





# Hydraulique Appliquée

*opale 3,6*

Khalifa 2020

## Légende

-  Entrée du glossaire
-  Abréviation
-  Référence Bibliographique
-  Référence générale

# Table des matières



<b>Objectifs</b>	4
<b>Introduction</b>	5
<b>I - CHAPITRE 01 : PHÉNOMÈNE DU COUP DE BÉLIER -</b>	<b>6</b>
1. Causes et conséquences du phénomène .....	6
2. Analyse physique du phénomène du coup de bélier .....	6
2.1. Hypothèses .....	7
3. Modélisation mathématique .....	8
3.1. Mise en équations du phénomène .....	9
<b>II - CHAPITRE 02 : SYSTÈMES DE PROTECTION CONTRE LE COUP DE BÉLIER</b>	<b>11</b>
1. Les soupapes de décharge .....	11
2. Les ventouses (Les reniflards) .....	12
3. Les réservoirs d'air .....	12
<b>III - Conclusion</b>	<b>14</b>
<b>Glossaire</b>	<b>15</b>
<b>Abréviations</b>	<b>16</b>
<b>Références</b>	<b>17</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>18</b>

# Objectifs

- *Protection de système AEP*
- *Détermination les moyens de protection contre le coup de Relier*
- *Dimensionnement du réservoir d'air*

# Introduction



## *Écoulement à surface libre*

Les écoulements à surface libre sont caractérisés par l'existence d'une surface de séparation entre l'air et l'eau, appelée "surface libre". Cette dernière est soumise à la pression atmosphérique.

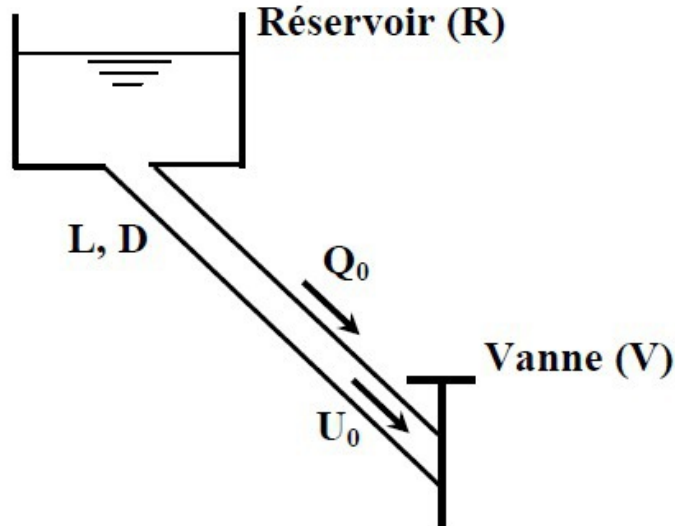
Canal C'est un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique. On distingue cependant deux catégories de canaux :

1. *Les canaux naturels* : ce sont des cours d'eaux existant naturellement sur terre, tels que, les rivières et les fleuves, et dont les propriétés géométriques et hydrauliques sont généralement assez irrégulières.
2. *Les canaux artificiels* : ce sont des cours d'eaux réalisés par l'homme, tels que, les canaux de navigation et d'évacuation, et dont les propriétés géométriques et hydrauliques sont généralement assez régulières.





placée à l'aval d'une conduite d'adduction idéale de longueur  $L$  et de diamètre  $D$  (Figure (3.1)).



**Figure (3.1) : Conduite gravitaire avec vanne à l'aval**

## 2.1. Hypothèses

- Manœuvre instantanée (faite à l'instant  $t = 0$ ).
- Pertes de charge supposées nulles (conduite idéale).
- Pas de dispositifs de protection.

Le temps que met l'onde pour parcourir la conduite de longueur  $L$  est " $L/a$ ", avec  $a$  : célérité des ondes du coup de bélier (m/s).

	Régime permanent (avant la manœuvre)	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 liquide transporté : compte de l'élasticité de la conduite et de compressibilité du liquide transporté		
Section de la conduite	$S_0$	$S$
Masse volumique du liquide	$\rho_0$	$\rho$

### 2.1.1

La fermeture brusque de la vanne engendre l'annulation de la vitesse des particules liquides du fait que ces dernières viennent buter contre cette vanne. Par conséquent, toute l'énergie cinétique du liquide se transforme en travail de déformation de la conduite (dilatation des parois) et du liquide (compressibilité du liquide). Les différentes phases de cette manœuvre brutale de la vanne se déroulent comme suit

(Figure (3.2)):

- A l'instant 0 (juste avant la manœuvre) : On a le régime permanent dans la conduite :  $Q_0, U_0, S_0, \rho_0$ .
- A l'instant  $(0 + \varepsilon)$  (immédiatement après la manœuvre) : La vanne fermée, ne peut décharger l'eau hors de la conduite, alors  $Q$  et  $U = 0$ . Donc départ vers le réservoir d'une surpression (transformation d'énergie cinétique en potentielle) donnant dans la zone ainsi concernée  $S > S_0$  (dilatation de la conduite) et  $\rho > \rho_0$  (compressibilité du liquide).
- A l'instant  $(L/a)$  : Toute la conduite est surpressée,  $Q$  et  $U = 0, S > S_0, \rho > \rho_0$  et  $P > P_0$ .
- A l'instant  $(L/a + \varepsilon)$  :  $P > P_0$ , ce qui implique la vidange de la conduite dans le réservoir. Donc départ du réservoir vers la vanne à la célérité  $a$  d'une dépression provoquant le retour à l'état initial ( $S_0$  et  $\rho_0$ ) dans la zone concernée, mais avec un écoulement inversé :  $-Q_0$  et  $-U_0$ .
- A l'instant  $(2L/a)$  : Toute la conduite est revenue à l'état initial ( $S_0$  et  $\rho_0$ ) mais avec un écoulement inversé.
- A l'instant  $(2L/a + \varepsilon)$  : La vanne fermée, ne peut pas fournir d'eau à la conduite, ce qui implique  $Q$  et  $U = 0$ . Donc, départ vers le réservoir, à la célérité  $a$ , d'une dépression donnant dans la zone ainsi concernée  $S < S_0$  et  $\rho < \rho_0$ .
- A l'instant  $(3L/a)$  : Toute la conduite est dépressée :  $Q$  et  $U = 0, S < S_0, \rho < \rho_0$  et  $P < P_0$ .
- A l'instant  $(3L/a + \varepsilon)$  :  $P < P_0$ , ceci implique la vidange du réservoir dans la conduite. Donc, départ du réservoir vers la vanne, à la célérité  $a$ , d'une surpression provoquant le retour total à l'état initial ( $Q_0, U_0, S_0$  et  $\rho_0$ ) dans la zone concernée.
- A l'instant  $(4L/a)$  : Toute la conduite est revenue à l'état initial (régime permanent).
- A l'instant  $(4L/a + \varepsilon)$  : Le cycle recommence comme à l'instant  $(0 + \varepsilon)$ .  
- A l'instant 0 (juste avant la manœuvre) : On a le régime permanent dans la conduite :  $Q_0, U_0, S_0, \rho_0$ .

### 3. Modélisation mathématique

Les équations du mouvement régissant les écoulements transitoires (coup de bélier) sont celles données par Lorenzo Allievi. Ces dernières sont déduites des équations générales du mouvement données par Saint Venant. Elles sont obtenues en appliquant à une tranche de canalisation le théorème des quantités de mouvement et l'équation de continuité moyennant certaines hypothèses simplificatrices.

#### 3.1

##### *Hypothèses simplificatrices*

- La conduite est élastique.
- Le liquide est compressible.



- Les vitesses et les pressions sont supposées uniformes dans une section donnée.
- La conduite est à caractéristiques uniques (le diamètre, la nature et l'épaisseur sont constants).
- Le réservoir est suffisamment grand (niveau d'eau est constant durant le phénomène).

### 3.2. Mise en équations du phénomène

Considérons l'installation donnée par la figure (3.3) ci-après :

En régime permanent (avant la fermeture de la vanne), le débit dans la conduite est  $Q_0$ , la vitesse est  $u_0$  et la pression est  $P_0$ . La pression statique y sera donc :  $P = \rho g z$

Si on ferme brusquement la vanne en D, nous allons observer dans les instants qui vont suivre une vitesse  $u$  (un débit  $Q$ ) et une pression dynamique ( $P = \rho g h$ ) en  $x$  variables avec le temps. Par ailleurs, à un même instant  $t$ , les quantités  $P$  et  $u$  auront évidemment des valeurs différentes le long de la conduite (varieront avec  $x$ ). Ainsi,  $P$  et  $u$  sont des fonctions des deux variables  $x$  et  $t$ . On a donc, deux inconnues à déterminer, à savoir :  $h(x, t)$  [ $P(x, t)$ ] et  $u(x, t)$  [ $Q(x, t)$ ].

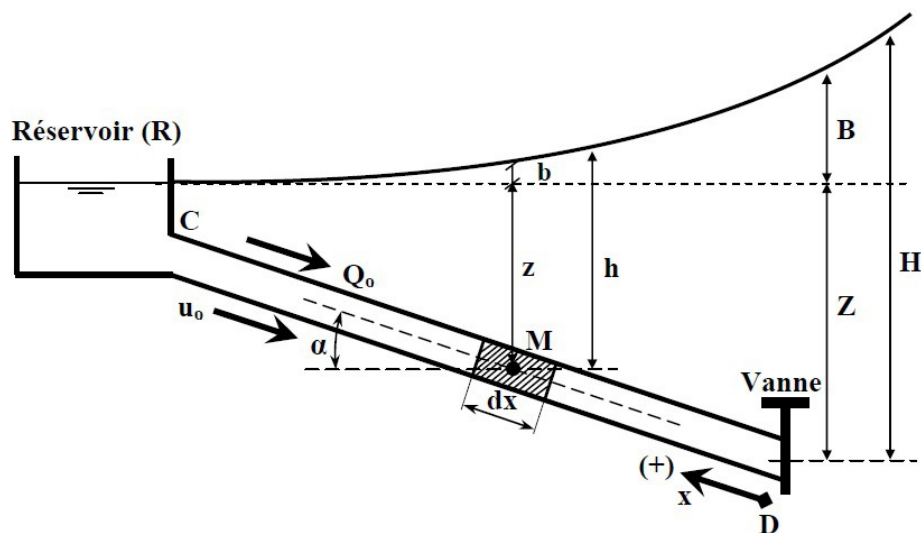


Figure (3.3) : Elément de contrôle sur une conduite gravitaire

*Remarque importante* : L'écoulement se fait du réservoir vers la vanne. Lors de l'établissement des équations du mouvement, l'axe est pris positivement du point D vers le point C, c'est-à-dire qu'on remonte le courant.

i) L'application du théorème de la quantité de mouvement donnera l'équation dynamique suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g(\sin(\alpha) + \frac{\partial h}{\partial x})$$

ii) L'application du principe de conservation de la masse donnera l'équation de continuité suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{g}{a^2} + \frac{\partial h}{\partial t}$$

### 3.2.1. Interprétation des équations d'Allievi

Imaginons un observateur mobile, se déplaçant à la vitesse constante  $a$  (mouvement uniforme) selon la loi :

$$x = at + cte$$

D'après le système d'axes choisi auparavant,  $x$  étant positif dans le sens opposé à l'écoulement, l'observateur remonte donc le courant. De l'équation (12) on a :  $(t - x/a) = Cste$ . Par conséquent, pour cet observateur,  $F(t - x/a)$  représente toujours la même valeur, où qu'il se trouve (en chaque point).  $F$  caractérise ainsi une onde se propageant dans la conduite avec une vitesse  $a$  en sens inverse de  $u$ .

De la même manière que pour un observateur se déplaçant à une vitesse  $(-a)$ , c'est-à-dire dans le sens du courant,  $f(t + x/a)$  représenterait une onde se propageant en sens inverse de la première ( $f(t + x/a)$  reste constante en chaque point).

De ce fait, la surpression (ou la dépression)  $b$  en chaque point de la conduite, résulte de la superposition en ce point des deux ondes  $F$  et  $f$  se propageant dans la conduite en sens inverse et avec la même vitesse absolue  $a$ .

#### a) Formule d'Allievi donnant la vitesse "a"

Allievi donne pour la vitesse "a" de l'onde, la valeur suivante :

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

- $D$  : diamètre intérieur de la conduite (m).
- $a$  : vitesse (m/s).
- $e$  : épaisseur du tuyau (m).
- $K$  : coefficient dépendant du matériau constituant la canalisation.

<b>Matériaux</b>	<b>K</b>
<i>Fonte grise</i>	<b>1</b>
<i>Fonte ductile</i>	<b>0.6</b>
<i>Acier</i>	<b>0.5</b>
<i>PVC</i>	<b>33</b>
<i>Amiante ciment</i>	<b>4 ou 4.4</b>
<i>Polyéthylène haute densité</i>	<b>83</b>
<i>Polyéthylène basse densité</i>	<b>500</b>
<i>Béton</i>	<b>5</b>
<i>Plo mb</i>	<b>5</b>

# CHAPITRE 02 : SYSTÈMES DE PROTECTION CONTRE LE COUP DE BÉLIER



Les soupapes de décharge	11
Les ventouses (Les reniflards)	12
Les réservoirs d'air	12

Les appareils anti-bélier dans le système AEP<sup>D.16 AA</sup> 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.

## 1. Les soupapes de décharge

Le rôle d'une soupape (Figures (4.3) et (4.4)) 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.

*galerie soupape*



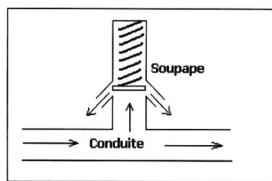


Figure (4.3) : Soupape de décharge

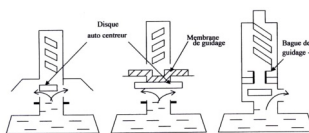


Figure (4.4) : Fonctionnement d'une soupape de décharge

## 2. Les ventouses (Les reniflards)

On distingue des ventouses à trois fonctions (Figure (4.5)), 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 (4.6)), en l'occurrence, l'évacuation des poches d'air seulement. Une ventouse est constituée en principe d'un flotteur sphérique en caoutchouc logé dans un corps en fonte.

### galerie ventouse

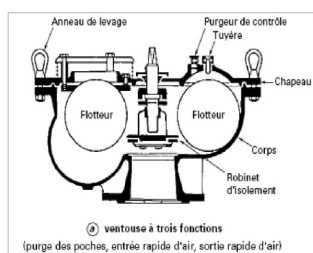


Figure (4.5) : Ventouse à trois fonctions

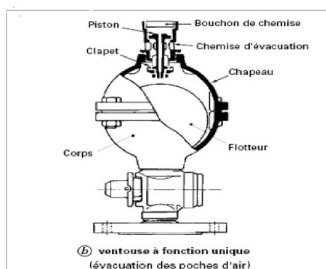
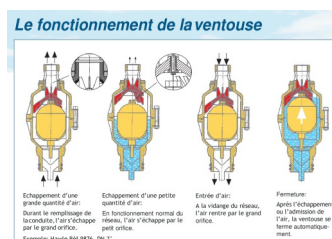


Figure (4.6) : Ventouse à une seule fonction



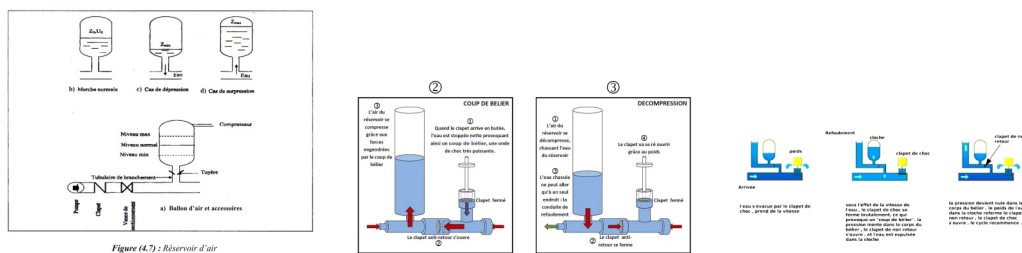
## 3. Les réservoirs d'air

Le réservoir d'air est l'appareil le plus utilisé pour la protection contre le coup de bélier. C'est un récipient contenant de l'air comprimé dans sa partie supérieure et de l'eau dans sa partie inférieure. Ces appareils sont aussi appelés "accumulateur, cloche à air, ballon d'air, réservoir anti-bélier,...etc." (Figure (4.7.a)). 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.

*galerie réservoir d'air*



# Conclusion



un régime in stationnaire apparaît dans le tronçon amont de la conduite. Ce régime est principalement caractérisé par la propagation d'ondes hydrauliques qui véhiculent une énergie élastique non négligeable (ondes de pression), suffisamment parfois pour apporter des dommages aux installations. Ces phénomènes sont assez courants (vous avez sans doute quelques fois remarqué qu'en fermant brutalement un robinet d'eau chez vous vous entendiez des tressautements dans les tuyaux), mais lorsqu'il s'agit de circuits destinés à l'alimentation de centrales hydrauliques (usines hydro-électriques notamment) produisant des centaines et des milliers de kilowatts, avec des débits d'écoulement très importants

ces inconvénients doivent impérativement être évités. Une des techniques consiste à recourir à des dispositifs anti-bélier, parmi lesquels on notera les réservoir d'air : ce-ci consiste à transformer les ondes de pression très énergétiques en oscillations en masse où l'énergie est amortie.

# Glossaire



## **coup de beier**

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



# Abréviations



**AEP** : alimentation en eau potable



# Références

<https://www.techniques-ingenieur.fr>

- [1] Michel Hug (sous la direction de): Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique – Eyrolles, 1975
- [2] R. Ginocchio: Aménagements hydro-électriques – Eyrolles, 1959
- [3] L. Escaude: Hydraulique générale – Privat, 1943
- [4] P. Chapouthier: Cours d'hydraulique de l'École Nationale des Ponts et Chaussées – ENPC, 1956
- [5] Frédéric Élie: Acoustique non linéaire, saturation extraordinaire et propagation paramétrique – site <http://fred.elie.free.fr>, mai 2009
- [6] A. Stucky: Chambres d'équilibre – École Polytechnique de l'Université de Lausanne, 1950
- [7] M. Bouvard: A propos de la condition de Thoma dans les cheminées cylindriques à étranglement optimum – Rev. La Houille Blanche, n° spécial A/1952 – article publié par SHF et disponible sur le site <http://www.shf-lhb.org>

