



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Hydraulique  
Hydraulique Urbaine

Réf. : HU8.2018

---

Présenté et soutenu par :  
**HAMZA Khaled**

Le : samedi 23 juin 2018

## Méthodologie de la recherche sur la protection des canalisations contre le coup de bélier.

---

### Jury :

Dr. Cherhabil sonia	MCA	Université de Biskra	Président
Dr. Masmoudi rachid	MAA	Université de Biskra	Examineur
Dr. Abdessemed fouzi	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2017 - 2018

---

# REMERCIEMENT

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

*Un grand remerciement à mon cher encadreur : Mr. Abdessemed fouzi pour sa précieuse assistance plein de sincérité et d'une volonté seine de me transmettre toutes ses connaissances se rattachant à mon travail.*

*Je tiens à remercier vivement et en particulier mes chers parents pour leur soutien inlassable et permanent, durant toute la période du travail.*

*Je remercie également mes frères qui n'ont jamais cessé de m'apporter soutien et réconfort.*

*Je tiens à remercier aussi :*

- ❖ Les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail*
  - ❖ Le corps d'enseignant et les étudiants d'hydraulique (Biskra).*
-

---

# DEDICACES

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

- ❖ *Mes très chers parents pour les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard.*
  
  - ❖ *Mes chers frères : « Djalal, Yasser, abas, Salah »*
  
  - ❖ *Toute les famille HAMZA*
  
  - ❖ *Mes amis proches : « Hassan, Hamadi, Bachir »*
  
  - ❖ *Mes collègues : « ishak, Omar, Khairani, Mohamed, nadjib, moatasseem, zakaria ».*
-

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

Figure I.1 : Joints d'expansion détruits par le coup de bélier.....	08
Figure I.2 : La surpression due à la fermeture de la vanne.....	10
Figure I.3: Vue d'une conduite forcée éclatée de la centrale électrique d'Oigawa, du Japon.....	11
Figure I.4 : Vue d'une conduite aplatie due à un vacuum de la centrale électrique D'Oigawa, du Japon (d'après Chaudhry, 1979).....	12
Figure I.5 : Les quatre étapes d'un cycle de variation de pression.....	14
Figure I.6 : Analyse des phases successives du coup de bélier.....	15

## Chapitre II

Fig. II.1 : Cas de la fermeture brusque.....	17
Fig. II.2 : Schéma de la fermeture brusque.....	17
Fig. II.3 : cas de la fermeture lente.....	19
Fig. II.4 : adduction gravitaire – surpression.....	21
Fig. II.5 : Répartition du coup de bélier (fermeture lente).....	22
Fig. II.6 : Répartition du coup de bélier : conduite de refoulement.....	25
Fig. II.7 : Répartition du coup de bélier, refoulement.....	26

---

**Chapitre III**

<b>Fig. III.1 : Coupe type du volant d'inertie.....</b>	<b>30</b>
<b>Fig.III.2: Schéma de fonctionnement des soupapes à ressort.....</b>	<b>32</b>
<b>Fig.III.3 : Soupapes de décharge Ramus.....</b>	<b>32</b>
<b>Fig.III.4 : Schémas de principe des soupapes pilotées.....</b>	<b>33</b>
<b>Fig.III.5: Soupape de décharge Neyrtec.....</b>	<b>34</b>
<b>Fig. III.6 : Cheminée d'équilibre de St-Alban, Québec.....</b>	<b>39</b>
<b>Fig.III.7 : Cheminée d'équilibre À Montevideo, Uruguay.....</b>	<b>39</b>
<b>Fig. III.8 : Cheminée à étranglement.....</b>	<b>41</b>
<b>Fig.III.9 : Cheminée à épanouissement.....</b>	<b>41</b>
<b>Fig.III.10 : Cheminée différentielle.....</b>	<b>42</b>
<b>Fig.III.11 : Coupe type de cheminée.....</b>	<b>42</b>
<b>Fig.III.12 : Schémas d'un réservoir d'air.....</b>	<b>43</b>
<b>Fig.III.13 : Réservoirs d'air.....</b>	<b>44</b>
<b>Fig.III.14 : Schémas de principe des ballons anti-bélier.....</b>	<b>45</b>
<b>Fig.III.15 : Organes dissymétriques à la base des balcons anti-bélier.....</b>	<b>46</b>
<b>Fig.III.16 : Section du volant.....</b>	<b>49</b>
<b>Fig.III.17 : Construction de l'épure dans le cas du volant.....</b>	<b>51</b>



# Notations et Symboles

Symbole	Unité	Définition
$a$	m/s	Vitesse de propagation de l'onde ( célérité )
$a_0$	m/s	Vitesse de propagation de l'onde dans l'eau
$\rho$	Kg/ m <sup>3</sup>	Masse volumique 1 000 kg/m <sup>3</sup> pour l'eau
$U_{a0}$	m <sup>3</sup>	Volume de l'air
D, d	mm	Diamètre de la conduite
U	m <sup>3</sup>	Volume
T, t	s	Temps
$E_{eau}$	N/m <sup>2</sup>	module d'élasticité de l'eau. $2.05 \times 10^9$ N/m <sup>2</sup>
e	mm	Epaisseur de la paroi de la conduite
E	N/m <sup>2</sup>	Module d'élasticité longitudinale de la conduite (module d'Young)
$E_m$	N/m <sup>2</sup>	Module d'élasticité d'un matériau
$E_f$	N/m <sup>2</sup>	Module d'élasticité du fluide
$E_c$	N/m <sup>2</sup>	Module d'élasticité du matériau de la conduite
g	m/s <sup>2</sup>	Accélération de la pesanteur
h	m	Hauteur piézométrique
$H_0$	m	Charge à l'extrémité amont du système
j	m/m	Perte de charge unitaire
k	m <sup>2</sup> /N	Coefficient du matériau de la conduite
L	m	Longueur de la conduite
$\sigma$	-	Le coefficient de Poisson
$\sigma_{adm}$	-	Tension admissible
K	m	Le rayon de giration
p	N/m <sup>2</sup>	Pression
Q	m <sup>3</sup> /s	Débit
$Q_0$	m <sup>3</sup> /s	Débit correspondant à l'écoulement permanent uniforme
r	m	Rayon de la conduite
S	m <sup>2</sup>	Section de la conduite

<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>Définition</b>
$\varepsilon$	N/m <sup>2</sup>	Compressibilité du liquide, Module d'élasticité volumique
V	m/s	Vitesse d'écoulement
$V_0$	m/s	Vitesse correspondant à l'écoulement permanent uniforme
$t_F$	s	Temps de fermeture
x	m	Abscisse compté horizontalement
z	M	Hauteur géométrique
m	Kg	La masse du volant
I	Kg.m <sup>2</sup>	
f	-	Le coefficient de frottement
$\Delta H$	m	Variation de la charge
w	rd/s	la vitesse angulaire
Cp	m N	
$P_{abs}$	W	La puissance absorbée par la pompe
$\gamma$	N/m <sup>3</sup>	Masse spécifique
N	t /min	le nombre de tours/minute de la pompe pour ce régime



# SOMMAIRE

**Introduction générale.....01**

## **Chapitre I : Le phénomène transitoire**

**I.1.Introduction.....02**

**I.2.Notion générale du phénomène.....02**

I.2.1.Types d'écoulements.....02

I.2.1.1.Ecoulement permanent.....02

I.2.1.2.Ecoulement non permanent.....02

I.2.1.3.Ecoulement uniforme .....03

I.2.1.4.Ecoulement non uniforme.....03

I.2.1.5.Ecoulement transitoire.....03

**I.3.Régime d'écoulement.....04**

I.3.1.Régime permanent.....04

I.3.2. Régime non permanent ou transitoire.....04

**I.4.Les équations régissant de phénomène.....05**

I.4.1. Équations de bases.....05

I.4.2. Hypothèses de base.....07

**I.5. Description physique du phénomène.....07**

**I.5.1. Phénomène du coup de bélier.....07**

---

I.5.1.1. Définition.....	07
I.5.1.2. Description du phénomène du coup de bélier.....	08
I.5.1.3. Causes fréquentes du coup de bélier.....	10
I.5.1.4. Risques et dommages conséquents aux coups de bélier.....	11
a) Suppressions excessives.....	11
b) Très basse pression.....	12
c) Inversion de l'écoulement.....	12
d) Mouvements et vibration des conduites.....	13
<b>I.5.2. Valeur numérique du coup de bélier.....</b>	<b>13</b>
I.5.2.1. État d'équilibre d'un système hydraulique .....	13
I.5.2.2. Manœuvres rapides. Formule de JOUKOWSKY.....	13
<b>I.6. Conclusion.....</b>	<b>15</b>

## **Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène**

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>16</b>
<b>II.2. Fermeture et ouverture des vannes dans les conduites gravitaires .....</b>	<b>16</b>
II.2.1. Ouverture des vannes .....	16
II.2.2. Fermeture d'une vanne de sectionnement.....	16
II.2.3. Valeur numérique du coup de bélier.....	16
II.2.3.1. Cas de fermeture brusque.....	17
II.2.3.2. Cas de la fermeture lente.....	19
II.2.4. Répartition du coup de bélier le long de la conduite.....	20
<b>II.3. Arrêt ou démarrage des pompes dans les conduites de refoulement.....</b>	<b>20</b>
II.3.1. démarrage des pompes.....	22

---

---

II.3.2. Arrêt des pompes.....	22
a) Première phase du coup de bélier direct.....	23
b) Deuxième phase ou contre-coup.....	23
II.3.2.1. Arrêt instantané.....	24
II.3.2.2. Arrêt non instantané.....	25
<b>II.4. Arrêt brutal par disjonction inopinée d'un ou de plusieurs groupes électro-pompes (panne d'alimentation d'énergie).....</b>	<b>26</b>
<b>II.5. Conclusion.....</b>	<b>27</b>
<b>Chapitre III : Protection des canalisations contre le phénomène transitoire passant par différents appareils et équipements</b>	
<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>29</b>
<b>III.2. Utilisation des appareils anti-bélier dans les installations hydrauliques.....</b>	<b>29</b>
<b>III.3. Les appareils de protection contre la dépression.....</b>	<b>29</b>
III.3.1. Volants d'inertie.....	29
<b>III.4. Les appareils de protection contre la surpression.....</b>	<b>30</b>
III.4.1. Soupapes de décharge.....	30
III.4.1.1. Description générale.....	30
III.4.1.2 Principes et particularités de la soupape Neyrtec.....	34
III.4.1.2.1. Principe.....	34
III.4.1.2.2. Particularités de la soupape.....	35
III.4.1.2.3. Domaine d'application.....	36

---

III.4.1.3. Choix de l'appareil.....	36
<b>III.5. Les appareils utilisés contre la dépression et la surpression.....</b>	<b>37</b>
<b>III.5.1. Cheminées d'équilibre.....</b>	<b>37</b>
III.5.1.1. But de l'ouvrage.....	39
III.5.1.2. Domaine d'application.....	39
III.5.1.3. Types de cheminées.....	40
III.5.1.3.1. Cheminée à étranglement.....	40
III.5.1.3.2. Cheminée à épanouissement.....	41
III.5.1.3.3. Cheminée différentielle.....	42
<b>III.5.2. Réservoirs d'air.....</b>	<b>43</b>
III.5.2.1. Description technologique.....	43
a) Les ballons à membrane ou à vessie.....	44
b) Les ballons sans membrane.....	45
III.5.2.2. Dispositifs à la base du ballon.....	45
<b>III.6. Nécessité de calculer la fluctuation de pression.....</b>	<b>46</b>
<b>III.7. Principe de calcul des appareils anti-béliers.....</b>	<b>47</b>
III.7.1. Les volants d'inertie.....	47
III.7.1.1. Principe.....	47
III.7.1.2. Calcul de l'amortissement du coup de bélier grâce au volant.....	48
<b>III.8. Conclusion.....</b>	<b>52</b>

---





### Introduction générale

Lorsque, dans un réseau de canalisations véhiculant un fluide, on modifie localement les conditions d'écoulement (manœuvre d'une vanne), on introduit dans le fluide une discontinuité portant sur les paramètres eux-mêmes (pression, vitesse, débit,...) ou sur leur dérivée ( $\frac{\partial P}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial V}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial Q}{\partial t}$ , ... etc.). En raison de l'élasticité du milieu (fluide- conduite) cette discontinuité se propage de proche en proche avec une célérité souvent élevée, affectant ainsi rapidement une zone étendue de l'écoulement considérée.

Cette perturbation ayant pour origine la variation de pression extrêmement brutale qui est souvent observées. Dès lors, l'étude des régimes transitoires (régime subissant des perturbations ou des variations) peut être traité de façon générale, avec prise en compte de l'élasticité du milieu et de la compressibilité du fluide, ce qui conduit à une évaluation précises des paramètres (pression, débit,...etc.) en chaque point du fluide et quelque soit le temps considéré, c'est la théorie du phénomène transitoire communément appelé coup de Bélier.

Notre travail traitant sur ce sujet du phénomène du coup de bélier a été divisé en trois grands chapitres :

Dans le 1<sup>er</sup> chapitre on s'est concentré sur une description générale ou globale du phénomène du coup de bélier passant par la description physique ainsi que les équations de bases régissant ce phénomène transitoire ;

Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre on s'est focalisé sur les causes principales et les plus probables provoquant le phénomène transitoire du coup de bélier qui tourne principalement autour de deux grands axes à savoir ; Les fermetures et les ouvertures des vannes dans le cas des conduites gravitaire et l'arrêt et le démarrage des pompes dans le cas des conduites de refoulement ainsi que le cas de l'arrêt brutal par disjonction inopinée d'un ou de plusieurs groupes électropompes ce qu'on désigne par une panne d'alimentation en énergie.

Dans le 3<sup>eme</sup> et dernier chapitre on s'est focalisé sur les moyens de protection des installations hydrauliques contre la variation brusque de pression et de régime d'écoulement due a ce phénomène transitoire du coup de bélier qui provoque des dégâts considérables dans les installations hydrauliques au niveau des conduites d'adduction gravitaire ou de refoulement ou encore dans les centrales hydroélectriques au niveau de conduites forcées et ou on a recours à différents appareils anti bélier qui sont utilisées dans des cas bien précis.





## I.1.Introduction

Lorsque, dans un réseau de canalisations véhiculant un fluide, on modifie localement les conditions d'écoulement (manœuvre d'une vanne), on introduit dans le fluide une discontinuité portant sur les paramètres eux-mêmes (pression, vitesse, débit,...) ou sur leur dérivée ( $\frac{\partial P}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial V}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial Q}{\partial t}$ , ... etc.). En raison de l'élasticité du milieu (fluide- conduite) cette discontinuité se propage de proche en proche avec une célérité souvent élevée, affectant ainsi rapidement une zone étendue de l'écoulement considérée.

Cette perturbation ayant pour origine la variation de pression extrêmement brutale qui est souvent observées. Dès lors, l'étude des régimes transitoires (régime subissant des perturbation ou des variations) peut être traité de façon générale ,avec prise en compte de l'élasticité du milieu et de la compressibilité du fluide, ce qui conduit à une évaluation précises des paramètres (pression, débit ,...etc.) en chaque point du fluide et quelque soit le temps considéré ,c'est la théorie du phénomène transitoire communément appelé coup de Bélier.

## I.2. Notion générale du phénomène

### I.2.1.Types d'écoulements

#### I.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 :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0; \frac{\partial P}{\partial t} = 0; \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (I.1)$$

V : vitesse d'écoulement,

P : la pression,

$\rho$  : Masse volumique.

#### I.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) remplir de liquide en mouvement, les vitesses et

---

## Chapitre I : le phénomène transitoire

---

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, un écoulement non permanent unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel [12].

### I.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 tout points de ce fluide c'est-à-dire :

$$\frac{\partial V}{\partial X} = 0 \quad (I.2)$$

### I.2.1.4.Ecoulement non uniforme

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

à-dire :

$$\frac{\partial V}{\partial X} \neq 0 \quad (I.3)$$

### I.2.1.5.Ecoulement transitoire

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 :

$$\frac{\partial V}{\partial X} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial V}{\partial X} = 0, \frac{\partial V}{\partial t} \neq 0 \quad (I.4)$$

Avec :

V : 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 :

## Chapitre I : le phénomène transitoire

---

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

Donc l'écoulement transitoire est un écoulement non permanent, dans notre travail nous nous intéresserons uniquement au phénomène du coup de bélier [12].

### I.3. Régime d'écoulement

#### I.3.1. Régime permanent

L'écoulement du liquide est dit permanent si en tout point de la conduite les paramètres hydrauliques (Q, V, h, p.....) dans une section donnée ne changent pas en fonction du temps, c'est-à-dire :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0; \frac{\partial V}{\partial t} = 0; \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \dots \text{etc.}$$

Ainsi les équations de mouvement se réduisent à une seule, qui peut être obtenue en écrivant pour un volume élémentaire quelconque du liquide l'équilibre des forces de pression, de pesanteur et d'inertie, Soit :

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + g \frac{dZ}{dx} + v \frac{dv}{dx} \quad (\text{I.5})$$

x : abscisse compté horizontalement,

Z : altitude du volume élémentaire,

v : vitesse du volume élémentaire

#### I.3.2. Régime non permanent ou transitoire

L'écoulement du liquide est dit non permanent ou transitoire si les grandeurs physiques (Q, V, h, p...) caractérisant l'écoulement dans chaque point de l'espace varient dans le temps, C'est-à-dire :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial V}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0 \quad (\text{I.6})$$

Où

$$V = f_1(x, y, z, t) ; p = f_2(x, y, z, t)$$

En d'autre terme, le mouvement du liquide consiste en une propagation, le long de  $x$  d'ondes de pression et de vitesse. Le mouvement transitoire est essentiellement dû à l'inertie de la masse liquide en mouvement dans l'installation. Donc, on peut considérer qu'une variation d'état ou de régime, en un lieu quelconque d'une conduite, se propage de part et d'autre sous la forme d'une onde plane caractérisant l'écoulement non transitoir [04] [05].

L'écoulement transitoire est dit unidimensionnel (filaire), si les composantes verticale et transversale de la vitesse sont négligeables par rapport à la composante longitudinale, autrement dit :

$$V = f_1(x, t) ; p = f_2(x, t) \quad (\text{I.7})$$

### I.4. Les équations régissant de phénomène

#### I.4.1. Équations de bases

En considérant, dans une conduite, deux variables dépendantes, le débit  $Q$  et la pression  $H$ . fonction de l'espace  $x$  et du temps  $t$ . les principes de conservation de la masse et de conservation de la quantité de mouvement, il est possible de définir un système à deux équations aux dérivées partielles pour décrire le comportement physique du système eau-conduite. La conservation de la masse s'exprime sous forme de l'équation de continuité [07] :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{I.8})$$

De plus, la conservation de la quantité de mouvement permet d'écrire l'équation de mouvement:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + f(Q) = 0 \quad (\text{I.9})$$

Où:

- H : pression ( $p/\gamma$ )  
 $\gamma$ : masse spécifique  
Q : Débit  
A : aire de la section de la conduite  
g : accélération gravitationnelle  
a : célérité de l'onde de pression  
 $f(Q)$  : terme de frottement

La première équation exprime le fait qu'une variation spatiale du débit entraîne une évolution temporelle de la pression; en effet, si, par exemple, il entre plus débit dans un volume donné qu'il en sort, il faut que la pression augmente de façon à ce que le volume augmente s'il est élastique.

La deuxième équation est en fait l'expression de l'équilibre des forces selon la loi de Newton  $F = ma$ , cet équilibre fait intervenir l'accélération du fluide par la variation temporelle du débit, les différences de pression sous forme de gradient de pression et les forces de frottement causé par la vitesse du fluide sur les parois plus ou moins rugueuses de la conduite. La célérité de l'onde de pression peut être assimilée à la vitesse de propagation du son dans le milieu eau-conduite. Elle s'exprime par:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{E_{eau}} + \frac{D}{e E_c} \right)}} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

- a : célérité de l'onde élastique  
 $\rho$ : Masse spécifique. 1 000 kg/m<sup>3</sup> pour l'eau

$E_{\text{eau}}$ : module d'élasticité de l'eau.  $2.05 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

$D$ : diamètre de la conduite

$e$ : épaisseur de la paroi

$E_c$ : module d'élasticité du matériau de la conduite

### I.4.2. Hypothèses de base

Avant de passer à la résolution des équations (I.8) et (I.9) il convient de considérer les hypothèses qui ont permis la formulation [07]:

- 1) La section d'écoulements est considérée invariable dans le temps dans l'équation de continuité.
- 2) L'effet des non-uniformités des sections d'écoulement est négligé dans l'équation de continuité.
- 3) L'équation de mouvement ne tient pas compte des effets d'inertie convective, c'est-à-dire par exemple, des effets des accélérations des particules de fluide causé par un rétrécissement de la section d'écoulement.

- 4) Le terme de frottement  $f(Q)$  est généralement considéré comme celui d'un écoulement

turbulent rugueux permanent uniforme représenté par le terme dissipatif  $\frac{\lambda Q|Q|}{2DA}$ .

## I.5. Description physique du phénomène :

### I.5.1. Phénomène du coup de bélier

#### I.5.1.1. Définition

Les changements du régime d'écoulement d'un fluide contenu à l'intérieur d'une conduite entraînent souvent de brusques variations de pression. Ces écarts seront d'autant plus importants que la modification du débit a été brutale.

D'une manière générale, le coup de bélier exprime toute variation de pression dans une conduite en charge, consécutive à une manœuvre quelconque de l'obturateur aval. Le coup de bélier est un phénomène non stationnaire de propagation d'ondes de pression à très hautes

vitesses. Autrement dit, c'est l'arrêt brutal de la circulation de l'eau lorsqu'un organe provoque une prompt modification du débit. Par conséquent, les forces dynamiques qui en résultent peuvent engendrer des ruptures de canalisations, dégâts matériels et quelques fois des pertes de vies humaines, d'où la nécessité de renforcement des ouvrages concernés, en particulier les conduites appelées alors conduites forcées [16].

### I.5.1.2. 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, et... 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 répercutant contre les autres dispositifs ou coudes de l'installation et s'étendant 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.



**Figure I.1** : Joints d'expansion détruits par le coup de bélier.

## Chapitre I : le phénomène transitoire

---

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 [17]

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 :

$$\Delta P = \rho \times g \times \frac{2VL}{t} \quad (\text{I.11})$$

Où :

$\Delta P$ : 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/s<sup>2</sup>)

$t$  : 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:

$$t^* = \frac{2L}{\alpha} \quad (\text{I.12})$$

Où

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

$L$ : est la longueur du tube (m)

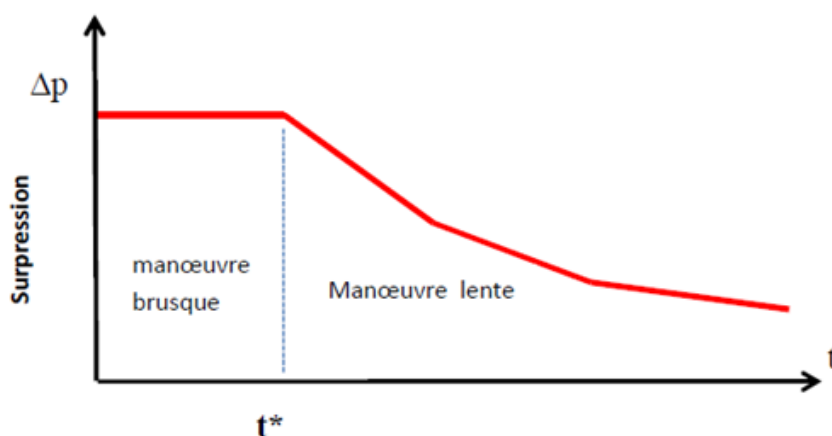
$\alpha$ : est la vitesse de propagation de l'onde (m/s) (en fonction du type de fluide, des matériaux, du diamètre interne et externe de la canalisation).



## Chapitre I : le phénomène transitoire

---

Pour les systèmes mécaniques tels que mitigeurs, électrovannes, vannes à sphère etc., tous les temps de fermeture  $t \leq t^*$  sont définis comme “manœuvres brusques”, car ils provoquent dans le tube un coup de bélier avec une surpression d’intensité maximum. Au contraire, un temps de fermeture  $t > t^*$  sera défini comme “manœuvre lente” et provoque un coup de bélier avec une surpression d’une intensité moins dangereuse. Nous utiliserons dans la formule (I.11) un temps  $t = t^*$  pour obtenir une valeur de surpression  $p$  maximum pour le coup de bélier. Le graphique ci-dessous permet de visualiser le phénomène



**t\* : Temps de fermeture**

**Figure I.2 :** La surpression due à la fermeture de la vanne.

### I.5.1.3. Causes fréquentes du coup de bélier

En ingénierie d’hydraulique, les causes les plus fréquentes occasionnant des coups de bélier sont :

- L’ouverture ou la fermeture des vannes dans les conduites gravitaires en charge ;
- La mise en marche ou l’arrêt des pompes sur des conduites de refoulement ;
- Vidange ou remplissage inadéquat de la conduite en charge ;
- Implosion des poches d’air suite à une cavitation ;
- Modification de la vitesse angulaire d’une pompe ;
- Coupure électrique inopinée dans une station de pompage qui est la cause la plus fréquente du coup de bélier en hydraulique urbaine ;

- La mise en marche ou la modification de l'opération d'une turbine ;
- Variation d'un plan d'eau relié à un réseau en charge ;
- Vibration des accessoires de contrôle comme les vannes.
- 

Cette liste est loin d'être exhaustive, et beaucoup d'autres situations complexes engendrent ce phénomène.

### I.5.1.4. Risques et dommages conséquents aux coups de bélier

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

#### a) *Surpressions excessives :*

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

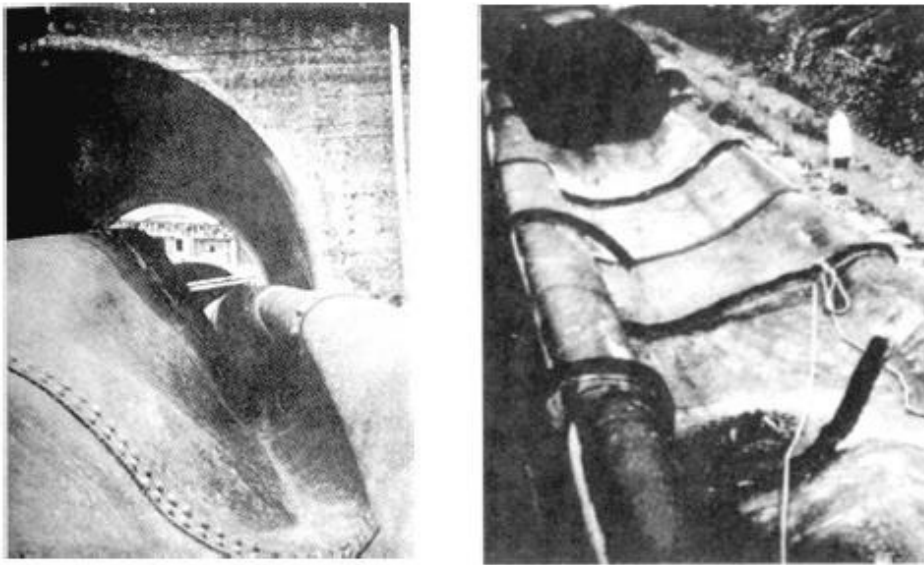
A titre illustratif, les photos ci-après (Figure I.3) représentent une rupture d'une conduite forcée.



**Figure I.3:** Vue d'une conduite forcée éclatée de la centrale électrique d'Oigawa, du Japon.

### *b) Très basse pression :*

Peut causer l'aplatissement des conduites et aspiration des joints, et contamination du fluide si en un point de la conduite la pression atteint le vide barométrique (-10 m.c.e), alors une cavitation (libération de gaz dissous + vapeur d'eau) se produirait, ce qui donne lieu à une séparation de la veine liquide. En ayant un profil en long tourmenté, lors de la phase de surpression, la poche de vapeur se résorbe engendrant une pression atteignant jusqu'à quatre fois la pression de service (Morel, 1994). Donc, c'est un risque à éviter à tout prix. Les photos ci-dessous (Figure (I.3)) illustrent le risque inhérent à ce cas dangereux.



**Figure I.4 :** Vue d'une conduite aplatie due à un vacuum de la centrale électrique D'Oigawa, du Japon (d'après Chaudhry, 1979).

### *c) Inversion de l'écoulement :*

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

### *d) Mouvements et vibration des conduites :*

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

## **I.5.2. Valeur numérique du coup de bélier**

### **I.5.2.1. État d'équilibre d'un système hydraulique**

Les phénomènes transitoires hydrauliques apparaissent lorsque l'équilibre des forces agissant sur un système est modifié. Quand un liquide est en mouvement dans une conduite et que ce mouvement ne varie pas dans le temps, il y a un état d'équilibre permanent. En fait, il y a un équilibre entre l'énergie disponible (ou potentielle) et les énergies dues au mouvement (cinétique) et perdues par le frottement, ce qui définit un mouvement permanent. Cette vision est macroscopique car, à une échelle plus petite, on observe que les vitesses fluctuent constamment autour d'une valeur moyenne, c'est une manifestation de la turbulence. Pour les besoins de l'analyse que nous ferons ici, nous ne considérerons que les effets globaux, moyens dans le temps, de la turbulence, notamment en ce qui concerne l'évaluation des forces de frottement selon le régime d'écoulement.

### **I.5.2.2. Manœuvres rapides. Formule de JOUKOWSKY [12]**

Nous avons considéré, jusqu'à présent, une manœuvre instantanée, c'est-à-dire, d'une durée  $T = 0$ , ce qui est physiquement impossible. Dans la réalité, la variation de débit, provoquée par l'arrêt d'une pompe par exemple, se fait en un temps  $\theta$  et des ondes élémentaires sont engendrées, au fur et à mesure que s'opère l'arrêt.

Dans le cas d'une variation de débit rapide, temps d'annulation du débit inférieur au temps correspondant à l'allée et venue d'une onde élastique, on montre que la Loi de JOUKOWSKY :

$$\Delta h = \pm \frac{aV_o}{g} \quad (\text{I.12})$$

# Chapitre I : le phénomène transitoire

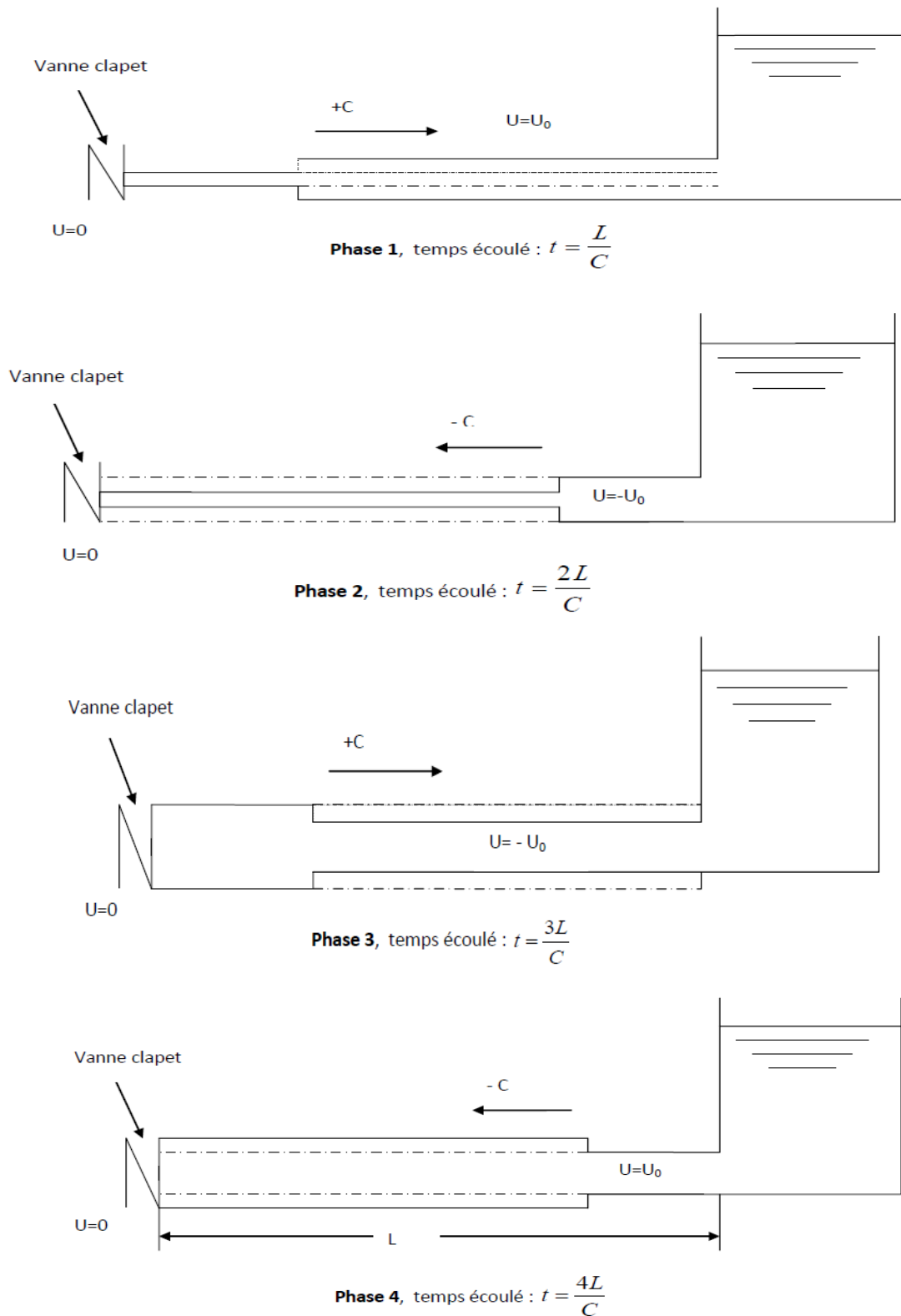


Figure I.5 : Les quatre étapes d'un cycle de variation de pression.

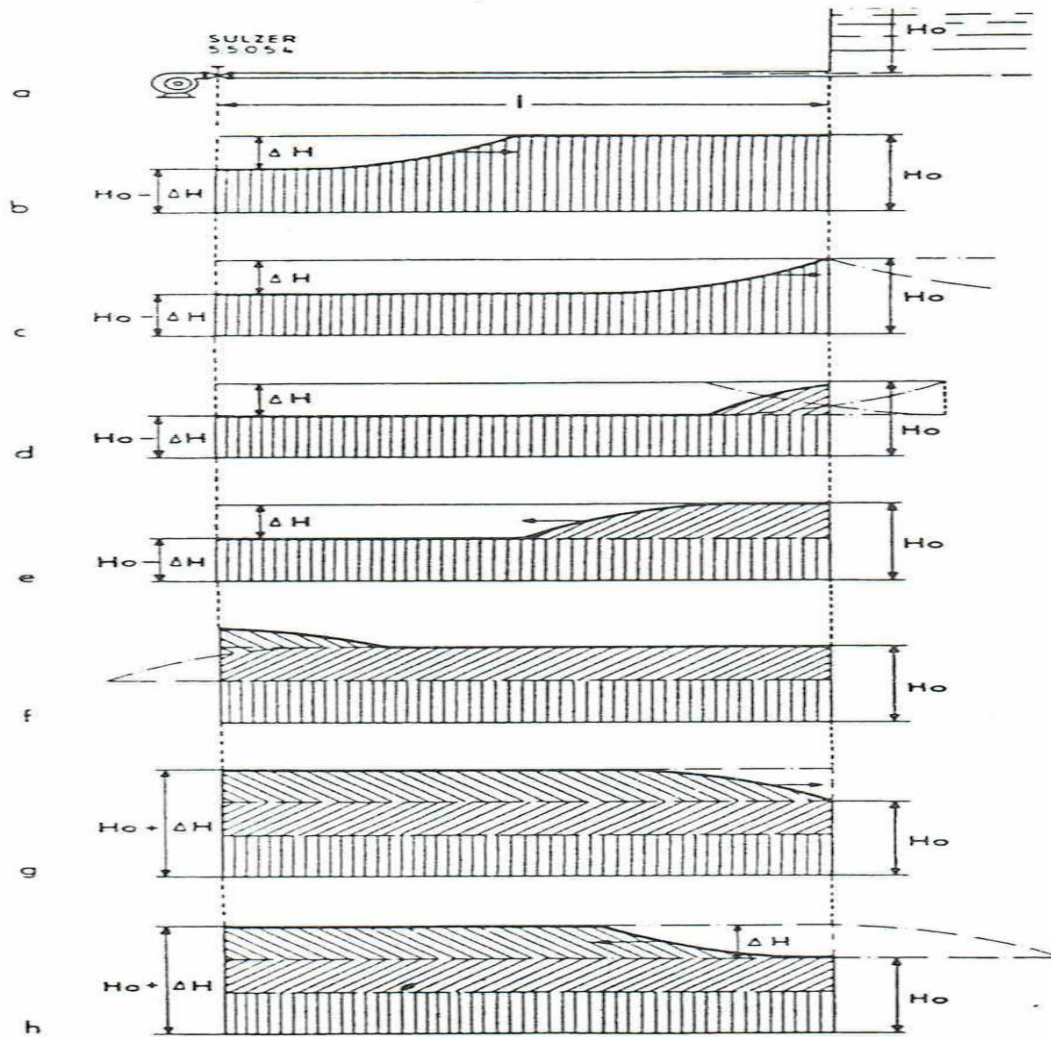


Figure I.6 : Analyse des phases successives du coup de bélier.

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé de passer en revue les notions de bases concernant le phénomène transitoire du coup de bélier passant par la définition des types et des régimes d'écoulements, la description physique ainsi que les équation de bases régissant ce phénomène, pour finir avec ces risques dans les installations hydrauliques en plus de ça valeur numérique dans le cas de manœuvre des vannes ; ces causes les plus probables sont détaillé dans le chapitre qui suit .







### **II.1. Introduction**

Dans ce chapitre on s'est focalisé sur les causes principales et les plus probables provoquant le phénomène transitoire du coup de bélier qui tourne principalement autour de deux grands axes à savoir ; Les fermetures et les ouvertures des vannes dans le cas des conduites gravitaire et l'arrêt et le démarrage des pompes dans le cas des conduites de refoulement ainsi que le cas de l'arrêt brutal par disjonction inopinée d'un ou de plusieurs groupes électropompes ce qu'on désigne par une panne d'alimentation en énergie.

### **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**

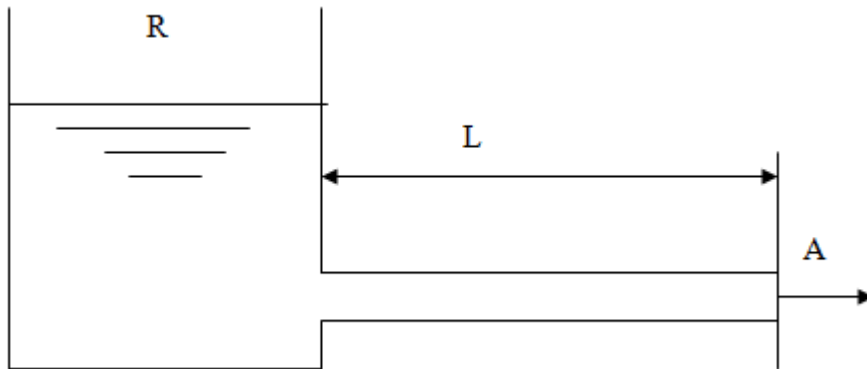
Initialement le liquide s'écoule avec une vitesse uniforme dans la tuyauterie. Une vanne est fermée brusquement à l'extrémité de la tuyauterie qui stoppe instantanément le liquide au voisinage de celle-ci. L'inertie du liquide provoque son accumulation et comme il est peu compressible, la pression augmente 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 générera un débit inverse qui provoquera une nouvelle onde de pression, négative cette fois en amont de la vanne toujours fermée.

#### **II.2.3. Valeur numérique du coup de bélier**

Nous examinons les deux cas de fermeture brusque et de fermeture lente d'un robinet vanne [01].

### II.2.3.1. Cas de fermeture brusque

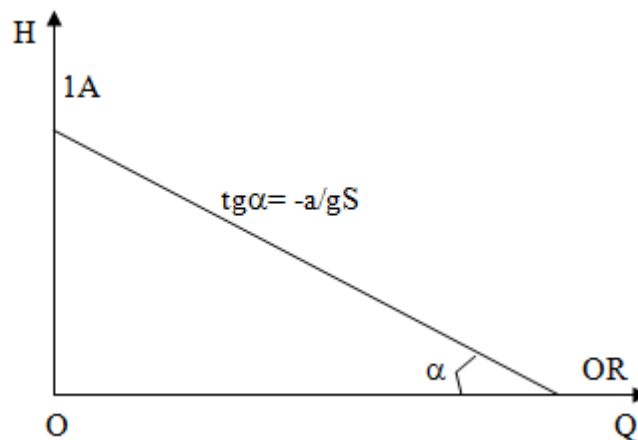
Considérons une conduite issue d'un réservoir et comportant un robinet en A. soit L la longueur de la conduite figure (II.1)



**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) [01].



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

## Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène

---

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.

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 :

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

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

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

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

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

Etant au-dessus d'OQ, le point H correspond à une surpression. La valeur maximale du coup de bélier peut donc atteindre  $H = \frac{aV_0}{g}$  [01].

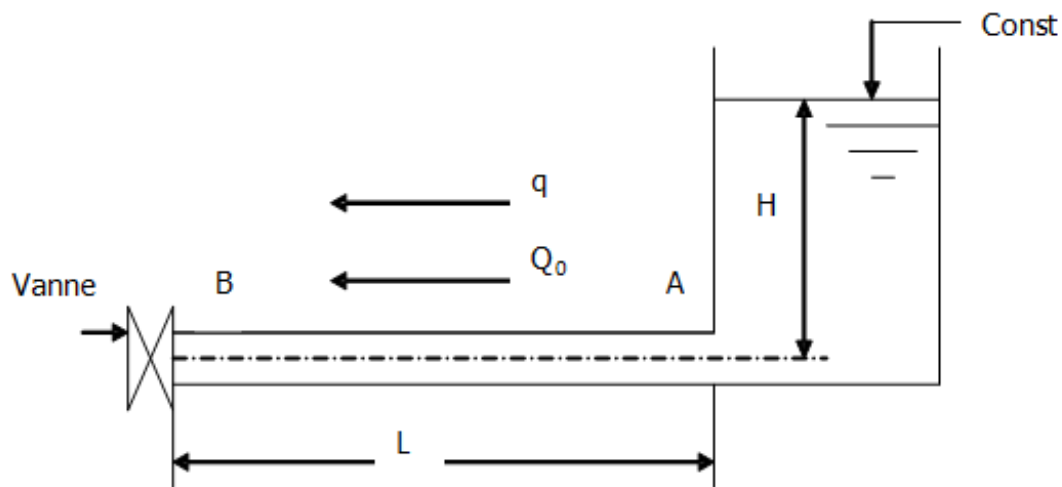
### Remarque :

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

### II.2.3.2. Cas de la fermeture lente

Elle est caractérisée par un temps de fermeture supérieur à  $\frac{2L}{a}$ . C'est à dire supérieur à un aller et retour d'onde. Si  $Q_0$  est le débit au temps 0, il passera encore, après un temps  $\frac{2L}{a}$  un débit  $q$  (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 :

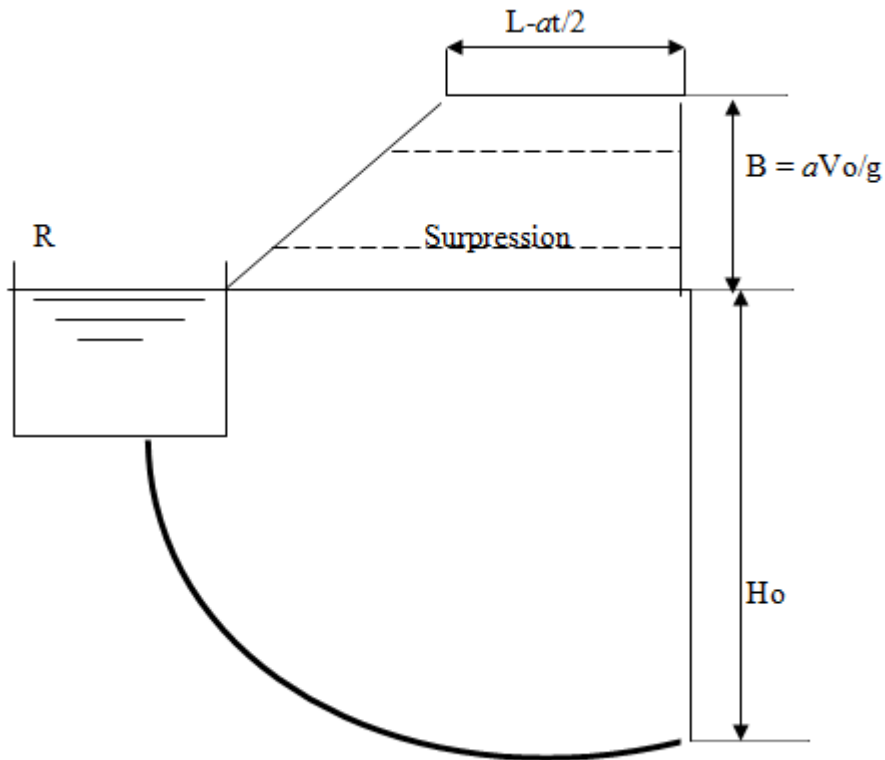
Pour les conduites d'adduction, d'adopter des robinets à fermeture lente, pour tomber dans le cas de la formule de MICHAUD.

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.2.4. 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 [01].



**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

$\frac{2LV_0}{gt}$  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 [01].

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

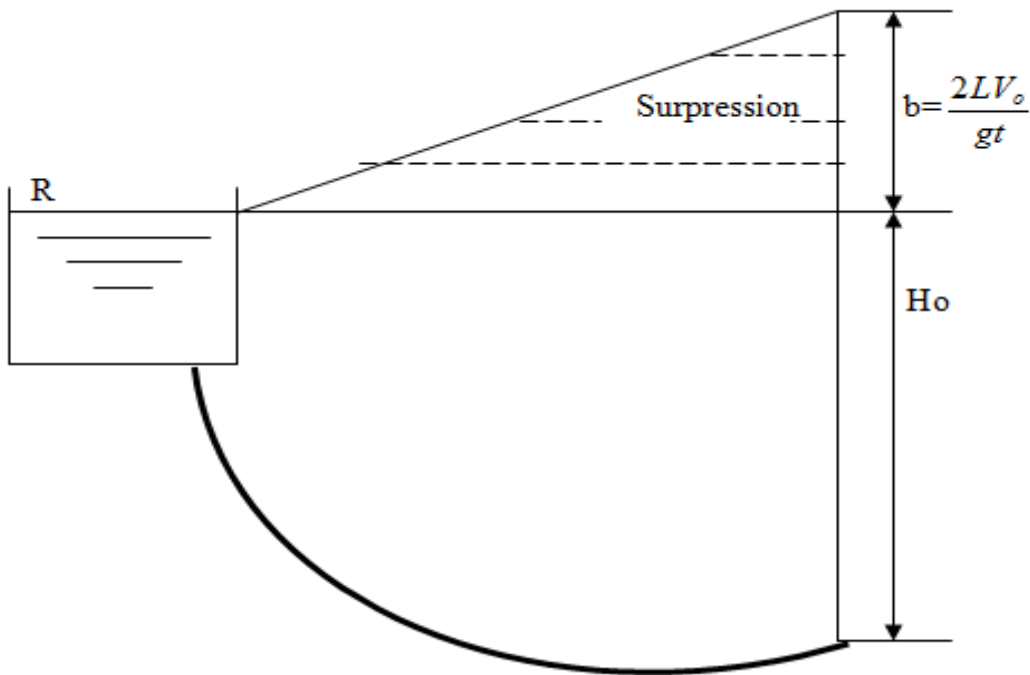


Fig. II.5 : Répartition du coup de bélier (fermeture lente).

### 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 [14].

### 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) [14].



### II.3.2.1. 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.

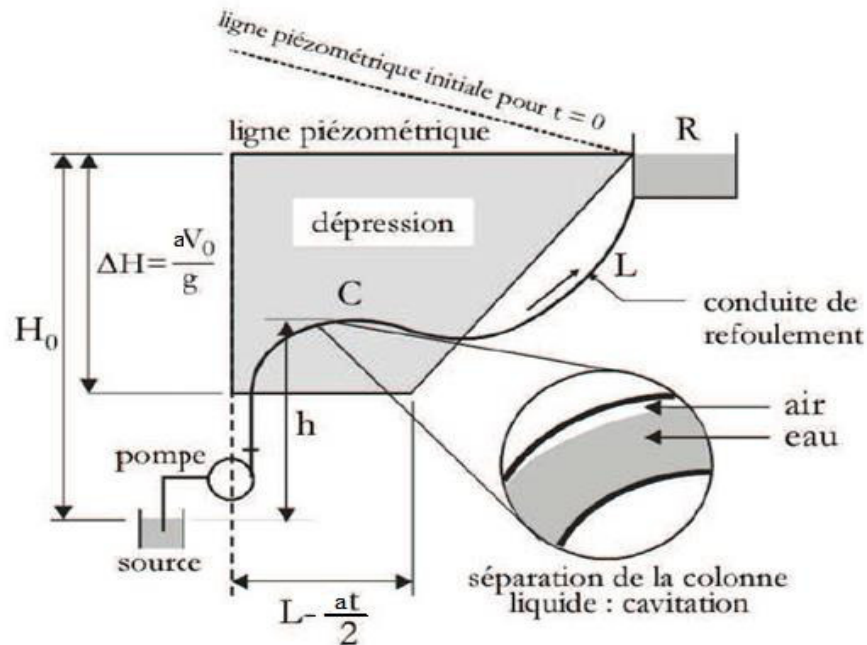


Fig. II.6 : Répartition du coup de bélier : conduite de refoulement.

### II.3.2.2. 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) [14].

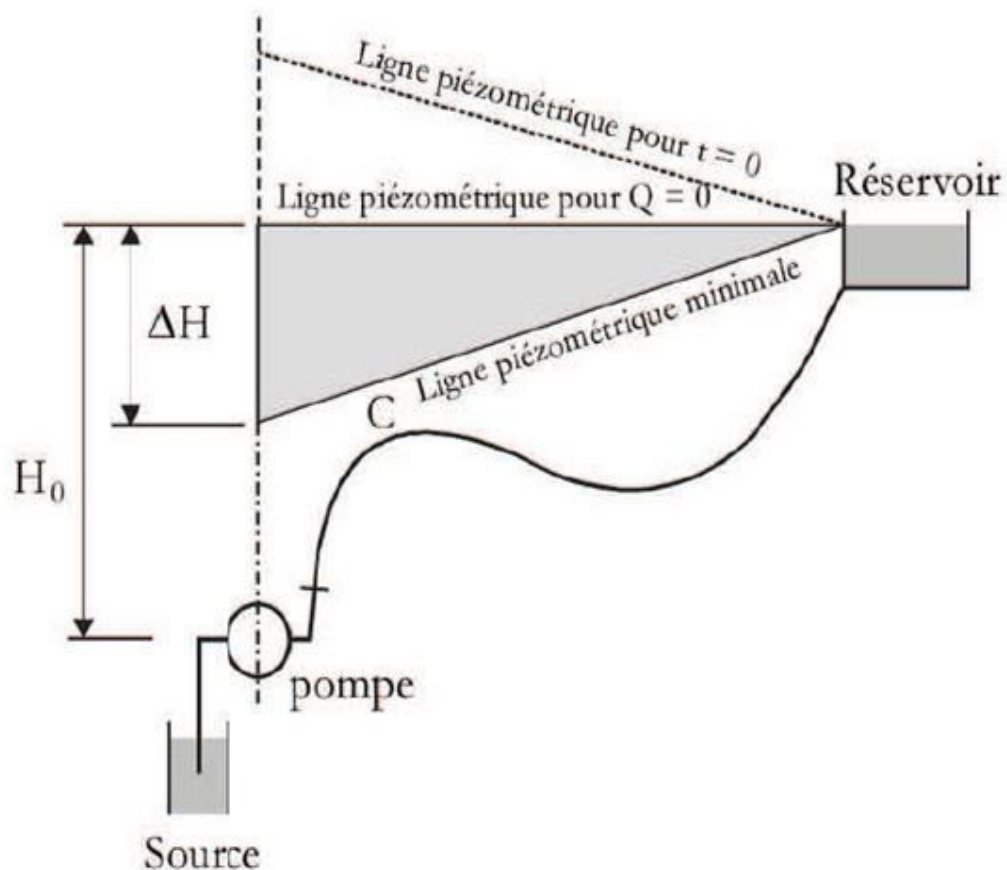


Fig.II.7 : Répartition du coup de bélier, refoulement.

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 [14].

### 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) [15].

## 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 (détachement 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) [15].

### 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

Comme on a vu dans ce chapitre, les causes les plus probables provoquant le phénomène transitoire du coup de bélier peuvent se classer en deux grandes catégories selon le type de manœuvre (Vanne ou pompes ou encore groupes électropompes) et selon le type d'installation hydraulique (conduites gravitaires ou conduites de refoulement), mais le cas où ce phénomène se produit avec une ampleur très importante est celle du cas de manœuvre des pompes dans les conduites de refoulement où l'amplitude du coup de bélier est très grande et

## **Chapitre II : Les causes les plus probables provoquant le phénomène**

---

pour y remédier on doit impérativement protéger notre installation hydraulique en utilisant des appareils adéquats et c'est ce qu'on va voir dans le dernier chapitre .