

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 :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Thème

**Méthodologie de recherche sur la protection
des conduites en charge contre les variations
de pression**

Nom et Prénom de l'étudiant :
KHELALFA Bahaeddine

Encadreur :
Mr. ABDESSEMED Fouzi

Promotion Juillet 2019

DEDICACES

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

- ❖ *Mes très chers parents : mon père Sadek - allah yarhmo- et le parfait Mère pour les sacrifices qu'elle consentit à mon égard.*
- ❖ *Mes chers frères et ma sœur : «Sari, Abdelhak, , Abir ».*
- ❖ *Toute la famille : Khelalfa*
- ❖ *Mes amis proches : « Housseem, Mouadh, Hamidou, Aziz ».*
- ❖ *Mes collègues : «Ramzi, Moussa, Midou».*

REMERCIEMENT

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

Je remercie vivement mon encadreur MR- ABDESSEMED Fouzi pour avoir accepté de diriger mon travail, pour sa disponibilité, sa compréhension et ses encouragements au cours de l'élaboration de ce mémoire.

Tous mes professeurs du département hydraulique pour leurs disponibilité et conseils.

J'adresse mes remerciements sincères à tous les membres de jury d'accepter de discuter ce mémoire, et pour le temps qui ont pris à l'examiner.

Tous mes compagnons de promotion 2018-2019 hydraulique. Mes amis qui n'ont cessé de m'encourager.

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre I : le phénomène de variation de pression (coup de bélier)

I-1-Introduction

I-2-Notion générale sur régime non permanent

I-3-Description physique :

I-3- Conclusion :

Chapitre II : les causes plus probables provoquant le phénomène

II-1- Introduction :

II-2- Fermeture et ouverture des vannes dans les conduites gravitaires :

II.2.1.Ouverture des vannes :

II.2.2. Fermeture d'une vanne de sectionnement :

II.2.2.a. Valeur numérique du coup de bélier :

II.2.2.b. Cas de fermeture brusque :

II.2.2.c. Cas de la fermeture lente :

II.2.2.d. Répartition du coup de bélier le long de la conduite :

II.3.Arrêt ou démarrage des pompes dans les conduites de refoulement

II.3.1.démarrage des pompes :

II.3.2.Arrêt des pompes :

II.3.2.a. Arrêt instantané :

II.3.2.b. Arrêt non instantané :

II.4. Arrêt brutal par disjonction inopinée d'un ou de plusieurs groupes électropompes (panne d'alimentation d'énergie) :

II-5- Conclusion :

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variation de pression

III-1- Introduction

III.2-les dispositifs de protection contre la dépression

III.2.1-le volant d'inertie:

III.2.1.a- Principe de fonctionnement des volants d'inertie :

III.2.1.b- Calcul de l'amortissement du coup de bélier grâce au volant d'inertie :

III.1.2.c-. Exemple de calcul d'un volant d'inertie :

III-4-4. Limite pratique d'utilisation des volants d'inertie :

III.1.2-cheminée d'équilibre :

III.2-les dispositifs de protection contre la surpression :

III.2.1-Soupape de décharge :

III.2.2-Réservoir D'air :

III.3-Exemples

III-4- Conclusion :

III-5- Conclusion générale

Références

Sommaire

NOTATION ET SYMBOLES

a : Vitesse de propagation d'onde [m/s] .

V : Vitesse moyenne de l'écoulement [m/s].

L : Longueur de conduite [m].

D : diamètre de la conduite [m].

A : aire d'une section droite d'une conduite [m²].

e : épaisseur de conduite [m].

E : module d'élasticité de la conduite [Pa].

K : coefficient dépendant du matériau constituant la canalisation (fonction inverse du module d'élasticité.[-].

a : la vitesse de propagation d'onde (la célérité) [m/s].

h : hauteur piézométrique [m].

m : la masse de liquide [kg].

g : accélération terrestre [m/s²].

t : unité de temps [s].

t_f : temps de fermeture [s].

α : coefficient de dilatation linéaire de matériau [°C⁻¹].chap2

R : le rayon [m].

H : hauteur d'élévation [m].

Q : débit volumique [m³/s].

Notation et symboles

T : couple [N.m].

P : Puissance[w].

N : vitesse de rotation [tr/min].

ω : vitesse de rotation [rad/s].

η : Rendement [-].

I : moment d'inertie[kg. m²].

C : couple[m. N].

LISTE DES FIGURES

Chapitre II

Fig. II.1 : Cas de la fermeture brusque.

Fig. II.2 : Schéma de la fermeture brusque.

Fig. II.3 : cas de la fermeture lente.

Fig. II.4 : adduction gravitaire – surpression.

Fig. II.5 : Répartition du coup de bélier (fermeture lente).

Fig.II.7 : Répartition du coup de bélier, refoulement.

Chapitre III

FIGURE III.1 : DILATATION DU TUYAU.

FIGURE III.2 : IMPLOSION OU ECRASEMENT DE LA CONDUITE.

Figure III.3 : section du volant d'inertie.

Figure III.4 : principe de la construction dans le cas du volant d'inertie.

Figure III.5 : section adoptée.

Figure III.6 : calcul de d'un volant d'inertie.

FigureIII.7 : cheminée d'équilibre de St-Alban,Quebec.

FigureIII.8 : cheminée d'équilibre à Montevideo,Uruguay.

Fig.III-9 : Cheminée à étranglement.

Fig.III-10: Cheminée à épanouissement.

Fig.III-10: Cheminée à épanouissement.

Fig.III-11 : Cheminée différentielle.

Fig.III.12 : coupe type de cheminée.

fig.III-13 : schémas des fonctionnements des soupapes a ressort.

fig.III-14 : soupapes des décharges Ramus.

Fig.III-15 : Shémas de principe des soupapes.

Liste des figures

Fig.III-16 :Soupape de décharge.

Fig.III-17 : Shémas d'un réservoir d'air.

Fig.III-18 : Réservoir d'air.

Fig.III-19 : shémas de principe des ballons Anti-Béliers.

Fig.III-20 : Organes dissymétriques à la base des balcons Anti-Bélier.

Liste des figures

Liste Des Tableaux

Tableau.III.1-Avantages-Inconvénients des appareils anti-béliers.

Introduction générale

Le coup de bélier est un phénomène instationnaire où tous les paramètres hydrauliques varient par rapport au temps (comme la pression, le débit, la vitesse ...etc.), cette variation peut être brusque ou instantanée comme elle peut être lente.

Les écoulements non permanents ou variables sont des écoulements dont les caractéristiques varient dans chaque section avec le temps. Dans ces écoulements les lignes de courants changent en chaque instant par rapport à l'espace. On parle alors du phénomène du coup de bélier.

« Le coup de bélier est un ensemble de phénomènes hydrauliques complexes provenant de la modification brutale du champ de vitesse et de pression dans une conduite.

L'importance technique des coups de bélier est extrêmement grande. En effet, l'amplitude et la soudaineté des surpressions et dépressions qui sont mises en jeu peuvent détériorer la conduite ou les organes qui y sont branchés. Il est nécessaire par conséquent d'empêcher la production de telles perturbations ou du moins de les atténuer.

Les causes les plus fréquentes provoquant le phénomène seront citées dans le second chapitre, à savoir la fermeture et l'ouverture des vannes et l'arrêt et démarrages des pompes.

Le coup de Bélier est nuisible pour les conduites, il engendre des surpressions et des dépressions.

- ❖ La surpression implique la dilatation du tuyau qui peut provoquer l'explosion de ce dernier.
- ❖ La dépression implique la compression du tuyau qui peut provoquer l'implosion de ce dernier.

On va voir dans le dernier chapitre les méthodes les plus utilisables pour la protection des canalisations contre le coup de bélier pour les deux cas : surpression – dépression.

I-1-Introduction :

Le coup de bélier est un phénomène instationnaire où tous les paramètres hydrauliques varient par rapport au temps (comme la pression, le débit, la vitesse ...etc.), cette variation peut être brusque ou instantanée comme elle peut être lente.

I-2-Notion générale sur régime non permanent :

Les écoulements non permanents ou variables sont des écoulements dont les caractéristiques varient dans chaque section avec le temps. Dans ces écoulements les lignes de courants changent en chaque instant par rapport à l'espace. En particulier on parle du phénomène du coup de bélier.

« Le coup de bélier est un ensemble de phénomènes hydrauliques complexes provenant de la modification brutale du champ de vitesse et de pression dans une conduite.

L'importance technique des coups de bélier est extrêmement grande. En effet, l'amplitude et la soudaineté des surpressions et dépressions qui sont mises en jeu peuvent détériorer la conduite ou les organes qui y sont branchés. Il est nécessaire par conséquent d'empêcher la production de telles perturbations ou du moins de les atténuer. » [1]

I-3-Description du phénomène du coup de bélier

Dans les installations industrielles ou sanitaires, le phénomène du coup de bélier se produit lors de la fermeture rapide, sur une canalisation de l'installation, d'un mitigeur, d'une électrovanne, d'une vanne à sphère, etc... La rapidité de la manœuvre provoque une brusque variation de la pression de l'eau, (surpression) dont l'onde se propage dans les canalisations. La perturbation part du dispositif de coupure, à l'amont, se répercute contre les autres dispositifs ou coudes de l'installation et s'étend vers l'aval en s'amortissant progressivement. La surpression va s'ajouter à la pression déjà existante dans la canalisation pouvant provoquer à la longue :

- Rupture des conduites, réservoirs ou flexibles.
- Usure des joints, des soudures de raccordement et des appareils sanitaires.
- Détérioration des dispositifs de coupure, clapet anti-retour et de régulation.
- Bruits importants et fortes vibrations dans les canalisations et les cloisons.

Chapitre I : le phénomène de variation de pression « coup de bélier »

L'importance de la surpression dépend de nombreux facteurs :

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

Pour pouvoir calculer la surpression lors d'un coup de bélier, la formule suivante prend en compte, de façon instantanée, les caractéristiques habituelles d'une installation sanitaire :

$$\Delta P = \rho \times g \times \frac{2VL}{t} \quad (\text{I-1})$$

où :

ΔP : est la surpression due au coup de bélier (Pa)

V : est la vitesse de l'eau au moment de la fermeture (m/s)

L : est la longueur du tube (m)

g : est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

t : est le temps de fermeture de la vanne (s)

La Formule précédente valable si $t > t^*$,

Si l'on veut définir simplement le "temps de fermeture" (mieux défini comme "temps de réaction") on peut utiliser la formule suivante:

$$t^* = \frac{2L}{\alpha} \quad (\text{I-2})$$

Où

t^* : est le temps de réaction de la vanne (s)

L: est la longueur du tube (m)

α : est la vitesse de propagation de l'onde (m/s) (en fonction du type de fluide, des matériaux, du diamètre interne et externe de la canalisation).

1-4-Description physique :

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

Chapitre I : le phénomène de variation de pression « coup de bélier »

Cette modification se propage vers l'amont, comme vers l'aval sous forme d'une onde qui se déplace avec une vitesse "a" appelé la célérité. Les surpressions ou dépressions peuvent atteindre des grandeurs assez considérables si la manœuvre de la vanne est suffisamment rapide et il peut résulter de ces chocs des accidents de rupture de la canalisation. Ces phénomènes sont connus sous le nom de *coups de Bélier*.

Le coup de Bélier est une onde de pression, positive ou négative, provoquée par une variation du régime hydraulique, et se propageant dans le milieu constitué par l'eau et la conduite qui la contient.

Cette onde est caractérisée par une vitesse de propagation ou célérité "a" qui ne dépend pas de l'amplitude de l'onde lorsque celle-ci est faible. Elle se réfléchit sur les obstacles et en particulier sur les extrémités de la conduite, en changeant de signe ou non suivant les conditions physiques qui y sont rencontrées.

La valeur de la célérité "a" est donnée par la formule de l'italien *Lorenzo Alliévi* (1901) :

$$a = \frac{A}{\sqrt{B + k \frac{D}{e}}} \quad (\text{I-3})$$

Alliévi a calculé les valeurs de A, B et k en remplaçant ω , g, k, et E par leurs valeurs exactes ou moyennes et a obtenus pour de l'eau aux températures ordinaires :

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{e}}} \quad (\text{I-4})$$

D : diamètre de la conduite (avec les mêmes unités que l'épaisseur de la conduite)

e : épaisseur de la conduite.

Chapitre I : le phénomène de variation de pression « coup de bélier »

E : module d'élasticité de la conduite.

k : coefficient dépendant du matériau constituant la canalisation (fonction inverse du module d'élasticité).

k=0,5 pour l'acier. k =1 pour la fonte. k =5 pour le plomb

a : la célérité en m/s

La célérité varie entre 700 et 1500 m/s

Pour les tuyaux industriels l'ordre de grandeur de la célérité est le Km/s ; Pour les tuyaux en fonte, la célérité peut atteindre 1400m/s ;

Pour le P.V.C, la célérité peut atteindre 400 à 500m/s ;

Pour l'acier, la célérité peut atteindre 1100 à 1200m/s ;

Plus la pression de service est élevée, et plus la célérité est forte (puisque l'épaisseur est plus élevée). Le maximum de la célérité serait atteint pour un tuyau indéformable ($k = 0$ ou $E = \infty$) et sa valeur correspondrait à la vitesse de propagation du son dans l'eau, soit 1425m/s à 15°C, car le tuyau étant indéformable il ne subsiste que la compressibilité de l'eau, le phénomène est analogue à la propagation des ondes sonores dans l'eau.

Dans les conditions d'arrêt brusque, l'eau coule à une vitesse de 2m/s et elle provoque un choc de 20bars.

L'interprétation énergétique du coup de Bélier se fait comme suit :

La masse liquide arrive avec une énergie cinétique :

$$E_c = 1/2 m v^2 \quad (I-5)$$

Avec:

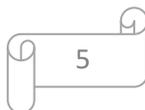
E_c : énergie cinétique de l'eau.

m: la masse de l'eau.

v: la vitesse de l'eau.

La vanne est brusquement fermée, l'eau étant compressible, elle ne se déforme pas donc c'est la conduite qui se déforme en transformant l'énergie cinétique en énergie potentielle de déformation:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (I-6)$$



Chapitre I : le phénomène de variation de pression « coup de bélier »

Avec:

E_p : l'énergie potentielle

M : la masse de l'eau

g : l'accélération de gravité

h : hauteur de l'eau

I-5- Conclusion :

Dans ce chapitre on va s'intéresser plus sur les régimes non permanents passant par une notion générale de ce type de régime ainsi qu'une description physique du phénomène transitoire. Dans le chapitre qui suit on va se concentrer sur les causes principales provoquant le phénomène en question.

Chapitre I : le phénomène de variation de pression « coup de bélier »

Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

II-1- Introduction :

Les causes les plus fréquents provoquant le phénomène seront cités dans cette partie, a savoir la fermeture et l'ouverture des vannes et l'arrêt et démarrages des pompes.

II-2- Fermeture et ouverture des vannes dans les conduites gravitaires :

II-2-1-Ouverture des vannes :

Le cas d'ouverture des vannes dans des conduites gravitaires on le rencontre le plus souvent dans des installations hydrauliques comme les centrales hydroélectriques et plus précisément dans les conduites forcées en adduction gravitaire muni de vannes de sectionnement ou le régime d'écoulement au début est permanent puis la manœuvre de la vanne le varie en un régime transitoire.

II-2-2-Fermeture d'une vanne de sectionnement :

Initialement le liquide s'écoule avec une vitesse uniforme dans la tuyauterie. Une vanne est fermée brusquement à l'extrémité de la tuyauterie qui stoppe instantanément le liquide au voisinage de celle-ci. L'inertie du liquide provoque son accumulation et comme il est peu compressible, la pression augmente en amont de la vanne. L'accumulation progressive de liquide génère une onde de pression qui remonte la tuyauterie à une vitesse qui peut atteindre 1000m/sec. Si un réservoir est présent en amont, la surpression présente dans la tuyauterie génèrera un débit inverse qui provoquera une nouvelle onde de pression, négative cette fois en amont de la vanne toujours fermée.

II-2-2-a- Valeur numérique du coup de bélier :

Nous examinons les deux cas de fermeture brusque et de fermeture lente d'un robinet vanne [3].

II-2-2-b- 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 (II.1).

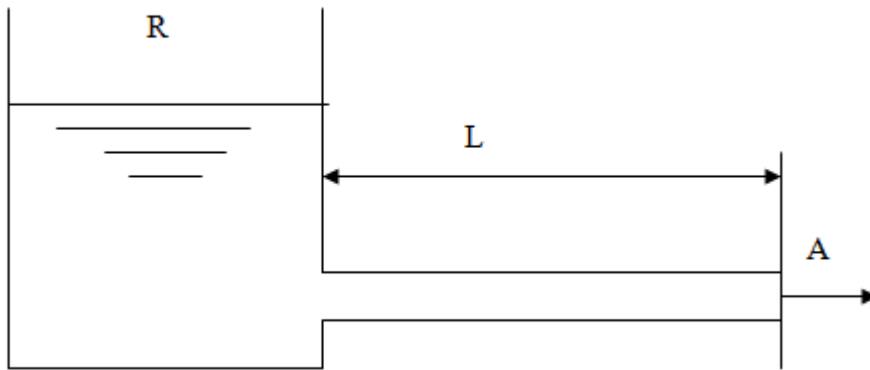


Fig. II.1 : Cas de la fermeture brusque.

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 II.2). [4].

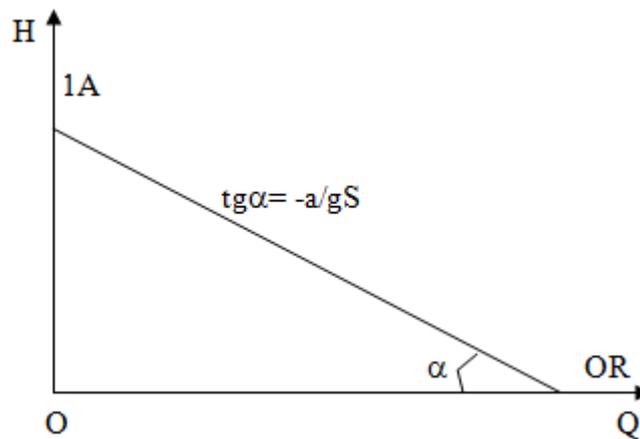


Fig. II.2 : Schéma de la fermeture brusque.

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

Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

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

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 :

$$OH = Q_0 \cdot tg\alpha$$

$$OH = Q_0 \cdot \frac{a}{gS} \quad (II.1)$$

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

$$OH = SV_0 \cdot \frac{a}{gS}$$

$$OH = \frac{aV_0}{g} \quad (II.2)$$

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

Remarque :

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

Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

II-2-2-c- Cas de la fermeture lente :

Elle est caractérisée par un temps de fermeture supérieur à $\frac{2L}{a}$. C'est à dire supérieur à un aller et retour d'onde. Si Q_0 est le débit au temps 0, il passera encore, après un temps $\frac{2L}{a}$ un débit q (figure II.3). En conséquence, la valeur de la surpression sera d'après (II.1) [01]

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

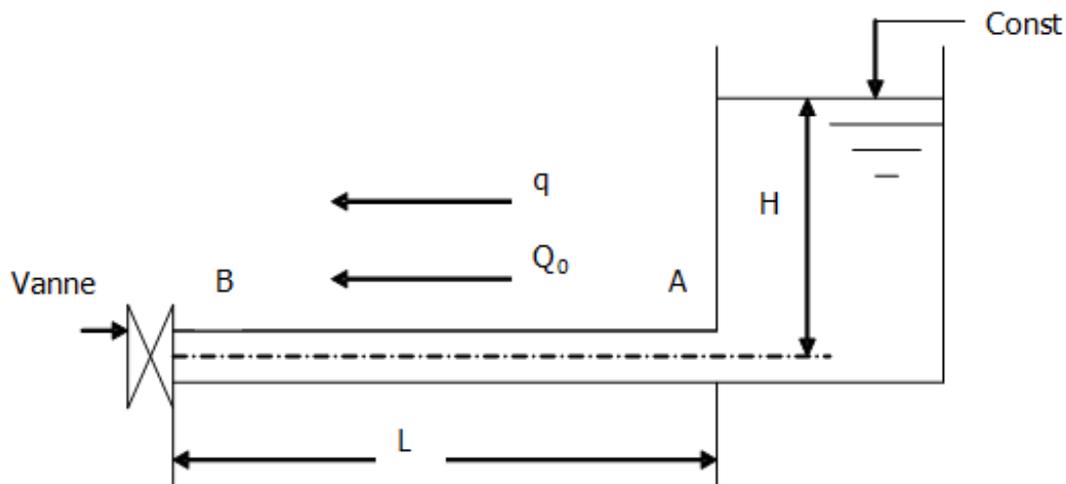


Fig. II.3 : cas de la fermeture lente.

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

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

On en déduit :

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

D'où

$$b = \frac{a}{gS} \cdot \frac{2Q_0L}{at} = \frac{2Q_0L}{gSt}$$

Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

Ou, puisque $Q_0 = SV_0$:

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

C'est la formule dite de MICHAUD [01].

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 $B = \frac{aV_0}{g}$.

Si $t > \frac{2L}{a}$, le coup de bélier est moins important et a pour valeur $b = \frac{2LV_0}{gt}$.

Ceci montre l'intérêt :

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

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

II-2-2-d- Répartition du coup de bélier le long de la conduite :

En cas d'arrêt brusque ($t \leq \frac{2L}{a}$), le coup de bélier, maximal près du robinet de réglage d'extrémité (cas de la conduite d'adduction) conserve sa valeur maximale $\frac{aV_0}{g}$ jusqu'à une distance égale à $(L - \frac{at}{2})$, puis décroît pour devenir nul à l'autre extrémité [01].

Nous pourrions donc avoir le cas représenté par la figure (II.4). Les pertes de charge dans la conduite étant négligées [3].

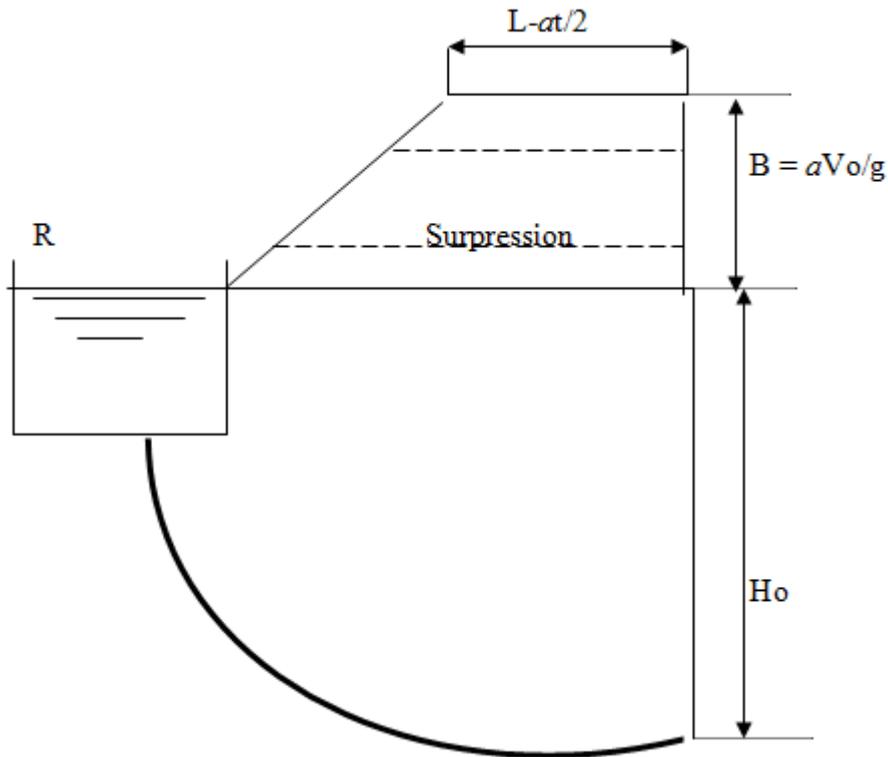


Fig. II.4 : adduction gravitaire – surpression.

En cas d'arrêt lent ($t > \frac{2L}{a}$), le coup de bélier décroît linéairement depuis sa valeur maximale $\frac{2LV_o}{gt}$ 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 [03].

On aura les diagrammes donnés par la figure (II.5).

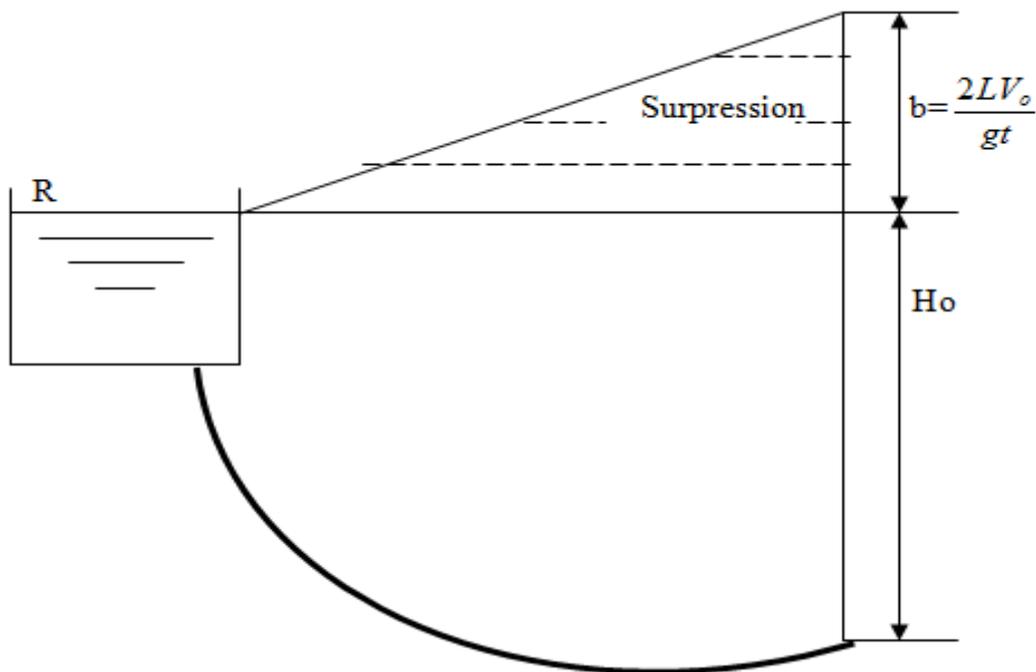


Fig. II.5 : Répartition du coup de bélier (fermeture lente).

II-3-Arrêt ou démarrage des pompes dans les conduites de refoulement

II-3-1-démarrage des pompes :

Lors du démarrage d'une pompe, la colonne de liquide dans les tuyauteries, à l'aspiration comme au refoulement, doit être accélérée à la vitesse de pointe et donc requiert un surcroît de pression qui est souvent un ordre de grandeur au-dessus de la contre-pression. Celui-ci dépend de la masse qui doit être accélérée, de la vitesse maximum à atteindre et du temps pris par la pompe pour atteindre son régime normal.

II-3-2-Arrêt des pompes :

Lors de l'arrêt brusque d'une pompe, il se produit un phénomène de coup de bélier similaire à celui de la fermeture d'une vanne. La différence principale est que le cycle commence par une onde de dépression près de la pompe au lieu de la surpression à côté de la vanne. Cette interruption donne lieu à un phénomène de coup de bélier qui est décrit schématiquement ci-dessous[3].

Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

a) Première phase du coup de bélier direct :

Lorsque la pompe s'arrête, la colonne d'eau continue son ascension grâce à son inertie. La pompe ne fournissant plus d'eau, il n'y a pas de relèvement pour combler le vide laissé par la colonne ascendante. L'onde de dépression se propage de la sortie de la pompe vers le réservoir. Dès que cette onde de dépression atteint le réservoir, une onde élastique de pression statique normale commence à se déplacer du réservoir vers la pompe.

b) Deuxième phase ou contre-coup :

Une onde élastique de surpression se propage depuis la pompe jusqu'au réservoir. Elle se produit au moment où l'onde de pression normale atteint la section de la pompe. Comme précédemment, dès que l'onde de surpression atteint le réservoir, une onde de pression statique normale commence à se propager depuis le réservoir jusqu'à la pompe.

Lorsque cette onde arrive à la section de la pompe, elle provoque une nouvelle onde de coup de bélier direct et tout le phénomène décrit précédemment recommence. Les pertes de charge par frottement dans la conduite contribuent à l'amortissement des surpressions et des dépressions jusqu'à ce que le système arrive au repos.

Chacune de ces phases a une durée $t = 2L/a$, L étant longueur de la conduite et a la célérité des ondes élastiques.

Dans la phase de coup de bélier direct et suivant le profil en long de la conduite, les ondes de dépression peuvent produire de la cavitation et même des ruptures de la veine liquide (séparation de la colonne d'eau). Généralement toutefois, la cavitation provoquée dans la première phase n'est pas dangereuse en elle-même.

Le remplissage des vides dans la phase de contrecoup peut au contraire engendrer des surpressions dangereuses (c'est pendant la deuxième phase que le phénomène devient semblable à la première phase de l'arrêt brusque d'une turbine[3]).

II-3-2-a- Arrêt instantané :

Soit une conduite de refoulement où l'écoulement a une vitesse V_0 . Supposons que la vitesse diminue brusquement jusqu'à la valeur $V < V_0$.

La dépression maximale est dans ce cas :

$$\Delta H = -\frac{a}{g}(V_0 - V) \quad (\text{II.3})$$

Si un arrêt brusque des moteurs se produit, événement qui doit presque toujours être prévu dans le cas de moteurs électriques, on a $V = 0$ et la dépression maximum, si aucun dispositif ne la diminue, est :

$$\Delta H = -\frac{a}{g}V_0 \quad (\text{II.4})$$

En posant $a = 1000\text{m/s}$, on obtient $h = 100V_0$, c'est-à-dire, dans le cas de fermeture brusque, la dépression en mètres de colonne de liquide est à peu près 100 fois la valeur de la vitesse en mètres par seconde; ce qui occasionne presque toujours la rupture de la veine.

Sauf dans le cas de pompes fonctionnant sous des pressions très fortes ou lorsque la vitesse moyenne est très faible, ces dépressions sont toujours dangereuses et on doit les éviter. Toutes choses égales par ailleurs, la surpression dans la deuxième phase est du même ordre de grandeur. Cette surpression est habituellement plus dangereuse encore que la dépression.

En cas d'arrêt brusque, $t_f \leq 2L/a$, le coup de bélier est maximal près de la pompe (figure II-6). Cette dépression reste constante sur une longueur égale à $L - a(t_f/2)$ puis croît linéairement jusqu'à zéro au niveau du réservoir.

Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

On voit que le point haut C présente un danger de cavitation. En fait, tous les points où la pression $P/\rho g = (H_0 - aV_0/g - h)$ est plus faible que la tension de vapeur h_v présentent un danger de séparation de la colonne fluide et de cavitation lors de la première phase du coup de bélier.

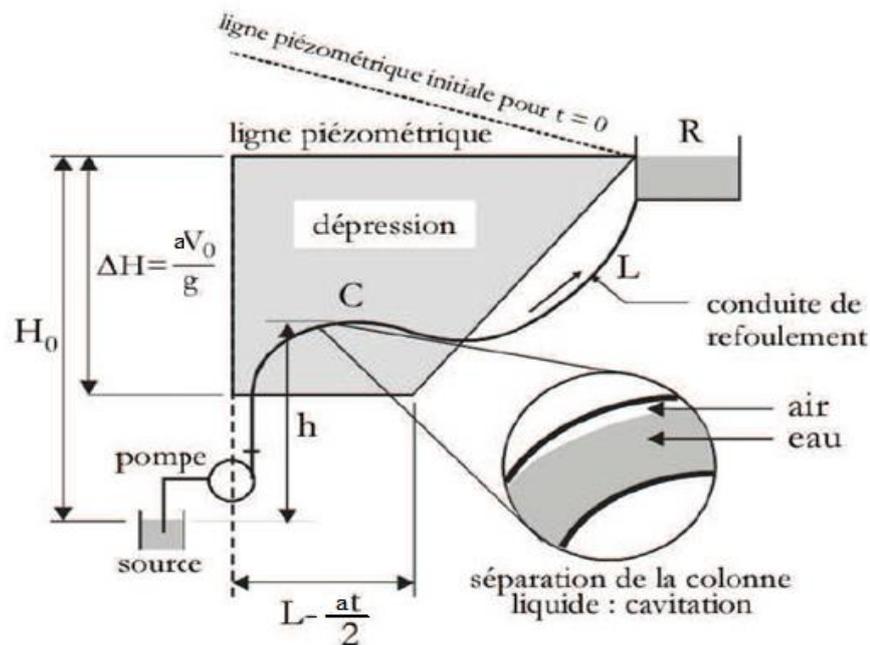


Fig. II.6 : Répartition du coup de bélier : conduite de refoulement.

II-3-2-b-Arrêt non instantané :

Compte tenu de son inertie, le moteur couplé à la pompe continue son mouvement après l'interruption du courant électrique. Le débit d'écoulement, et donc la vitesse, ne s'annulent pas instantanément. Si le temps d'arrêt est $t_f \geq 2L/a$, on dit que l'arrêt est non instantané.

En cas d'arrêt non instantané, $t_f \geq 2L/a$, le coup de bélier décroît de façon linéaire depuis sa valeur maximale $2LV_0/gt_f$ à la sortie de la pompe, jusqu'à zéro à l'autre extrémité (figure II.7) [3].

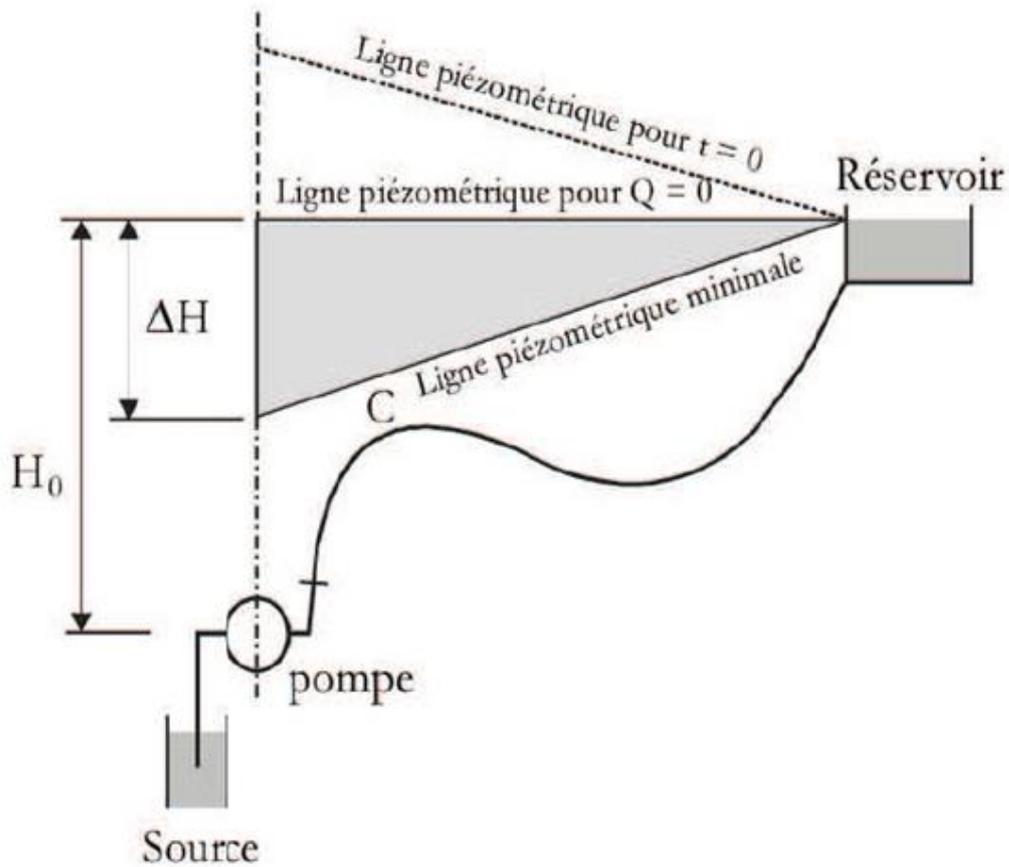


Fig.II.7 : Répartition du coup de bélier, refoulement.

Comparativement au cas de la figure II-6, on voit que le point C présente moins de danger de cavitation car la pression résiduelle y est positive{3}.

II-4- Arrêt brutal par disjonction inopinée d'un ou de plusieurs groupes électro-pompes (panne d'alimentation d'énergie) :

En cas d'arrêt brutal d'une station de pompage, l'alimentation de la conduite n'est plus assurée, alors que l'eau, contenue dans celle-ci, continue à se déplacer par son inertie propre (à titre indicatif il y a 500 tonnes d'eau par km dans une conduite de DN 800) .

Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

La masse d'eau en mouvement s'arrêtant beaucoup moins vite que les pompes, la conduite en amont du refoulement est alors soumise à une surpression, tandis que la conduite en aval est soumise à une dépression.

Si la protection anti-bélier est absente ou insuffisante, les risques pour l'installation sont principalement :

- ❖ Dégradation des conduites (décollement du revêtement intérieur,...),
- ❖ Perte d'étanchéité (aspiration des joints,...),
- ❖ Ovalisation ou aplatissement des conduites (conduites en inox, plastiques,...),
- ❖ Sollicitation des butées (variations des contraintes,...),
- ❖ Rupture des conduites (implosion de poche de cavitation,...),
- ❖ Aspiration d'eaux polluées par les fuites.

Compte tenu des masses respectives d'eau en mouvement à l'aspiration et au refoulement, la protection concerne principalement la conduite en aval des stations de pompage (sauf pour les surpresseurs en réseaux) .

Remarque

Dans le cas d'une station de pompage les régimes transitoires les plus dangereux sont consécutifs à une disjonction électrique (ou panne de courant). Il est rappelé que, dans le cas d'une disjonction électrique, la présence d'une variation de vitesse électronique ou de démarreur-ralentisseur électronique est sans effet sur les régimes transitoires et ne dispense pas, en conséquence, de l'étude et de l'installation de la protection anti-bélier.

II-5- Conclusion :

Après avoir passé par les causes principaux provoquant le phénomène non permanent on a remarqué que la surpression est bien plus importante dans le cas des fermetures des vannes que celui de l'ouverture et même chose pour le cas des pompes ; à l'arrêt la dépression est bcp plus importante que dans le cas de démarrages.

Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

III-1- Introduction :

Le coup de Béliér est nuisible pour les conduites, il engendre des surpressions et des dépressions.

- ❖ La surpression implique la dilatation du tuyau qui peut provoquer l'explosion de ce dernier.
- ❖ La dépression implique la compression du tuyau qui peut provoquer l'implosion de ce dernier.
- ❖ On va voir dans ce chapitre les méthodes les plus utilisables pour la protection des canalisations contre le coup de béliér pour les deux cas : surpression – dépression.

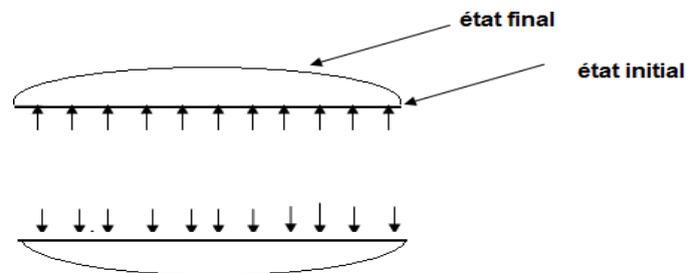


Fig 3.1 : dilatation du tuyau.

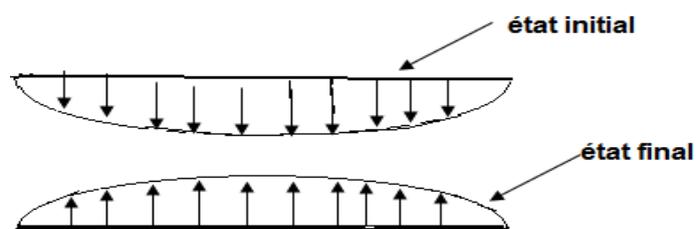


Fig3.2 : implosion ou écrasement de la conduite.

III-2-les dispositifs de protection contre la dépression:

III-2-1-le volant d'inertie:

III-2-1-a- Principe de fonctionnement des volants d'inertie :

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

Le volant d'inertie, calé sur l'arbre du groupe, constitue l'un de ces moyens. Grâce à l'énergie qu'il accumule pendant la marche normale, le volant la restitue au moment de la disjonction et permet ainsi d'allonger le temps d'arrêt de l'ensemble, donc, de diminuer l'intensité du coup de bélier.

III-2-1-b- Calcul de l'amortissement du coup de bélier grâce au volant d'inertie :

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

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

Nous donnerons ci-après des indications pour l'établissement de cette épure. Il y a toujours intérêt à accumuler la masse du volant près de la périphérie, donc de se rapprocher de la section type donnée par la figure III.3.

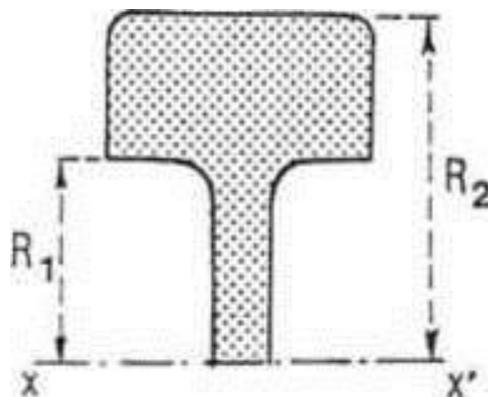


Figure III.3 : section du volant d'inertie

Le moment d'inertie I de ce volume de révolution par rapport à l'axe de rotation xx'

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

Est donné par la relation :

$$I = m K^2 \quad (\text{III.1})$$

Où :

m : est la masse du volant.

K : le rayon de giration.

I : est exprimé en Kg.m²

Pour un cylindre :

$$K^2 = \frac{R^2}{2} \quad (\text{III.2})$$

Où R est le rayon de la section de base du cylindre

Pour la section donnée sur la figure

$$K^2 = \frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \quad (\text{III.3})$$

Si R est le rayon de la section de base du cylindre pour la section donnée sur la figure III.3

H_0 , Q_0 , et ρ , les caractéristiques ; hauteur d'élévation, débit et rendement correspondant au point du point de fonctionnement de la pompe en régime normale, H_0 étant exprimé en m et Q_0 en m³/s.

Appelons alors :

- H_0, Q_0 , et P les caractéristiques hauteur d'élévation, débit et rendement correspondant au point de fonctionnement de la pompe en régime normal. H_0 étant exprimé en m et Q_0 en m³/s.
- N le nombre de tours/minute de la pompe pour ce régime [01]

La vitesse angulaire ω en rd/s est donnée par :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (\text{III.4})$$

La puissance absorbée par la pompe, en watts :

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

$$P_{abs} = \frac{1000 Q_o H_o \times 9,81}{\rho} \quad (\text{III.5})$$

Le couple C_p exprimé en m N vaut :

$$C_p = \frac{P_{abs}}{N} = \frac{1000 Q_o H_o \cdot 9,81}{\omega \rho} \quad (\text{III.6})$$

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

$$\frac{1}{2} I \omega^2 \quad (\text{III.7})$$

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

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

$$C_p \omega dt$$

En conséquence :

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

Ou :

$$I \omega d\omega = C_p \omega dt$$

Donc :

$$d\omega = \frac{C_p}{I} \Delta t \quad (\text{III.8})$$

Des différentielles, passons aux différences finies :

$$\Delta \omega = \frac{C_p}{I} \Delta t \quad (\text{III.9})$$

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

- En ce qui concerne le volant : les vitesses successives décroissantes telles que $(\omega - \Delta\omega)$ à des temps tels que $(t - \Delta t)$; **[01] [10]**.
- En ce qui concerne la pompe : pour les vitesses successives ci-dessus du volant les caractéristiques H , Q et P de la pompe puisque l'on sait, d'après les lois de variations des pompes centrifuges :

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

- Que les débits varient dans le rapport des vitesses.
- Que les hauteurs varient dans le rapport du carré des vitesses.

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

Si nous choisissons pour Δt la valeur du temps d'un aller-retour de l'onde entre pompe et réservoir, soit $\Delta t = \frac{2L}{a}$, c'est à dire si nous considérons.

Selon BERGERON, les régimes dits à rythmes entiers, l'épure du coup de bélier s'établira suivant le schéma ci-après (figure III-17) en prenant $\frac{L}{a}$ comme unité de temps.

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

Le régime dit à rythmes entiers, l'épure du coup de bélier s'établira suivant le schéma ci-après (Figure III.4) en prenant L/a comme unité de temps :

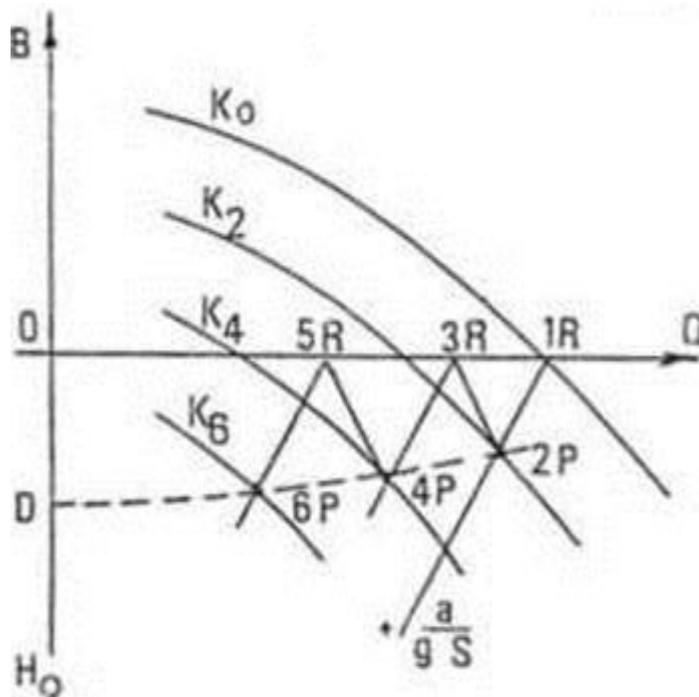


Figure III.4 : Principe de la construction dans le cas du volant d'inertie

Au temps zéro, il y a disjonction à la pompe mais, au réservoir, au temps 1 le régime est encore le régime initial et il est donné par le point 1R, intersection de la caractéristique K_0 de la pompe pour la vitesse de régime normal avec l'horizontale passant par la hauteur géométrique d'élévation (on néglige les pertes de charge dans la conduite). L'observateur partant du réservoir et allant vers la pompe remonte le courant, donc parcourt la droite $\frac{+a}{gS}$. Arrivé à la pompe au temps 2 c'est à dire après un temps $\Delta t = \frac{2L}{a}$ depuis l'arrêt brusque, il trouve la pompe avec sa nouvelle caractéristique K_2 résultant de sa nouvelle vitesse ($w - \Delta w$), ce qui donne le point 2P. L'observateur rebrousse alors chemin jusqu'au réservoir (droite $\frac{-a}{gS}$ point 3R) puis revient à nouveau vers la pompe (droite $\frac{+a}{gS}$) où il arrive après un nouveau temps Δt , trouvant une nouvelle caractéristique K_4 donc un point 4P, etc. [04]

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

En poursuivant l'épure, nous obtenons une suite de points 2P, 4P, 6P etc. Qu'il suffit de joindre par une ligne continue qui coupera l'axe OB en un point D.

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

Il ne restera plus qu'à examiner si, avec le profil en long de la conduite de refoulement et la valeur d'OD (la pression positive restante étant $H_0 - OD$) au départ de la pompe, certains points du profil ne sont pas le siège de dépressions trop importantes. On supposera une répartition linéaire du coup de bélier le long de la conduite [01].

III.1.2.c. Exemple de calcul d'un volant d'inertie :

Soit à calculer un volant d'inertie dont le point de fonctionnement est donné par Q_0

= 0,100 m³/s pour une hauteur géométrique $H_0 = 50$ m. On négligera les pertes de charge dans la conduite. Celle-ci a une longueur de 154 m, elle est en fonte. Son diamètre est de 0,400 m et son épaisseur 12 mm [5].

La courbe caractéristique K_0 de la pompe, pour une vitesse de rotation de 1 450 tr/mn, est donnée sur la Figure III.4, ainsi que la courbe des rendements.

Solution :

Fixons-nous le type de volant dont la section est représentée par la Figure III.5 et qui cadre avec la place disponible Sa masse m est de (si la masse volumique de l'acier est prise égale à 7 800 kg/m³) :

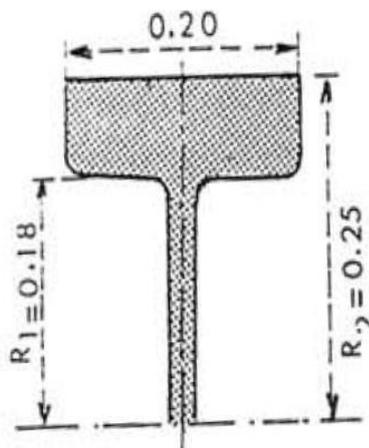


Figure III.5 : section adoptée

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

$$m = 7800 \times \frac{\pi}{4} (0,50^2 - 0,36^2) \times 0,20 = 147\text{kg}$$

Son moment d'inertie I est de :

$$I = \frac{R^2 + R^2}{147 \times \frac{1}{2}} = \frac{0,18^2 + 0,25^2}{2} = 6,9 \text{ Kg. m}^2$$

Célérité des ondes :

Valeur de Δt :

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + \frac{0,4}{0,012}}}$$

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

= 1100 m/s

$$\Delta t = \frac{2L}{a} = \frac{2 \times 154}{1100} = 0,28s$$

Valeur de $\Delta\omega$ en rd/s, d'après (III-8) :

$$\Delta\omega = C \times \frac{0,28}{0,041C} \text{ avec } C \text{ en mN } 6,9$$

Ou 0,4 avec C exprimé en mdaN.

Vitesse de l'eau dans la conduite pour $Q_0 = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}$: $V_0 = 0,80 \text{ m/s}$

Valeur maximale du coup de bélier : $\frac{1100 \times 0,80}{9,8} = 90 \text{ m d'eau}$.

On voit la nécessité de prévoir un anti-bélier puisque la dépression ($50 - 90 = 40 \text{ d'eau}$) serait inadmissible [5].

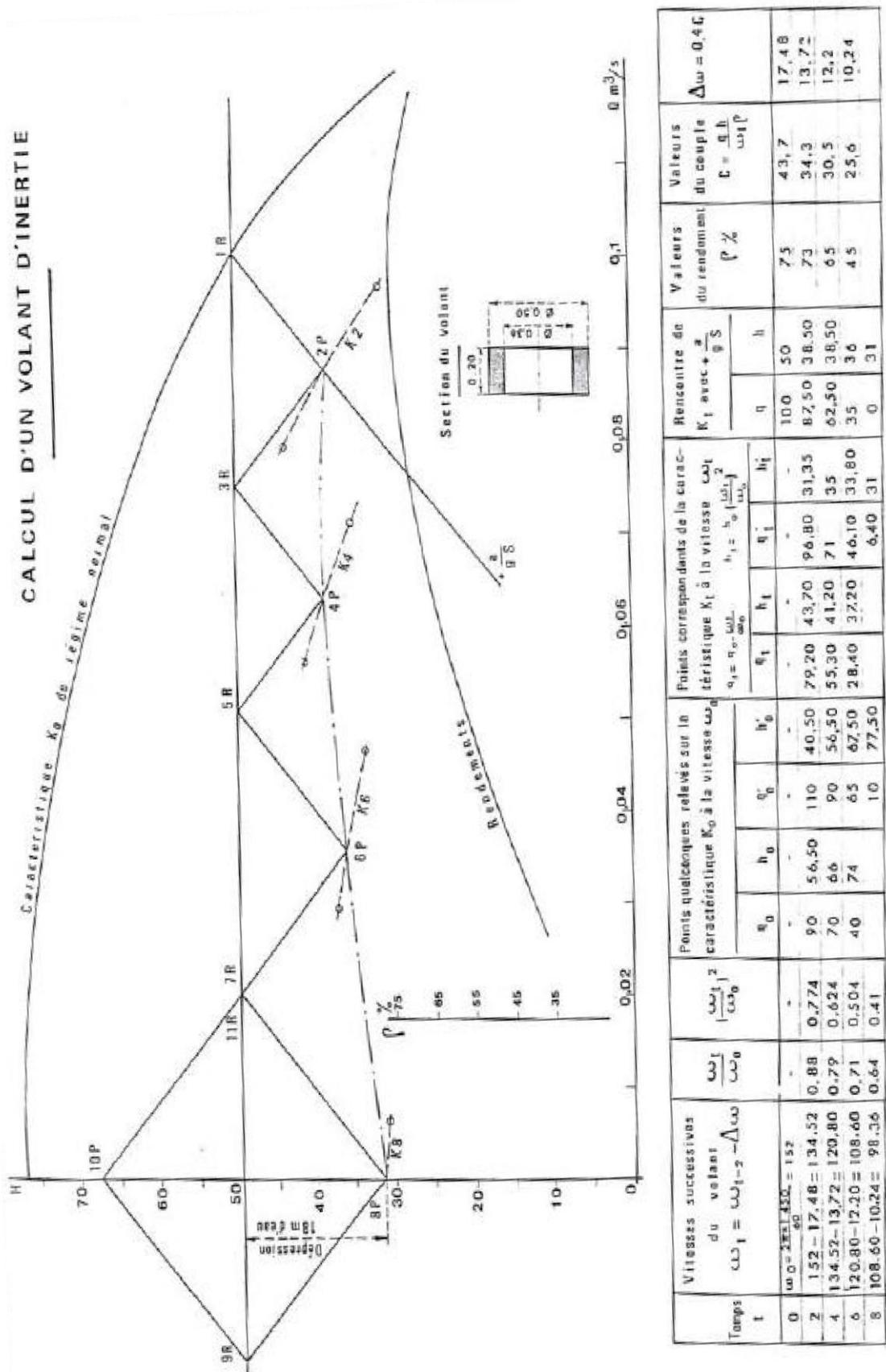


Figure III.6 : calcul d'un volant d'inertie

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

Traçons l'épure selon les indications données plus haut en prenant pour Δt la valeur 0,28 seconde et en calculant, selon les indications du tableau, les valeurs de $\Delta\omega$ à tous les temps (on prend pour unité de temps $2L/a$)

Toute ligne horizontale de ce tableau a pour but de calculer $\Delta\omega$ et l'on recommence une nouvelle ligne avec la nouvelle valeur $(\omega - \Delta\omega)$.

Pour trouver une caractéristique K_t quelconque de la pompe à une vitesse ω_t , on prend deux points quelconques de $K_0(g_h, g_0 h_0)$ de façon que les points correspondants $(q_1 h_1, q_1' h_1')$, obtenus par application des lois de similitude des pompes, tombent de part et d'autre de la droite $(+a/g.s)$.

En joignant à l'aide du pistolet les points $q_t h_t$ et $q_t' h_t'$ on obtient sur $a/g.s$ le point cherché q_h .

Il suffit alors de lire la valeur du rendement (on admet que la courbe du rendement ne varie pas avec la vitesse de rotation) et de calculer le couple C , puis $\Delta\omega$.

C'est ainsi que, dans l'exemple traité, la dépression est d'environ 18 m d'eau, c'est-à-dire que la pression minimale reste positive et égale à $50 - 18 = 32$ m d'eau[5].

III-4-4. Limite pratique d'utilisation des volants d'inertie :

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

C'est ce que montre effectivement l'épure. Si le point de recoupement de l'axe des ordonnées donne une valeur acceptable pour la dépression, c'est que les droites successives $+a/g.s$ ont pu se réfléchir sur des courbes K suffisamment proches les unes des autres. Or, pour satisfaire cette condition, il faut que $\Delta\omega$ ne prenne pas de trop grandes valeurs. Mais $\Delta\omega$ varie comme Δt (expression (III-11)). En conséquence, si la longueur de la conduite augmente $\Delta t/L$ augmente aussi, puisque $\Delta t = 2L/a$.

Chapitre III : Protection des canalisations contre ces variations de pression

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

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

De toute manière, le volant n'intervient que pour limiter la dépression. Pour protéger également l'installation contre les surpressions, il peut être nécessaire de la compléter par la mise en place d'une décharge, en aval du clapet, bien entendu, qui évacue l'eau au cours de la phase de surpression et se referme ensuite, ou d'un clapet à battant percé.[5].

III-1-2- 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 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 $4L/a$

caractéristique du coup de bélier d'onde, s'instaure un mouvement oscillatoire de période plus grande, l'oscillation en masse.

La cheminée d'équilibre est un ouvrage relativement peu utilisé pour la protection de canalisations de refoulement du fait des pressions rencontrées qui rendent ces ouvrages importants, coûteux et difficiles à insérer dans le site.

Dans le domaine de l'hydraulique urbaine, ce dispositif trouve essentiellement des applications :

- Pour la protection des canalisations de refoulement d'eaux usées (charges généralement faibles, intérêt de la simplicité du dispositif) ;
- Pour la protection de points hauts difficiles à protéger et disposés le long de canalisations.

Ce dispositif est par contre beaucoup utilisé en hydroélectricité pour la protection des galeries et pour assurer la stabilité de fonctionnement des groupes.

Comme déjà signalé, la cheminée d'équilibre peut être étudiée généralement avec une bonne approximation avec les équations du mouvement en masse.

Les cheminées, comme les réservoirs d'air, peuvent être équipées d'un dispositif d'étranglement à la base ; de plus, elles peuvent être à section variable, comporter des chambres d'expansion et des seuils de déversement [06] [07].



Fig. III-7 : Cheminée d'équilibre de St-Alban, Québec.

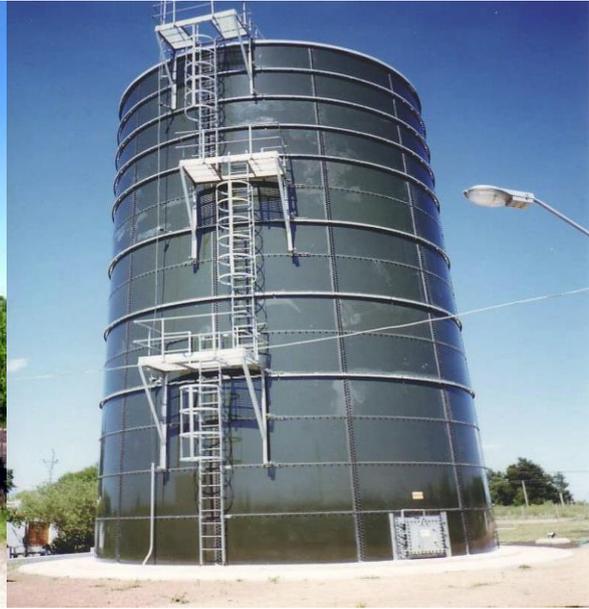


Fig.III-8 : Cheminée d'équilibre à Montevideo, Uruguay.

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 [08].

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 [09] .

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 maintenant 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 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 [09].

C. Types de cheminées :

Du point de vue construction, on a plusieurs types de cheminées [07] [08] [09] :

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.

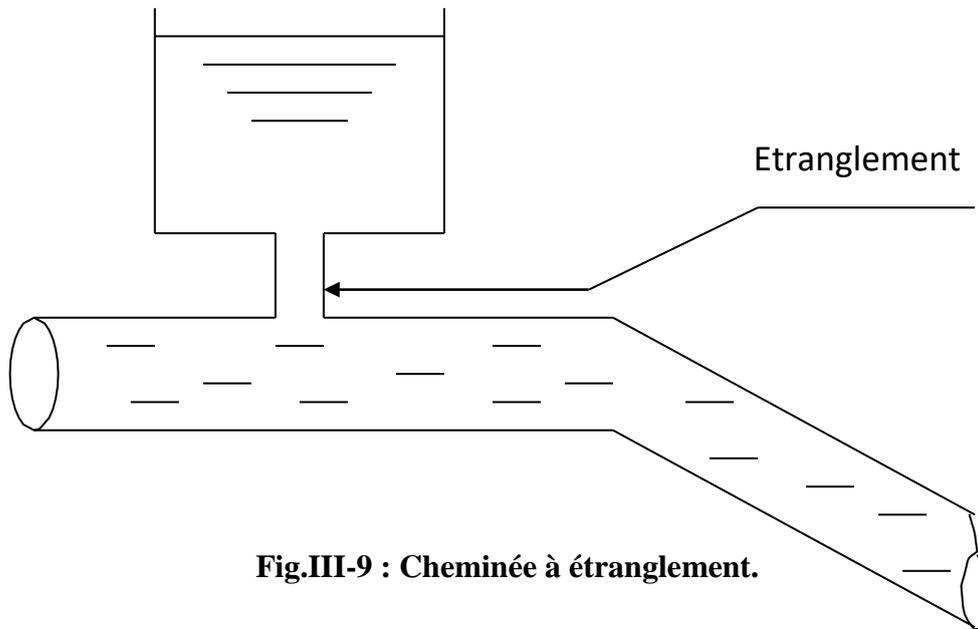


Fig.III-9 : Cheminée à étranglement.

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.

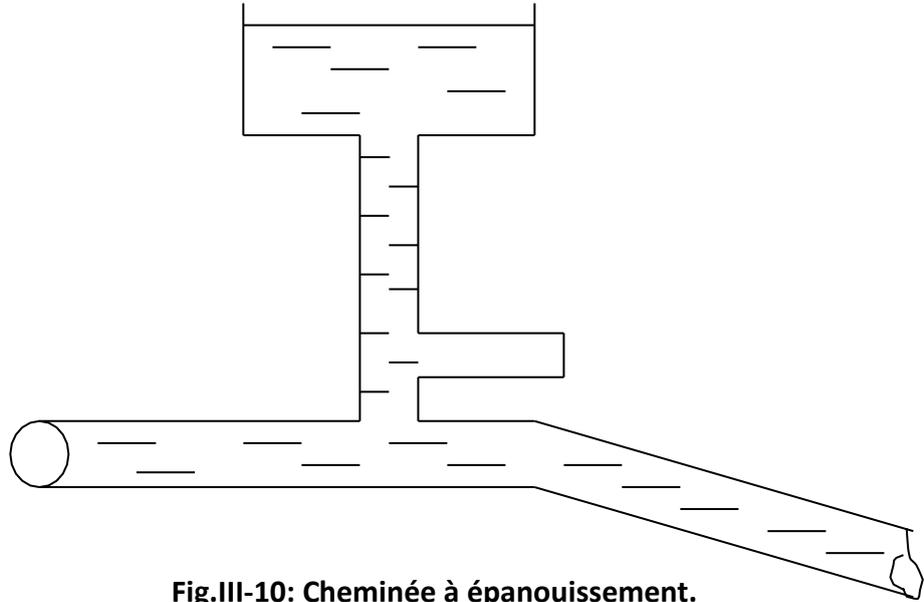


Fig.III-10: Cheminée à épanouissement.

Cheminée différentielle :

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

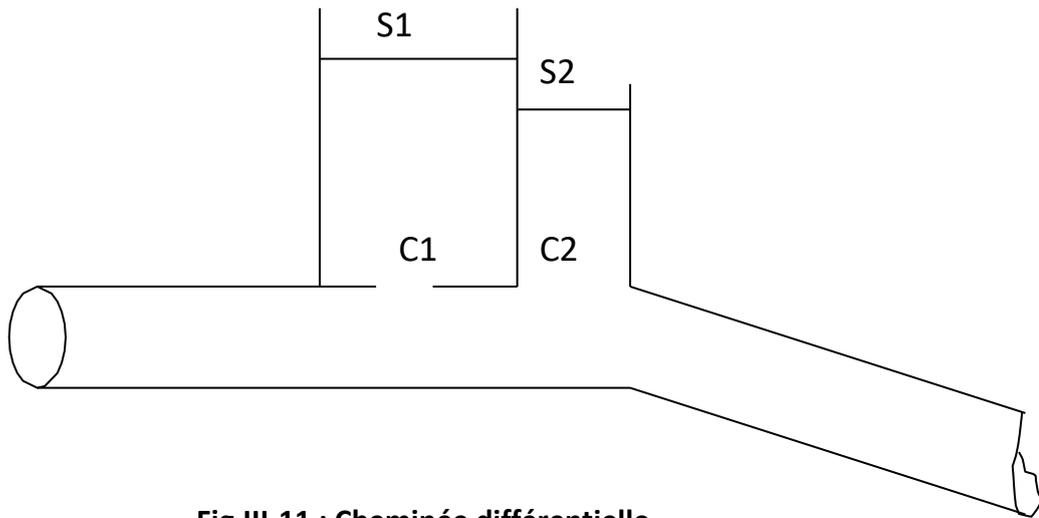


Fig.III-11 : Cheminée différentielle.

Fig.III.12 : coupe type de cheminée

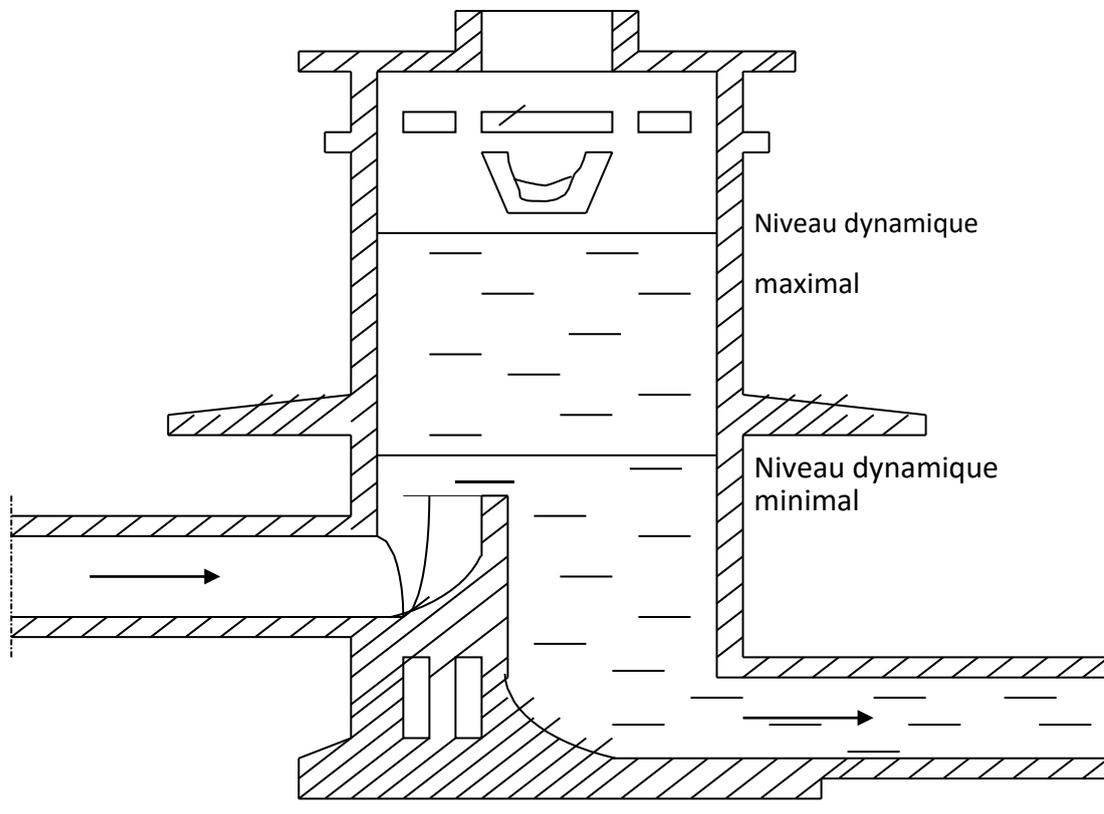


Fig.III.12 : coupe type de cheminée

III.2-les dispositifs de protection contre la surpression :

III.2.1-Soupape de décharge :

Description générale :

La soupape de décharge est définie comme étant un appareil anti-bélier qui écrête les surpressions en dérivant un certain débit à l'extérieur de la conduite dès que la pression dépasse une certaine valeur de réglage, estimée généralement à $1,04 \div 1,1$ de la pression maximale admissible.

Ces appareils font intervenir un organe mécanique, un ressort à boudin généralement,

qui par sa compression obture en exploitation normale, un orifice placé sur la conduite au point à protéger, c'est à dire où la compression à craindre est maximale. L'ouverture doit pouvoir s'effectuer très rapidement pour que l'opération soit efficace. Il importe donc de réduire à l'extrême l'inertie de ces appareils et c'est sur ce point que les efforts de constructeurs ont particulièrement porté [10].

Généralement, chez les constructeurs, deux systèmes sont utilisés pour assurer la fermeture de la soupape jusqu'à la pression de consigne [09] :

a) Un ressort maintient un clapet contre l'orifice du corps de la soupape, celui-ci se présente dans le cas des soupapes (Neyrtec, Bayard, Ramus) figure III-13.

La seule différence de conception entre ces trois constructeurs, réside dans le dispositif de centrage du clapet : disque centré hydrauliquement pour Neyrtec et Bayard avec en plus une membrane de guidage pour Bayard et une bague de guidage pour Ramus.

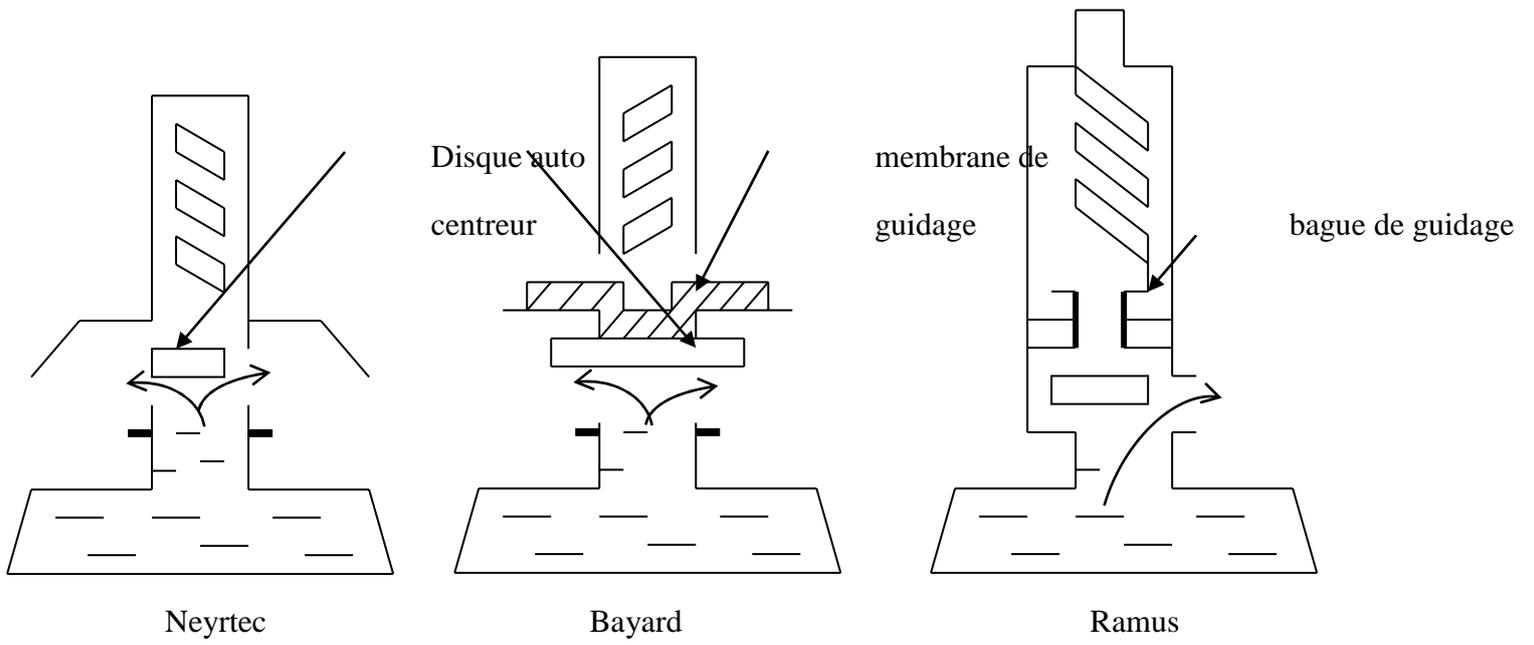


fig.III-13 : schémas des fonctionnements des soupapes a ressort



fig.III-14 : soupapes des décharges Ramus

b) C'est la propre pression de l'eau agissant sur les deux faces d'un piston qui maintient la soupape fermée tant qu'elle ne dépasse pas une certaine valeur. Cette valeur est détectée par un pilote qui s'ouvre à pression trop forte, mettant à la pression atmosphérique la face supérieure du piston. Celui-ci se soulève alors et la conduite se vide en se décompressant. On distingue parmi ces soupapes pilotées les marques LEZIER et CLAYTON figure III-15 [09].

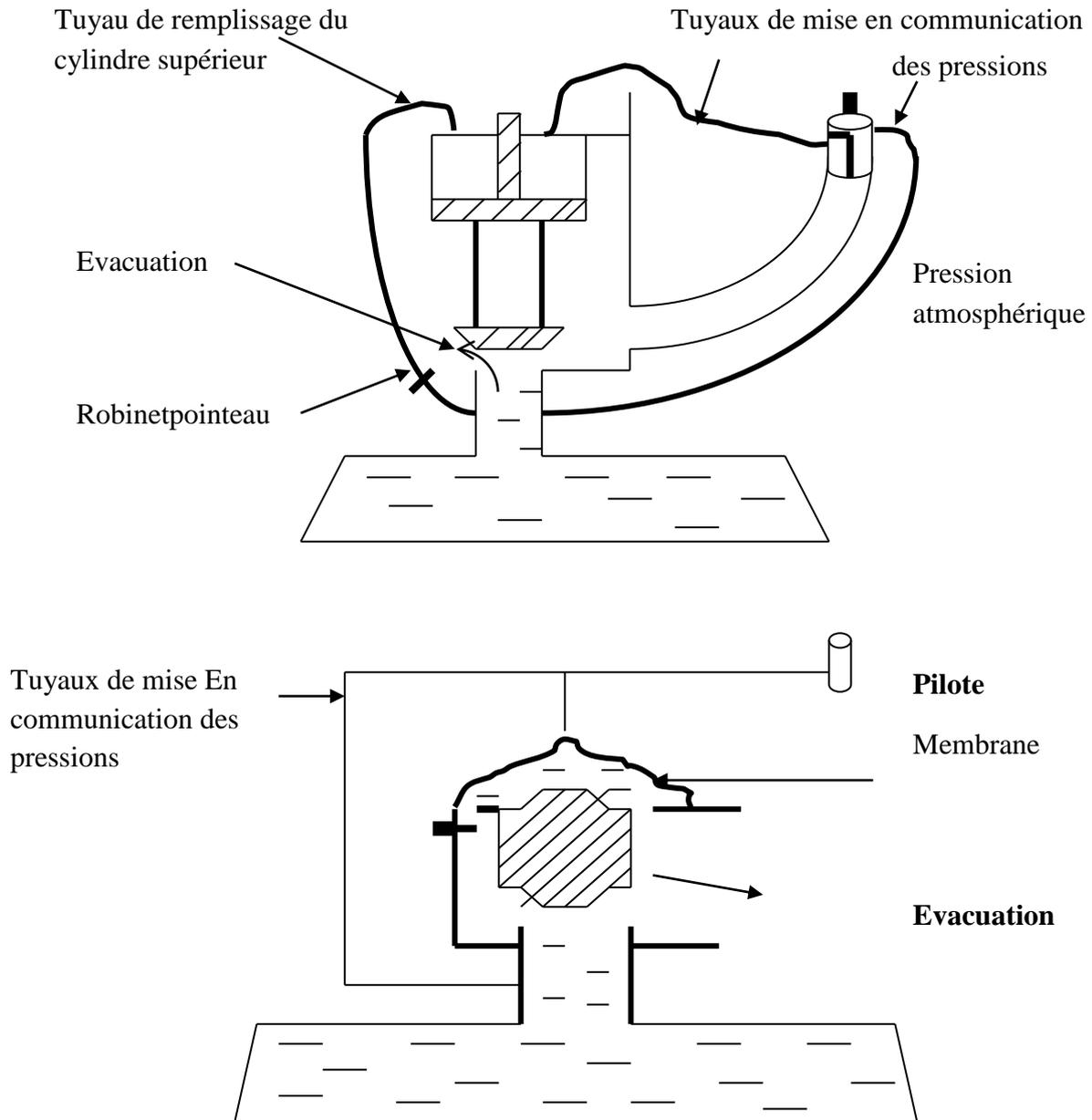


Fig.III-15 : Schémas de principe des soupapes pilotées.

Role de la soupape de décharge :

Les circuits hydrauliques sont conçus pour fonctionner dans une certaine marge de pression. Le dépassement de celle-ci peut endommager les composants du système et devenir dangereux. La soupape de décharge maintient la pression dans la limite conçue en ouvrant et en permettant à l'excédent d'huile de couler vers un autre circuit ou de nouveau vers le réservoir[11].

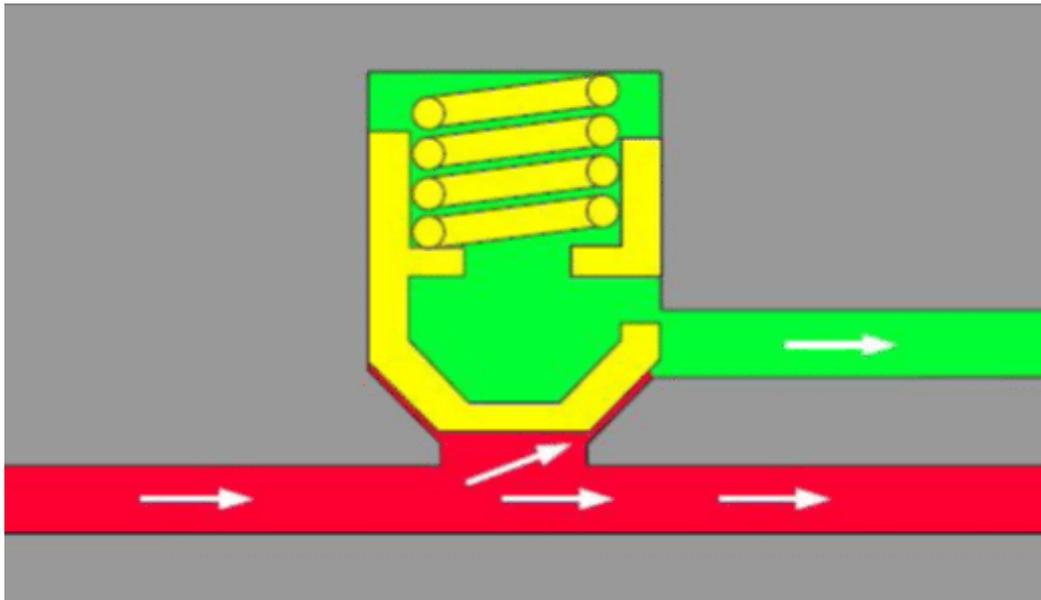


Fig.III-16- Soupape de décharge.

La dernière figure.III-16 montre une soupape de sécurité (clapet de décharge) simple dans la position de “pression d’ouverture”.

La soupape de sécurité simple (également appelée **la soupape de sécurité à action directe**) est maintenue fermée par la force du ressort.

La tension de ressort est réglée à la « pression de décharge ».

Cependant, le réglage de pression de décharge n'est pas la pression à laquelle la soupape commence à s'ouvrir.

Lorsqu'une condition se crée et cause une résistance à l'entrée normale de liquide dans le circuit, le débit excessif de liquide provoque une augmentation de pression. La pression croissante de liquide est ressentie par la soupape de sécurité. Lorsque la force de la pression croissante de liquide dépasse la force du ressort de la soupape de décharge, la valve se déplace

contre le ressort et commence à s'ouvrir. La pression exigée pour commencer l'ouverture de la valve s'appelle la "pression d'ouverture." La valve s'ouvre juste convenablement pour permettre à l'excédent de liquide de s'écouler à travers la valve[11].

III.2.2-Réservoir D'air :

Le réservoir d'air est une réserve d'eau qui se vide pour combler les dépressions et grossit pour absorber les surpressions.

Le principe de fonctionnement est le même que pour les cheminées d'équilibre. La différence provient de ce que cette réserve n'a pas une surface libre à la pression atmosphérique mais se trouve à la pression absolue du fluide à l'endroit où est piqué le ballon. C'est le volume d'air enfermé dans le ballon qui régularise les variations de pression du liquide en se comprimant ou en se détendant au gré des besoins [09].

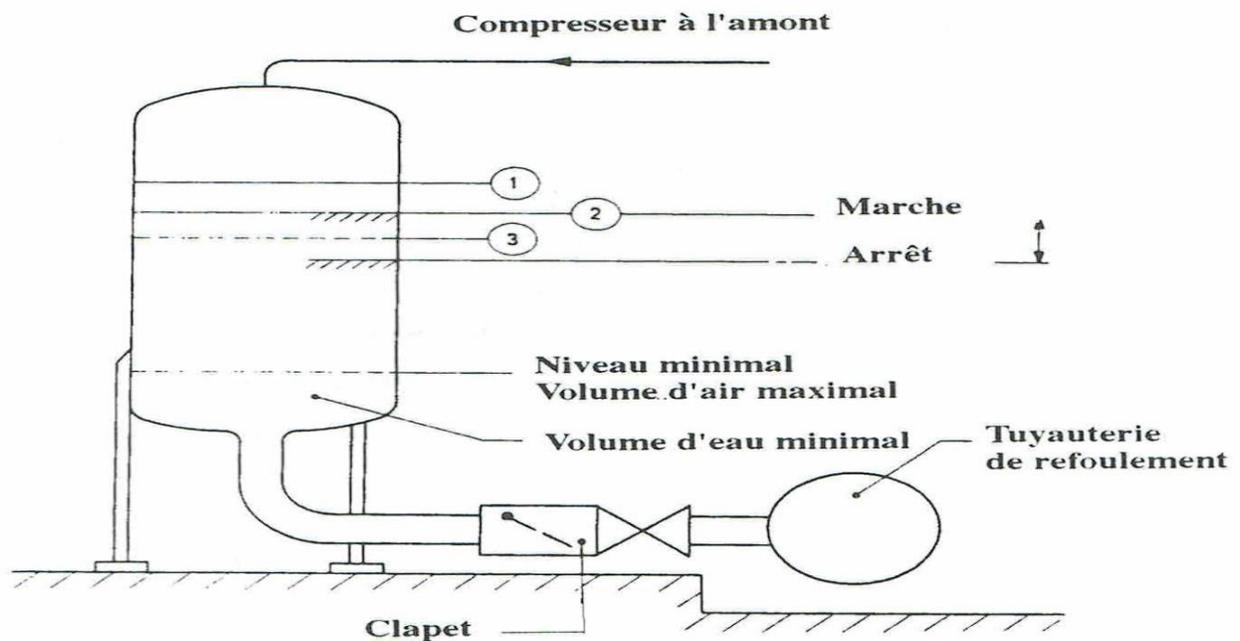


Fig.III-17 : schémas d'un réservoir d'air



Fig.III-18 : Réservoir D'air

Description technologique :

Du point de vue technologique, on peut distinguer deux grands types de ballons [09]:

a) Les ballons à membrane ou à vessie

L'air et l'eau n'y sont pas en contact, ce qui évite la dissolution de l'air dans l'eau. On n'a donc pas le problème de rétablir de façon périodique le volume d'air nécessaire au bon fonctionnement du ballon. Ces ballons doivent être pré-gonflés à la pression de pré-gonflage désirée.

De point de vue sécurité, le liquide n'est pas en contact avec la partie métallique du vase. Le risque de corrosion est donc supprimé. Le tube de niveau permet de contrôler à tout moment le volume de liquide contenu dans la vessie.

b) Les ballons sans membrane

Leurs inconvénients proviennent du contact air-eau : l'air se dissolvant dans l'eau, il est nécessaire d'avoir en permanence un compresseur qui rétablit périodiquement et automatiquement le volume d'air dans le ballon. Cette complication pose alors le problème des fuites, soit fuite d'air lorsque l'alimentation d'air arrive par le dessus du ballon, soit fuite d'eau dans le compresseur lorsque cette alimentation se fait par le bas du ballon.

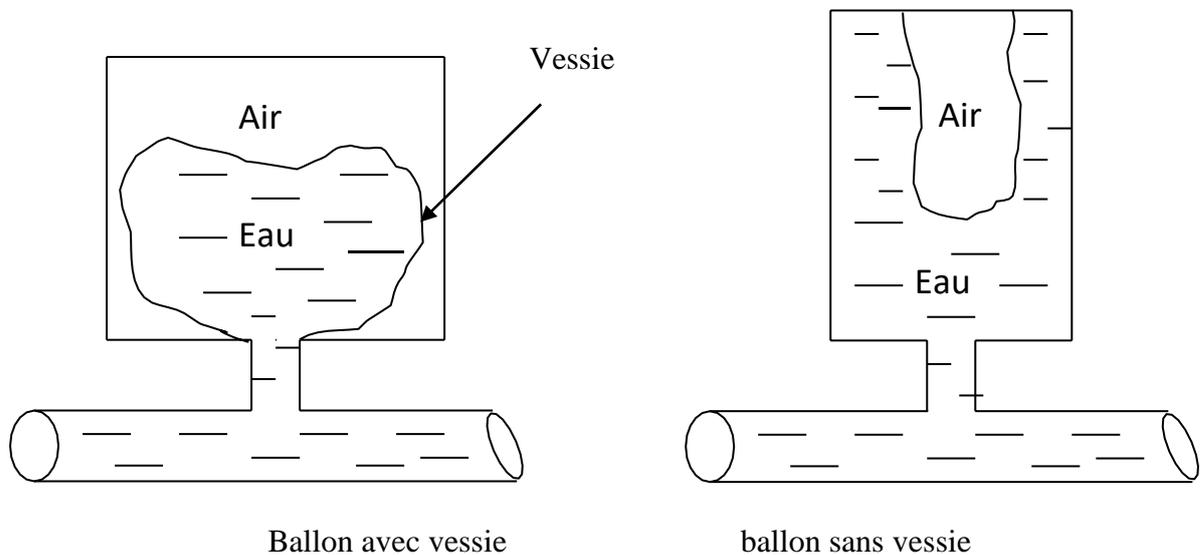


Fig.III-19 : schémas de principe des ballons Anti-Bélier

Dispositifs à la base du ballon :

Les ballons comportent souvent à leur base un dispositif permettant un échange d'eau non symétrique : on désire en effet avoir pour la vidange une perte de charge aussi faible que possible et, par contre, on désire que cette perte de charge ne soit pas négligeable lors du remplissage. Plusieurs possibilités existent pour créer cette perte de charge dissymétrique : on peut disposer un clapet percé qui se ferme au remplissage, ou bien une tuyère, ou bien un clapet plein avec un petit tuyau de dérivation qui assure seul la communication avec le ballon en phase de remplissage .

Le clapet percé est un dispositif très utilisé car il est facile d'adapter le diamètre du trou à la perte de charge qu'on veut assurer au remplissage. Par contre, il présente les inconvénients des pièces mobiles (risques de casse ou de blocage, coups de bélier parasites). L'inconvénient de la tuyère provient de sa difficulté de fabrication et de dimensionnement. La tuyère, fonctionnant au retour de l'eau comme un ajutage rentrant de BORDA, permet, théoriquement, d'avoir une perte de charge quatre fois plus grande au retour qu'à l'aller. Le troisième système présente les inconvénients du premier, avec le risque d'obstruction en plus, mais présente par contre le très gros avantage de pouvoir modifier la perte de charge au remplissage en installant une vanne de réglage sur la dérivation. C'est une méthode employée

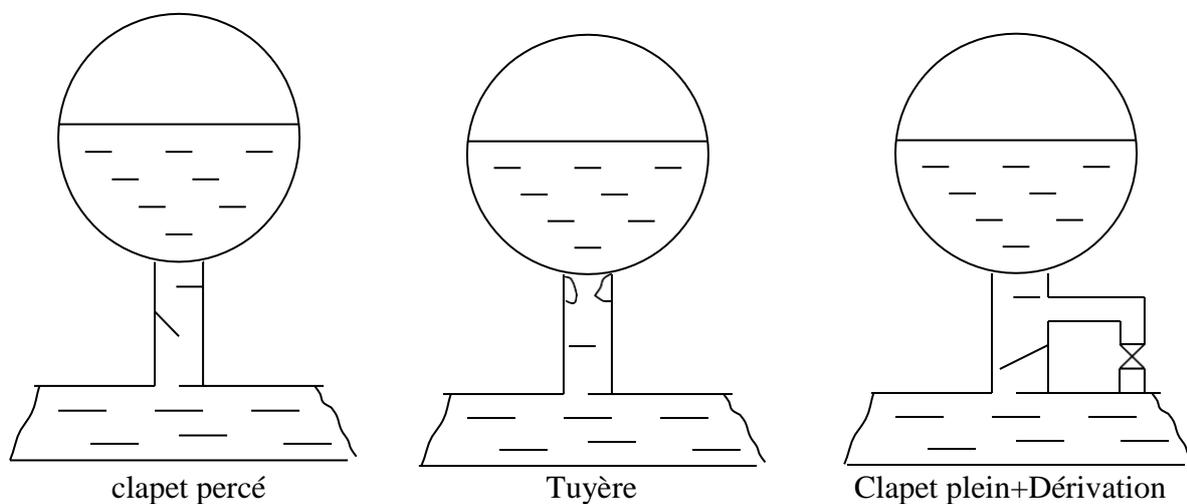


Fig.III-20 : Organes dissymétriques à la base des balcons Anti-Bélier

très souvent dans les petites installations pour lesquelles la perte de charge au remplissage n'est pas étudiée mais elle est réglée par essais réels lors des premières mises en route [09].

Tableau III-1 : Avantages et inconvénients des appareils anti-bélier

Appareils	Avantages	Inconvénients	Observations
Volant d'inertie	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositif économique - Intéressant sur les installations qui ne s'arrêtent pas trop souvent. 	<p>Consommation d'énergie supplémentaire. Protection limitée par la puissance du moteur et les caractéristiques de démarrage. Inapproprié dans les stations à forte fréquence de démarrage.</p>	Utilisé comme protection contre les dépressions
Cheminée d'équilibre	<ul style="list-style-type: none"> - Bon fonctionnement (ne comporte pas d'organes mécaniques susceptibles de fonctionnement défectueux). - Importante durée de vie ; - Indépendante d'une installation électrique ; - Pas de pertes d'eau 	<p>Possibilités d'installation limitées. Ouvrage coûteux (hauteur généralement très développée).</p>	Utilisé comme protection et pour la dépression et pour la surpression
Soupape de décharge	<ul style="list-style-type: none"> - Coût limité - Entretien et réglage facile - Ne consomme pas d'énergie - Indépendant d'une installation électrique 	<p>Nécessite un entretien et un contrôle attentifs (ressort). Pertes considérables d'eau pendant le fonctionnement</p>	Utilisé comme protection contre la surpression
Réservoir d'air	<ul style="list-style-type: none"> - Bon fonctionnement ; - Bonne sécurité ; - Pas de pertes d'eau 	<p>Entretien et réglage compliqués qui exige du personnel qualifié . Coût élevé .</p>	Utilisé comme protection contre la dépression et la surpression

III-4- Conclusion :

Dans ce 3^{ème} et dernier chapitre on s'est focalisé sur les différents appareils anti béliers utilisés pour la protection des canalisations dans les deux cas de variation de pression ; cas de la surpression et celui de la dépression, décrivant leur système de fonctionnement et méthode d'utilisation ainsi que leur avantages et leur inconvénients.

Conclusion générale

Dans ce travail on s'est intéressé sur les régimes non permanents passant par une notion générale de ce type de régime ainsi qu'une description physique du phénomène transitoire.

Dans le cas d'une station de pompage les régimes transitoires les plus dangereux sont consécutifs à une disjonction électrique (ou panne de courant). Il est rappelé que, dans le cas d'une disjonction électrique, la présence d'une variation de vitesse électronique ou de démarreur-ralentisseur électronique est sans effet sur les régimes transitoires et ne dispense pas, en conséquence, de l'étude et de l'installation de la protection anti-bélier.

Après avoir passé par les causes principaux provoquant le phénomène non permanent on a remarqué que la surpression est bien plus importante dans le cas des fermetures des vannes que celui de l'ouverture et même chose pour le cas des pompes ; à l'arrêt la dépression est bcp plus importante que dans le cas du démarrage.

Dans la dernière partie du travail on s'est focalisé sur les différents appareils anti béliers utilisées pour la protection des canalisations dans les deux cas de variation de pression ; cas de la surpression et celui de la dépression, décrivant leur système de fonctionnement et méthode d'utilisation prenant en considération leur avantages et leur inconvénients.

Le phénomène transitoire du coup de bélier reste toujours un sujet d'actualité vu que nombreuse installation hydrauliques subissent ces effets que ce soit dans les stations de pompage, les centrales hydroélectriques ou encore dans les réseau d'alimentation en eau potable, l'étude de ce phénomène nous aide à bien comprendre comment diminuer les dégâts et comment bien protéger les différentes installations hydrauliques qui ne peuvent fonctionner sans quelle subissent ces effets de surpression ou encore de dépression.

Bibliographie :

- [1] : hydraulique générale, **José VAZQUEZ** (Laboratoire Systèmes Hydrauliques Urbains) ENGEES.
- [2] : polycopié hydraulique générale première partie, **Dr ALOUI-LABIOD. Zehour**
- [3] : mémoire de master, **Khaled Hamza**, 2018
- [4] : **A. DUPONT**, (1977) Hydraulique urbaine, Tome II : Ouvrage de transport, élévation et distribution des eaux, 3^e Editions Eyrolles, Paris, France.
- [5] : **BEKBOUKI Samih**, mémoire de master < Etude du phénomène du coup de bélier dans les conduites forcées– cas des centrales hydroélectriques de moyenne chute >, 2016
- [6] : **A.G.H.T.M**, (1991) Les stations de pompes d'eau, travaux de la commission Distribution de l'eau de l'Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux, Lavoisier, Paris, France.
- [7] : **J.L.BOILLAT, P de SOUZA**, (2004), HYDRAULIC SYSTEM- Modélisation des Systèmes hydrauliques à écoulements transitoires en charge, communication N° 16 Du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, suisse.
- [08] : **R.Ginocchio, P-L.Viollet**, (2012) L'énergie hydraulique, collection EDF R&D. 2^{ème} édition Lavoisier
- [09] : **M.MEUNIER**, (1980) Les coup de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression, ENGREF, Paris, France.

Bibliographie

[10] : **OURAGH. Y**, (1994) Ecoulement forcé en hydraulique, Tome 2, Edition O.P.U., Alger.

[11] : <https://www.hydrauliquesimple.com/soupape-de-decharge-et-fonctionnement/>

Bibliographie
