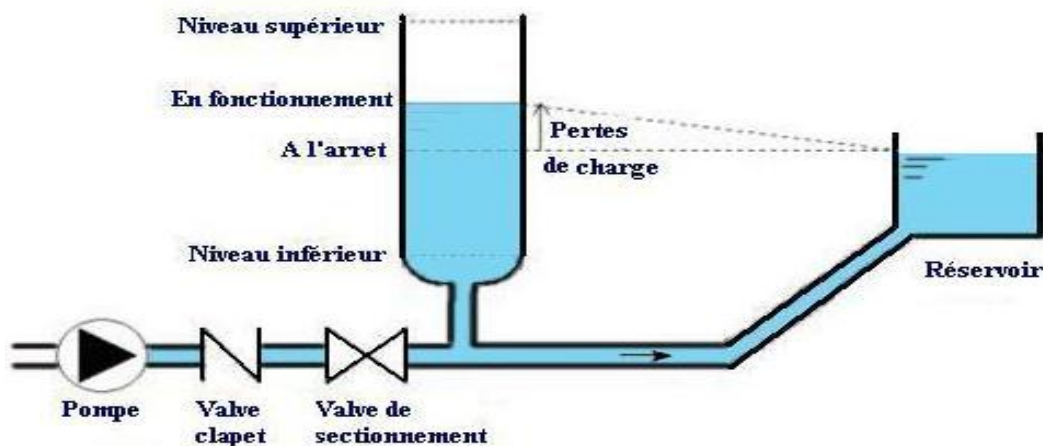
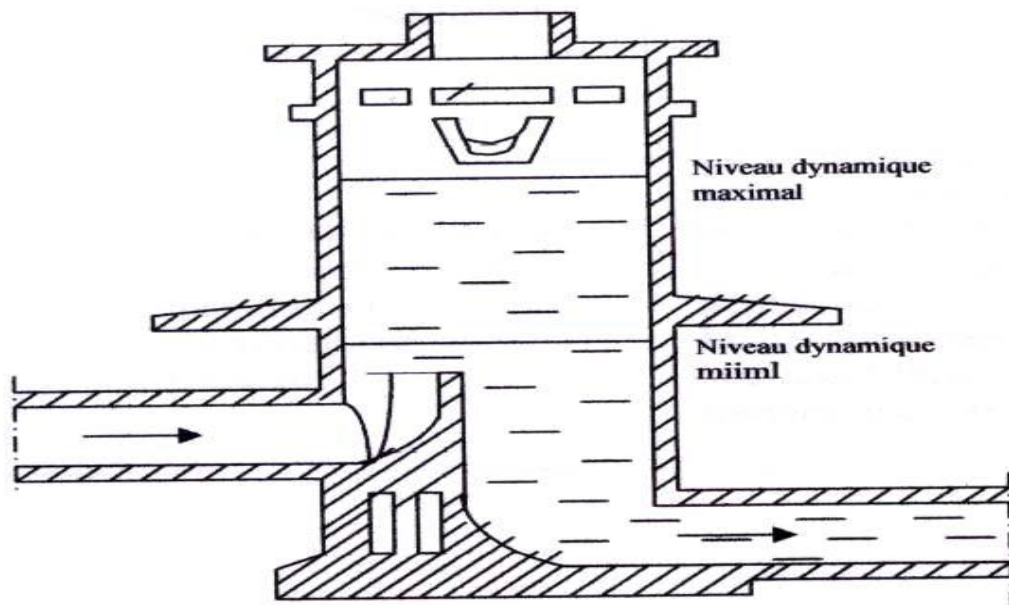


Figure III. 15 Cheminée d'équilibre sur refoulement



**Figure III. 16** Coupe d'une cheminée d'équilibre

### III.6. LES CLAPETS

Il existe différentes technologies de clapets :

À battant, à double battant, à disques concentriques, à boule, à membrane, etc. Le rôle commun à tous les clapets est d'empêcher l'écoulement du fluide dans un sens.

Dans le cadre de l'étude des régimes transitoires, il faut connaître la caractéristique dynamique d'un clapet c'est-à-dire les différents degrés de fermeture en fonction de la décroissance du débit dans la conduite.

Il faut être vigilant, lorsque plusieurs clapets sont installés en série. Cette configuration peut éventuellement entraîner des problèmes très importants de réflexions multiples des ondes et de coups de clapet.

Les clapets à boule sont à proscrire avec les appareils à compression d'air car cela entraîne un risque de coup de clapet [15].



**Figure III. 17** Clapet [16]

### III.7. Valves à air

Du point de vue de la protection contre les coups de bélier, par valve à air on comprend le dispositif qui introduit de l'air dans la conduite dès que la pression devient négative (inférieure à la pression atmosphérique, respectivement si le vacuum se produit). Normalement, les valves à air commercialisées sont du type aération - évacuation, c'est-à-dire, elles ont à côté de cette fonction, celle d'évacuer l'air sous pression qui s'accumule dans certains points (soi-disant hauts) du profil longitudinal de l'adduction. Pour la protection contre les coups de bélier, les valves (pour l'introduction de l'air) peuvent être placées aussi dans d'autres points que ceux hauts (où elles sont montées indépendamment du problème des coups de bélier, par leur fonction d'évacuation).

La valve à air est un dispositif extrêmement fin par rapport à l'hydrophore ou au château. Son principal désavantage est le fait que la protection (pour la réduction du vacuum) est réalisée seulement sur une longueur réduite de conduite, à proximité immédiate du point où la valve est installée. Par conséquent, pour protéger une plus grande longueur de conduite, il est nécessaire d'installer plusieurs dispositifs pareils. Un autre désavantage est constitué, comme dans le cas de l'hydrophore, par le fait que des mesures de montage et d'entretien attentives sont nécessaires pour assurer leur fonctionnement correct en pleine sécurité.

L'effet protecteur de la valve à air est dû au fait que celui-ci rentre en action avec beaucoup de retard par rapport au moment où dans le point respectif arrivent les premières variations de pression. Il est nécessaire que la pression baisse au point respectif sous zéro pour que la valve s'ouvre. Pendant ce temps, sur le reste de l'adduction, l'effet de la propagation des variations de pression a déjà produit son effet négatif.

(En plus, par l'ouverture de la valve à air, on assure une pression égale à zéro seulement dans le point respectif (pression atmosphérique). En fait, la pression assurée par l'ouverture de la valve est un peu sous zéro car la perte de charge intervient elle aussi à la circulation de l'air qui rentre par la valve dans la conduite. Dans ces conditions, les pressions de proximité de la valve seront, inévitablement, inférieures à zéro et même par le montage de plusieurs valves relativement proches l'une de l'autre, le vacuum ne peut pas être éliminé en totalité. C'est la raison pour laquelle, dans l'acte normatif, on accepte un vacuum limité, de 2...3 m.c.e, qui d'habitude peut être supporté par les conduites normales. Si ce vacuum limité n'était pas accepté, la solution de la protection par des purgeurs serait, pratiquement, impossible à appliquer.

En ce qui concerne l'installation pratique des valves sur le profil longitudinal de l'adduction, le nombre, la position et la typo-dimension résultent du calcul détaillé du coup de bélier qui aura comme résultat, à côté de la valeur des pressions externes, le débit d'air que chaque valve introduit dans la conduite [14].



**Figure III. 18** Valve à air dans une conduite [17]

### III.8. Valve de surpression

La valve de surpression est le dispositif qui s'ouvre dès que la pression dépasse une certaine valeur (maximale) qui, en général, peut être réglée en préalable. Ainsi, dans le point respectif, la pression maximale est limitée à la valeur calibrée à l'ouverture de la valve. Par conséquent, la pression assurée par l'ouverture de la valve est un peu plus grande que la valeur d'ouverture calibrée car c'est la perte de charge qui intervient à l'écoulement de l'eau par la valve.

La valve de surpression est un dispositif très bon marché par rapport à l'hydrophore ou au château. Son principal désavantage est le fait que la protection (pour la réduction des surpressions) est réalisée seulement sur une longueur réduite de conduite, à proximité immédiate du point où la valve est installée. Par conséquent, pour protéger une plus grande longueur de conduite, il est nécessaire d'installer plusieurs dispositifs pareils. Un autre désavantage est constitué, comme dans le cas de l'hydrophore, par le fait que des mesures de montage et d'entretien attentives sont nécessaires pour assurer leur fonctionnement correct en pleine sécurité.

L'effet protecteur limité de la valve de surpression est dû au fait que celle-ci « rentre en action » avec beaucoup de retard par rapport au moment où dans le point respectif arrivent les premières variations de pression. Il est nécessaire que la pression augmente dans le point respectif jusqu'à la valeur d'étalonnage afin que la valve s'ouvre. Pendant ce temps, sur le reste de l'adduction, l'effet de la propagation des variations de pression a déjà produit son effet négatif.

En ce qui concerne l'installation pratique des valves sur le profil longitudinal de l'adduction, le nombre, la position et typo-dimension résultent du calcul détaillé du coup de bélier qui aura comme résultat, à côté de la valeur des pressions extrêmes, le débit d'air que chaque valve évacue de la conduite [14].



**Figure III. 19** Valve de surpression [18]

### III.9. Conduite de retour

Dans les stations de pompage, en général, sur le refoulement de chaque pompe se trouve un clapet de retenue (clapet de non-retour) qui ne permet que l'écoulement vers le bassin de refoulement et non l'écoulement inverse. Ces clapets doivent se fermer au moment

de l'inversion du débit (ou même un peu avant) et que tout décalage à la fermeture génère de nouvelles perturbations génératrices de phénomènes supplémentaires de coups de bélier.

À partir de ces constatations, le montage d'une conduite de retour (de by-pass) du clapet de non-retour est une solution pour la réduction des surpressions, illustrée dans la figure III.20

La conduite de retour à un diamètre beaucoup inférieur à celui de la conduite de refoulement et une vanne y est montée.

En régime normal de fonctionnement la vanne doit être ouverte et l'eau coule vers le bassin de refoulement, en principal par la conduite de refoulement et le clapet de retenue et, dans une mesure moindre mesure, par la conduite de non-retour et par la vanne ouverte.



**Figure III. 20** Vanne by-pass sur détendeur-régulateur de pression [19]

À l'arrêt de la pompe et l'inversion de l'écoulement, le clapet de retenue se ferme et l'eau s'écoule en sens inverse seulement par la conduite de retour et par la vanne ouverte. Grâce au diamètre réduit, précisément déterminé par le calcul, cet écoulement en sens inverse peut-être contrôlé de manière qu'il ait un petit débit et que la pompe n'ait pas à souffrir à cause de la rotation excessive, obtenant en échange une réduction importante des surpressions. Le personnel de la station de pompage fermera ensuite lentement cette vanne, mais le débit en sens contraire étant très petit, le volume d'eau perdu est très réduit [14].

**III.10. LES VENTOUSES**

Elles se trouvent en général sur les points hauts. Il faut bien distinguer les ventouses permettant l'évacuation d'air de celles permettant, également, l'entrée d'air pour une lutte contre les pressions relatives négatives, mais qui ne peuvent fonctionner que de manière exceptionnelle pour les réseaux d'eau potable. En revanche, elles peuvent jouer un rôle plus étendu lorsque le réseau transporte de l'eau non destinée à la consommation (eaux brutes ou eau destinée à l'irrigation) ou lors du remplissage du réseau et ce quel que soit le type d'eau.

Il faut connaître le diamètre de la ventouse ainsi que les coefficients de perte de charge l'entrée et à la sortie. Les différentes cotes altimétriques sont également nécessaires, en particulier, la cote de l'orifice par rapport à la génératrice supérieure de la conduite.

Une ventouse n'a pas un comportement linéairement fonction du temps et de la pression.

Une étude précise devrait tenir compte notamment du retard, donc de la fiabilité et de l'efficacité réelle de cet appareil, à sa mise en débit lors de son ouverture, mais cette donnée essentielle est difficile à obtenir.

La fermeture de la ventouse est à prendre en considération. Le retard à la fermeture est souvent bien plus important (plusieurs dixièmes de seconde) que le retard à l'ouverture. Ce retard peut occasionner des régimes transitoires. Certains constructeurs proposent des ventouses fermeture contrôlée à la fin de la purge. Il faut tenir compte de la présence de cette fonctionnalité.

Dans tous les cas, il faudra poursuivre les simulations au-delà de la fermeture des ventouses, afin de bien englober ces phénomènes de fin de purge.

Dans tout calcul, et en particulier dans les simulations informatiques, les points où sont placées les ventouses sont des points où règne une pression proche de la pression atmosphérique (soit la pression atmosphérique, soit une valeur légèrement inférieure du fait des pertes de charge dans la conduite). C'est pourquoi, il est indispensable dans le choix des nœuds de modélisation de prévoir un ou plusieurs nœuds intermédiaires entre deux nœuds où sont modélisées des ventouses pour connaître les différentes pressions le long de la conduite

[ 1 5 ] .

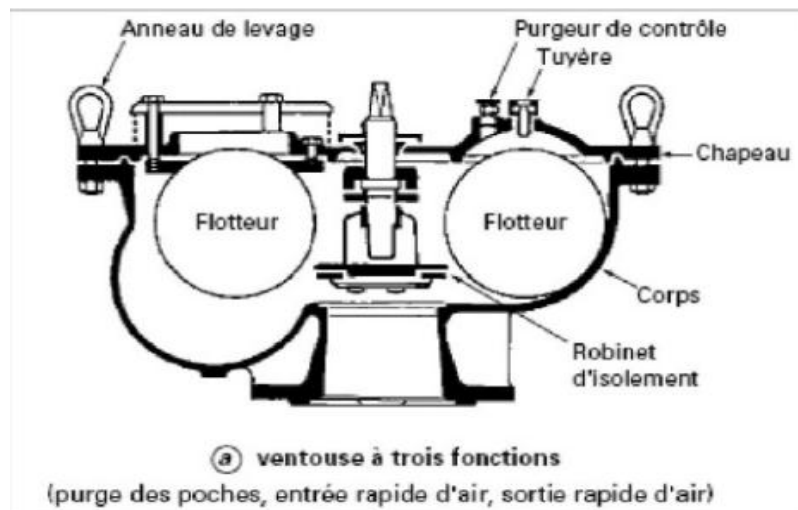


Figure III. 21 Ventouse à trois fonctions

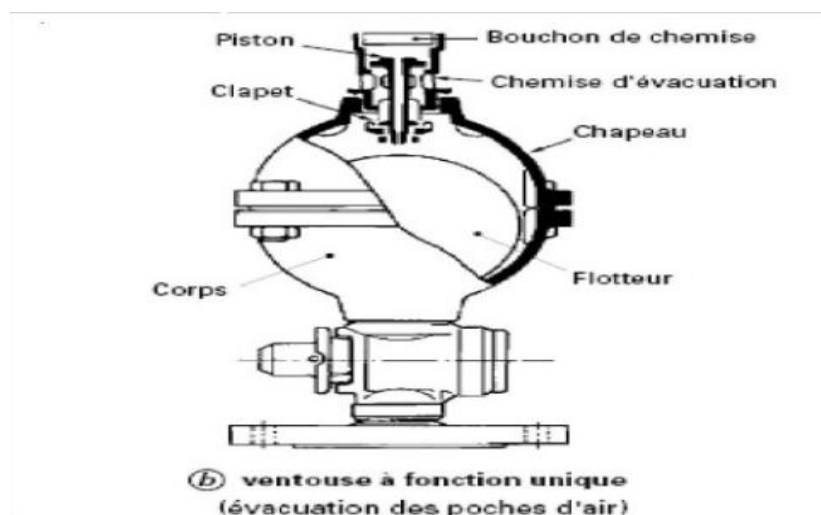
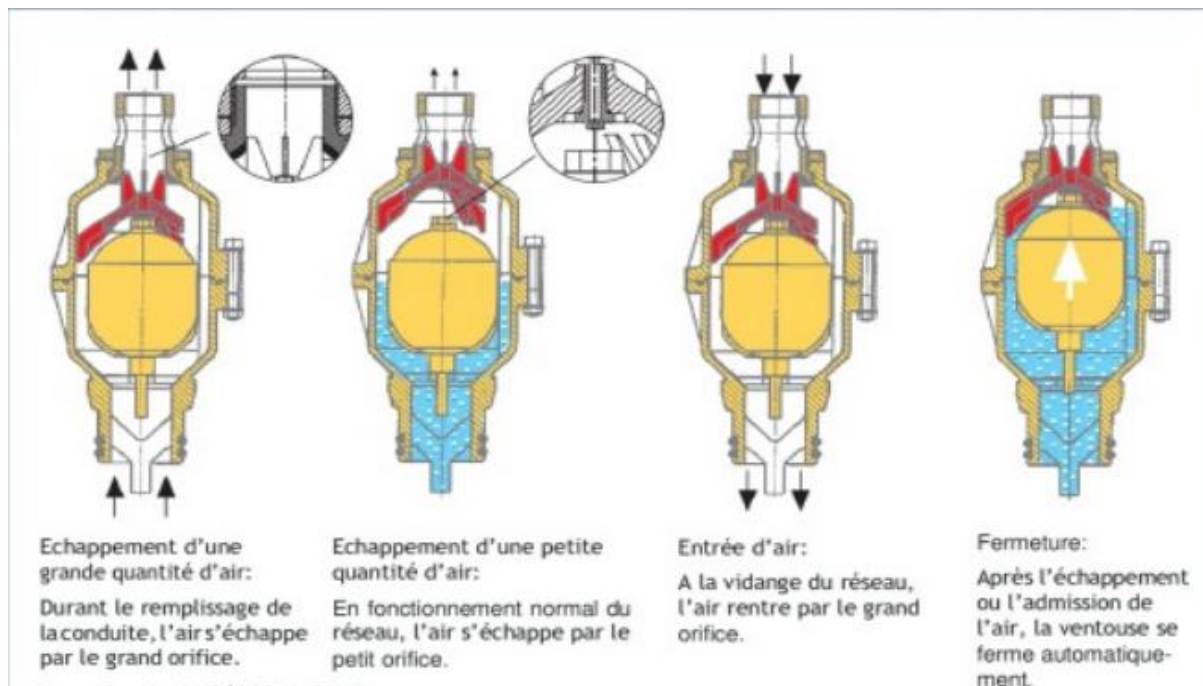


Figure III. 22 Ventouse à une seule fonction



**Figure III. 23** Le fonctionnement de la ventouse [20]

### III. Conclusion

Nous nous sommes étendu sur le mode pratique de calcul des divers appareils couramment utilisés dans ce domaine en raison de l'intérêt que cette étude présente, et chaque une de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients, qui doit être prise en compte avant le procéder à la mise en marche d'un système anti-bélier.

***CHAPITRE IV***  
***ÉTUDE D'UN CAS RÉEL***

## IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude d'un cas réel de protection d'une conduite de refoulement, contre le coup de bélier, à l'aide d'un réservoir d'air. Il sera procédé en premier au dimensionnement du réservoir d'air et de ses organes annexes.

La vérification du dimensionnement sera faite par la méthode de Puech et Meunier et le tracé de l'épure de Bergeron.

## IV.2. Présentation du projet

### IV.2.1 Situation géographique

Le chef-lieu de la Wilaya de TIZI OUZOU est situé sur la RN 12 à environ 100Km l'est de la capitale Alger.

La zone d'étude prend son départ à la station de traitement du barrage de Taksebt (centre de la Wilaya) et arrive aux différentes localités concernées par le projet (Nord de la Wilaya) passant par Irdjen, Tizi Rached et Ouaguenoun.

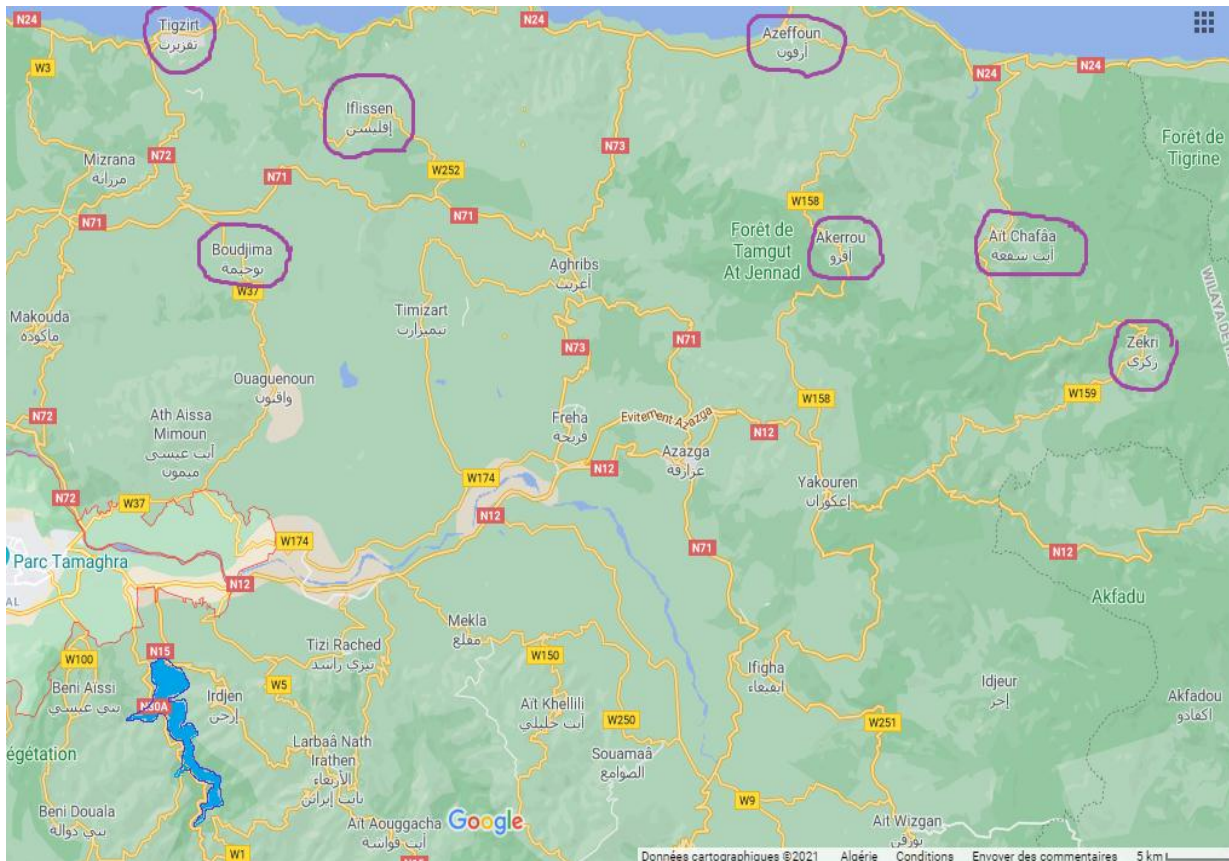
La région bénéficiaire de ce projet est limitée:

- Au Nord par : la mer méditerranée ;
- Au Sud par les localités de : Ait Aissa Mimoun, Ouaguenoun, Timizart, Aghrib, Azazga et Yakouren.
- A l'Est par : la wilaya de Bejaia
- A l'Ouest par : Mizrana et Makouda
- Administrativement, les sept communes attributaires de ce projet sont :

BOUJIMA, TIGZIRT, IFLISSEN, AZEFFOUN, AKERROU, AIT CHAFAA, ZEKRI

### IV.2.2. Situation géologique

Le site est constitué de l'aval à l'amont par le massif de Aissa Mimoun de nature essentiellement argileuse et marneuse où pointent les niveaux de grés numidiens. La partie basse est constituée par les terrasses alluviales du Sébaou. (Voir la figure IV.1).



**Figure IV. 1** Plan de situation des communes concernées par le projet

### IV.2.3. La sismicité

L'analyse des informations sismologiques disponibles, depuis les plus anciens temps jusqu'à présent (données historiques et instrumentales) montre que la sismicité de la zone d'étude est déterminée par des séismes crustalés

On a remarqué que dans les environs immédiats de la zone, le séisme le plus important est de magnitude 6,8 et a été enregistré le 21 mai 2003 dans la wilaya de Boumerdes.

On déduit que la région d'étude est considérée comme zone à moyenne sismicité.

### IV.2.4. Situation topographique

La situation topographique de la zone d'étude est déterminée à base d'une carte d'état-major au 1/50000.

En coordonnées polaires, la zone d'étude est située entre les parallèles  $4^{\circ} 38' 30''$  Est et  $4^{\circ} 02' 30''$  Ouest et entre les méridiens  $36^{\circ} 54' 30''$  Nord et  $36^{\circ} 41' 00''$  Sud.

L'altitude varie entre 85m NGA au niveau de oued Sébaou et 865m NGA au niveau de Tléta (Boudjima) ce qui donne en général, un relief très accidenté avec des pentes considérables.

### IV.3. Calcule du coup de bélier dans le tronçon (SR1 VERS SR2)

Dans notre cas nous avons affaire à une conduite en fonte ductile, où les caractéristiques du projet sont comme suit :

**Tableau IV. 1 Listes des données du tronçon (SR1-SR2)**

Longueur	13221.08 m
Débit	0.291 m <sup>3</sup> /s
vitesse	1.48 m/s
Type de matériaux	fonte ductile
Diamètre de la conduite	500 mm
La hauteur géométrique	256.53 m
Épaisseur de la conduite	9 mm
$\lambda$ coefficient de perte de charge	0.023781

Source : direction de l'hydraulique de Tizi-Ouzou

→ Calculant la célérité d'onde a :

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K \frac{D}{e}}}$$

$$A.N \quad a = \frac{9900}{\sqrt{48. + 0.59 * \frac{0.5}{0.009}}} = 1100 \text{ m/s}$$

Ensuite, on doit déterminer la caractéristique de la conduite A :

→ Nous calculons :

$$H_0 = H_g + 10$$

$$H_0 = 256.53 + 10 = 266.53 \text{ m}$$

$$A = \frac{av_0}{gH_0} = \frac{1100 \times 1.48}{9.81 \times 266.53} = 0.62$$

→ Calcule des pertes de charges en tenant compte que  $\lambda = 0.023781$  alors  $J = \frac{\lambda v^2 L}{2gD}$

$$J = \frac{0.023781 \times 1.48^2}{2 \times 9.81 \times 0.5} = 0.00535 \text{ m/ml}$$

$$j_T = j_S + j_L \quad \text{avec} \quad j_S = 10\%j_L$$

$$j_t = 1.1 \times j_L = 1.1 \times JL$$

$$j_t = 1.1 \times 0.00535 \times 13221.08 = 77.8060 \text{ m}$$

→ La hauteur manométrique totale :

$$H_{MT} = H_g + j_T$$

$$H_{MT} = 256.53 + 77.8060 = 334.34 \text{ m}$$

→ Hauteur absolue :

$$H_{abs} = H_{MT} + 10$$

$$H_{abs} = 334.34 + 10 = 344.34 \text{ m}$$

→ Maintenant on calcule K caractéristique des pertes de charges :

$$K = \frac{H_{abs} - H_0}{H_0} = \frac{344.34 - 266.53}{266.53} = 0.29$$

→ Caractéristique du réservoir B :

Nous devrions considérer la famille de courbes B pour

A= 0.5      K=0.2

A=0.5      K=0.4

A=1      K=0.2

A=1      K=0.4

A=0.5 K=0.2  
A=0.5 K=0.4  
A=1 K=0.2  
A=0.5 K=0.4

Pour B=0.8 et en faisant une interpolation entre la conduite est entièrement protégée contre les dépressions absolues et laisse au-dessus du point le plus défavorable du profil une pression absolue de plus de 5m d'eau. Cette valeur de B nous permet de calculer le volume d'air comprimé en régime permanent :

Tableau IV. 2 Profil en long

Cote z	78.16	137.75	131.89	217.55	145.67	231.44	219.04	260.8	334.79
Longueur de conduite	0	0.33L	0.36L	0.51L	0.57L	0.7L	0.78L	0.89L	1
$\frac{\Delta Z + 10}{Hg + 10}$	0.004	0.26	0.24	0.56	0.29	0.61	0.57	0.72	1
x/L	0	0.33	0.36	0.51	0.57	0.7	0.78	0.89	1

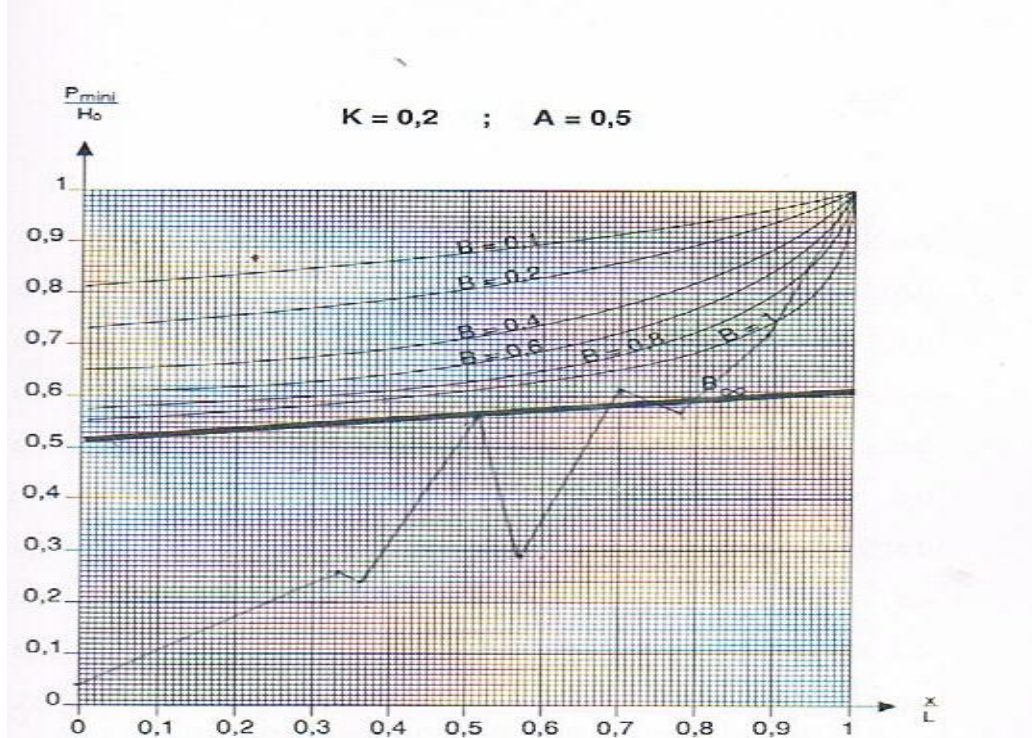


Figure IV. 2 Abaques de Puech et Meunier pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon d'air pour K=0.2 et A=0.5

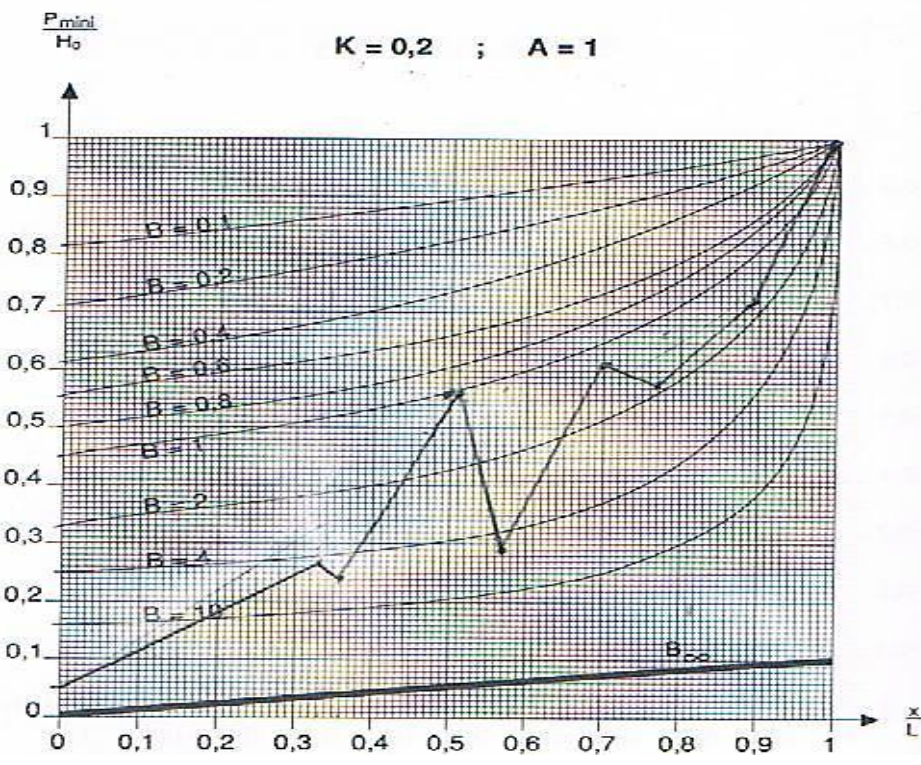


Figure IV. 3 Abaques de *Puech* et *Meunier* pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon d'air pour  $K=0.2$  et  $A=1$

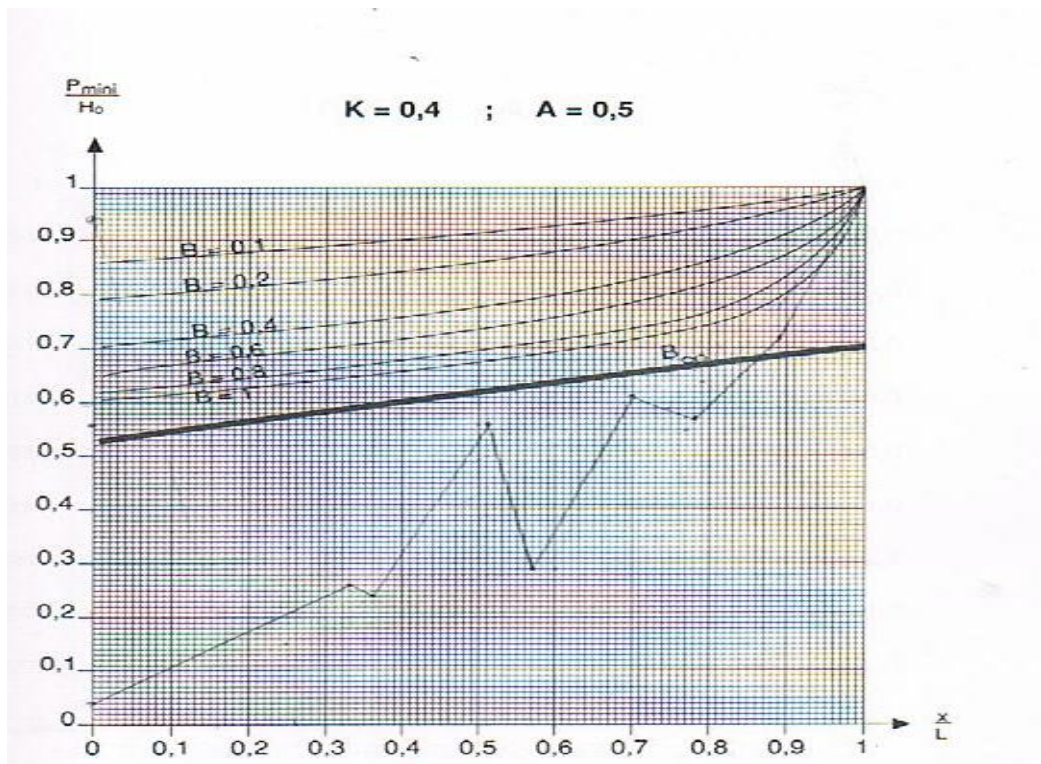
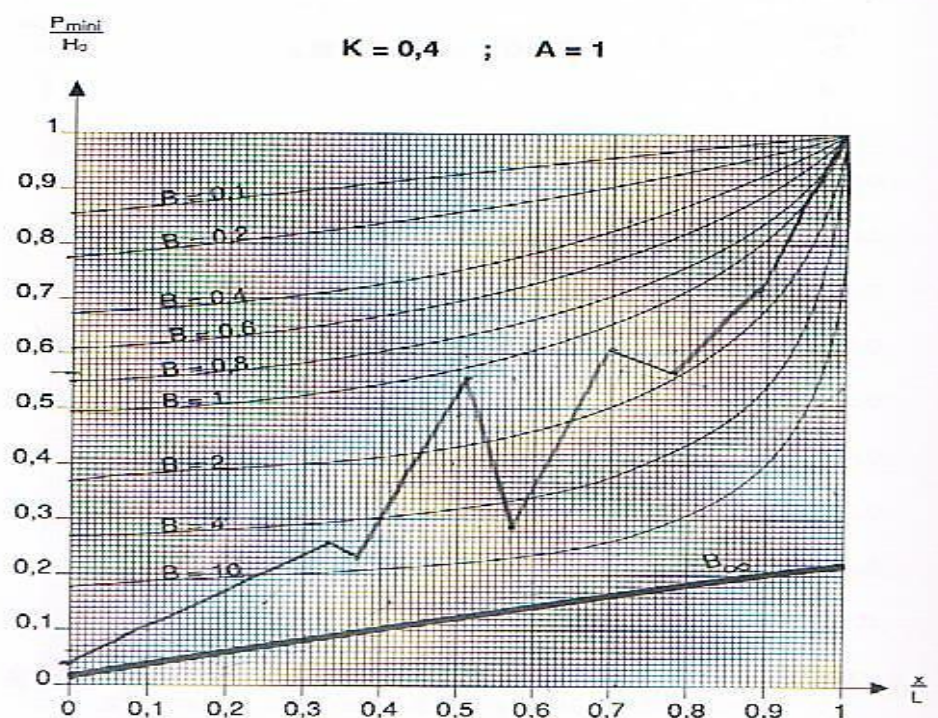


Figure IV. 4 Abaques de *Puech* et *Meunier* pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon d'air pour  $K=0.4$  et  $A=0.5$



**Figure IV. 5** Abaques de *Puech* et *Meunier* pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon d'air pour  $K=0,4$  et  $A=1$

→ Volume d'air initial :

$$U_0 = \frac{v_0^2}{gH_{abs}} \times \frac{Ls}{B}$$

$$A.N \quad U_0 = \frac{1,48^2 \times 13221,08 \times \frac{3,14 \times 0,5^2}{4}}{9,81 \times 344,34 \times 0,8} = 2,10 \text{ m}^3$$

→ Le plus grand volume d'air sera pour la plus faible pression et nous lisons sur le graphique

$$\frac{P_{min}}{H_0} = 0,56$$

On a une marge de sécurité de  $\frac{\Delta P_{min}}{H_0} = n_c \times 0,01$

$$\Delta P_{min} = H_0 \times n_c \times 0,01 \geq 5 \text{ m}$$

$$P_{min} = H_0 \times 0,56$$

$$P_{min} = 266,53 \times 0,56 = 149,26 \text{ m d'eau}$$

→ Si l'évolution du volume d'air est intermédiaire entre les lois isotherme et adiabatique, nous avons :

$$P_{min} U_{max}^{1.2} = H_{abs} U_0^{1.2}$$

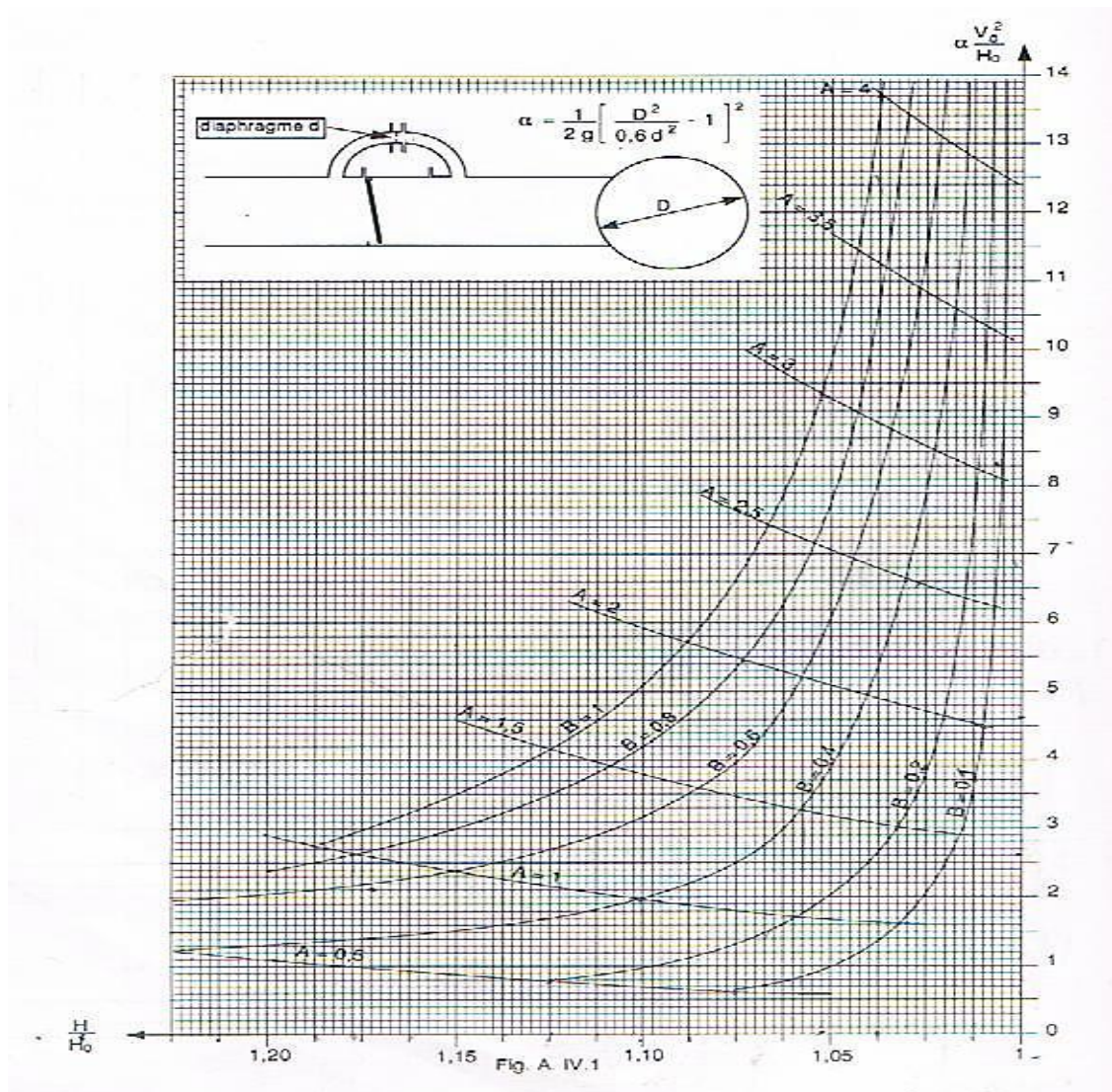
$$U_{max} = U_0 \left( \frac{H_{abs}}{P_{min}} \right)^{\frac{1}{1.2}}$$

$$A.N \quad U_{max} = 2.1 \left( \frac{344.34}{149.26} \right)^{\frac{1}{1.2}} = 4.56 \text{ m}^3$$

Le plus grand volume d'air est de  $4.56 \text{ m}^3$  si nous voulons qu'il reste encore 20 % d'eau lors de la plus grande dépression, il nous faut prévoir un ballon de volume égal à :

$$\tau = 4.56 \times 1.20 = 5.47 \approx 5.5 \text{ m}^3$$

→ Nous nous servons de l'abaque de Dubin et Guéneau pour déterminer le diamètre de diaphragme :



**Figure IV. 6** Abaque de Dubin et Guéneau donnant la surpression d'une conduite protégée par un ballon d'air

$$\left. \begin{array}{l} A = 0.62 \\ B = 0.8 \end{array} \right\} \text{ nous lisons } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\alpha V_0^2}{H_0} = 2.6 \text{ avec } \alpha = \frac{1}{2g} \left[ \frac{D^2}{0.6d^2} - 1 \right]^2 \\ \frac{P_{max}}{H_0} = 1.175 \end{array} \right.$$

$$\text{On a } \alpha = \frac{2.6 \times H_0}{V_0^2} = \frac{2.6 \times 266.53}{1.48^2} = 316.4$$

$$\alpha = \frac{1}{2g} \left[ \frac{D^2}{0.6d^2} - 1 \right]^2$$

$$2\alpha g = \left[ \frac{D^2}{0.6d^2} - 1 \right]^2$$

$$\frac{D^2}{0.6d^2} = \sqrt{2\alpha g} + 1$$

$$0.6d^2 = \frac{D^2}{\sqrt{2\alpha g} + 1}$$

$$d = \sqrt{\frac{D^2}{0.6\sqrt{2\alpha g} + 1}}$$

$$\text{A. N } d = \sqrt{\frac{500^2}{0.6\sqrt{2} \times 316.4 \times 9.81 + 1}}$$

$$d = 72.7 \text{ mm}$$

En prend  $d = 80 \text{ mm}$

Pour que la conduite soit protégée sur toute sa longueur, il faut l'équiper d'un Réservoir eau+ air comprimé d'un volume total  $\tau = 5.5 \text{ m}^3$  avec un volume d'air En fonctionnement permanent  $U_0$  compris  $2,1 \text{ m}^3$ . La canalisation de Branchement entre le ballon et la conduite de refoulement sera équipée d'un clapet ne laissant passer l'eau que dans le sens ballon conduite (dépression), by Passée par un diaphragme à bord vif dont le diamètre optimum sera de 80 mm.

Dans le sens conduite réservoir (surpression), l'eau passe par ce diaphragme.

Nous avons déterminé la protection nécessaire pour que la conduite soit protégée dans sa totalité, mais il peut être nécessaire de connaître les valeurs de la dépression et de la surpression en un Point déterminé de la conduite. Pour cela, nous pouvons avoir recours au tracé de l'épure de Bergeron.

Ce tracé est long et fastidieux car il associe une détermination graphique de la pression avec son Calcul et bien sûr les deux valeurs doivent correspondre. Nous devons donc agir par tâtonnements. En Plus de cela, les calculs préliminaires, pour mettre le tableau en place sont également assez longs.

Cependant le tracé de l'épure de Bergeron à la pompe peut être intéressant pour juger de l'utilité ou non Du diagramme à bord vif ; en effet si la conduite est très longue, les pertes de charge, très importante Pourront d'elles-mêmes limiter la surpression et il ne sera pas nécessaire de mettre un clapet by-passée Par un diaphragme.

Nous avons pris  $a = 1100$

→ Volume d'air initial :

$$U_0 = 2.1 \text{ m}^3$$

Pseudo période

$$\theta = \frac{2L}{a} = \frac{2 \times 13221.08}{1100} = 24.04 \text{ s}$$

Nous tracerons l'abaque à partir de  $H_0 = 266.34$

→ Variation de volume d'air ; nous avons la relation  $ZU^{1.2} = C^{te}$  en fonctionnement transitoire :

$$ZU^{1.2} = H_{abs}U_0^{1.2} = 344.34 \times 2.1^{1.2}$$

$$Z = \frac{838.78}{U^{1.2}}$$

### Amortissement de l'onde

Aller de l'onde : l'eau s'écoule du ballon vers la conduite (dépression,  $V_f > 0$ ).

Nous supposons que la perte de charge dans le clapet totalement ouvert est négligeable ainsi que celles dues au coude  $90^\circ$  et à l'élargissement brusque (embranchement /conduite) le diamètre de cet embranchement doit être proche du diamètre de la conduite.

Il y a juste la perte de charge  $\delta$  dans la conduite de refoulement représentée par le diaphragme équivalent.

Retour de l'onde l'eau s'écoule de la conduite vers le ballon (surpression,  $V_f < 0$ ).

L'eau passe par le diaphragme DN 80mm nous ne comptabilisons que l perte de charge  $\Delta h_2$  occasionnée pour une conduite DN 500 mm comportant ce diaphragme et nous négligerons le changement de direction ainsi que les changements de section.

→ Nous compterons également la perte de charge régulière  $\delta$  dans la conduite.

$$\Delta h_2 = K \frac{Vf^2}{2g} = \left[ \left( \frac{S}{ms_0} - 1 \right)^2 + \frac{1}{9} \right] \frac{Vf^2}{2g}$$

$$\Delta h_2 = K \frac{Vf^2}{2 \times 9.81} = \left[ \left( \frac{500^2}{0.6 \times 80^2} - 1 \right)^2 + \frac{1}{9} \right] \frac{Vf^2}{2 \times 9.81} = 209.45 Vf^2$$

→ Variation du volume d'air  $\Delta U$  :

$$\Delta U = SV_m \theta \quad V_m \text{ vitesse moyenne} = \frac{(V_f)_i + (V_f)_{i+1}}{2}$$

$$\Delta U = 0.25^2 \times 3.14 \times 24.04 = 4.71 V_m$$

→ La valeur maximale du coup de bélier :

$$b = a \frac{V_0}{g} = 1100 \times \frac{1.48}{9.81} = 166 \text{ m}$$

→ Calcule de la pente :

$$p = \frac{a}{gs} = \frac{1100}{9.81 \times 0.19625} = 571.36 \text{ s/m}^2$$

On a  $Q = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \rightarrow x$

0.025  $\rightarrow$  1 cm

$x = \frac{1 \times 1}{0.025} = 40 \text{ cm} \longrightarrow$  A

$h = 571.36 \rightarrow y$

25  $\rightarrow$  1 cm

$y = \frac{571.36 \times 1}{25} = 22.85 \text{ cm} \longrightarrow$  B

$$\alpha = \arctg \frac{B}{A} = \arctg \frac{22.85}{40} = \arctg(0.57125) = 29,74^\circ \cong 30^\circ$$

### Remarque :

Dressons maintenant le tableau que nous allons remplir en même temps que nous tracerons le graphique. Nous commencerons à calculer la vitesse moyenne  $V_m$  puis nous continuerons à remplir le tableau en revenant à la deuxième colonne où nous appliquant les lois trouvés ci-dessus pour calculer : la variation de volume d'air, volume d'air, pression de l'air, pression dans la conduite, et les pertes de charges dans la conduite.

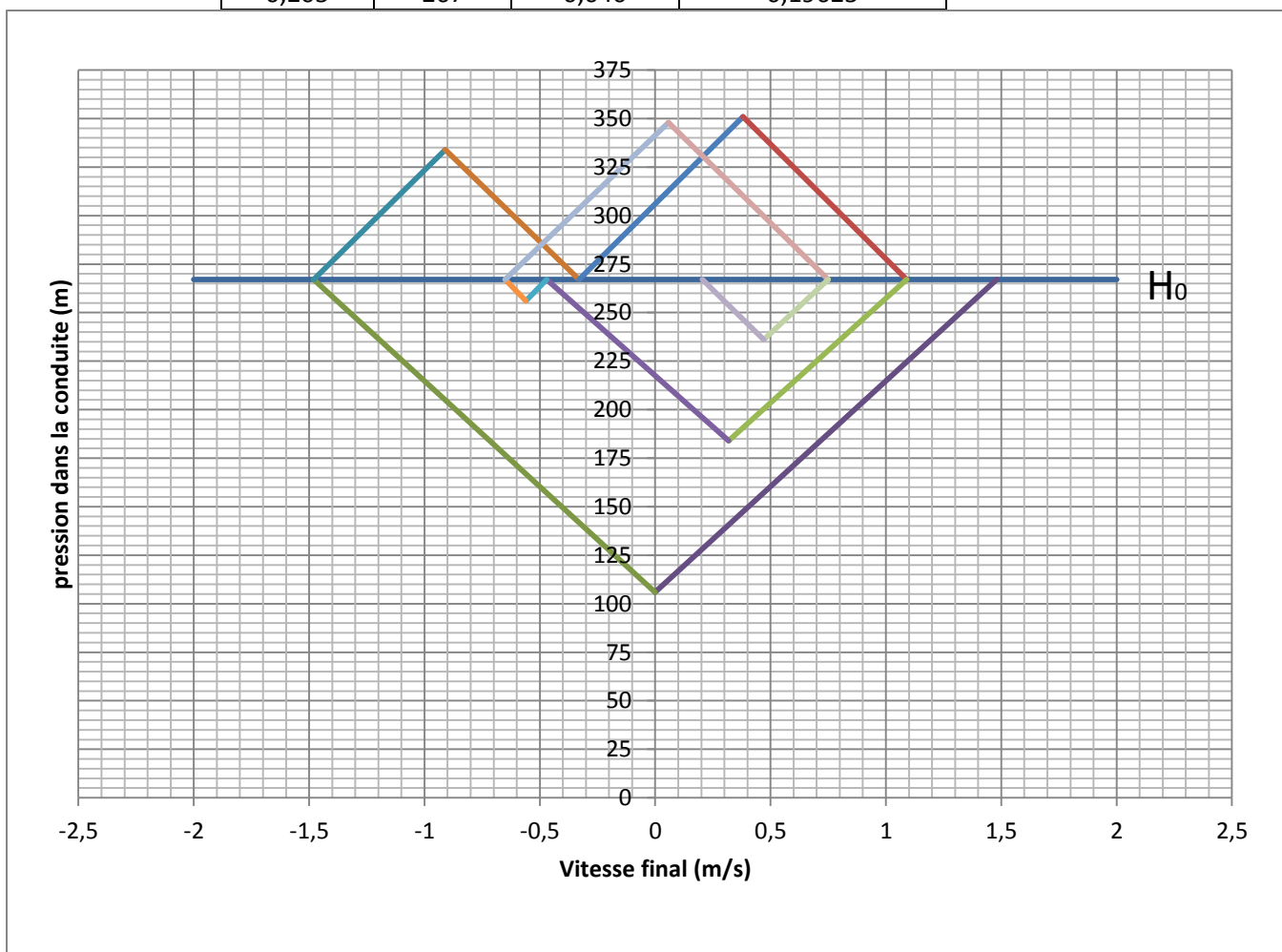
D'où nous allons exploiter les résultats obtenus dans la construction de l'épure de Bergeron.

**Tableau IV. 3** Calculs inhérents au tracé de l'épure de Bergeron

Intervalle de temps	variation de volume d'air $\Delta u=4,72V_m$	volume d'air $U_i=U_{i-1}+U$	pression de l'air $Z=838,78/U^1,2$	perte de charge aller: $\Delta h_1=0$ retour: $\Delta h_2=196Vf^2$	pression conduite avec $\sigma$ aller: $Z-\Delta h_1$ retour: $Z+\Delta h_2$	perte de charge $\sigma$	pression conduite sans $\sigma$ aller: $Z-\Delta h_1-\sigma$ retour: $Z+\Delta h_2+\sigma$	vitesse $V_f$	vitesse moyenne $V_m$	vitesse $V_f$ choisie
0,000	-	2,100	344,340	-	344,340	77,223	267,117	1,480	-	-
24,040	3,493	5,593	106,290	-	106,290	0,000	106,290	0,000	0,740	1,100
48,080	-2,148	3,445	190,104	173,446	363,549	29,195	334,355	-0,910	-0,455	-
72,120	-1,251	2,194	326,640	-	356,884	5,091	351,794	0,380	-0,265	0,650
96,160	1,647	3,842	166,810	-	187,991	3,565	184,426	0,318	0,349	-
120,200	-0,571	3,271	202,349	65,684	268,033	11,056	256,977	-0,560	-0,121	-
144,240	-1,187	2,083	347,617	-	348,297	0,115	348,183	0,057	-0,252	0,050
168,280	1,244	3,327	198,223	-	244,490	7,788	236,702	0,470	0,264	-

**Tableau IV. 4 Rapport vitesse-débit- section**

vitesse	pression	Débit	section de la conduite
1,480	267	0,290	0,19625
0,000	106	0,000	0,19625
-1,480	267	-0,290	0,19625
-0,910	334	-0,179	0,19625
-0,330	267	-0,065	0,19625
0,380	351	0,075	0,19625
1,090	267	0,214	0,19625
0,318	184	0,062	0,19625
-0,470	267	-0,092	0,19625
-0,560	256	-0,110	0,19625
-0,650	267	-0,128	0,19625
0,057	348	0,011	0,19625
0,750	267	0,147	0,19625
0,470	236	0,092	0,19625
0,205	267	0,040	0,19625



**Figure IV. 7** l'épure de Bergeron

**Remarque :** Le principe de construction de l'épure nécessitera quelques tâtonnements où nous tracerons les abscisses selon les vitesses de l'écoulement dans la conduite (nous pouvons aussi faire appel au débit) et sur l'axe des ordonnées nous tracerons les valeurs des pressions dans la conduite. Le principe de traçage consiste donc à supposer un observateur se déplace au long de toute la conduite, la première valeur de la vitesse sera prise égale à celle de l'écoulement puis nous dressons une droite de pente qui a une valeur de :

$+\frac{a}{g_s}$  (*cas de surpression*) ou  $-\frac{a}{g_s}$  (*cas de dépression*). On refait le tâtonnement pour le reste des valeurs pour pouvoir construire le reste de l'épure.

### **Conclusion**

Nous avons pu calculer la valeur du coup de bélier ainsi le volume du réservoir d'air utilisé comme protection, puis on a construit l'épure de Bergeron.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Le phénomène transitoire du coup de bélier reste toujours un sujet d'actualité vu que de nombreuses installations hydrauliques subissent ces effets que ce soit dans les stations de pompage, les centrales hydroélectriques ou encore dans les réseaux d'alimentation en eau potable. Dans le cas d'une station de pompage les régimes transitoires les plus dangereux sont consécutifs à une disjonction électrique (ou panne de courant).

















L'étude de ce phénomène nous aide à bien comprendre comment diminuer les dégâts et comment bien protéger les différentes installations hydrauliques qui ne peuvent fonctionner sans quelle subissent ces effets de surpression ou encore de dépression

Ce mémoire nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le phénomène et les différentes techniques de lutte utilisées.


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. Les réservoirs d'air appelés communément « ballons anti-béliers » sont des récipients sous pression contenant de l'eau et de l'air sous pression. Ils sont installés sur des circuits hydrauliques afin d'assurer un approvisionnement efficace de l'eau après la disjonction. Les réservoirs d'air peuvent être utilisés comme moyen pour réguler les pressions du système pour répondre rapidement aux effets transitoires du circuit hydraulique.


La méthode de Louis Bergeron permet de déterminer dans les installations hydrauliques les variations de pression et de débit dues aux coups de bélier sans expliciter analytiquement la nature de l'onde. Cette méthode permet d'exprimer les pressions en hauteur de colonne de fluide et remplacer la vitesse moyenne d'écoulement par le débit-volume. Notons également qu'ils comptabilisent généralement les pressions absolues.


## Références bibliographiques

-  Acte normatif relatif au calcul des coups de bélier dans les conduites d'eau Rédigé par l'Université technique de construction Bucarest Mars 2011. [14]
-  ALI BERREKSI Cours hydraulique 3 Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE-Bejaia) 2015. [6]
-  Armando LENCASTRE Hydraulique général Professeur en hydraulique Université nouvelle - Lisbonne – Portugal. octobre 1995. [11]
-  BH GROUPE google.com. [16]
-  DADI Meriem, MEZINE Ouarda, Université AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA, Mémoire Simulation numérique du phénomène de coup de bélier par MATLAB 2018. [4]
-  DUPONT André Hydraulique urbain Tome 2 ouvrage de transport élévation et distribution des eaux 1974. [1]
-  Guide méthodologique d'études anti-bélier pour les réseaux d'eau Groupement de Bordeaux UR Ouvrages et réseaux hydrauliques, avenue de Verdun Gazinet – 33612 Cestas Cedex. [15]
-  HUSSON (R.). Étude théorique et expérimentale de la sirène glottique, et contributions diverses à la théorie des pavillons. Thèse Fac. Sci. Paris (1965). [10]
-  Hydraulique Appliquée elearning.univ-djelfa.dz 2020. [20]
-  L.BERGERON de coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité professeur à l'école centrale des arts et manufactures, PARIS, 1950. [2]
-  Michel A.Morel Tome2 turbomachines constructions graphiques phénomènes transitoires. [12]
-  SAID L'HADJ Dihia mémoire fin d'étude, étude du coup de bélier en refoulement dans un réseau de rang-2-, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE- ARBAOUI Abdallah, 2014. [3]
-  SINI. M'hamed et BOUDJEMIA Malek mémoire étude de phénomène du coup de bélier UMMTO 2014. [8]
-  M. VBERT La protection des conduites de refoulement contre les surpressions (Génie Civil du 15 mars 1950). [7]
-  elearning.univ-annaba.dz[5]
-  [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coup\\_de\\_b%C3%A9lier](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coup_de_b%C3%A9lier). [8]

 <https://www.mesdepanneurs.fr/blog/chocs-dans-les-canalisation?page=1>**[9]**

 Intersurgical google.com. **[18]**

 Le Volant d'inertie, une technologie prometteuse –Enerzine, google.com. **[13]**

 TLV.com. **[19]**

 www.valvemagazine.com. **[17]**

# PROFIL EN LONG DU TRONÇON SR1-SR2

