

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique  
Référence : ...../2020



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية و الري  
المرجع ...../2020

## Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Thème

### METHODOLOGIE DE RECHERCHE SUR LES PHENOMENES TRANSITOIRES EN ADDUCTION D'EAU

Présenté par : Aissani Chafik

Devant le jury composé de :

Mr Masmoudi Rachid

Mr Laayadi Adel

Mr Abdessemed Fouzi

President

Examineur

Promoteur

Année universitaire : 2019 - 2020

# DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissances  
et de respects à :

- ❖ Mes très chers parents : mon père LAKHDAR - allah  
yarhmo- et a ma Mère pour tous ces sacrifices qu'elle a  
consentit à mon égard ;
- ❖ Mes chers frères et ma sœur ;
- ❖ Toute la famille ;
- ❖ Mes amis proches ;
- ❖ Mes collègues ;

# REMERCIEMENT

DIEU, pour m'avoir donné la force dans les moments difficiles d'éditer ce mémoire.

Je remercie vivement mon encadreur Mr. Abdessemed Fouzi d'avoir accepté de diriger mon travail, pour sa compréhension et ses encouragements au cours de l'élaboration de ce mémoire et Mr. Bouziane Mohamed Toufik pour avoir accepté de m'aider durant mes recherches ;

Tous mes professeurs du département d'hydraulique pour leurs disponibilités et conseils.

J'adresse aussi mes remerciements les plus sincères à tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Tous mes compagnons de promotion 2019-2020 hydraulique.

Mes amis qui n'ont cessé de m'encourager.

## Liste des matières

Liste des matières.....	I
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE.....	3
1. INTRODUCTION :.....	4
2. NOTION GENERALE DU PHENOMENE :.....	4
2.1. type d'écoulement :.....	4
2.1.1. Ecoulement permanent :.....	4
2.1.2. Ecoulement non permanent :.....	4
2.1.3. Ecoulement uniforme :.....	4
2.1.4. Ecoulement non uniforme :.....	4
2.1.5. Ecoulement transitoire :.....	5
3. HISTORIQUE :.....	5
3.1. Le régime transitoire dans les conduites enterrées et non enterrées :.....	5
4. DESCRIPTION PHYSIQUE :.....	8
4.1. Présentation du phénomène transitoire :.....	8
4.1.1. Généralités :.....	8
4.1.2. Mise en équations :.....	9
4.2. Les équations aux caractéristiques :.....	16
4.3. Interprétation des équations aux caractéristiques :.....	19
4.4. Les équations d'ALLIEVI :.....	20
5. CONCLUSION :.....	24
Chapitre 02: LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE.....	25
1. Introduction :.....	26
2. PHENOMENE DU COUP DE BELIER :.....	26
2.1. Notions générales :.....	26
2.2. Les risque dus aux coups de bélier :.....	27
2.3. Célérité $\langle a \rangle$ des ondes :.....	27
2.4. Analyse physique du phénomène du coup de bélier :.....	28
3. Fermeture et ouverture des vannes dans les conduites gravitaires :.....	29
3.1. Fermeture de vannes :.....	29
3.2. Ouverture de vanne :.....	32

4. Arrêt ou démarrage de pompes dans les conduites de refoulement :.....	33
5. CONCLUSION :.....	36
CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS.....	37
1. INTRODUCTION :.....	38
2. PROTECTION CONTRE LA DEPRESSION (CAS DES VOLANTS D'INERTIE) :.....	38
3. PROTECTION CONTRE LA SURPRESSION (CAS DES SOUPAPES DE DECHARGE):	39
4. PROTECTION CONTRE LA DEPRESSION ET LA SURPRESSION : .....	40
4.1. Les ventouses (les reniflards) :.....	40
4.2. Les réservoirs d'air :.....	42
4.3. Cheminée d'équilibre : .....	48
4.3.1. But de l'ouvrage:.....	49
4.3.2. Domaine d'application :.....	49
4.3.3. Types de cheminées : .....	50
5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS :.....	52
6. APPLICATION A UN CAS REEL :.....	53
6.1. Généralités :.....	53
7. CONCLUSION :.....	65
CONCLUSION GENERALE.....	66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	70

## Liste des figures

Figure 1 :Forces et contraintes radiales dans un tuyau .....	9
Figure 2 :Déplacement d'un élément liquide. ....	11
Figure 3 : Théorème des quantités de mouvement. ....	13
Figure 4 : Forces exercées sur une tranche liquide.....	14
Figure 5 : Déplacement d'une onde dans le plan (x, t).....	19
Figure 6 :Conduite gravitaire.....	23
Figure 7 : Cas de la fermeture brusque.....	29
Figure 8: Cas de la fermeture brusque.....	30
Figure 9 : Cas de fermeture lente.....	31
Figure 10 : Adduction gravitaire – surpression .....	33
Figure 11 : Conduite de refoulement – dépression.....	34
Figure 12 : Répartition du coup de bélier (fermeture brusque).....	35
Figure 13 : Répartition du coup de bélier (fermeture lente).....	35
Figure 14 : Répartition du coup de bélier (fermeture lente).....	36
Figure 15 : Volant d'inertie. ....	39
Figure 16 : Concentration de la masse du Volant d'inertie. ....	39
Figure 17 : Soupape de décharge.....	40
Figure 18 : Fonctionnement d'une soupape de décharge .....	40
Figure 19 : Ventouse à trois fonctions.....	41
Figure 20 : Ventouse à une seule fonction. ....	41
Figure 21 : Réservoir d'air.....	43
Figure 22 : Abaque de Vibert. ....	45
Figure 23 : Etranglement au moyen d'une tuyère .....	47
Figure 24 : Etranglement au moyen d'un battant percé.....	47
Figure 25 : Robinet Vanne papillon.....	48
Figure 26 : Robinet Vanne à opercule .....	48
Figure 27 : clapet anti-retour. ....	48
Figure 28 : Cheminée à étranglement.....	50
Figure 29 : Cheminée à épanouissement. ....	50
Figure 30 : Cheminée différentielle.....	51
Figure 31 : Coupe type de cheminée. ....	51
Figure 32 : Réservoir d'air.....	56
Figure 33 : Le type du réservoir anti –bélier choisi.....	63
Figure 34 : Emplacement du réservoir anti-bélier .....	64
Figure 35: Les accessoires de raccordement du réservoir anti-bélier avec la conduite de refoulement.....	64

## Liste des tableaux

Tableau 1: Valeurs du coefficient $K_m$ .....	28
Tableau 2: Valeurs moyennes et les fourchettes de la célérité des ondes : .....	28
Tableau 3: Notations.....	29
Tableau 4 : Avantages et inconvénients des appareils anti-bélier. ....	52



# **Introduction Générale**



# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

Dans le cadre de la gestion et de l'exploitation des systèmes hydrauliques en charge (alimentation en eau potable ou autres) les ingénieurs sont confrontés au problème récurrent du coup de bélier, qui nuit au bon fonctionnement de ces systèmes.

Le coup de bélier étant un cas particulier du régime transitoire, est un phénomène oscillatoire qui se manifeste dans les conduites entre deux régimes permanents. C'est le nom que l'on donne à une onde de choc hydraulique, lorsqu'un liquide non compressible comme l'eau, est stoppé net dans une canalisation. Autrement dit, c'est l'arrêt brutal de la circulation de l'eau lorsqu'un robinet (ou tout autre appareil) se ferme

Dans l'optique d'une meilleure compréhension du phénomène et des paramètres intrinsèques le caractérisant, on se propose, dans le cadre de notre mémoire, de faire une étude de coup de bélier en cas de refoulement avec influence du sol et loi de manœuvre du robinet-vanne. Ce travail se divise en deux grandes parties.

La première partie purement théorique et qui se subdivise en deux chapitres on essaiera de donner un aperçu sur les causes et effets du régime transitoire dans les installations hydrauliques en charge. Aussi nous ferons une analyse qualitative et quantitative du phénomène, c'est à dire que l'on essaiera de comprendre et d'illustrer ce qui se passe réellement pendant un coup de bélier dans une conduite. Puis de formuler les équations régissant le phénomène en appliquant deux théorèmes bien connus en hydraulique, à savoir le théorème de conservation de la masse, et le théorème des quantités de mouvement. De plus, nous verrons quelques phénomènes particuliers tels que la rupture de la veine liquide, l'entraînement d'air, la cavitation etc.

Dans la seconde partie c'est-à-dire troisième et dernier chapitre on traitera un exemple pratique du coup de bélier qui se manifeste dans une conduite de refoulement lors d'une disjonction inopiné du courant. Dans le but de faire un calcul le plus représentatif possible de la réalité, nous exposerons un moyen de protection contre le coup de bélier provoqué par cette disjonction qui est le réservoir d'air.



**Chapitre 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE**

## 1. INTRODUCTION :

L'objet de ce chapitre porte sur l'analyse théorique puis physique du phénomène transitoire en tant que régime d'écoulement.

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu bibliographique sur le régime transitoire et définir quelques types d'écoulements que l'on rencontrera au cours de notre travail.

## 2. NOTION GENERALE DU PHENOMENE :

### 2.1. Type d'écoulement :

#### 2.1.1. Ecoulement permanent :

L'écoulement de liquide est dit permanent lorsque les propriétés du fluide et les caractéristiques hydrauliques de celui-ci restent invariables dans le temps, c'est à dire :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

U : vitesse d'écoulement,

P : la pression,

$\rho$  : masse volumique.

#### 2.1.2. Ecoulement non permanent :

L'écoulement du liquide est dit non permanent si la vitesse et la pression varient dans le temps (t) en un point donné de l'espace (x) rempli de liquide en mouvement, les vitesses et les pressions en écoulement non permanent sont les fonctions de quatre variables indépendantes à savoir : coordonnées (x, y, z) du point examiné et le temps (t).

On distingue un écoulement non permanent en charge et à surface libre.

#### 2.1.3. Ecoulement uniforme :

Un écoulement est dit uniforme lorsque la vitesse du fluide à un instant donné, à une même direction et une même intensité en tous points de ce fluide.

$$\frac{\partial U}{\partial X} = 0$$

#### 2.1.4. Ecoulement non uniforme :

Un écoulement est dit non uniforme si la vitesse du fluide varie d'une section à l'autre

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

c'est-à-dire  $\frac{\partial U}{\partial X} \neq 0$ .

### 2.1.5. Ecoulement transitoire :

L'écoulement est dit transitoire lorsque les paramètres ou les caractéristiques hydrauliques à savoir la vitesse et la pression varient dans le temps :

$$\frac{\partial U}{\partial X} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial U}{\partial X} = 0, \frac{\partial U}{\partial t} \neq 0$$

Avec :

U : vitesse d'écoulement.

P : la pression.

Ce phénomène transitoire peut se manifester soit dans un canal à ciel ouvert ou bien dans une conduite en charge, par accroissement ou décroissement du débit.

On pourra citer quelques exemples d'écoulements transitoires dans le cas d'une conduite en charge :

- Ecoulement dans les machines hydrauliques à puissance variable.
- Phénomène du coup de bélier.

Dans notre travail on va se focaliser sur le phénomène du coup de bélier.

## 3. HISTORIQUE :

L'hydraulique est une science aussi ancienne que la civilisation humaine puisqu'elle commande toutes les utilisations de l'eau.

L'étude des écoulements transitoires a commencé par l'examen des propagations des ondes sonores dans l'air, la propagation des ondes dans l'eau peu profonde et l'écoulement du sang dans les artères.

Le médecin THOMAS YOUNG en 1808 a élaboré expérimentalement sa théorie de la propagation des ondes de pression due aux pulsations cardiaques. Dans ses études il introduisit le célèbre module de YOUNG.

### 3.1. Le régime transitoire dans les conduites enterrées et non enterrées :

Le régime transitoire dans les conduites non enterrées et enterrées a fait l'objet de plusieurs recherches, dont on peut citer :

NEWTON qui a étudié la propagation des ondes dans les canaux. Il a obtenu expérimentalement la vitesse du son dans l'air comme égale à 348m/s.

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

En 1789 MANGE a développé une méthode graphique d'intégration des équations hyperboliques aux dérivées partielles, connue sous le nom de méthode des caractéristiques.

En 1869 RIEMANN a développé et appliqué une équation tridimensionnelle du mouvement et sa forme simplifiée unidimensionnelle dans différents domaines (ondes sonores, cordes vibrantes etc. ...).

KORTEWEG fut le premier à déterminer la célérité d'onde en considérant l'élasticité de la conduite et la compressibilité du fluide en même temps.

Bien que WOOD considère MICHAUD comme étant le premier à avoir traité le problème du « coup de bélier » des équations récentes faites par ANDERSON montrent que le général MENABREA (1858) fut le premier à avoir étudié ce problème.

GROMEKA a introduit pour la première fois, les frottements dans l'analyse du coup de bélier. Il a considéré cependant que le liquide était incompressible et que les frottements étaient directement proportionnels à la vitesse d'écoulement.

EN 1897 JOUKOWSKI a publié son rapport classique sur la théorie de base du « coup de bélier » qui est basée sur ses études expérimentales et théoriques, il a développé une formule pour la célérité d'onde en tenant compte de l'élasticité de la conduite et celle de l'eau. Il a développé la relation entre la variation de la vitesse d'écoulement et celle de la pression. Il a supposé que la pression est uniforme à chaque instant dans toutes les sections transversales du tuyau.

La solution définitive du problème a été donnée par l'Italien LORENZO ALLIEVI dans un mémoire magistral publié en décembre 1901 dans les annales de la société des Ingénieurs et Architectes Italiens. IL a étudié le coup de bélier et a trouvé une formule générale qui donne la célérité d'onde.

Plusieurs auteurs ont étudié l'application aux problèmes particuliers posés par les conditions usuelles de la pratique courante (conduites forcées, conduites de refoulement etc....) parmi les Savants et Ingénieurs qui ont apporté leur contribution à l'étude de ces phénomènes complexes, citons MM BOUSSINESQ, KORTEWEG, JOUGUET, CAMICHEL, GABRIEL, LOUIS BERGERON, ESCANDE, DUBIN, EYDOUX, etc....

GIBSON introduit une méthode qui permet de mesurer le débit d'une canalisation (généralement une conduite forcée) en provoquant volontairement un coup de bélier suivant

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

une loi de fermeture quelconque et en enregistrant les variations de pression qui en résultent. Cette méthode fut utilisée pour la première fois en 1921 pour la mesure d'un rendement des turbines de la centrale du NIAGARA.

Le suisse OTHMAR SCHNYDER a proposé, en 1929 une méthode graphique de calcul du coup de bélier dans les conduites de refoulement des pompes puis dans les systèmes en charge quelconques en particulier aux conduites forcées (1932).

Indépendamment de SCHNYDER le français LOUIS BERGERON a proposé en 1931 la même méthode. Le principe de la méthode avait été donné par les autrichiens KREITNER et LOWY en 1928.

En 1957, JEAGER a élaboré la célérité d'onde dans les galeries creusées dans une roche et les galeries blindées en tenant compte de la théorie des conduites épaisses et la déformabilité de la conduite, mais négligeant le coefficient de POISSON.

L'événement du calcul numérique vers la moitié de ce siècle a dérouté dans des perspectives nouvelles. Une procédure numérique s'appuyant sur la méthode des caractéristiques a été élaborée par la contribution de PARMARKIAN (1963), de WILIE et STREETER (1967). Cette procédure n'a cessé d'être élargie et consolidée pour rendre compte des divers phénomènes qui accompagnent le passage des ondes de coup de bélier dans les tuyauteries.

PARMARKIAN a étudié l'influence des efforts longitudinaux sur la célérité de propagation dans les conduites à parois minces uniquement, mais il a considéré l'influence des contraintes et déformations longitudinales de la conduite.

En 1936, HALLIWEL élargit les travaux de PARMARKIAN pour inclure la conduite à parois épaisses tout en prenant en compte les contraintes et les déformations de la conduite, mais il exprime la célérité de la même façon que PARMARKIAN.

En 1977, E.HADJ TAYEB a montré l'influence de la déformabilité des parois et de compressibilité du fluide sur la propagation des ondes de pression dans le domaine diphasique. Il a montré que la propagation des ondes de pression est étroitement liée à l'élasticité des parois et la compressibilité du fluide.

En 1979, F.MASSOUH traitant les équations de continuité et dynamique par la méthode d'ALLIVI ou par la méthode des caractéristiques et détermine une nouvelle expression de la célérité de propagation qui tient compte des efforts longitudinaux dans les conduites à parois minces et épaisses.

# CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

Dans le même domaine, B.BAHRAR, H.RIEUTORD, et R.MOREL, ont mené une étude avec le minimum d'hypothèse tant sur l'écoulement que sur le comportement de la paroi, ou sont également prises en compte les déformations de flexion et de cisaillement ainsi que les effets dynamiques liés à l'inertie de la paroi.

Actuellement, B.SALAH analyse tous les travaux de JEAGER et HALLIWEL et développe un modèle mathématique permettant le calcul de la célérité d'onde dans les conduites enterrées, en tenant compte des caractéristiques mécaniques du sol et de la conduite.

Le développement de l'outil informatique et l'accroissement constant de sa puissance ont permis de traiter des problèmes beaucoup plus complexes et d'améliorer la précision de calcul.

## 4. DESCRIPTION PHYSIQUE :

### 4.1. Présentation du phénomène transitoire :

#### 4.1.1. Généralités :

On appelle régime transitoire, un phénomène qui se manifeste entre deux régimes stationnaires, autrement dit c'est un écoulement varié, où les paramètres hydrauliques changent :

$$\frac{\partial U}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial X} \neq 0, \frac{\partial U}{\partial X} \neq 0$$

Il peut se produire soit dans un canal à ciel ouvert, soit dans une conduite à écoulement en charge par accroissement ou décroissement du débit.

L'écoulement du liquide s'appelle non permanent si la vitesse et la pression varient dans le temps  $t$  en point donné de l'espace rempli de liquide en mouvement [7].

Les vitesses et les pressions en mouvement non permanent sont les fonctions de quatre variables indépendantes ; coordonnées  $x, y, z$  du point examiné et le temps  $t$ .

On distingue un écoulement non permanent en charge et à surface libre, un écoulement non permanent unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel.

Un exemple de l'écoulement non permanent unidimensionnel en charge du liquide est un écoulement non permanent apparaissant par suite de la variation du régime de service des dispositifs régulateurs installés sur les tuyauteries.

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

Un cas particulier d'un tel écoulement est désigné par le terme « **coup de bélier** » que nous définirons en détail.

### 4.1.2. Mise en équations :

Nous allons établir les deux équations connues sous le nom d'équations de SAINT-VENANT à partir des équations générales qui sont l'équation de continuité et l'équation dynamique.

#### A - Equation de continuité :

Nous allons d'abord rappeler certains résultats de la mécanique des matériaux et les utiliser pour déterminer les contraintes dans les tuyaux sous pression. [8]

Soient  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  respectivement les contraintes longitudinale et radiale,  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  les déformations correspondantes, E le module d'élasticité de la conduite (module de YOUNG) et  $\nu$  le module de poisson.

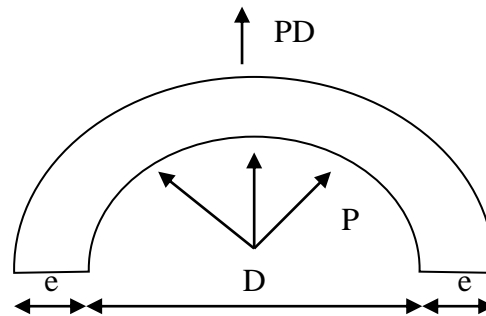
La loi de HOOKE permet d'écrire :

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1)$$

Exprimons les contraintes  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$

La contrainte  $\sigma_2$  :



**Figure 1** :Forces et contraintes radiales dans un tuyau.

Si D est le diamètre et e l'épaisseur du tuyau. La pression interne P exerce une force P.D sur une demi-circonférence.

La contrainte est donc :  $\sigma_2 = \frac{PD}{2e}$



## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

Contrainte  $\sigma_1$  : on distingue deux cas :

**Premier cas** : si la conduite a suffisamment de joints, on peut considérer qu'il n'y a ni contraintes, ni déformations longitudinales et que les éléments cylindriques successifs sont indépendants entre eux (donc  $\nu = 0$ ). Dans ce cas, on a  $\nu_1 = \nu = 0$  ( $\nu$  n'est pas alors le module de poisson du matériau proprement dit mais son équivalent pour la canalisation globale).

**Deuxième cas** : la contrainte longitudinale doit être prise en compte. Elle dépend dans ce cas de la façon dont le tuyau est ancré aux extrémités :

- Tuyau ancré aux deux extrémités : on a donc  $\varepsilon_1 = 0$  et par conséquent

$$\sigma_1 = \nu \sigma_2$$

- Tuyau libre à une extrémité : la force qui s'exerce à l'extrémité du tuyau est égale  $\frac{P \cdot \pi \cdot D^2}{4}$ , cette pression peut être nulle dans le cas où la vanne d'extrémité serait grande ouverte. Cette force s'exerce sur le périmètre entier du tuyau  $\pi \cdot D$ , donc sur la surface  $\pi \cdot D \cdot e$ , la contrainte est donc  $\sigma_1 = \frac{P \cdot D}{4e}$  qu'on peut écrire  $\sigma_1 = \frac{\sigma_2}{2}$

### Récapitulation :

L'expression de la contrainte radiale :  $\sigma_2 = \frac{PD}{2e}$

L'expression de la contrainte longitudinale :  $\sigma_1 = k_c \sigma_2$

Avec  $k_c$  coefficient d'ancrage, on peut avoir trois cas :

**Cas A** : conduite sans joints, libre à une extrémité  $k_c = \frac{1}{2}$

**Cas B** : conduite sans joints, ancrées aux deux extrémités  $k_c = \nu$

**Cas C** : conduite avec de nombreux joints  $k_c = 0$

Nous allons exprimer l'équation de continuité en analysant les déformations à masse constante d'un volume de liquide entre les instants  $t$  et  $t + dt$ . Pour cela, nous allons exprimer que cette masse  $\rho v = \rho \cdot S \cdot \Delta L$  reste constante soit :

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

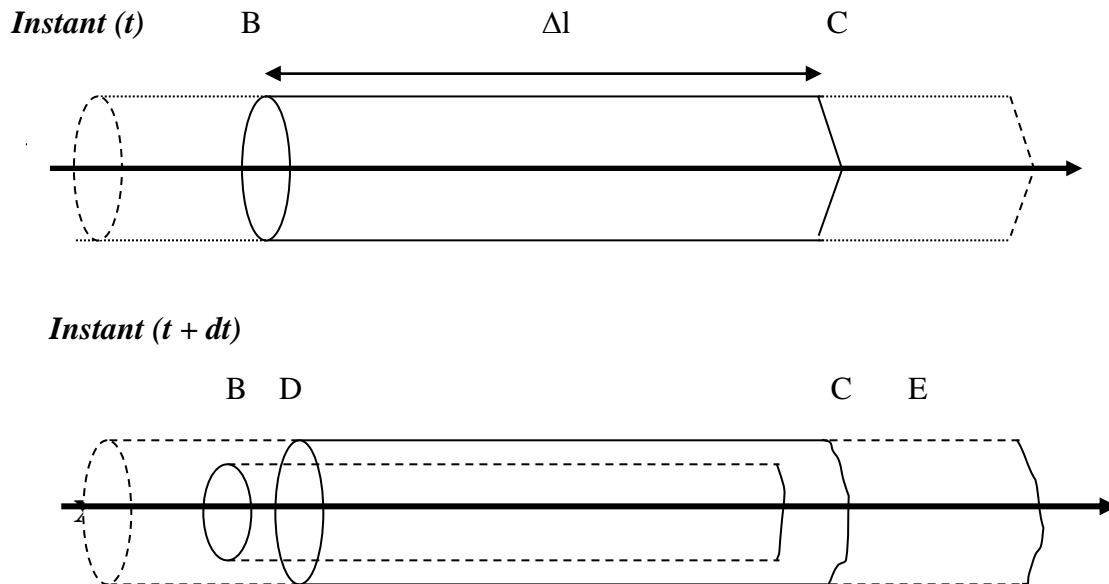
## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

Avec :

$\rho$  : La masse volumique du liquide.

$S$  : La section radiale.

$\Delta L$  : la variation de longueur de l'élément liquide



**Figure 2** : Déplacement d'un élément liquide.

### Variation de longueur de l'élément liquide

Exprimons la variation  $\Delta L$ :

$$\Delta L(t) = x_C - x_B$$

$$\Delta L(t + dt) = x_E - x_D$$

$$d(\Delta L) = (x_E - x_C) - (x_D - x_B)$$

$$d(\Delta L) = U_C \cdot dt - U_B \cdot dt = (U_C - U_B) dt$$

$$\text{d'où } d(\Delta L) = \frac{\partial U}{\partial X} \cdot \Delta L \cdot dt$$

$$\text{et } \frac{d(\Delta L)}{\Delta L} = \frac{\partial U}{\partial X} dt \quad (I.2)$$

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

Par définition, le module d'élasticité du fluide  $\varepsilon$  est égal à  $dp/(d\rho/\rho)$ .

On en déduit l'égalité suivante :

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{d\rho}{\varepsilon} \quad (I.3)$$

### Variation de section de l'élément liquide :

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

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r} = 2d\varepsilon_2 = \frac{2}{E}(d\sigma_2 - \nu d\sigma_1)$$

On a vu précédemment que  $\sigma_1 = k_c \sigma_2$

Si on pose  $c = 1 - k_c \nu$ , on obtient :

$$\frac{dS}{S} = \frac{2C}{E} d\sigma_2 = \frac{D}{E.e} . C dP \quad (1.4)$$

On remplace chaque terme de l'équation (I.1) par les expressions données dans les équations (I.2, I.3 et I.4), on obtient l'équation de continuité:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \left( \frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E.e} C \right) \frac{dP}{dt} = 0 \quad (1.5)$$

On voit que le terme  $\left( \frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E.e} C \right)$  dépend d'une part de la compressibilité de l'eau ( $\varepsilon$ ), d'autre part des caractéristiques du tuyau  $\left( \frac{D}{E.e} \right)$  et de la façon dont ce dernier est assemblé et ancré ( $c$ ).

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

$$\frac{1}{a^2} = \rho \left( \frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E.e} . C \right) \quad (I.6)$$

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

$$\rho \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{a^2} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial X} \right) = 0 \quad (I.7)$$

La relation (I.7) représente la première équation de SAINT-VENANT

### B - Equation dynamique :

On va suivre un petit élément de volume dans son mouvement et lui appliquer

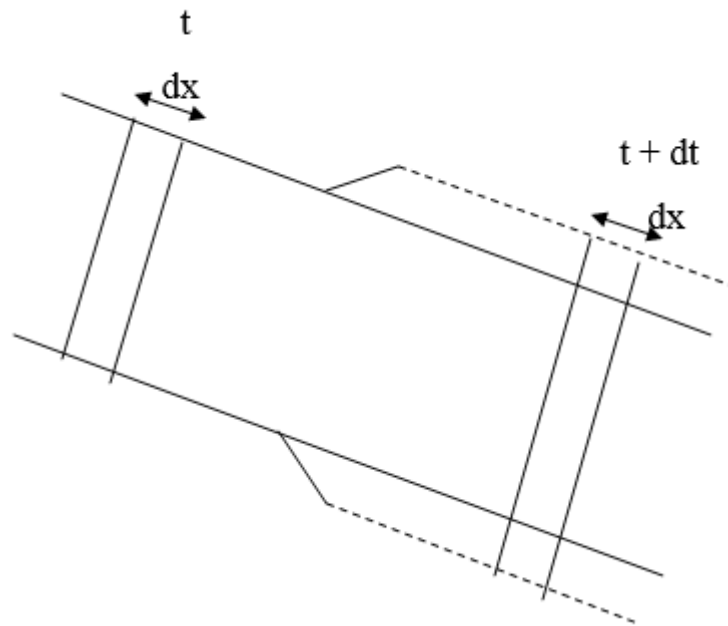
## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

le théorème des quantités de mouvement : [8]

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

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

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



**Figure 3 :** Théorème des quantités de mouvement.

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

On a donc : 
$$\frac{dm}{dt} = 0$$

Donc 
$$\frac{d(mU)}{dt} = m \frac{dU}{dt} = \rho \cdot S \cdot dX \cdot \frac{dU}{dt} \quad (I.9)$$

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

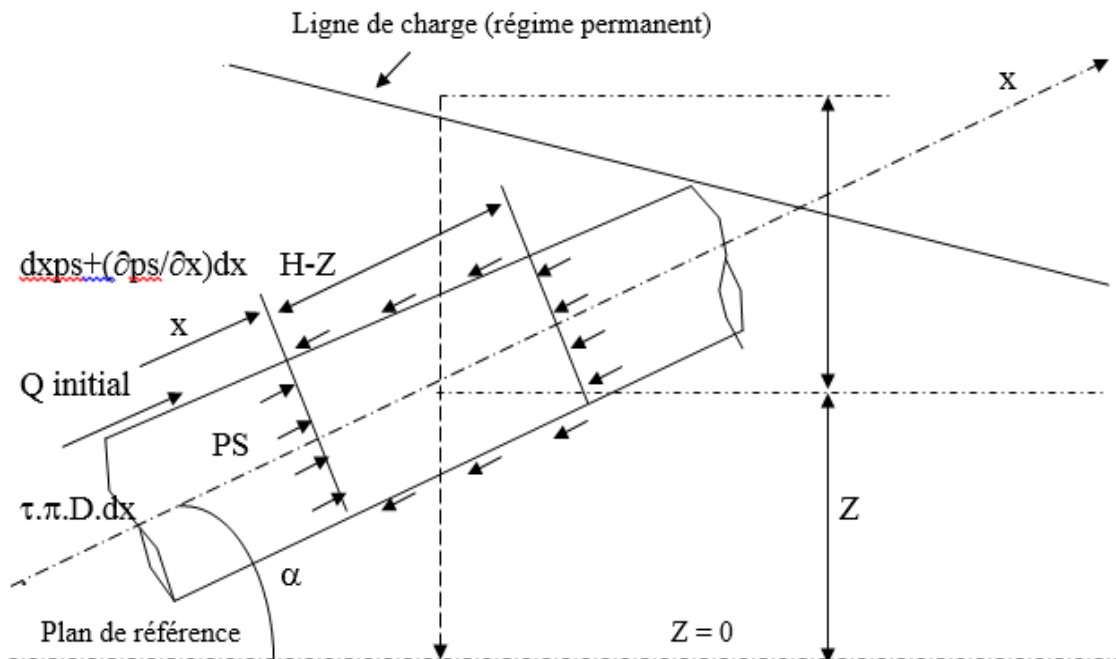
- ❖ La pression sur une face de la tranche dX : PS
- ❖ La pression sur l'autre face :  $-\left(PS + \frac{\partial P}{\partial X} dX\right)S$

**N.B** : la section S est supposée constante sur toute la longueur de la conduite donc nous

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

négligeons le terme  $\frac{\partial S}{\partial X}$ .

- ❖ La composante du poids :  $-\rho g S dx \sin \alpha$
- ❖ Les frottements du liquide avec les parois de la conduite :  $\tau \cdot \pi \cdot D \cdot dX$



**Figure 4 :** Forces exercées sur une tranche liquide.

On signale que :  $\frac{dZ}{dX} = \sin \alpha$

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

A partir de la figure (I.4) on aura :

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

On détermine d'abord le terme  $\tau \cdot \pi \cdot D$

Les pertes de charge étant représentées par  $\Delta P$  données par la formule :

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

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

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

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

D'où l'on déduit :

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

Avec  $j = \frac{\lambda U^2}{D 2g}$  gradient hydraulique

On injecte l'expression  $\tau \cdot \pi \cdot D$  dans l'équation (I.10)

On aura :

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

En portant l'équation (I.12) dans l'équation (I.9) on obtient après simplification par  $\rho \cdot s \cdot dx$ :

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

Ou bien :

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

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

On sait que :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial t} \frac{\partial U}{\partial X}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X}$$

d'où on aura :

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

L'équation (I.14) représente la 2<sup>ème</sup> équation de SAINT-VENANT

$$\rho \frac{\partial U}{\partial X} = -\frac{1}{a^2} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial X} \right) \quad (\text{I.15})$$

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

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

Par conséquent les équations (I.7) et (I.14) représentent le système (I.15) des équations de SAINT-VENANT.

### 4.2. Les équations aux caractéristiques :

A partir du système (I.15) on a [8] ; [11] :

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

(I.16)

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

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

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

(I.17)

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

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (a + U) \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{\rho a} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + (a + U) \frac{\partial P}{\partial X} \right) = -g(\sin \alpha + j)$$

(I.18)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U - a) \frac{\partial U}{\partial X} - \frac{1}{\rho a} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + (U - a) \frac{\partial P}{\partial X} \right) = g(i - j)$$

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

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} = -g(\sin \alpha + j)$$

(I.19)

$$\frac{dU}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} = -g(\sin \alpha + j)$$

En utilisant les expressions suivantes :

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

$P = \rho g(H - Z)$  il vient donc :

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

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

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

$$\frac{dX}{dt} = U + a$$

(I.20)

$$\frac{dU}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} = -\frac{g}{a}(U + a) \sin \alpha - g(\sin \alpha + j)$$

$$\frac{dX}{dt} = U - a$$

(I.21)

$$\frac{dU}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} = -\frac{g}{a}(U - a) \sin \alpha - g(\sin \alpha + j)$$

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



## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

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

$$1^\circ/ \text{ pour } \frac{dX}{dt} = U + a \approx +a$$

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

$$2^\circ/ \text{ pour } \frac{dX}{dt} = -a$$

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

Ou autrement écrites :

$$\frac{dX}{dt} = \pm a$$

$$\frac{g}{a} \frac{d}{dt} \left( \frac{a}{g} U \pm H \right) + gj = 0$$

On introduit le débit  $Q = U.S$  dans cette dernière expression tout en la multipliant

par  $\frac{a}{g}$  :

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

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

$$\frac{dX}{dt} = \pm a$$

(I.22)

$$d \left( \frac{a}{gS} Q \pm H \right) + j dX = 0$$

Rappelons que le signe (+) doit être pris si  $dX = + a dt$  et le signe (-) n'est valable que dans le cas où  $dX = - a dt$

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

### 4.3. Interprétation des équations aux caractéristiques :

Le système (I.22) peut s'écrire sous la forme : [8]

$$\frac{dX}{dt} = \pm a \tag{I.23}$$

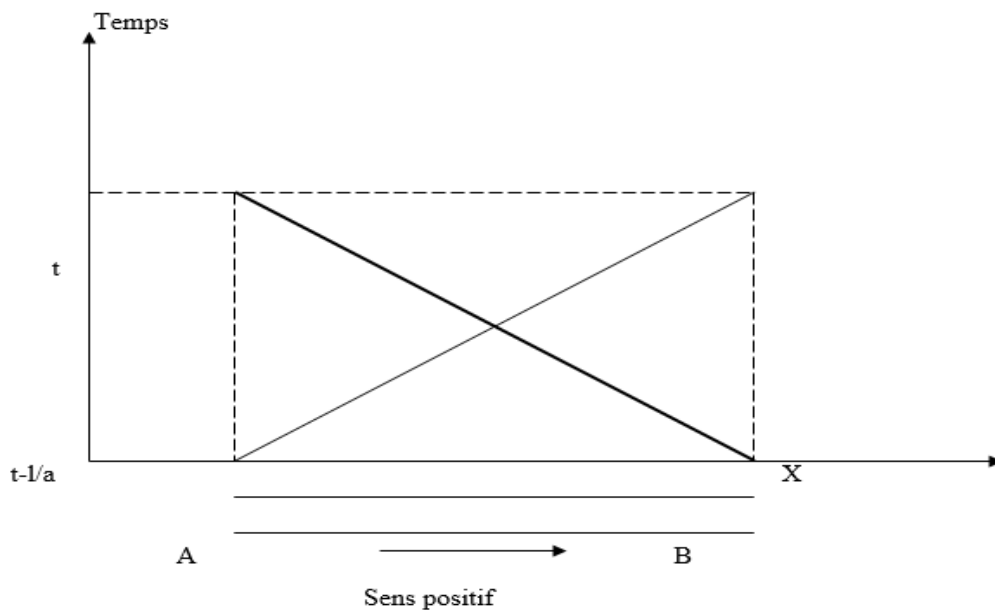
$$dH \pm \frac{a}{gS} dQ = -j dX$$

La figure (I.5) explique bien la première équation du système (I.23) qui représente deux droites sous la forme  $dX = adt$ .

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

$$H(B, t) + \frac{a}{gS} Q(B, t) = H\left(A, t - \frac{L}{a}\right) + \frac{a}{gS} Q\left(A, t - \frac{L}{a}\right) - \int_{A(t-\frac{L}{a})}^{B(t)} j dx$$

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



**Figure 5 :** Déplacement d'une onde dans le plan (x, t).

### 4.4. Les équations d'ALLIEVI :

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

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

$$\rho \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \tag{I.24}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} = -g \sin \alpha$$

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

On peut écrire :  $\rho \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial P^*}{\partial t} = 0$  (I.25)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial X} = 0$$

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

$$P^* = P^*_o + F' \left( t - \frac{X}{a} \right) + f' \left( t + \frac{X}{a} \right) \tag{I.26}$$

$$U = U_o + \frac{1}{a} \left( F' \left( t - \frac{X}{a} \right) - f' \left( t + \frac{X}{a} \right) \right)$$

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

Où  $F'$  et  $f'$  représentent des fonctions quelconques des variables  $(t - \frac{X}{a})$  et  $(t + \frac{X}{a})$ .  
C'est à partir de ces équations que sont établies les solutions analytiques pour les cas simples, en faisant intervenir les conditions aux limites.

On peut écrire le système (I.26) sous forme :

$$P^* - P^*_o = F' + f'$$

$$U - U_o = \frac{1}{\rho a} (F' - f')$$

Effectuons les opérations suivantes :

1°/ Divisons la première équation par  $\rho g$ .

2°/ Multiplions le terme de droite de la deuxième équation par  $(\rho g)$ , puis divisons  $(F' - f')$  de ce même terme par  $(\rho g)$ .

3°/ Faisons sortir le signe moins (-) du terme  $(F' - f')$ .

Le système devient alors :

$$\frac{P^*}{\rho g} - \frac{P^*_o}{\rho g} = \frac{F'}{\rho g} + \frac{f'}{\rho g}$$

$$U - U_o = -\frac{g}{a} \left( \frac{f'}{\rho g} - \frac{F'}{\rho g} \right)$$

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

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

Posons ensuite :  $F = f' / \rho g$  et  $f = \frac{F'}{\rho g}$

Il vient alors :

$$H - H_o = F + f$$

(I.27)

$$U - U_o = -\frac{g}{a} (F - f)$$

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

Enfin nous aurons :

$$b = H - H_o = F\left(t - \frac{X}{a}\right) + f\left(t + \frac{X}{a}\right) \quad (I.28)$$

$$U - U_o = -\frac{a}{g} \left[ F\left(t - \frac{X}{a}\right) - f\left(t + \frac{X}{a}\right) \right]$$

Le système (I.28) représente les équations d'ALLIEVI.

Avec  $b = |H - H_0|$  : valeur du coup de bélier

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

### Interprétation :

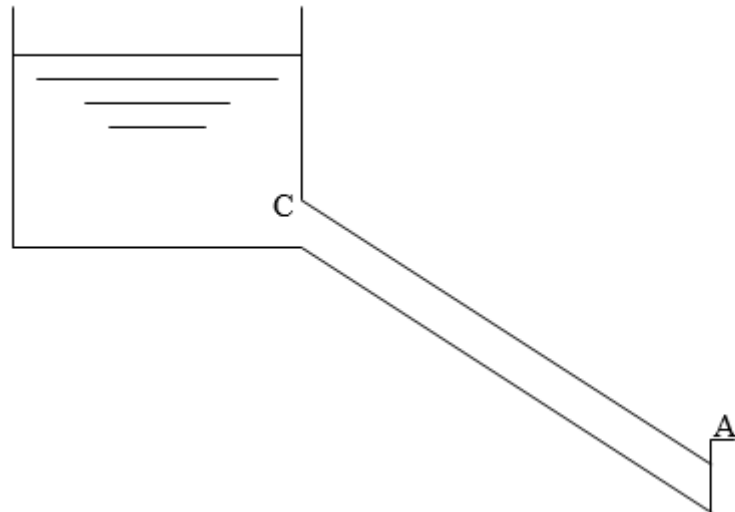
Imaginons un observateur mobile, se déplaçant à la vitesse constante « a » [3],[15] selon la loi :

$$X = at + X_o$$

D'après les expressions ci-dessus, X étant positif dans le sens contraire à l'écoulement, l'observateur remonte le courant. L'équation ci-dessus devient alors :  $\left(t - \frac{X}{a}\right) = \text{Cts}$

En conséquence, pour cet observateur mobile, la fonction  $F\left(t - \frac{X}{a}\right)$  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. On verrait de même que la fonction  $f\left(t + \frac{X}{a}\right)$  représente une onde se propageant avec une vitesse -a, c'est à dire dans le sens du courant. Finalement la surpression b en chaque point, résulte de la superposition des deux ondes F et f.

Si nous tenons compte maintenant des conditions aux limites, les équations d'ALLIEVI se transformeront de la manière suivante :



**Figure 6 :** Conduite gravitaire.

A l'extrémité amont C, où le niveau du plan d'eau du réservoir est supposé invariable, la pression reste constante ; donc on a  $X = L$ , la surpression  $b$  reste constamment nulle ; on a donc la quantité suivante (par rapport au temps  $t$ ).

$$F\left(t - \frac{L}{a}\right) + f\left(t + \frac{L}{a}\right) = 0$$

$$f\left(t + \frac{L}{a}\right) = -F\left(t - \frac{L}{a}\right)$$

Ainsi, l'onde de retour  $f$  est, en C, à tout instant, égale et opposée à l'onde incidente F. On en conclut qu'en C où la pression d'un réservoir à niveau fixe maintient une pression constante. L'onde F se réfléchit totalement avec changement de signe.

Observons d'autre part, qu'une onde incidente F, émise en A au temps  $t = 0$ , se réfléchit en C au temps  $\frac{L}{a}$  et revient en A, changée de signe au bout du temps :

$$\theta = \frac{2L}{a}$$

On a donc :  $F(\theta) = -F(0)$

D'une manière générale :  $f(t) = -F(t - \theta)$

En faisant  $t$  égale à  $(t - \frac{L}{a})$ . On peut conclure que l'onde  $f$  qui passe, au temps  $t$ , en un point X quelconque avec la vitesse  $(-a)$  est égale à l'onde F qui y est passée (avec la vitesse  $+a$ )

## CHAPITRE 01 : LE PHENOMENE TRANSITOIRE

---

au temps  $(t - \theta)$  mais changée de signe.

$$\text{Finalement} \quad f\left(t + \frac{X}{a}\right) = -F\left(t - \theta + \frac{X}{a}\right)$$

Les équations d'ALLIEVI s'écrivent définitivement :

$$b = F\left(t - \frac{X}{a}\right) - F\left(t - \theta + \frac{X}{a}\right)$$
$$U = U_o - \frac{g}{a} \left[ F\left(t - \frac{X}{a}\right) + F\left(t - \theta + \frac{X}{a}\right) \right]$$

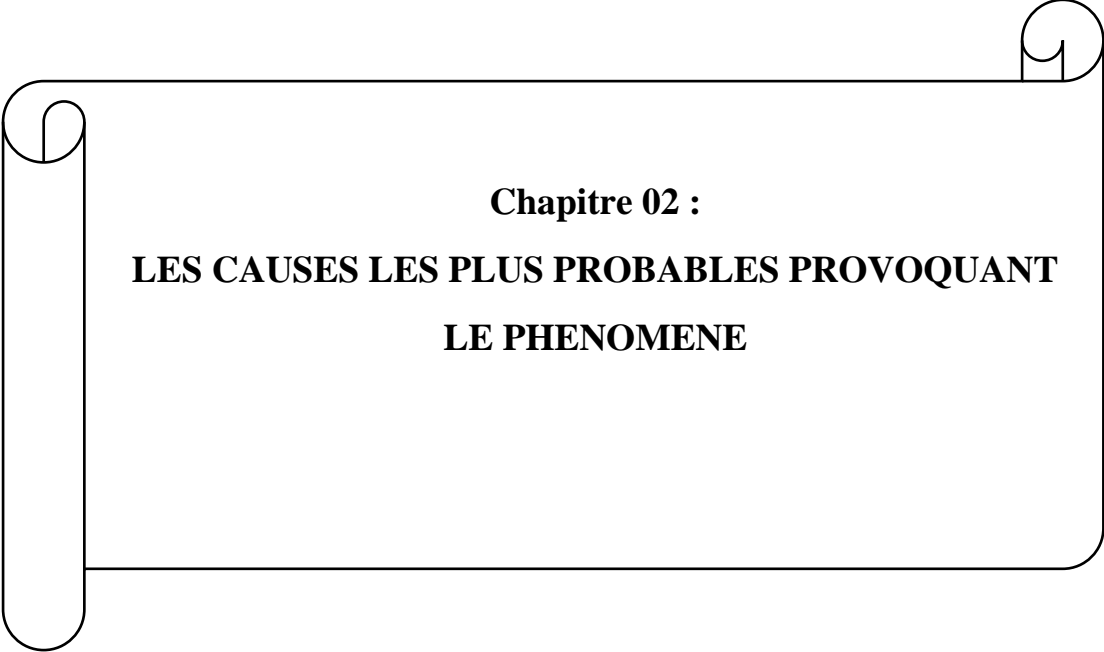
Comme on le voit la fonction  $f$  a disparu et le problème se ramène à la détermination de la seule fonction  $F$ .

### 5. CONCLUSION :

Tout au long de ce chapitre nous avons pu établir une série d'équations analysant clairement le régime transitoire.

Les équations de SAINT-VENANT sont générales et traduisent tous les mouvements transitoires. Après les avoir simplifié, en rétrécissant leur champ de validité, nous avons abouti aux équations d'ALLIEVI.

En faisant intervenir les conditions aux limites, nous pouvons établir des solutions analytiques à partir de ces équations pour des cas simples.



**Chapitre 02 :**  
**LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT**  
**LE PHENOMENE**



## **CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE**

---

### **1. INTRODUCTION :**

Dans ce chapitre en s'avoit la description d'installations d'extinction (système à eau et mousse), ainsi que les différentes causes de feux de bac et c'est quoi les normes de NFPA, enfin en avoir étude de danger.

### **2. PHENOMENE DU COUP DE BELIER :**

#### **2.1. Notions générales :**

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

On entend aussi sous le terme « coup de bélier » un écoulement non permanent du liquide accompagné des variations pratiquement sensibles de la pression qui peuvent engendrer d'énormes dommages matériels et quelques fois des pertes de vie humaines.

Le coup de bélier est un phénomène oscillatoire dont les causes les plus fréquentes sont les suivantes :

1. L'ouverture ou la fermeture des vannes dans les conduites en charge à écoulement gravitaire.
2. La mise en marche ou l'arrêt des pompes dans les conduites en charge par refoulement.
3. Le remplissage ou la vidange d'un système d'AEP.
4. Modification de la vitesse d'une pompe.
5. Variation d'un plan d'eau.
6. La disparition de l'alimentation électrique dans une station de pompage qui est la cause la plus répandue du coup de bélier.

Le coup de bélier, dont la brutalité est susceptible d'entraîner des ruptures de tuyaux, peut atteindre des valeurs très élevées pouvant être égale à plusieurs fois la pression de service sur les réseaux à basse pression.

Il est donc de toute première importance d'étudier des moyens propres à limiter ses effets puisqu'il en résultera une économie dans la construction des tuyaux, lesquels sont calculés notamment, pour résister à une pression intérieure donnée.

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

---

### 2.2. Les risques dus aux coups de bélier :

**Risque de forte pression** : les coups de bélier provoquent des surpressions qui s'ajoutent à la pression initiale. Si la somme (pression initiale) plus (surpression) est supérieure à la pression maximale admissible des tuyaux, il y a des risques de rupture des tuyaux et de déboîtement des joints.

**Risque de pression négative** : une autre conséquence des coups de bélier peut être l'apparition d'une pression relative négative. Si cette pression devient inférieure à  $-10\text{mCE}$ , il se produit une poche de cavitation. Si le profil en long de la canalisation est défavorable, c'est à dire si la poche de vapeur peut se former sur une grande distance, la canalisation peut être aplatie par implosion et les joints peuvent être aspirés. Une autre conséquence de la cavitation est la détérioration de l'enduit intérieur du tuyau, mais le risque le plus grave est celui d'éclatement de la conduite lors du retour à des pressions positives : les pressions obtenues à ce moment sont en effet souvent très importantes.

**Fatigue du tuyau** : comme autre conséquence des coups de bélier, on peut citer la fatigue qu'entraîne pour le matériau une alternance rapide de fortes et de faibles pressions même si chaque onde de surpression n'est pas suffisante en elle-même pour créer la rupture.

### 2.3. Célérité $a$ des ondes :

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

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + K_m \frac{D}{e}}}$$

Avec :

$D$  : Diamètre intérieur de la conduite, en mètres.

$e$  : Epaisseur du tuyau, en mètres.

$K_m$  : Coefficient dépendant de la nature du matériau de la conduite.

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

---

**Tableau 1:** Valeurs du coefficient  $K_m$

Matériau	$K_m$	Matériau	$K_m$
Fonte grise	<b>1</b>	Polyéthylène haute densité	<b>83</b>
Fonte ductile	<b>0.6</b>		
Acier	<b>0.5</b>	Polyéthylène haute densité	<b>500</b>
PVC	<b>33</b>		
Amiante ciment	<b>4</b>	Béton	<b>5</b>

**Tableau 2:** Valeurs moyennes et les fourchettes de la célérité des ondes

Matériau	Valeur moyenne (m/s)	Fourchette (m/s)
Fonte	1200	900 à 1300
Acier	1100	1000 à 1250
PVC	400	300 à 500
Amiante ciment	1000	900 à 1200
Polyéthylène haute densité	300	230 à 430
Polyéthylène basse densité	150	115 à 180

### 2.4. Analyse physique du phénomène du coup de bélier:

On exposera une étude qualitative sommaire sur deux cas, fermeture de vanne et arrêt de pompe en se basant sur les hypothèses suivantes [13] :

- Manœuvres instantanées faites à l'instant 0.
- Pertes de charge supposées nulles.
- Pas de dispositif de protection.

Dans le cas de la pompe, le clapet anti-retour se ferme dès l'arrêt et reste ensuite constamment dans cette position.

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

---

Le temps que met l'onde pour parcourir la conduite de longueur L est  $\frac{L}{a}$ .

**Tableau 3:** Notations.

	Régime permanent	Régime transitoire (après la manœuvre)
Débit	$Q_0$	Q
Vitesse	$U_0$	U
Pression dans la conduite	$P_0$	P
Et, comme il est tenu compte de l'élasticité de la conduite et de la compressibilité du liquide transporté		
Section de la conduite	$S_0$	S
Masse volumique du liquide	$\rho_0$	$\rho$

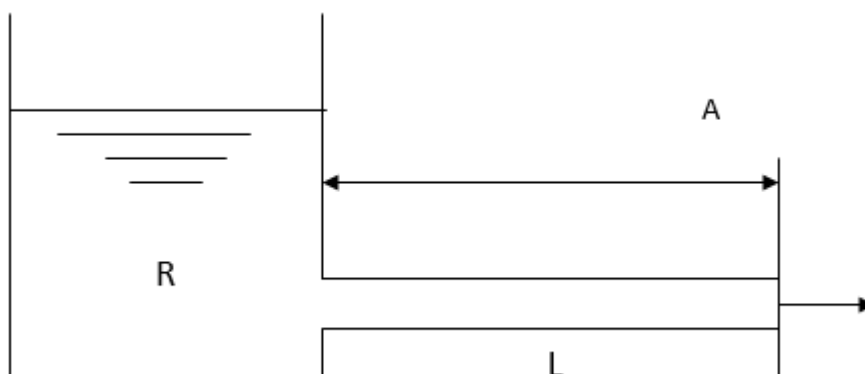
### 3. Fermeture et ouverture des vannes dans les conduites gravitaires :

Nous examinons les deux cas de fermeture brusque et de fermeture lente d'un robinet vanne.

#### 3.1. Fermeture de vannes :

##### A- Cas de fermeture brusque :

Considérons une conduite issue d'un réservoir et comportant un robinet en A. soit L la longueur de la conduite figure 7.



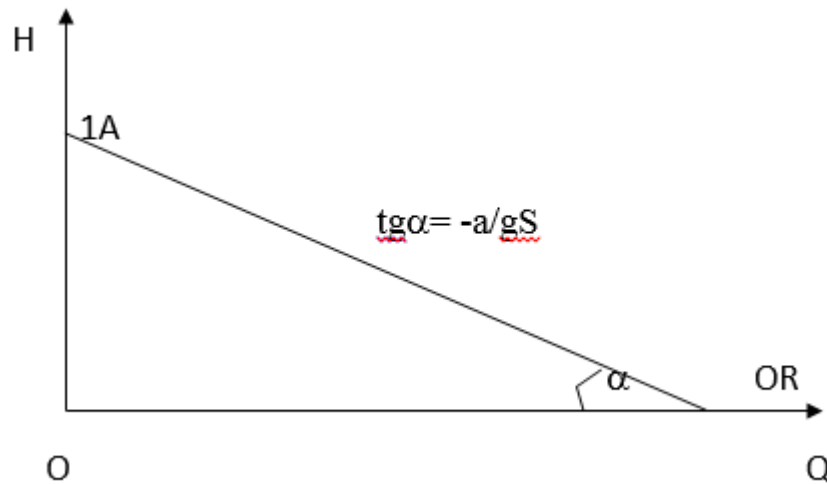
**Figure 7 :** Cas de la fermeture brusque.

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

---

Prenons comme unité de temps la valeur  $\frac{L}{a}$ ,  $a$  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  $0 + \Delta t$ . mais, au temps 0, le régime, au départ du réservoir est caractérisé dans le système de coordonnées QH, par un point OR sur l'axe OQ (figure 8).



**Figure 8:** Cas de la fermeture brusque.

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

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

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 OH ( $Q = 0$ ).

Le point figuratif du régime au temps 1 sera en conséquence donné par l'intersection des deux caractéristiques et on aura :

$$OH = Q_0 \cdot \text{tg} \alpha$$

$$OH = Q_0 \cdot \frac{a}{gS} \quad (\text{II.3})$$

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

---

Remplaçons  $Q_0$  par  $SU_0$ ,  $U_0$  étant la vitesse initiale de l'eau dans la conduite.

$$OH = SU_0 \cdot \frac{a}{gS}$$

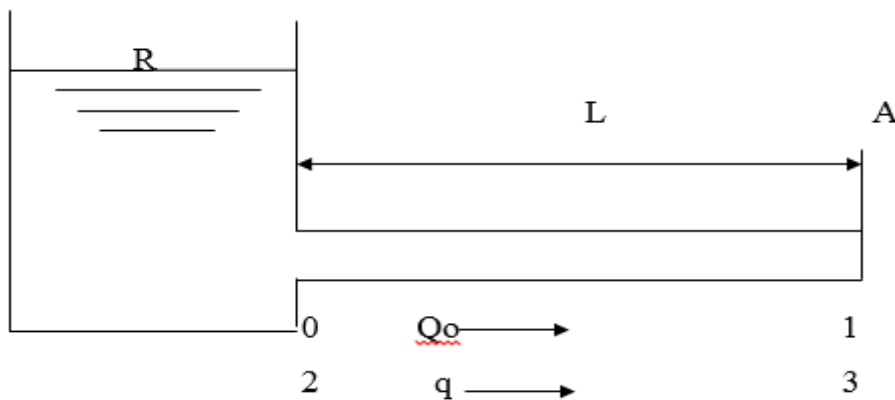
$$OH = \frac{aU_0}{g} \quad (\text{II.4})$$

Étant au-dessus de  $OQ$ , le point  $H$  correspond à une surpression. La valeur maximale du coup de bélier peut donc atteindre  $H = \frac{aU_0}{g}$

### B-Cas de 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  $q$  en conséquence, la valeur de la surpression sera d'après (Figure 9)  $b = \frac{a}{gS}(Q_0 - q)$



**Figure 9 :** Cas de fermeture lente.

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

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

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

---

On en déduit

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

D'où 
$$b = \frac{a}{gS} \cdot \frac{2Q_o L}{at} = \frac{2Q_o L}{gSt}$$

Ou, puisque  $Q_o = SU_o$  :

$$b = \frac{2SU_o L}{gSt} = \frac{2LU_o}{gt}$$

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  $B = \frac{aU_o}{g}$ .

Si  $t > \frac{2L}{a}$ , le coup de bélier est moins important et a pour valeur  $b = \frac{2LU_o}{gt}$ .

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.

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

### 3.2. Ouverture de vanne :

L'étude des ouvertures brusques ou lentes s'effectue de la même façon que celle de la fermeture toute fois dans le cas d'une fermeture brusque la surpression maximale est limitée ;

Au contraire, dans le cas d'une ouverture, la dépression produite entraîne un ralentissement de l'écoulement, à la limite cette dépression ne peut dépasser  $y_0$  en valeur

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

absolue car pour cette valeur, la pression à la vanne devenant égale à la pression atmosphérique, l'écoulement s'arrêterait et tout se passerait comme si la conduite n'était pas ouverte.

Alors que la surpression consécutive à une fermeture brusque n'est limitée que par la valeur initiale de  $U_0$ , la dépression consécutive à une ouverture ne peut dépasser  $y_0$

### 4. Arrêt ou démarrage de pompes dans les conduites de refoulement :

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  $\frac{aU_0}{g}$  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 les figures (II.4) et (II.5) 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.

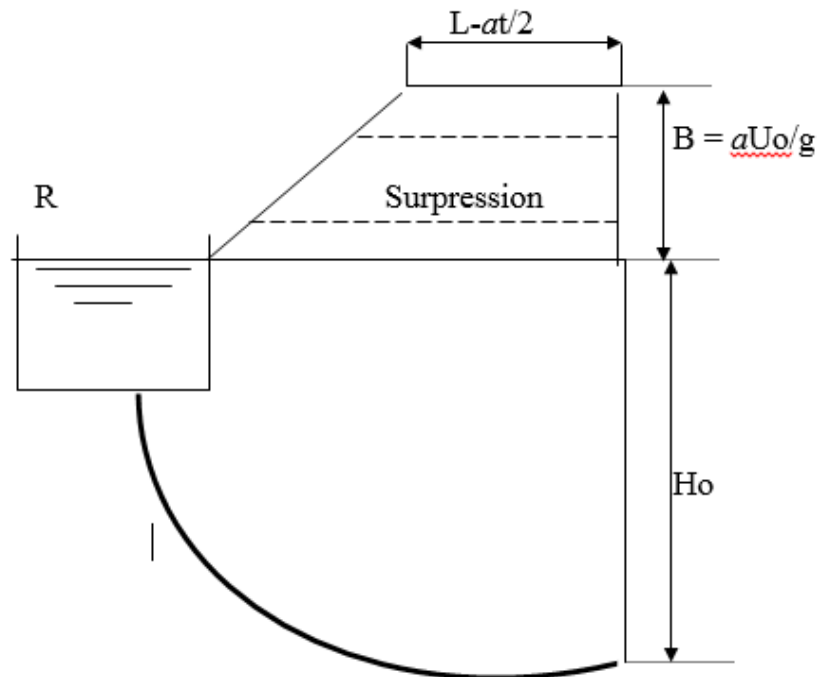
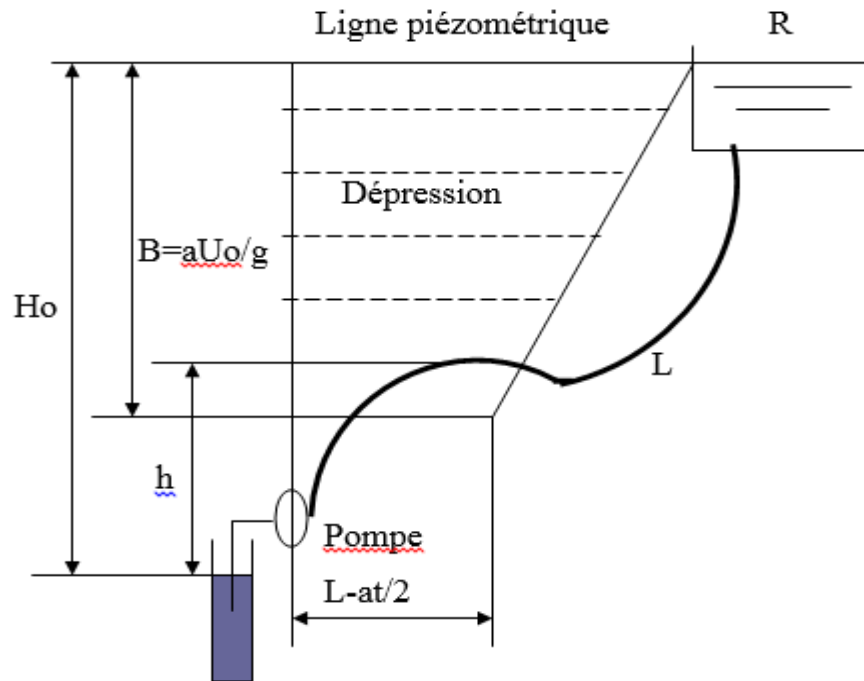


Figure 10 : Adduction gravitaire – surpression.



## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE



**Figure 11 :** Conduite de refoulement – dépression.

En cas d'arrêt lent ( $t > \frac{2L}{a}$ ), le coup de bélier décroît linéairement depuis sa valeur maximale  $\frac{2LU_0}{gt}$  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.

On aura les diagrammes donnés par les figures (12) et (13).

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

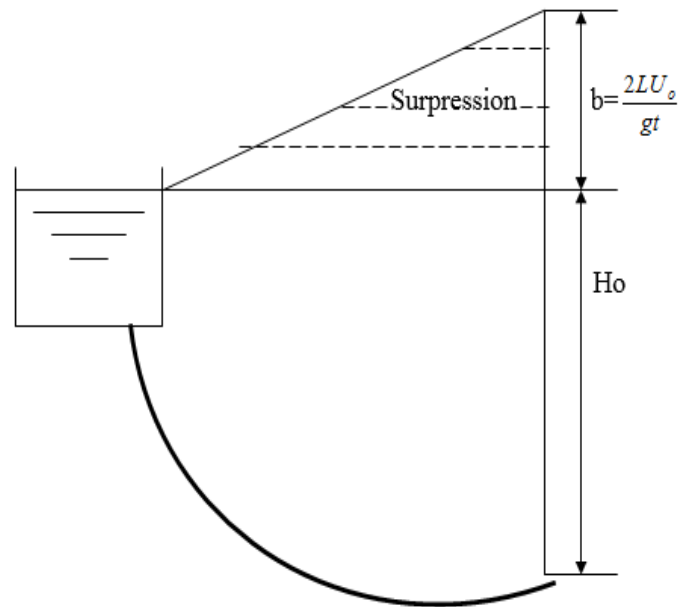


Figure 12 : Répartition du coup de bélier (fermeture brusque).

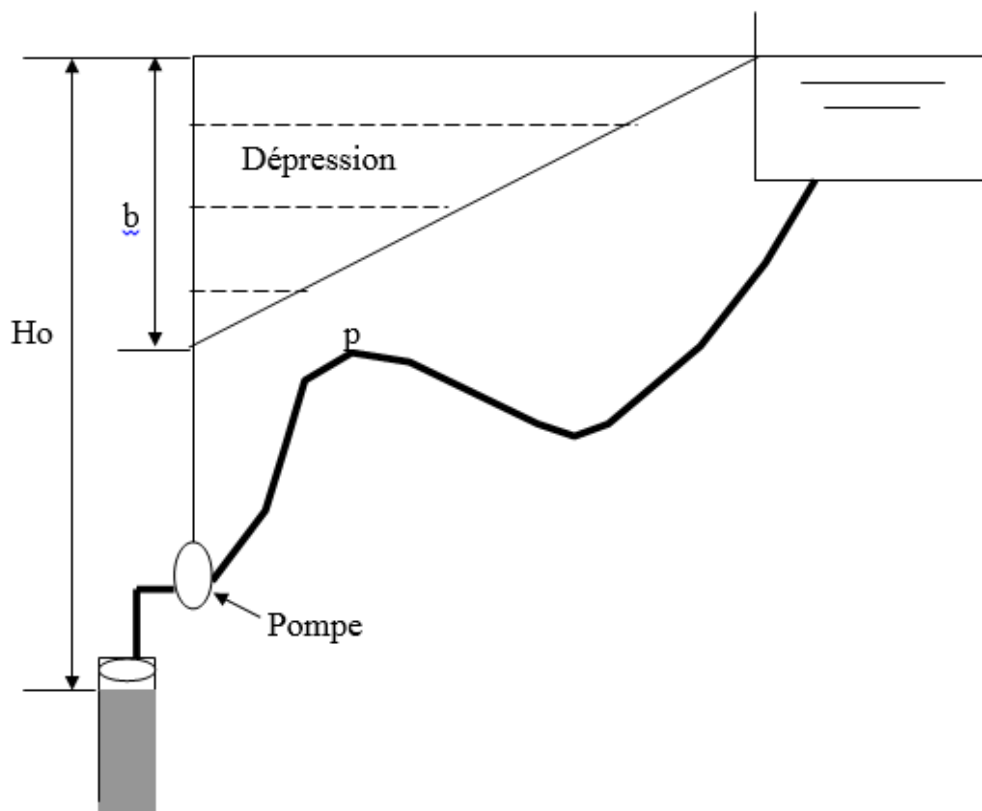


Figure 13 : Répartition du coup de bélier (fermeture lente).

## CHAPITRE 2 : LES CAUSES LES PLUS PROBABLES PROVOQUANT LE PHENOMENE

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 (14) et que la dépression est importante au départ, il y aura tout intérêt à protéger cette conduite plus efficacement.

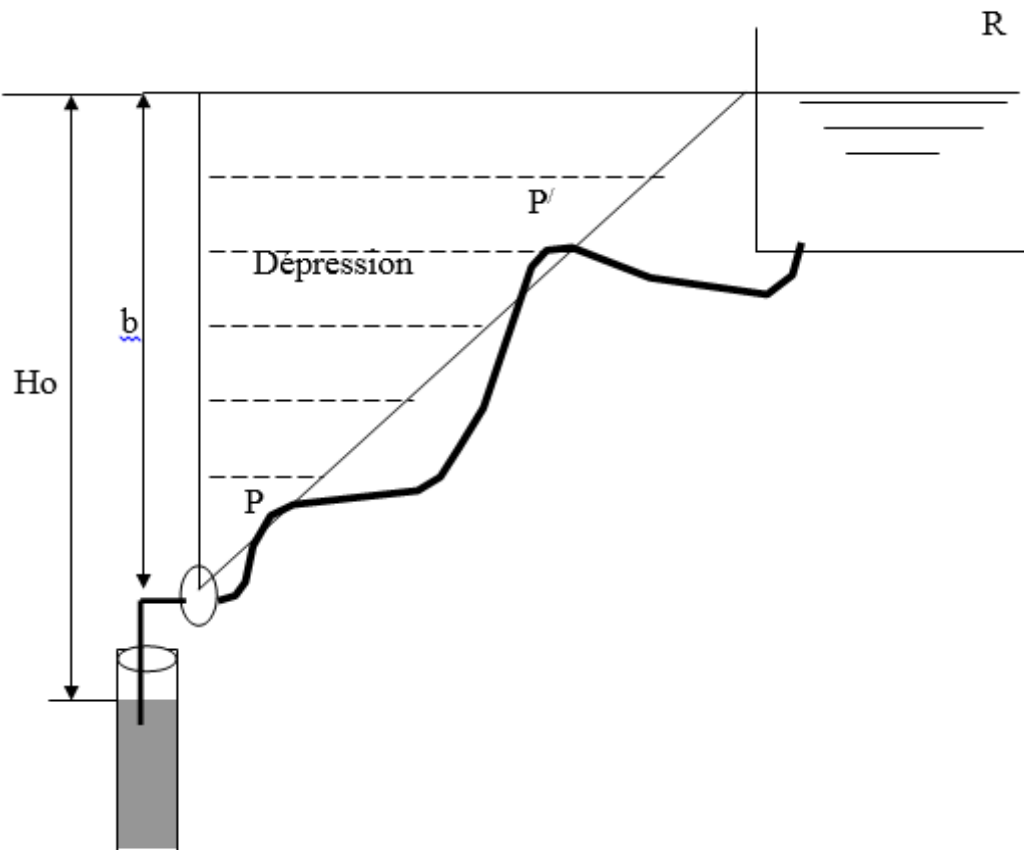


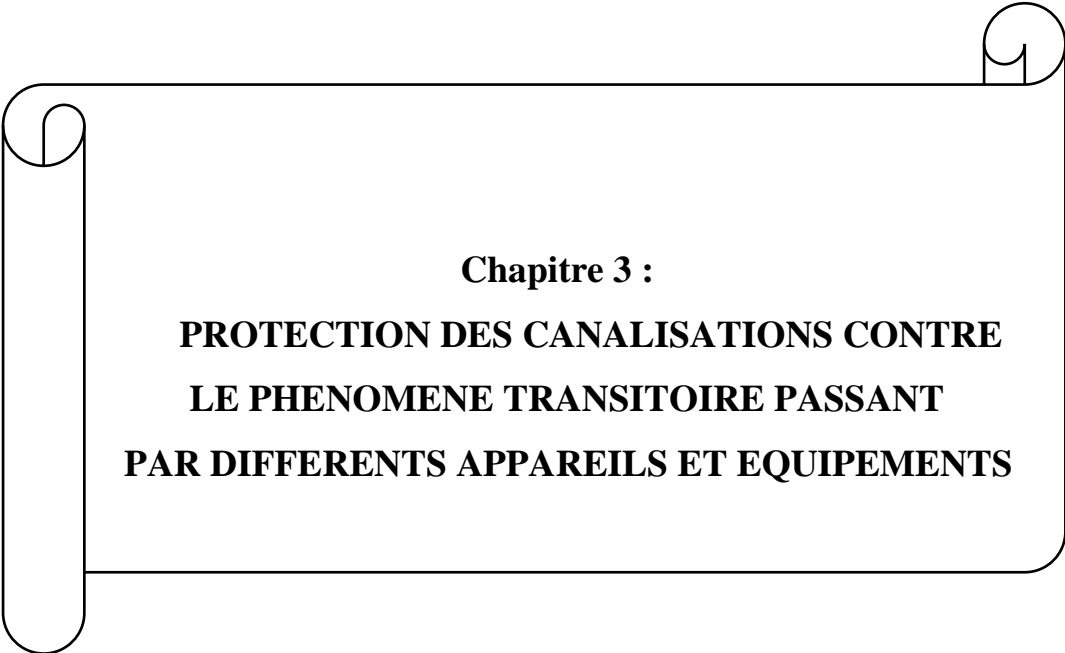
Figure 14 : Répartition du coup de bélier (fermeture lente).

### 5. CONCLUSION :

A travers ce chapitre, nous avons pu établir une analyse succincte du phénomène du « coup de bélier ».

Après avoir effectué une analyse physique du phénomène, nous avons procédé à sa représentation graphique à partir des équations d'ALLIEVI. Ces dernières nous ont permis de mieux le comprendre.

Les effets néfastes que provoque le coup de bélier nous obligent à attacher une grande importance à sa quantification, et par conséquent calculer et dimensionner une protection anti-bélier assez conséquente.



**Chapitre 3 :**  
**PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE**  
**LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT**  
**PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS**

# **CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS**

---

## **1. INTRODUCTION :**

Dans ce chapitre on va exposer les appareils anti-bélier qui devront avoir essentiellement pour effet de limiter la surpression et la dépression. Les principaux types de protection anti-bélier sont explicités dans ce qui suit citant leurs avantages et leurs inconvénients.

## **2. PROTECTION CONTRE LA DEPRESSION (CAS DES VOLANTS D'INERTIE):**

La spécificité de ce type de protection est qu'il continue à assurer l'alimentation de la veine liquide, et ce malgré l'arrêt du moteur actionnant la pompe. Ce volant (Figure 15) qui est placé sur l'arbre du groupe, restitue l'énergie cinétique accumulée pendant la marche en régime normal au moment de la disjonction et permet ainsi de prolonger le temps d'arrêt de l'ensemble du groupe, et donc, de diminuer l'intensité du coup de bélier. En d'autres termes, la vitesse de rotation diminue lentement et il en est de même de son débit. La masse du volant est généralement accumulée près de la périphérie (Figure 16). Le volant d'inertie est généralement peu ou non utilisable, pour les raisons suivantes :

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

Ce procédé est finalement utilisé pour la protection des conduites à longueurs de refoulement faibles ou moyennes et qui n'excèdent pas quelques centaines de mètres.

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

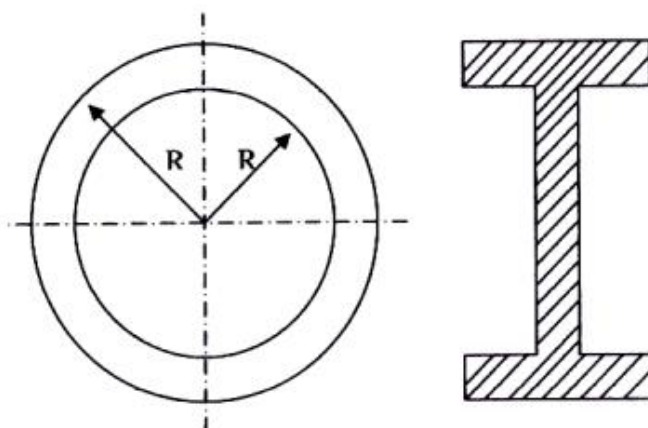


Figure 15 : Volant d'inertie.

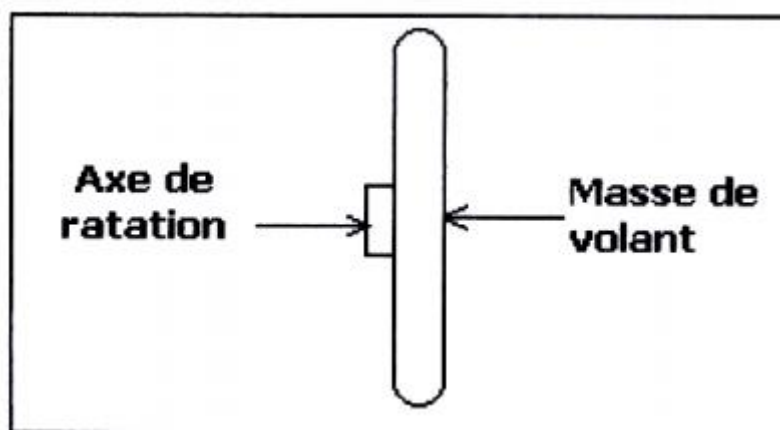


Figure 16 : Concentration de la masse du Volant d'inertie.

### 3. PROTECTION CONTRE LA SURPRESSION (CAS DES SOUPAPES DE DECHARGE):

Le rôle d'une soupape (Figures 17 et 18) consiste à dévier un certain débit à l'extérieur de la conduite à protéger, dès que la pression atteint une certaine valeur de réglage estimée généralement à environ 1.04 à 1.10 de la pression maximale admissible. L'ouverture doit pouvoir s'effectuer très rapidement pour que l'opération soit efficace.

- Les soupapes permettent la protection contre les surpressions uniquement.
- Le nombre de soupapes dépend de l'importance de l'installation et est compris généralement entre 1 et 6.
- L'utilisation des soupapes nécessite une surveillance attentive et un entretien continu.
- Il faut aussi prévoir l'évacuation vers l'extérieur de l'eau libérée.

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

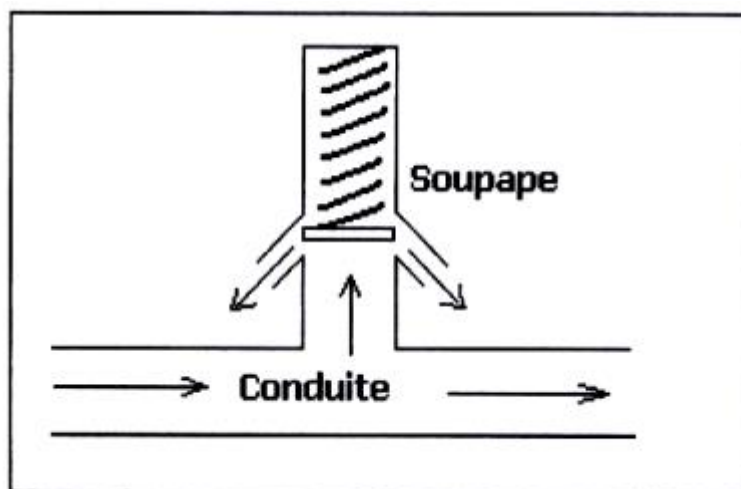


Figure 17 : Soupape de décharge.

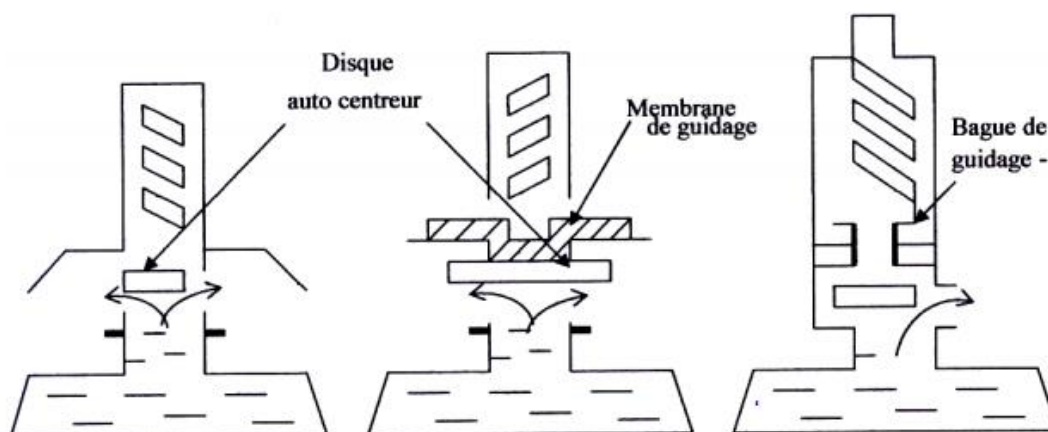


Figure 18 : Fonctionnement d'une soupape de décharge.

### 4. PROTECTION CONTRE LA DEPRESSION ET LA SURPRESSION :

#### 4.1. Les ventouses (les reniflards) :

On distingue des ventouses à trois fonctions (Figure 19) à savoir, l'évacuation de l'air contenu dans les conduites, l'admission de l'air dans ces conduites lorsqu'on procède à leur vidange et l'élimination des poches d'air qui se manifestent aux points hauts du circuit (qui peuvent provoquer des coups de bélier), d'où leur installation en des points hauts. Il y a également des ventouses à fonction unique (Figure 20) en l'occurrence, l'évacuation des

# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

poches d'air seulement. Une ventouse est constituée en principe d'un flotteur sphérique en caoutchouc logé dans un corps en fonte.

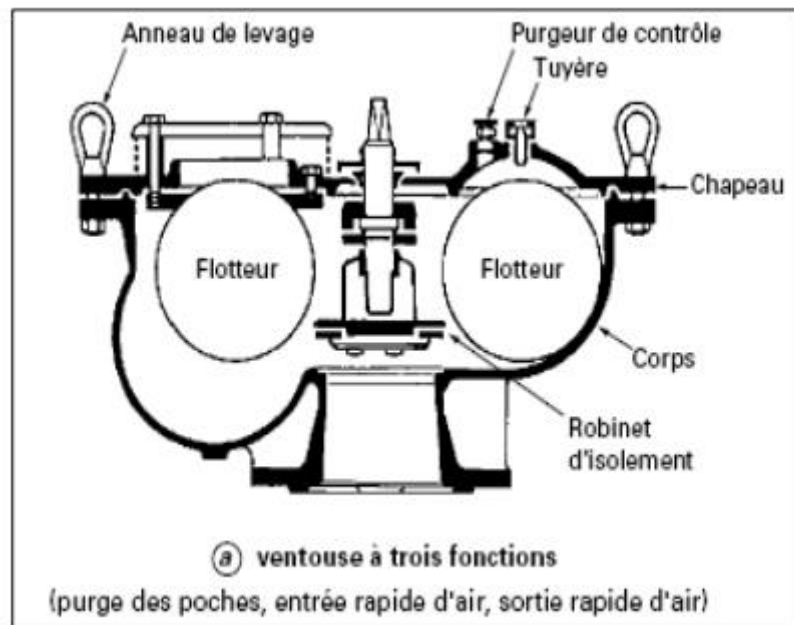


Figure 19 : Ventouse à trois fonctions.

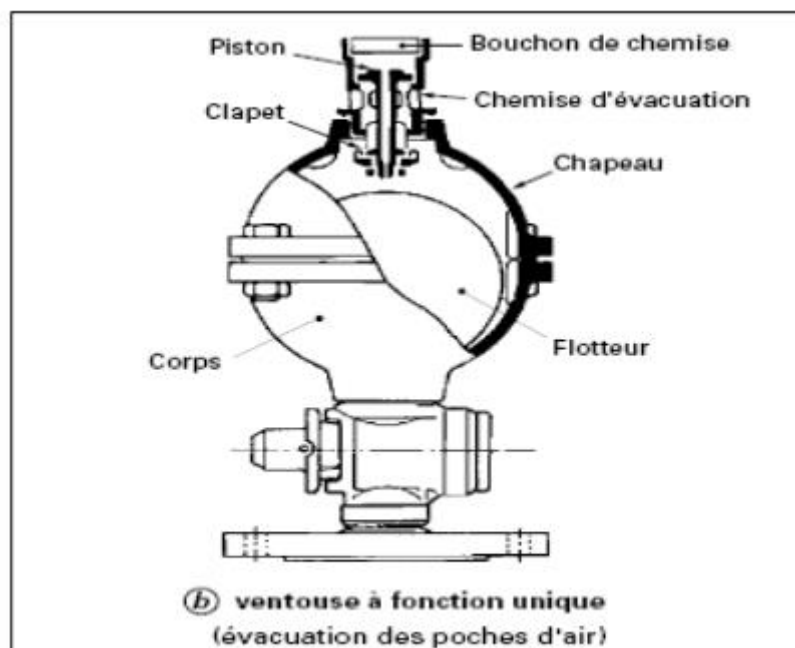


Figure 20 : Ventouse à une seule fonction.



## **CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS**

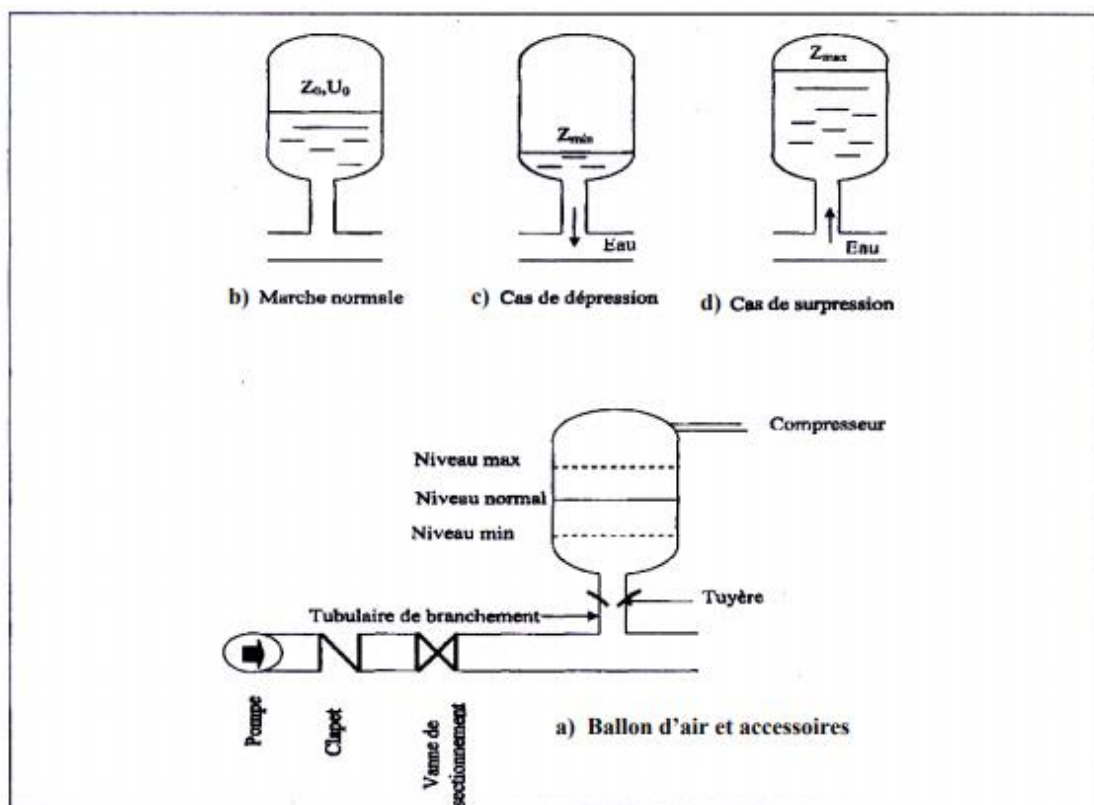
---

### **4.2. Les réservoirs d'air :**

Le réservoir d'air est l'appareil le plus utilisé pour la protection contre le coup de bélier. C'est un récipient contenant de l'air comprimé dans sa partie supérieure et de l'eau dans sa partie inférieure. Ces appareils sont aussi appelés "accumulateur, cloche à air, ballon d'air, réservoir anti-bélier,...etc." (Figure21). Par ailleurs, un compresseur d'air est habituellement utilisé pour garder le volume d'air dans certaines limites (à cause des fuites) d'une part, et d'autre part, un clapet anti-retour est souvent prévu entre la pompe et le ballon d'air. Ce dispositif est très simple et protégera l'installation aussi bien contre les dépressions que contre les surpressions.

Suite à une disjonction, le clapet se ferme et à ce moment-là, la pression de l'air de la cloche est encore supérieure à celle qui s'exerce à l'autre extrémité de la conduite ; ainsi, une partie de l'eau de la cloche est chassée dans la conduite. Après diminution progressive, puis annulation de sa vitesse, l'eau de la conduite revient en arrière et remonte dans la cloche, et ainsi de suite. La dissipation de l'énergie de l'eau peut être obtenue par le passage de celle-ci à travers un organe d'étranglement disposé à la base de la cloche. A cause du remplissage ou de la vidange du réservoir anti-bélier, l'air dans ce dispositif se comprime ou se dilate, et l'amplitude de la surpression et de la dépression seront réduites suite à la variation graduelle de la vitesse d'écoulement dans la conduite.

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS



**Figure 21** : Réservoir d'air.

### A) Dimensionnement des réservoirs d'air :

#### A-1- Calcul simplifié d'un réservoir d'air :

Dans ce cas, on considère le phénomène comme une oscillation en masse, c'est-à-dire :

- On néglige l'élasticité de la conduite et la compressibilité de l'eau (mouvement en bloc).
- Les pertes de charge ne sont pas prises en considération dans la conduite de refoulement.
- Le dispositif ne comporte pas d'organe d'étranglement.

Suite à ces hypothèses, on aura à faire le calcul simplifié d'un réservoir d'air qui peut largement suffire pour des petites installations d'environ 30 l/s et de 1000 à 1200 m de longueur de refoulement. VIBERT a donné une expression relativement simple qui permet d'avoir le volume  $U_0$  de l'air contenu dans la cloche sous un régime de marche à la vitesse  $V_0$ . Les caractéristiques de l'air dans le réservoir d'air en marche normale sont  $Z_0$  et  $U_0$  (Figure22).  $Z_0$  est la pression absolue exprimée en mètres d'eau. Si on néglige la hauteur de

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

l'eau dans le réservoir d'air au-dessus de l'axe de la conduite, la pression absolue  $Z_0$  est telle que :

$$Z_0 = H_r + 10 \quad (1)$$

Où  $H_r$  correspond à la hauteur géométrique de refoulement.

On distingue ici deux phases :

➤ **1ère phase** : A la fin de la dépression, l'air occupe un volume plus grand et sa pression sera donc plus faible ; ainsi la pression absolue est  $Z_{min}$ .

➤ **2ème phase** : A la fin de la surpression, l'air occupe un volume plus petit qu'en marche normale et sa pression sera dans ce cas  $Z_{max}$ .

VIBERT a donné un abaque permettant d'avoir  $U_0$ , et ceci en utilisant l'expression suivante :

$$\frac{U_0}{LS} = \frac{h_0}{Z_0} * \frac{1}{f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

Dans laquelle,  $\frac{U_0}{LS}$ ,  $\frac{h_0}{Z_0}$ ,  $f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$  se trouvent sur les trois échelles de l'abaque (Figure 22)).

-  $U_0$  : Volume d'air en  $m^3$ .

-  $L$  : Longueur de la conduite en m.

-  $S$  : Section de la conduite en  $m^2$ .

$$-h_0 = \frac{v_0^2}{2g}$$

**Remarque** : Cet abaque permet une approche pour le dimensionnement d'un réservoir d'air. Une fois que les dimensions de ce réservoir sont connues, on effectue une étude du coup de bélier en fonction des paramètres géométriques de ce réservoir.

# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

DE M. VIBERT

POUR LE CALCUL SIMPLIFIÉ  
DES RÉSERVOIRS D'AIR

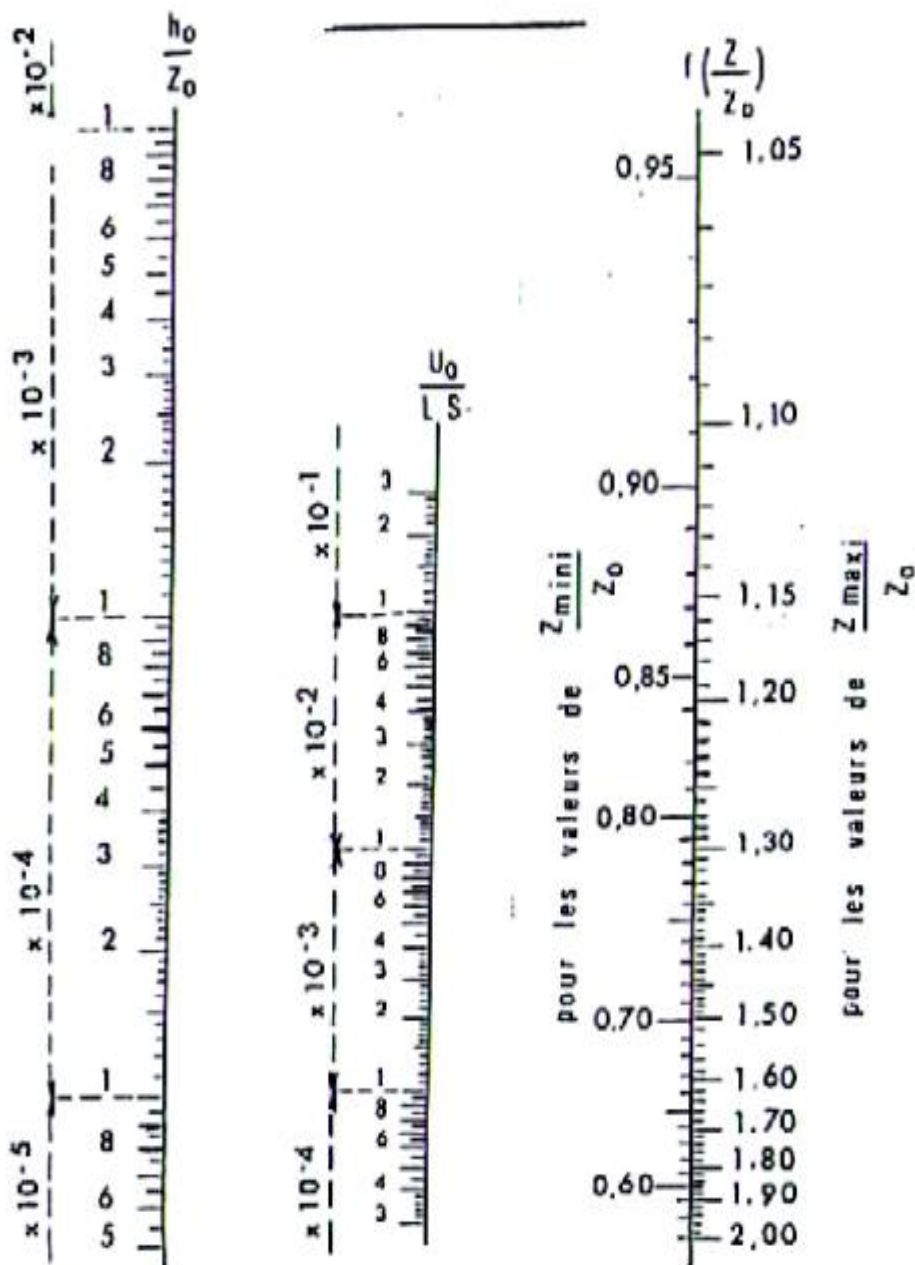


PLANCHE XXVII

Figure 22 : Abaque de Vibert.

# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

---

## A-2- Etapes du calcul simplifié d'un réservoir d'air

1. Déterminer la valeur maximale du coup de bélier.
2. Déterminer la pression au moment du retour de l'onde (Valeur max du coup de bélier + H0).
3. Comparer la valeur obtenue ci-dessus avec la pression admissible dans la conduite (Padm).
4. Calculer la valeur de Z0 :  $Z0 = H0 + 10$  (Pression absolue).
5. Calculer la valeur de Zmax :  $Zmax = Padm + 10$  (Pression absolue).
6. Calculer  $Zmax / Z0$ .
7. Calculer la valeur de  $h0 : \frac{V_0^2}{2g}$
8. Calculer  $h0 / Z0$ .
9. Lire sur l'abaque de Vibert les valeurs de (U0 / L S) et (Zmin / Z0) en utilisant respectivement les valeurs de  $Zmax / Z0$  et  $h0 / Z0$ .
10. Déduire la valeur de U0.
11. Déduire la valeur de Umax tout en sachant que :  $U0 Z0 = Umax Zmin$ .
12. Calculer la pression restante définie par :  $Zmin - 10$
13. Déterminer la dépression qui est égale à :  $H0 - \text{Pression restante}$

## B) Avantage des réservoirs d'air :

- Dimensions réduites par rapport à d'autres dispositifs comme la cheminée d'équilibre.
- Ils sont préconisés comme solutions dans les régions froides, car ils sont faciles à chauffer pour éviter les effets du gel.
- Ils sont installés parallèlement au sol, cela offre une meilleure résistance aux vents et aux tremblements de terre.

## C) Inconvénients des réservoirs d'air :

- La nécessité de fournir de l'air comprimé constamment.

# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

➤ La nécessité de prévoir plusieurs équipements auxiliaires qui demandent une maintenance constante et des frais élevés.

## D) Calcul normal d'un réservoir d'air :

La méthode de VIBERT risque de donner des volumes très importants du réservoir. L'installation d'un réservoir anti-bélier sur le refoulement sans dispositif de freinage d'écoulement entraîne une suite d'oscillations ; le seul facteur d'amortissement est la perte d'énergie.

Il sera donc nécessaire de disposer à la base du réservoir d'air un étranglement qui amortira rapidement ces oscillations. On peut utiliser comme étranglement, soit une tuyère (Figure 23) ou un clapet à battant percé (Figure 24) ou encore un diaphragme.

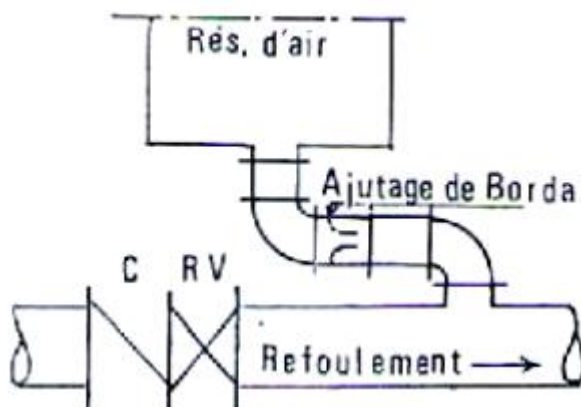


Figure 23 : Etranglement au moyen d'une tuyère.

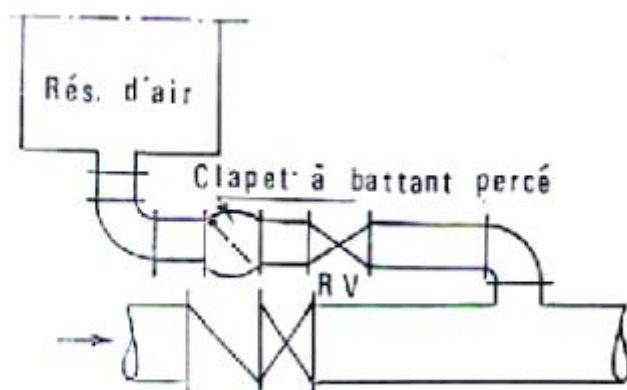


Figure 24 : Etranglement au moyen d'un battant percé.

# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

Un robinet vanne est utile pour isoler le réservoir d'air de la conduite en cas de besoin (Figures 25 et 26). Un clapet anti-retour est également utilisé afin de protéger la pompe en cas de retour d'eau (Figure 27).



Figure 25 : Robinet Vanne papillon.

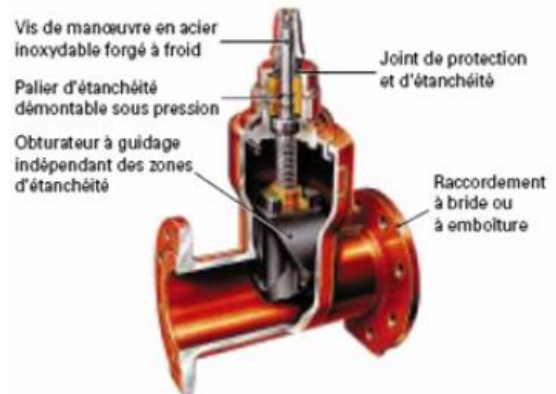


Figure 26 : Robinet Vanne à opercule.



Figure 27 : clapet anti-retour.

### 4.3. Cheminée d'équilibre :

La cheminée d'équilibre est une réserve d'eau en contact permanent avec la conduite et dont la surface libre traduit exactement les variations de pression du fluide.

La cheminée doit donc avoir une section assez large pour combler la dépression sans se

## **CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS**

vider complètement et doit être assez haute pour ne pas déborder lorsqu'une surpression fait monter son niveau. La présence d'une cheminée modifie le mouvement transitoire engendré par une disjonction. Au lieu d'un mouvement oscillatoire de période  $\frac{4L}{a}$  caractéristique du coup de bélier d'onde, s'instaure un mouvement oscillatoire de période plus grande, l'oscillation en masse.

### **4.3.1. But de l'ouvrage:**

On place la cheminée d'équilibre dans une galerie d'amenée en charge et dans une conduite forcée afin de :

- Réduire la valeur des surpressions produites par le coup de bélier dans la conduite forcée.
- Diminuer les surpressions dues au coup de bélier dans la galerie d'amenée.
- Amortir les oscillations importantes.
- Assurer l'alimentation de la veine liquide, en diminuant les dépressions engendrées par l'arrêt du moteur actionnant la pompe.

### **4.3.2. Domaine d'application:**

Les cheminées d'équilibre sont usuellement utilisées lorsque l'installation est constituée d'une longue canalisation ou d'un long chenal d'amenée à faible pente suivi d'une canalisation à forte pente terminée par un appareil de manœuvre susceptible d'engendrer des variations plus ou moins rapides de débit [8] .

En dehors du domaine de l'hydroélectricité, on rencontre des cas semblables de canal d'amenée à faible pente dans les grands aménagements qui ont des débits trop importants pour qu'on puisse les véhiculer en conduites. On utilise alors des canaux et des galeries en charge pour traverser les reliefs importants. Lorsqu'il y a des organes de manœuvre à la sortie de ces galeries en charge, une cheminée comme appareil de protection est alors tout indiquée.

Dans le domaine des réseaux sous pression, les cheminées sont rarement utilisées car il faudrait qu'elles aient une hauteur supérieure à la hauteur manométrique totale ; on n'imagine pas une telle cheminée dès que la hauteur de refoulement dépasse quelques mètres. Son emploi redevient d'ailleurs d'actualité puisqu'on réalise de plus en plus des conduites d'assainissement sous pression. Les hauteurs de refoulement y sont en général faibles et la cheminée présente de réels avantages de simplicité de fonctionnement et de robustesse qui la



# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

rendent intéressante. Elle résout en outre le problème de l'évacuation d'air et on peut facilement envisager de l'installer pour protéger localement un point haut puisqu'elle fonctionne sans apport d'énergie annexe.

### 4.3.3. Types de cheminées :

#### A) –Cheminée à étranglement :

Un étranglement à la base de la cheminée produit des pertes de charge importantes qui contribuent à :

- Réduction de l'amplitude des oscillations et par conséquent la hauteur atteinte par l'eau dans la cheminée.
- Amortissement des oscillations, qui s'ajoute à celui créé par les pertes de charge dans la galerie d'amenée.

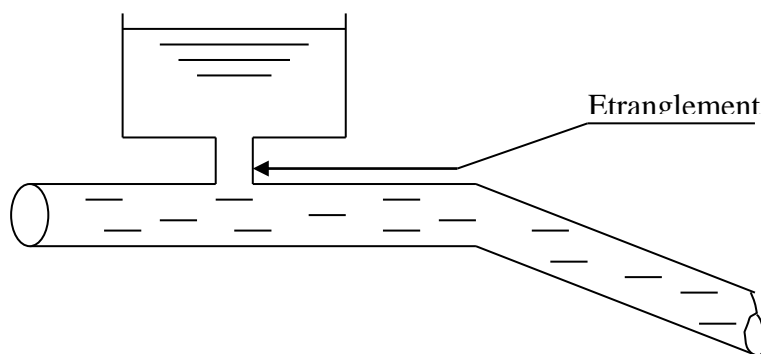


Figure 28 : Cheminée à étranglement.

#### B) –Cheminée à épanouissement :

Il est possible de réduire le volume total de l'excavation en donnant à la cheminée une forme évasée vers le haut.

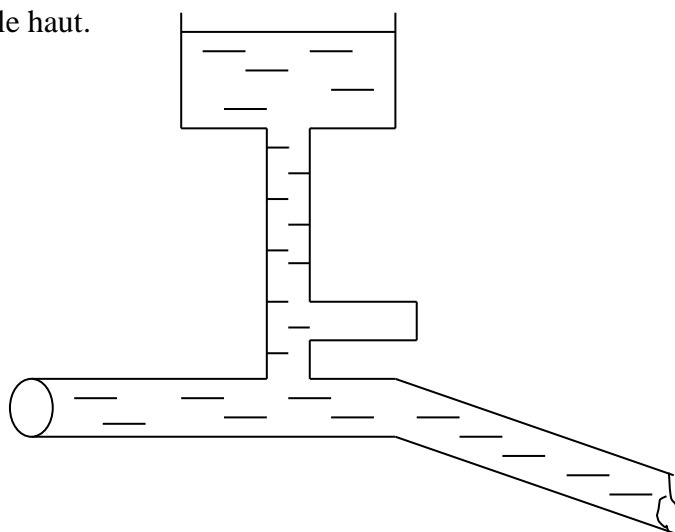


Figure 29 : Cheminée à épanouissement.

# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

## C) –Cheminée différentielle:

Elle comporte deux chambres C1 et C2 de sections différentes S1 Et S2 alimentées en dérivation sur la galerie d'amenée.

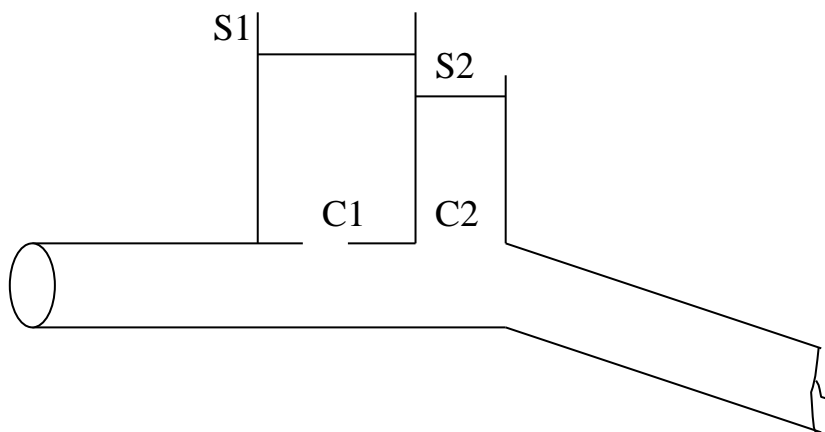


Figure 30 : Cheminée différentielle.

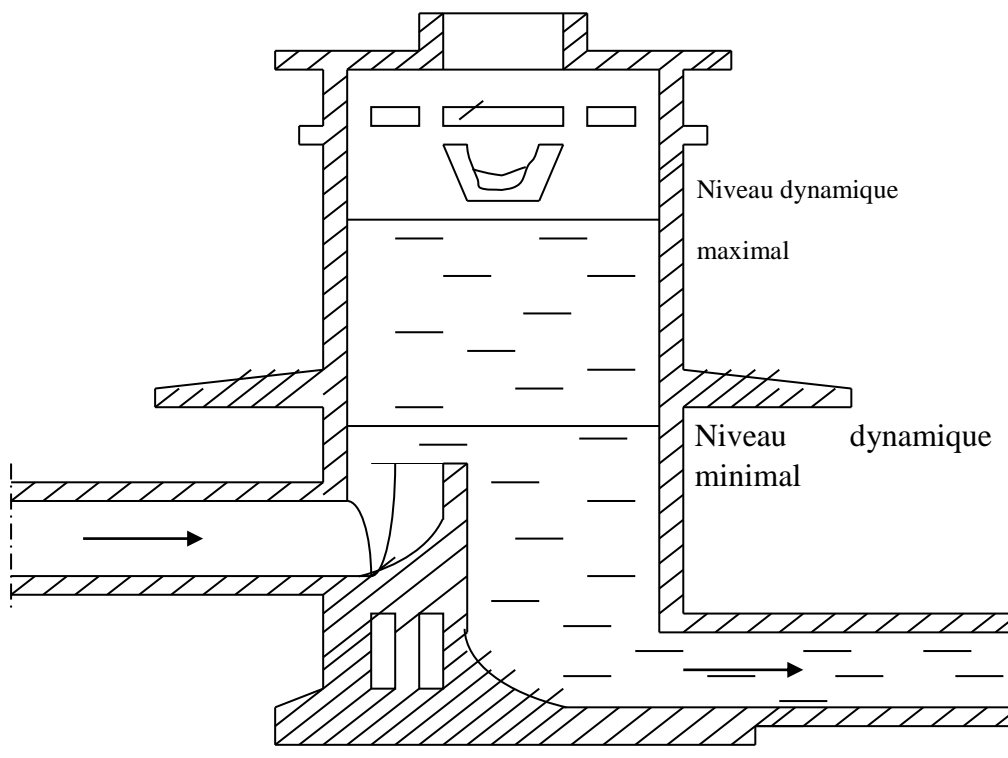


Figure 31 : Coupe type de cheminée.

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

### 5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS :

**Tableau 4 :** Avantages et inconvénients des appareils anti-bélier.

Appareils	Avantages	Inconvénients	Observations
Volants d'inertie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dispositif économique</li> <li>- Intéressant sur les installations qui ne s'arrêtent pas trop souvent.</li> </ul>	<p>Consommation d'énergie supplémentaire.</p> <p>Protection limitée par la puissance du moteur et les caractéristiques de démarrage.</p> <p>Inapproprié dans les stations à forte fréquence de démarrage.</p>	Utilisé comme protection contre les dépressions
Soupapes de décharge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût limité</li> <li>- Entretien et réglage facile</li> <li>- Ne consomme pas d'énergie</li> <li>- Indépendant d'une installation électrique</li> </ul>	<p>Nécessite un entretien et un contrôle attentifs (ressort).</p> <p>Pertes considérables d'eau pendant le fonctionnement.</p>	Utilisé comme protection contre la surpression
Ventouses (reniflards)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon fonctionnement pour un écoulement stable</li> <li>- Peuvent être placées sur la plupart des points hauts d'un réseau</li> </ul>	<p>Quelques difficultés dans des cas de dépression ou il se produit une aspiration d'eau sale dans le réseau.</p> <p>Dépression d'origine inconnue (poteau d'incendie, manoeuvre de vannes etc...) ou d'une opération mal préparée.</p>	Utilisé comme protection contre la surpression ( et dépression dans certains types a triples fonctions)
Réservoir d'air	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon fonctionnement ;</li> <li>- Bonne sécurité ;</li> <li>- Pas de pertes d'eau</li> </ul>	<p>Entretien et réglage compliqués qui exige du personnel qualifié.</p> <p>Coût élevé.</p>	Utilisé comme protection contre la dépression et la surpression
Cheminée d'équilibre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon fonctionnement (ne comporte pas d'organes mécaniques susceptibles de fonctionner défectueux).</li> <li>- Importante durée de vie ;</li> <li>- Indépendante d'une installation électrique ;</li> <li>- Pas de pertes d'eau</li> </ul>	<p>Possibilités d'installation limitées.</p> <p>Ouvrage coûteux (hauteur généralement très développée).</p>	Utilisé comme protection et pour la dépression et pour la surpression

# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

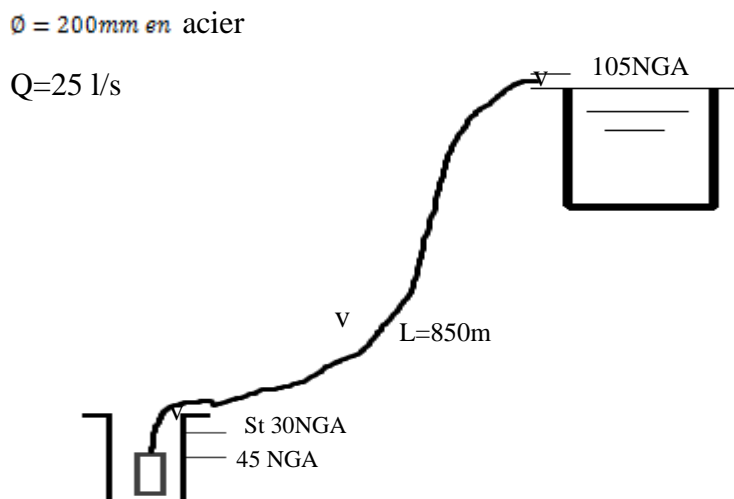
## 6. APPLICATION A UN CAS REEL :

### 6.1.Généralités :

Soit un groupe électropompe équipant le forage de la ville en fonctionnement normal qui envoie dans une conduite avec une vitesse d'écoulement  $V_0$  un débit  $Q_0$ , supposant qu'il se produise un arrêt brusque du fonctionnement de cette pompe (disjonction inopinée de l'électricité).

Cet arrêt donne lieu à un phénomène oscillatoire qui est le coup de bélier dont les processus sont les suivants :

- **1<sup>ère</sup> phase :** Par suite de son inertie, la colonne va poursuivre son chemin ascendant, mais n'étant plus alimentée, il se propage vers le réservoir une onde élastique à pression statique normale qui commence à se déplacer du réservoir à la pompe.
- **2<sup>ème</sup> phase :** Dès que l'onde de pression normale atteint la pompe, une onde élastique de surpression commence à se propager de la pompe jusqu'au réservoir, une nouvelle onde de pression statique normale commence à se déplacer du réservoir jusqu'à la pompe.



Lorsque cette onde atteint la pompe, elle provoque une nouvelle onde de pression et le phénomène décrit ci-dessus continue jusqu'à qu'il sera amorti par les pertes de charge résultant des frottements de l'eau dans la conduite.

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

---

Chacune de ces ondes à une durée de  $\theta = \frac{2L}{a}$  d'où :

L : longueur de la conduite [m]= 850m.

a : Célérité en [m/s]

$$a = \frac{\left(\frac{k}{\rho}\right)^{1/2}}{\left(1 + \frac{kD}{Ee}\right)^{1/2}}$$

avec :

k : Coefficient de compressibilité de l'eau ;  $k = 2.10^9$  à  $20^\circ \text{C}$ .

$\rho$  : Masse volumique de l'eau ;  $\rho = 1000 \text{ kg / m}^3$

E : Coefficient de l'élasticité de la conduite ;  $E = 2.10^{11}$

e : Epaisseur de la conduite (m).

$(k/\rho)^{1/2}$  : Célérité de l'onde de pression des conduites très rigides.

$\left(1 + \frac{kD}{Ee}\right)^{1/2}$  : Contribution de l'élasticité de la conduite.

Le maximum de la suppression et de la dépression s'exprime par :

$$H_{\max} = \pm \frac{aV_0}{g}$$

$V_0$  : Vitesse d'écoulement en régime normal (m/s) ;

g : accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m}^2/\text{s}$ )

$$a = \frac{\left(\frac{k}{\rho}\right)^{1/2}}{\left(1 + \frac{kD}{Ee}\right)^{1/2}}$$

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

---

$$k = 2.10^9$$

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

$$E = 2.10^{11}$$

$$D = 200 \text{ mm}$$

$$e = 5 \text{ mm}$$

Donc :  $a = 1154.46 \text{ m/s}$

- **Les caractéristiques de la conduite de refoulement :**

- Longueur :  $L = 850 \text{ m}$
- Diamètre :  $D = 200 \text{ mm}$
- Hauteur géométrique :  $H = 60\text{m}$
- Débit refoulé :  $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$

- **La vitesse d'écoulement en régime permanent :**

$$V_0 = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4(0.025)}{3.14(0.2)^2} = 0.80 \text{ m/s}$$

Les dépressions et les surpressions sous moyens de protection peuvent atteindre les valeurs maximales suivantes :

$$H_{\max} = \frac{aV_0}{g} = \frac{1154,46 \cdot 0,80}{9.81} = 94.15 \text{ m}$$

$H_{\max} = 94.15 \text{ m}$

- **La surpression :**

$$H_s = H_g + H_{\max} = 60 + 94.15$$

$H_s = 154.15 \text{ m}$

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

- La dépression:

$$H_d = H_g - H_{\max} = 60 - 94.15$$

$$H_d = - 34.15\text{m}$$

### - Réservoir d'air :

Comme étranglement à la base de la cloche, on a choisi tuyère qui fonctionnant au retour de l'eau comme un ajustage rentrant de BORDA [Annexe N°.1] permet théoriquement d'avoir une perte de charge quatre (4) fois plus grande au retour qu'a l'aller.

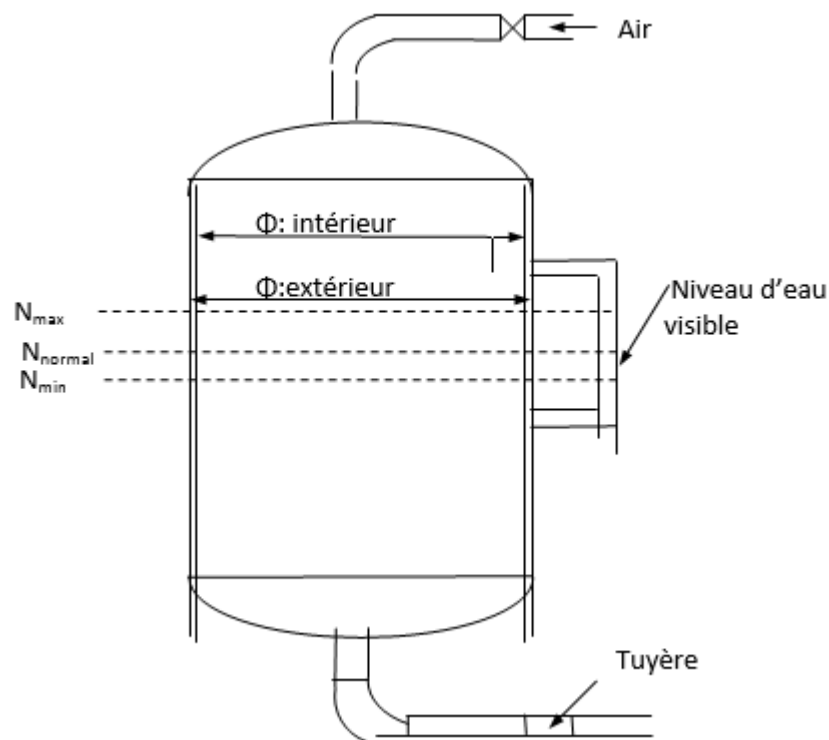


Figure 32 : Réservoir d'air.

#### a- Montée de la masse d'eau :

On choisi le diamètre de la tubulure qui doit être inférieur ou égale au diamètre de la conduite de refoulement.

Ce diamètre on le prend égal a :  $\varnothing = 100 \text{ mm}$

### CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

d : diamètre de la tuyère

d sera choisi, pour que k reste compris entre 15 et 20

$$k = \frac{V_1}{V_f} = \frac{D^2}{d'^2}$$

Avec :

$V_1$  : Vitesse de l'eau dans la tuyère lors de la montée de l'eau.

$V_f$  : Vitesse finale dans la conduite de refoulement.

$d'$  : Diamètre de la veine contractée d'où  $d' = 0.92d$ .

D : Diamètre de la conduite de refoulement.

on choisi d = 55 mm donc  $d' = 50.60$  mm

$$k = \frac{V_1}{V_f} = \frac{D^2}{d'^2} = 15.62$$

$15 < k = 15.62 < 20$  donc k est vérifié.

D'où  $V_1 = 17.48 V_f$

- Calcul des coefficients m et c dans le cas de la montée de l'eau :

$$m = \frac{d'^2}{\phi^2} = \frac{(50.6)^2}{(100)^2}$$

$$m = 0.25$$



## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

---

$m = 0.25$  du graphe N° VII.1 correspondant on tire le coefficient de perte de charge  $c$  :

$$C = 0.62$$

- La perte de charge  $\Delta H_1$  lors de la montée de la masse liquide est :

$$\Delta H_1 = \frac{V_1^2}{2g} c = 0,62 \frac{V_1^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$\Delta H_1 = 0.032 V_1^2$$

- La résistance de la tuyère dans ce cas est :

$$\Delta H_1 = c \frac{V_1^2}{2g} = c \frac{(kV_f)^2}{2g} = c \frac{\left(k \frac{Q}{A}\right)^2}{2g}$$

$$\Delta H_1 = c \frac{(k \cdot Q)^2}{2g A^2} = c \frac{16 \cdot k^2 Q^2}{2g \pi^2 D^4} = c \frac{8 \cdot k^2 Q^2}{g \pi^2 D^4}$$

$$\Delta H_1 = R_1 Q^2 \Rightarrow R_1 = \frac{8c}{g} \left(\frac{k}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{D^4}$$

on a :

$$c = 0.65; g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}; k = 15.62; D = 200 \text{ mm}$$

Donc :

$$R_1 = \frac{8 \cdot 0,62}{9,81} \left(\frac{15,62}{3,14}\right)^2 \cdot \frac{1}{0,2^4}$$

$$= 0,51 \cdot 24,75 \cdot 625$$

d'où :

$$R_1 = 78890,06 \text{ m}^{-5} \cdot \text{s}^2$$

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

### b- Descente de la masse de l'eau :

A la descente de l'eau, la tuyère agit comme un ajutage rentrant de BORDA avec un coefficient de contraction de 0.5

$$\dot{K} = \frac{V_2}{V_f} \frac{\frac{D^2}{4}}{0.5 \frac{d^2}{4}} = \frac{2D^2}{d^2} = \frac{2(200)^2}{(55)^2}$$

$$\dot{K} = 26.45$$

Donc :  $V_2 = 26.45 V_f$

### -Calcul de m` et c` :

$$m = 0.5 d^2 / \Phi^2 = 0.5 (0.55^2 / 100^2) = 0.15$$

$$m = 0.15 \text{ ( même abaque N°VII.1 que précédemment on tire } c = 0.72$$

La perte de charge lors de la descente de la masse de l'eau :

$$\Delta H_2 = c \frac{V_2^2}{2g} = 0.037 V_2^2$$

La résistance est : R` même raisonnement que R et on aura :

$$\dot{R} = \frac{8c}{g} \left( \frac{\dot{K}}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{D^4}$$

$$= 0.59 \cdot 70.96 \cdot 625$$

Donc:  $R = 26165,20 \text{ m}^{-5} \cdot \text{s}^2$

$$\text{La durée d'une onde } \theta = 2L/a = (2 \cdot 850) / 1154,46$$

$$\theta = 1,47 \text{ s}$$

### - Préparation des données :

- La longueur de la conduite de refoulement et son diamètre en (m) sont :

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

$$L = 850 \text{ m} \quad \text{et} \quad D = 0,200 \text{ m}$$

- La célérité de la conduite en (m/s)

$$a = 1154,46 \text{ m/s}$$

- Les résistances de la tuyère dans les deux cas sont :

$$\text{Eau montante : } R = 78890,06 \text{ m}^{-5} \cdot \text{s}^2$$

$$\text{Eau descendante : } R = 26165,20 \text{ m}^{-5} \cdot \text{s}^2$$

### c - Dimensionnement du réservoir d'air :

On calcul le volume du réservoir d'air anti-bélier de la conduite de refoulement par la méthode de VIBERT :

- C'est une méthode graphique simplifiée de détermination du volume d'air.
- Valable pour les petites installations ( $L \leq 200 \text{ m}$ ).
- Abstraction des pertes de charges dans la conduite.
- Non prise en compte de l'organe d'étranglement.

### Dans notre cas la conduite est enterrée.

On à :

$$Q = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = 850 \text{ m}$$

$$D = 200 \text{ mm}$$

$$V_0 = 0,8 \text{ m/s}$$

Pour tenir compte de l'effet du sol sur la conduite, on applique la relation suivante, donnant la célérité d'onde du coup de bélier.

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + K \frac{2r(1 - v_m^2)(1 - v_s)}{(1 - v_m^2)r \cdot E_s + E_m \cdot e_m(1 - v_s)}}}$$

r : rayon intérieur de la conduite égale à 188 mm

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

---

$\nu_m$  : coefficient de POISSON du matériau de la conduite égale à 0,30 (acier)

$\nu_s$  : coefficient de POISSON du sol entourant la conduite égale à 0,33.

$E_m$  : module de YOUNG de la conduite qui égale à  $2 \cdot 10^5$  M.pa (acier)

$E_s$  : module de YOUNG du sol qui égale à 200 M.pa

$e_m$  : épaisseur de la conduite qui égale à 0,06 m

donc :

$$a = \frac{1438,75}{\sqrt{1 + \frac{474,54}{34,22 + 8040}}}$$

$a = 1398,25 \text{ m/s}$

-La charge tenant compte du coup de bélier :

$$H_g + \frac{c \cdot V_0}{g} = 63,15 + \frac{1398,25 \cdot 0,80}{9,81}$$

$$= 114,03 \text{ m}$$

- La charge maximale absolue :

$$Z_{\max} = 114,03 + 10 = 124,03 \text{ m}$$

- La charge statique absolue :

$$Z_0 = H_g + 10 = 73,10 \text{ m}$$

$$h_0 = \frac{V_0^2}{2g} = 0,033 \text{ m}$$

d'où :  $h_0/Z_0 = 4,46 \cdot 10^{-4}$

$$Z_{\max}/Z_0 = 1,70$$

On à les valeurs de  $(h_0/Z_0)$  et  $(Z_{\max}/Z_0)$  on peut tirer la valeur de  $(U_0/L.S)$  à partir de

## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

---

l'abaque de VIBERT

$$\text{Donc } U_0/L.S = 4,3 \cdot 10^{-3}$$

$$Z_{\min}/Z_0 = 0,46$$

Donc :

$$U_0 = 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot S$$

$$U_0 = 114,68 \text{ litres d'air.}$$

$$U_0 \cdot Z_0 = U_{\max} \cdot Z_{\min}$$

D'ou:

$$U_{\max} = U_0 \cdot Z_0/Z_{\min} = 114,68 \cdot 1,56$$

$$U_{\max} = 179,036 \text{ litres}$$

En tenant compte de la sécurité  $U_{\max} = 179,036$  litres d'air

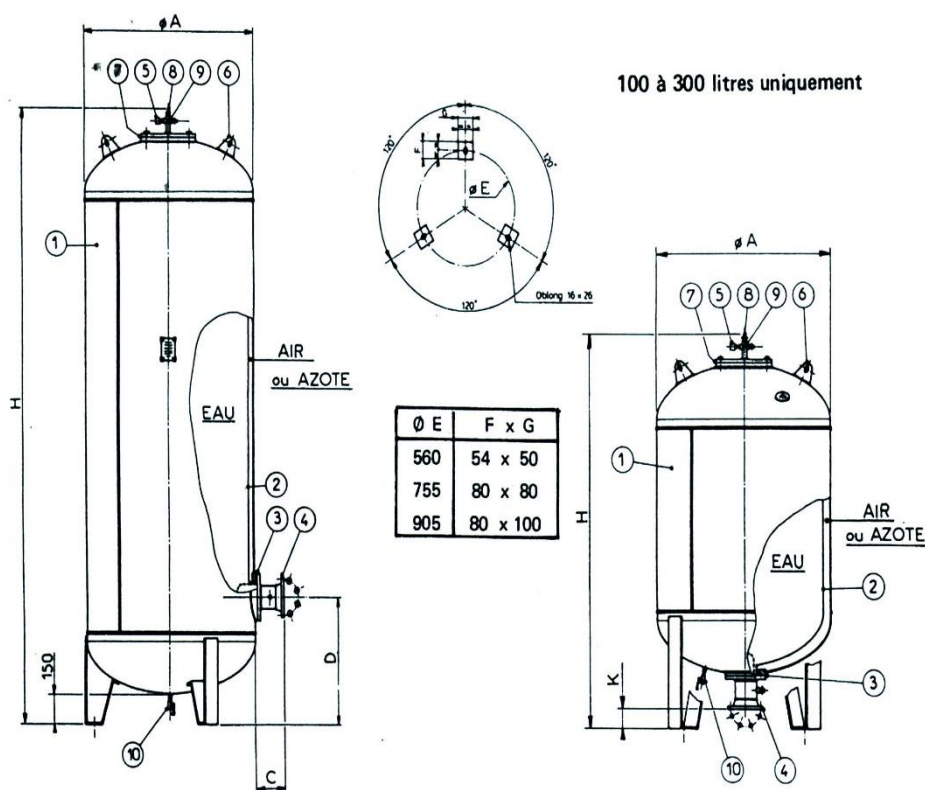
Comme il doit rester de l'eau dans le réservoir on prend le volume total égal à 200 litres.

Ce réservoir à un fond de diamètre de 0,63 m.

La hauteur totale du réservoir est de 1,10 m et un poids de 62,5 kg.

La figure suivante représente le réservoir anti-bélier choisi dans notre adduction

# CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS



1. Réservoir en tôle d'acier soudée. Protection peinture intérieure et extérieure.
2. Vessie en butyl alimentaire interchangeable.
3. Ensemble bride et contre-bride de serrage de vessie.
4. Sortie d'eau standard DN 50 ou 80 à bride PN 10. Option . DN 100, 125, 150.
5. Valve de gonflage protégée fileté mâle 1/2" gaz.
6. Pattes d'élingage.
7. Orifice de visite avec couvercle. Etanchéité par joint spécial.
8. Piquage mano 1/2" gaz.
9. Croix de liaison femelle 1/2" gaz sur air ou azote.
10. Purge 3/8" gaz sur Air ou Azote.

Capacité	Référence	Ø A	D	Ø E	H	Poids(kg)
100 litres	20300	630		560	810	62,5
200 litres	20301	630		560	1100	85
300 litres	20302	630		560	1460	100
500 litres	20303	630	550	560	2015	140
750 litres	20304	850	600	755	1765	220
1000 litres	20305	850	600	755	2215	265
1500 litres	20306	1000	630	905	2410	410
2000 litres	20307	1000	630	905	3070	490

Sortie	Référence	C	K	Poids (kg)
DN 50	22222 50 SIB	182	63	10,3
DN 80	22222 80 SIB	177	68	11,4
DN 100	22222 100 SIB	172	73	11,5
DN 125	22222 125 SIB	172	73	13
DN 150	22222 150 SIB	165	80	13,6

**Figure 33 : Le type du réservoir anti –béliet choisi.**

### d-Calculdu volume de la calotte :

On pose :

$$H_{cal}=0.3 \text{ m}$$

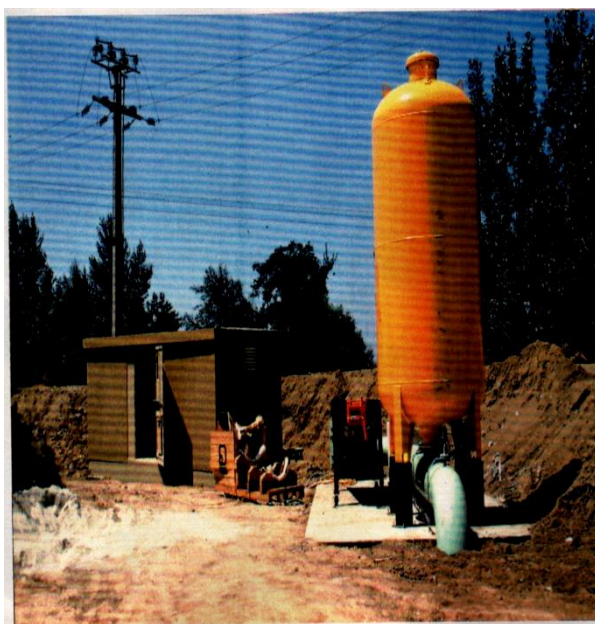
## CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS

Donc le volume est donné par la relation suivante :

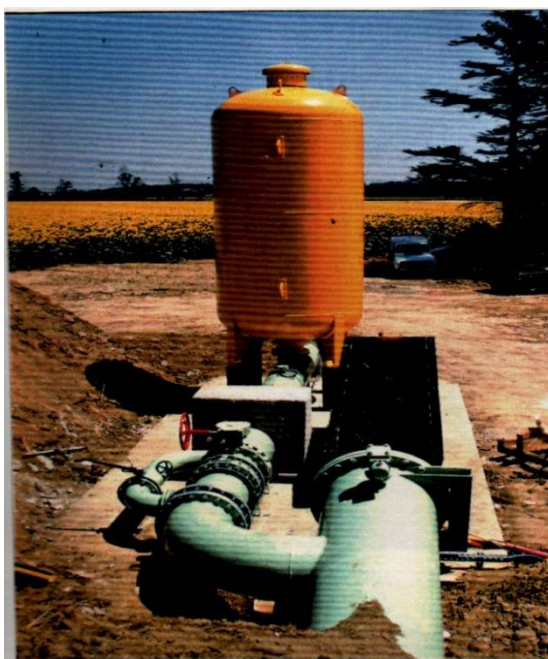
$$V_{cal} = (4/3) \cdot \pi \cdot R_2 \cdot H_{cal}$$

$$V_{cal} = 0,12 \text{ m}^3$$

- La position du réservoir anti-bélier et les accessoires qui sont raccordés au réservoir avec la conduite de refoulement sont représentés dans la figure suivante :



**Figure 34 :** Emplacement du réservoir anti-bélier.



**Figure 35:** Les accessoires de raccordement du réservoir anti-bélier avec la conduite de refoulement.

## **CHAPITRE 03 : PROTECTION DES CANALISATIONS CONTRE LE PHENOMENE TRANSITOIRE PASSANT PAR DIFFERENTS APPAREILS ET EQUIPEMENTS**

---

### **7. CONCLUSION :**

Nous nous sommes limités dans ce chapitre à la description des divers appareils couramment utilisés dans la protection contre le coup de bélier.

La cheminée d'équilibre à la station est très exceptionnelle et sera toujours de construction très onéreuse. Elle peut trouver son emploi sur le tracé de refoulement, quand celui-ci comporte, par exemple, des points hauts où peut survenir une cavitation en régime transitoire, même avec l'existence d'un anti-bélier.

Cependant, le réservoir d'air est le moyen de protection le plus utilisé, il trouve sa place dans la station de pompage où il peut être surveillé.

Pour éviter et limiter un peu le risque du coup de bélier dans une conduite de refoulement, nous optons impérativement pour un réservoir anti- bélier, pour limiter les surpressions et les dépressions dans la conduite, une protection pour la continuité de l'eau.





## **Conclusion Générale**

# CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

Tout au long de notre travail nous avons pu aborder une série d'équations analysant clairement le régime transitoire, se sont les équations générales de SAINT-VENANT traduisent tous les mouvements transitoires. Après les avoir simplifié, en rétrécissant leur champ de validité, nous avons abouti aux équations d'ALLIEVI.

En faisant intervenir les conditions aux limites, nous avons pu établir des solutions analytiques à partir de ces équations pour des cas simples.

A travers le 2<sup>ème</sup> chapitre, nous avons pu établir une analyse succincte du phénomène du « coup de bélier ». Après avoir effectué une analyse physique du phénomène, nous avons procédé à sa représentation graphique à partir des équations cités auparavant d'ALLIEVI. Ces dernières nous ont permis de mieux comprendre le phénomène.

Les effets néfastes que provoque le coup de bélier nous obligent à attacher une grande importance à sa quantification, et par conséquent calculer et dimensionner une protection anti-bélier assez conséquente.

Dans le 3<sup>ème</sup> et dernier chapitre nous nous sommes limités à la description des divers appareils couramment utilisés dans la protection contre le coup de bélier. Du volant d'inertie à la soupape de décharge passant par les ventouses ou reniflards, les cheminées d'équilibre ainsi que les réservoirs d'air ;

La cheminée d'équilibre à la station est très exceptionnelle et sera toujours de construction très onéreuse. Elle peut trouver son emploi sur le tracé de refoulement, quand celui-ci comporte, par exemple, des points hauts où peut survenir une cavitation en régime transitoire, même avec l'existence d'un anti-bélier.

Cependant, le réservoir d'air est le moyen de protection le plus utilisé, très utilisée dans les stations de pompage où il peut être surveillé.

Pour éviter et limiter un peu le risque du coup de bélier dans une conduite de refoulement, nous avons opté impérativement pour un réservoir anti-bélier, pour limiter les surpressions et les dépressions dans la conduite, une protection pour la continuité de l'eau.

Les hypothèses simplificatrices introduites dans le calcul du réservoir d'air 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 cloche un étranglement qui amortira rapidement les oscillations et permettra aussi de réduire le volume de la cloche, ou nous avons opté dans notre application pour un volume total de 200 litres.

## ملخص:

لحماية القنوات ضد صدمة الضغط، نقترح الخزانات الهوائية. لكن في الميدان التطبيقي، صدمة الضغط في حالة الدفع أو السيلان بالجاذبية، كانت دائما تدرس باعتبار ان القنوات غير مغطاة. اثر التربة على القنوات مغطاة كان دائما مهملًا، وهذا لا يعكس الحقيقة.

دراستنا تصبو الى ابعاد الاخطاء على حساب المضادات للصدمة، والتي تهتم بحساب حجم الخزان الهوائي مع الاخذ بعين الاعتبار اثر التربة وتأثير خصائص القنوات. هذه الدراسة تنقسم الى ثلاثة فروع مرتبطة فيما بينها و تهدف الى الاقتصاد في حساب حجم الخزان الهوائي.

## Résumé

En vue de protéger les conduites contre le phénomène du coup de bélier, on prévoit souvent des réservoirs d'air. Mais dans le domaine pratique, le coup de bélier, en écoulement gravitaire ou en refoulement, a toujours été étudié en supposant que les conduites sont non enterrées. L'effet du sol sur les conduites enterrées a donc toujours été négligé, chose qui ne reflète pas la réalité.

Notre étude qui veut justement éviter les erreurs du dimensionnement des anti-béliers s'est intéressée au calcul du volume du réservoir d'air en introduisant l'effet du sol et l'influence des paramètres caractérisant les conduites. Elle s'est scindée en trois parties bien liées et a abouti à une économie sur le dimensionnement du réservoir anti-bélier.

## Abstract

In order to protect the conduits against the phenomenon of the water hammer, one often envisages air receivers. But in the practical field, the water hammer, in gravitating flow or repression, was always studied by supposing that the conduits are not buried. The effect of the ground on the conduits was thus always neglected, thing which does not reflect reality.

Our study which wants to precisely avoid the errors of the dimensioning of the desurgers is interested in the calculation of the volume of the air receiver by introducing the effect of the ground and the influence of the parameters characterizing the conduits. It was divided into three well bound parts and led to an economy on the dimensioning of the tank desurger.



**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ANDRE.DUPONT**"Hydraulique urbaine", Tome II Eyrolles, paris 1977.
- [2] **CARLIER.M**"Hydraulique générale et appliquée", Edition Eyrolles, paris 1972.
- [3] **A.LENCASTRE** "Hydraulique générale", Edition Eyrolles, paris 1983.
- [4] **M ESCAND.L** " Hydraulique générale", Tome II Edition, paris 1971.
- [5] **VARLET.H** "Usines de dérivation" Eyrolles, paris 1965.
- [6] **M.BOUMARAH, A.GOURDIN** "Méthodes numériques appliquées ", OPU, Edition1993.
- [7] **M.MEUNIER** "Les coup de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression", ENGREF, Paris 1980.
- [8] **OURAGH.YOUCEF**"Ecoulement forcé en Hydraulique" Tome II OP, 1986.
- [9] **PISKONOV.N**"Calcul intégral et différentiel et intégral" Tome II première partie OPU Edition corrigée.
- [10] **B.SALAH, A.KETTAB, B.MASSOUH, B.MBANGANGOYE** "Célérité de l'onde de coup de bélier dans les réseaux enterrés", revue la Houille Blanche, n°3/4,2001.
- [11] **P.NONCLERCQ**"Hydraulique urbaine appliquée" 3<sup>ème</sup> partie, Edition CEBEDEC, 1981.
- [12] **G.PISSARENKO, A.YAKOVLEV, V.MATVEEV** "Aide-mémoire de résistance des matériaux", Editions Mir.Moscou, 1975.
- [13] **B.SALAH, A.KETTAB, B.MASSOUH** "Coups de bélier dans un réseau ramifié de rang 2, en refoulement", 2<sup>ème</sup> séminaire national sur l'Hydraulique, Biskara (Alger), Novembre 1996.
- [14] **B.SALAH** "Cours d'AEP", cinquième année.
- [15] **MICHEL A.MOREL** "Turbomachines - Constructions graphiques,

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

Phénomènes transitoires", Tome II Chihab Eyrolles, 1994.

[16] **NACERA, SALAH TAIBI** "Pratique du Fortran 77" Berti Editions, 1991.

[17] **M.A.HACHEMI** "Analyse du coup de bélier par des méthodes numériques" M.F.E, ENP Promotion 1994.

[18] **TOUMI.A** "Contribution à l'étude du régime transitoire dans une conduite en charge" M.F.E, ENSH Promotion 1999.

[19] **T.ABDELMALEK** "Etude comparative des moyens anti-bélier (cas des refoulement)" M.F.E, ENSH Promotion 1999.

[20] **M.BEN MEIA** "Dimensionnement des réservoirs d'anti-bélier, cas des conduites non enterrées et cas des conduites enterrées " M.F.E, ENSH Promotion 2003





