

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 :/2022



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع...../2022

Mémoire de Master

Filière : HYDRAULIQUE

Spécialité :HYDRAULIQUE URBAINE

Thème

**Protection des canalisations
contre les variations brusques de pression
duent aux phénomènes transitoires.**

Nom et Prénom de l'étudiant :
ZEGAAR ABD ELHAFED

Encadreur :
Mr.Abdessemedfouzi

Promotion: Juin 2022

Remerciements :

Nous remercions Dieu Tout-Puissant

Cet humble travail. Je remercie Mr. Abdessemed Fouzi pour ses directives et ses enseignements tout au long des travaux de ce mène.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté pour juger notre travail.

Enfin, nous remercions sincèrement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Loué soit Dieu, par la grâce duquel les bonnes actions sont accomplies,
et après :*

*Je dédie ce travail à celle avec qui j'ai vu le chemin de ma vie... à la
lutte incessante... à la femme noble qui m'a appris le sens de la
persévérance, ma mère bien-aimée. Et à celui qui a donné sa vie en
sacrifice pour la vie de mon cher père... Je ne trouve pas d'expressions
qui correspondent à votre droit, que Dieu vous protège et prenne soin
de vous.*

*À mon soutien mes frères et sœurs et tous les membres de ma famille
qui avaient une préférence pour moi. Et à tous mes professeurs et
amis.*

*Et aux compagnons du chemin et aux frères des jours : Muhammad,
Abdullah, Oussama, Yahya, Rabeh, hakou .*

HAFED.

Résumé :

Le traitement du problème du coup de bélier va nous amener à approfondir notre connaissance à la gérer avec l'accroissement et la multiplication des sources d'informations et à construire une démarche efficace pour limiter ce problème qui représente un fléau pour toute installation hydraulique quelque soit les dimensions de ces installations ils seront toujours confrontés à ce phénomène transitoire. Donc le but de cette étude est de diminuer les risques de dégradation des conduites de refoulement ou le phénomène se produit avec une ampleur très grande avec ses dépressions et ses surpressions provoquant ainsi l'aplatissement ou l'éclatement et la rupture des conduites mais aussi la détérioration des appareils traversés par le liquide et d'insister sur le fait de l'importance de ces organes de protection anti-bélier qui doivent être mis dans toutes les installations hydrauliques (forages, station de pompes, stations de reprises, adduction par refoulement...) pour assurer leur protections. Il est donc capital de prévoir et d'étudier ces phénomènes transitoires afin de réduire leurs effets par l'utilisation de dispositifs spéciaux et le dimensionnement correct des différents composants d'une installation.

Abstract :

The treatment of the problem of the water hammer will lead us to deepen our knowledge to manage it with the increase and the multiplication of the sources of information and to build an effective approach to limit this problem which represents a scourge for any hydraulic installation whatever the dimensions of these installations they will always be confronted with this transitory phenomenon. So the purpose of this study is to reduce the risk of degradation of the discharge pipes where the phenomenon occurs on a very large scale with its depressions and its overpressures thus causing the flattening or the bursting and the rupture of the pipes but also the deterioration of the devices crossed by the liquid and to insist on the fact of the importance of these anti-ram protection devices which must be placed in all hydraulic installations (boreholes, pumping stations, recovery stations, adduction by repression, etc.) to ensure their protection. It is therefore essential to predict and study these transient phenomena in order to reduce their effects by the use of special devices and the correct sizing of the various components of an installation.

ملخص:

إن معالجة مشكلة المطرقة المائية ستقودنا إلى تعميق معرفتنا لإدارتها مع زيادة وتكاثر مصادر المعلومات وبناء حد مقارنة فعال لهذه المشكلة والذي يعيد الماء الذي يعيد أبعاد هذه المنشآت ستواجه دائمًا هذه الظاهرة العابرة. لذا فإن الغرض من هذه الدراسة هو تقليل مخاطر تدهور أنابيب التفريغ حيث تحدث الظاهرة على نطاق واسع جدًا مع انخفاضاتها وضغوطها الزائدة التي تتسبب في تدهور الطبائع الصناعية " للأجهزة التي يعبرها السائل والإصرار على أهمية أجهزة الحماية من المطرقة المائية التي يجب وضعها في جميع التركيبات الهيدروليكية (الآبار ، ومحطات الضخ ، ومحطات الاسترداد ، وإمدادات المياه ، وما إلى ذلك) لضمان حمايتها. لذلك من الضروري التنبؤ بهذه الظواهر العابرة ودراستها من أجل تقليل آثارها باستخدام أجهزة خاصة والتحجيم الصحيح للمكونات المختلفة للتركيب.

SOMMAIRE

Introduction générale :	1
--------------------------------------	----------

Chapitre I:Le phénomène transitoire

I.1. Introduction:.....	2
I.2. Définitions :.....	2
I.2.1. Écoulement permanent:	2
I.2.2. Écoulement non permanent :	2
I.2.3. Ecoulement uniforme :	2
I.2.4. Ecoulement non uniforme :.....	2
I.2.5. Écoulement transitoire :	3
I.2.6. Phénomène du coup de bélier:.....	3
I.2.6.a. Risques dus au phénomène du coup de bélier :.....	4
Cas de dépression :.....	6
Fatigue de la canalisation :	7
I.2.6.b. Causes du coup de bélier :.....	7
I.3. Description physique :.....	7
A- Cas gravitaire:.....	8
B - Cas de refoulement :.....	10
I-4- Conclusion :	13

Chapitre II :Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

II.1. Introduction	15
II.2. Fermeture et ouverture des vannes	15
II.2.1. Cas des conduites d'adductions gravitaires :.....	15
II.2.2.Cas des conduites d'adductions par refoulement :	16
II.3. Fermeture de vannes :.....	18
A- Cas de fermeture brusque :.....	18
B- Cas de la fermeture lente :	20
II.4. Ouverture de vanne :.....	21
II.5. Arrêt et démarrage brusque des pompes :.....	22
II.5.1. Cas de démarrage brusque de la pompe	22
II.5.2. Cas d'arrêt brusque de la pompe	22

a) Première phase du coup de bélier direct	23
b) Deuxième phase ou contre-coup	24
II.5.3. Arrêt instantané	24
II.5.4. Arrêt non instantané	26
II.6. Conclusion	27

Chapitre III :Protection des canalisations contre les variations brusques de pression

III.1. Introduction :.....	28
III.2. Protection contre la dépression (cas des volants d'inertie) :.....	28
III.3. Protection contre la surpression (cas des soupapes de décharge):	29
III.3.1. Description générale :.....	30
III.4. Protection contre la depression et la surpression :.....	33
III.4.1.Les réservoirs d'air :.....	33
III.4.2.Les ventouses (les reniflards) :	33
III.5. Cheminées d'équilibre :.....	36
III.5.2. Domaine d'application :	38
III.5.3. Types de cheminées :.....	38
A. Cheminée à étranglement :	38
B. Cheminée à épanouissement :.....	39
C. Cheminée différentielle :.....	39
D. Description technologique :.....	40
a) Les ballons à membrane ou à vessie :.....	41
b) Les ballons sans membrane :.....	41
C. Dispositifs à la base du ballon :.....	42
III.6. Avantages et inconvénients des appareils anti-bélier :	43
III.7.Exemple de cas d'étude :.....	44
III.7.1.Description générale du programme :.....	44
III.7.2.Caractéristiques D'AFT Impulse :.....	44
III.7.3.Exemple d'application:.....	45
III.7.4. Modèle d'étude :.....	46
III.7.5.Résultats :.....	63

III.8. Conclusion :.....63

Conclusion générale :..... 65

Liste des figures

Figure I.1 : Suppression au niveau des canalisations.	05
Figure I.2 : Rupture des canalisations.	06
Figure I.3 : Dépression au niveau des canalisations.	07
Figure I.4 : Schéma explicatif de la première phase (cas gravitaire)	08
Figure I.5: Schéma explicatif de la deuxième phase (cas gravitaire)	09
Figure I.6: Schéma explicatif de la troisième phase (cas gravitaire)	09
Figure I.7: Schéma explicatif de la quatrième phase (cas gravitaire).	10
Figure I.8: Temps écoulé $t=\frac{L}{a}$	11
Figure I.9: Temps écoulé $t=\frac{2L}{a}$	12
Figure I.10: Temps écoulé $t=\frac{3L}{a}$	12
Figure I.11: Temps écoulé $t=\frac{4L}{a}$	13
Figure II.1 : Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite gravitaire libre.	16
II.2 : Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (H,Q) dans une conduite de refoulement libre	17
Figure II-3: Cas de la fermeture brusque	18
Figure II-4 : Caractéristique de la fermeture brusque	18
Figure II-5 : Cas de la fermeture lente	20
Figure II.6 : Répartition du coup de bélier : Arrêt brusque	25
Figure II-7 : Répartition du coup de bélier, arrêt non instantanée	26
Figure III-1 : Volant d'inertie.	28
Figure III-2 : Concentration de la masse du Volant d'inertie.	29
Figure III-3 : Soupape de décharge.	29
Figure III -4 : Fonctionnement d'une soupape de décharge.	30
Figure III-5 : Soupapes de décharge Ramus.	31
Figure III-6 : Schémas de principe des soupapes pilotées.	32
Figure III-7: Réservoir d'air.	33
Figure III-8 : Ventouse à trois fonctions.	34

Figure III-9 : Ventouse fonctions unique.	34
Figure III-10 : Schémas d'un réservoir d'air.	35
Figure III-11 : Réservoirs d'air.	35
Fig. III-2 : Cheminée d'équilibre de St-Alban Montevideo, Uruguay.	37
Fig.III-3 : Cheminée d'équilibre à Québec.	37
Figure III-14 : Cheminée à étranglement.	39
Figure III-15 :Cheminée à épanouissement.	39
Figure III-16 : Cheminée différentielle.	40
Figure III-17 :Coupe type de cheminée.	40
Fig.III-18 : Schémas de principe des ballons anti-bélier.	41
Fig.III-19 : Organes dissymétriques à la base des ballons anti-bélier.	42
Fig. III-20 : Schéma de l'exemple dans AFT Impulse.	45
Fig. III-21 :Variation de la hauteur dans le réservoir.	46
Fig. III-22 : Variation de la hauteur au point médian.	47
Fig. III-25 : Variation du débit au point médian.	48
Fig. III-26 : Variation du débit a la vanne.	48
Fig. III-27 : Courbe caractéristique de la vanne.	48
Fig.III-28 : Schéma du modèle dans AFT Impulse.	49
Fig III-29 :Variation de la pression statique à la 1ere section de la conduite 1.	50
Fig. III-30 :Variation de la pression statique au point médian 4 de la conduite 1.	51
Fig. III-31 :Variation de la pression statique à la dernière section 9 de la conduite 1	51
Fig. III-32 :Variation de la pression statique à la 1ere section de la conduite 2	52
Fig. III-33 :Variation de la pression statique au point médian 5 de la conduite 2	52
Fig. III-34 :Variation de la pression statique à la dernière section de la conduite 2	53
Fig. III-35 :Variation de la pression statique au début de la conduite 3.	53
Fig. III-36 :Variation de la pression statique à la fin de la conduite 3	54
Fig. III-37 :Variation de la pression statique au début de la conduite 4	54

Fig.III-38: Variation de la pression statique au point médian 3 de la conduite 4	55
Fig.III-39: Variation de la pression statique à la dernière section de la conduite 4	55
Fig.III-40: Variation du Débit à la 1ere section de la conduite 1	56
Fig.III-41: Variation du Débit à la dernière section 9 de la conduite 1	56
Fig.III-42: Variation du Débit au début de la conduite 2	57
Fig.III-43: Variation du Débit à la dernière section 11 de la conduite 2	57
Fig.III-44: Variation du Débit à la 1ere section de la conduite 3	58
Fig.III-45: Variation du Débit à la dernière section 3 de la conduite 3	58
Fig.III-46: Variation du Débit au début de la conduite 4	59
Fig.III-47: Variation du Débit au point médian 2 de la conduite 4	59
Fig.III-48: Variation du Débit à la fin de la conduite 4	60
Fig.III-50: Variation (max/min) de la pression statique le long des conduites 1-3- 4.	61
Fig.III-51: Variation (max/min) de la pression statique le long des conduites 2-3- 4.	61

Liste Des Tableaux

Tableau III-1 : Avantages et inconvénients des appareils anti-bélier	43
Tableau III-2 : Cv/Temps de la vanne.	46
Tableau.III-3 : CV / temps de la vanne	50

Introduction générale :

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

Le fait de mettre en marche une pompe crée une sensible variation de pression dans les tuyauteries auxquelles elle est reliée. Il s'agit en effet d'y mettre en mouvement une masse d'eau jusqu'alors au repos et de lui communiquer par la roue de la pompe une vitesse de régime appréciable. Or cette masse ne saurait passer du repos à la vitesse moyenne d'écoulement sans traverser un régime oscillatoire de transition dont l'ensemble constitue précisément « le phénomène du coup de bélier ».

On entend par le terme « coup de bélier » une série d'ondes de pression positive ou négative provoquée par la variation brusque du régime d'écoulement et se propageant dans le milieu constitué par l'eau et la conduite qui le contient et s'amortissant progressivement en raison des pertes d'énergie dues aux forces de frottement. Cette onde est caractérisée par une vitesse de propagation ou célérité.

Ainsi toute phase d'opération produisant des modifications de la pression dynamique du fluide peut présenter un risque de « coup de bélier » qui est susceptible d'entraîner des ruptures de tuyaux, et destruction des appareils de pompage, les causes les plus fréquentes sont :

- ❖ Démarrage d'une pompe
- ❖ Arrêt de la pompe
- ❖ Modification de position de vanne
- ❖ Changement de vitesse
- ❖ Panne d'alimentation d'énergie.
- ❖ Opérations incontrôlées.

Hormis les deux derniers cas. Les autres opérations sont des actions délibérées qui peuvent être accomplies sans risques. Par contre les pannes d'énergie ou opérations incontrôlées représentent des cas extrêmes qui doivent être pris en compte par des dispositifs supplémentaires adéquats. C'est pourquoi il est primordial d'étudier ce phénomène avec plus de précision et les moyens propres à limiter ses effets.

Notre travail est divisé en 3 étapes avec un 1^{er} chapitre qui renferme deux parties : dans la première, nous donnons une description physique du phénomène de coup de bélier qui est une phase prononcée du régime transitoire, et dans la seconde partie, nous présentons les équations mathématiques permettant la détermination de la variation de pression et de vitesse qui résulte d'un régime transitoire. L'étude des écoulements non stationnaires a pour intérêt la mise en place de solutions afin de minimiser les dommages qui leur sont liés.

Ensuite avec le 2^{ème} chapitre on va se focaliser 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^{ème} et dernier chapitre on va exposer les appareils anti-bélier qui devront avoir essentiellement pour effet de limiter la surpression et la dépression et même les deux dans certains cas. Les principaux types de protection anti-bélier sont expliqués citant leurs avantages et leurs inconvénients.

Chapitre I:

Le phénomène transitoire.

Chapitre I:Le phénomène transitoire.

I.1. Introduction:

Ce premier chapitre renferme deux parties : dans la première, nous donnons une description physique du phénomène de coup de bélier qui est une phase prononcée du régime transitoire, et dans la seconde partie, nous présentons les équations mathématiques permettant la détermination de la variation de pression et de vitesse qui résulte d'un régime transitoire. L'étude des écoulements non stationnaires a pour intérêt la mise en place de solutions afin de minimiser les dommages qui leur sont liés [1].

I.2. Définitions :

I.2.1. Écoulement 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 :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0; \frac{\partial P}{\partial t} = 0; \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

V : vitesse d'écoulement,

P : la pression,

ρ : Masse volumique.

I.2.2. Écoulement non permanent :

L'écoulement du liquide est dit non permanent si la vitesse et la pression varient dans le temps (t) en un point donné de l'espace (x) rempli de liquide en mouvement, les vitesses et les pressions en écoulement non permanent sont en fonction 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.

I.2.3. Ecoulement uniforme :

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

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{X}} = \mathbf{0}$$

I.2.4. 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:

Chapitre I:Le phénomène transitoire.

$$\frac{\partial V}{\partial X} \neq 0$$

I.2.5. Écoulement transitoire :

L'écoulement est dit transitoire lorsque les paramètres hydrauliques à savoir : la vitesse et la pression et les propriétés du fluide sont des fonctions du temps et de l'espace, $U=f(x,y,z,t)$ et $p=f(x,y,z,t)$.

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

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 :

- 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 allons nous intéresser beaucoup plus sur le phénomène du coup de bélier [2][7][8].

I.2.6. Phénomène du coup de bélier:

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.

Chapitre I:Le phénomène transitoire.

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 [2][7][8].

I.2.6.a. Risques dus au phénomène du coup de bélier :

Les conséquences du coup de bélier peuvent être néfastes elles deviennent de plus en plus dangereuses à mesure que les paramètres modificateurs deviennent importants (variation de pressions et de débits dans le temps).

Ces phénomènes se produisant dans une conduite en charge peuvent provoquer des risques à la suite d'une dépression ou surpression engendrée par des manœuvres brusques ou instantanées [2].

Cas de suppression :

La surpression est une conséquence du coup de bélier engendrée par une pression importante se produisant à la suite d'une fermeture instantanée ou rapide d'une vanne de sectionnement ou bien à la suite d'une dépression causée par l'arrêt brusque d'une pompe. Si la pression totale c'est-à-dire la pression en régime permanent majorée de la valeur de surpression due au coup de bélier qui dépasse la pression maximale admissible des tuyaux, ce qui engendre des risques de rupture de ces derniers et des déboîtements des joints (les anneaux d'étanchéité seront délogés)[8].



Chapitre I:Le phénomène transitoire.

Figure I.1 : Surpression au niveau des canalisations.

La source : Google 2022.

En plus de ces risques, l'onde de surpression peut porter des préjudices aux autres équipements.

- ✓ Rupture des réservoirs ou flexible.
- ✓ 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.

La photo représentée sur la figure (I.1) montre la détérioration des joints d'expansion suite à un aigu coup de bélier..



Chapitre I:Le phénomène transitoire.

Figure I.2 : Rupture des canalisations.

La source : Google 2022

Cas de dépression :

C'est également une conséquence du coup de bélier engendrée par l'apparition d'une pression relative négative, à la suite d'un arrêt brusque d'une pompe ou d'une ouverture instantanée d'une vanne de sectionnement. Si cette pression devient inférieure à 10 m.c.e Il se produit une poche de cavitation. Si le profil en long de la canalisation est déformable la canalisation peut être aplatie par implosion et les joints peuvent être aspirés. Le phénomène de cavitation une fois apparu peut aussi provoquer la détérioration de la couche d'enduit intérieur du tuyau [2][7][8].



Chapitre I:Le phénomène transitoire.

Figure I.3 : Dépression au niveau des canalisations.

La source : Google 2022

Fatigue de la canalisation :

En régime transitoire les alternances de surpression et de dépression qui sont une conséquence inévitable du phénomène provoquant la fatigue pour le matériau de la canalisation même si leur amplitude est faible [2].

I.2.6.b. Causes du coup de bélier :

Le coup de bélier est un phénomène oscillatoire dont les causes les plus fréquentes sont les suivantes [2]:

- L'ouverture ou la fermeture des vannes dans les conduites en charge à écoulement gravitaire.
- La mise en Marche ou l'arrêt des pompes dans les conduites en charge par refoulement.
- Le remplissage ou la vidange d'un système d'AEP.
- Modification de la vitesse d'une pompe.
- Une variation du niveau d'un réservoir à une extrémité du réseau.
- La disparition de l'alimentation électrique dans une station de pompage qui est la cause la plus répandue du coup de bélier.
- La mise en marche ou la modification de l'opération d'une turbine.
- Une modification de position de vanne.
- Des opérations incontrôlées.

I.3. Description physique :

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 :

$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial P}{\partial X} \neq 0; \frac{\partial V}{\partial X} \neq 0$$

Chapitre I:Le phénomène transitoire.

Il peut se produire soit dans un canal à ciel ouvert, soit dans une conduite à écoulement en charge par accroissement ou décroissement du débit. L'écoulement du liquide s'appelle non permanent si la vitesse et la pression varient dans le temps t en point donné de l'espace rempli de liquide en mouvement. Les vitesses et les pressions en mouvement non permanent sont les fonctions de quatre variables indépendantes ; coordonnées x, y, z du point examiné et le temps t .

On distingue un écoulement non permanent en charge et à surface libre, un écoulement non permanent unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel. Un exemple de l'écoulement non permanent unidimensionnel en charge du liquide est un écoulement non permanent apparaissant par suite de la variation du régime de service des dispositifs régulateurs installés sur les tuyauteries. Un cas particulier d'un tel écoulement est désigné par le terme « coup de bélier » que nous définirons en détail [8][6].

A- Cas gravitaire:

Phase1 :

La vanne est fermée instantanément, elle forme un obstacle infranchissable. L'énergie cinétique des particules liquides qui sont proche de la vanne est transformée en énergie potentielle qui affecte la compressibilité du liquide et la dilatation de la conduite. Dans cette phase une onde de surpression se produit au niveau de la vanne et se propage vers le réservoir, à $t = \frac{L}{a}$ cette onde arrive au réservoir [1][9] .

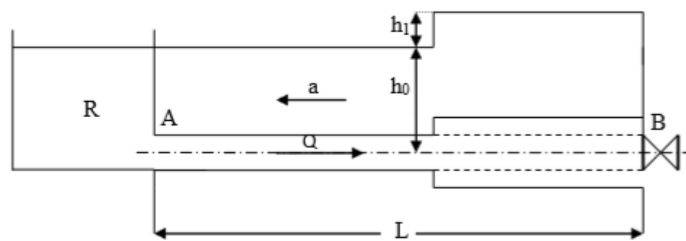


Figure I.4 : Schéma explicatif de la première phase (cas gravitaire)[9] [1].

Phase 02 :

Au début de cette phase, la pression dans la conduite est très élevée comparée à la pression initiale, l'onde de surpression se dissipe au niveau du réservoir et une nouvelle onde d'équilibre se propage

Chapitre I:Le phénomène transitoire.

du réservoir vers la vanne et donc le diamètre reprend sa valeur initiale. À la fin de cette phase, la pression dans la conduite est égale à la valeur initiale [1].

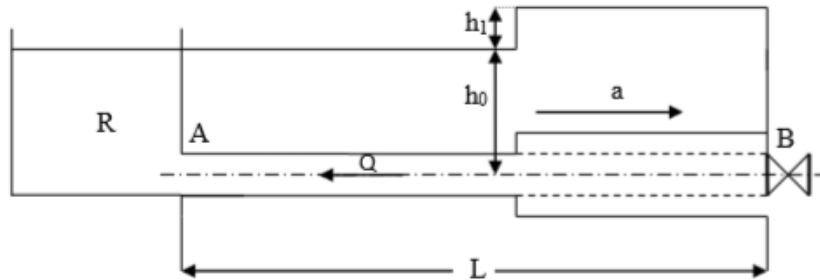


Figure I.5: Schéma explicatif de la deuxième phase (cas gravitaire)[1].

Phase 03 :

La vitesse au niveau de la vanne s'annule, une onde de dépression remonte de la vanne vers le réservoir, et la masse volumique du liquide et le diamètre de la conduite diminuent[9] [1].

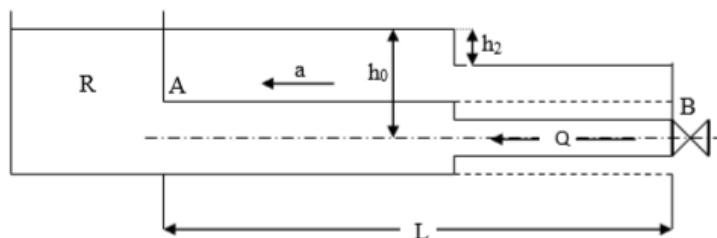


Figure I.6: Schéma explicatif de la troisième phase (cas gravitaire)[1].

Phase 04 :

Chapitre I:Le phénomène transitoire.

Une onde positive se dirige du réservoir vers la vanne et la conduite reprend ses caractéristiques initiales. A l'instant $t = 4\frac{L}{a}$, cette onde positive arrive à la vanne, on retrouve les conditions de l'écoulement permanent sauf que la vitesse de l'eau est moindre que la vitesse initiale, ceci résulte des pertes d'énergie dues aux frottements ainsi qu'au travail de déformation[9] [1].

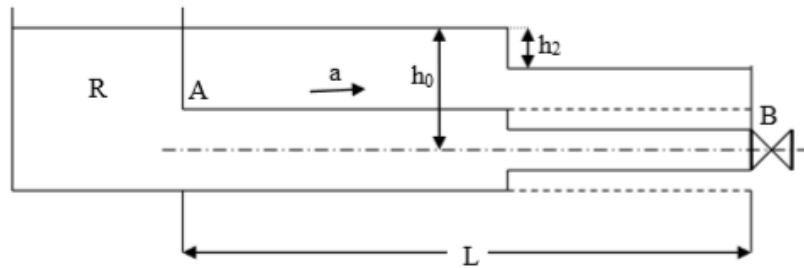


Figure I.7: Schéma explicatif de la quatrième phase (cas gravitaire)[1].

B - Cas de refoulement :

Considérons donc un système, analogue à une situation de refoulement, où l'eau coule à une vitesse v_0 pour alimenter un réservoir dont le niveau est gardé constant. Le phénomène peut être décrit en quatre phases [3].

Avec:

(L) : La longueur de la conduite.

(a): la célérité de l'onde de déformation.

(v):La vitesse d'écoulement à l'instant t.

(v_0): La vitesse initiale.

(P): Pompe.

Phase1:

Au temps $t = 0$, le débit à travers la pompe est brusquement interrompu. La vanne clapet située à l'amont du système est fermée, immédiatement et à proximité de la vanne, la vitesse d'écoulement s'annule, donc l'énergie cinétique fait de même et doit être compensée par un gain d'énergie

Chapitre I:Le phénomène transitoire.

potentielle sous forme d'une dépression puisque le mouvement initial de l'eau a tendance à tirer sur la partie de la colonne d'eau qui est immobile. Cette énergie de dépression se traduit mécaniquement par une énergie de déformation qui tend à réduire le diamètre de la conduite. Ce phénomène se poursuit jusqu'à ce que toute la conduite soit mise en compression, ce qui prend un temps égal au rapport de la longueur 'L' sur la célérité de l'onde de déformation «a» [3].

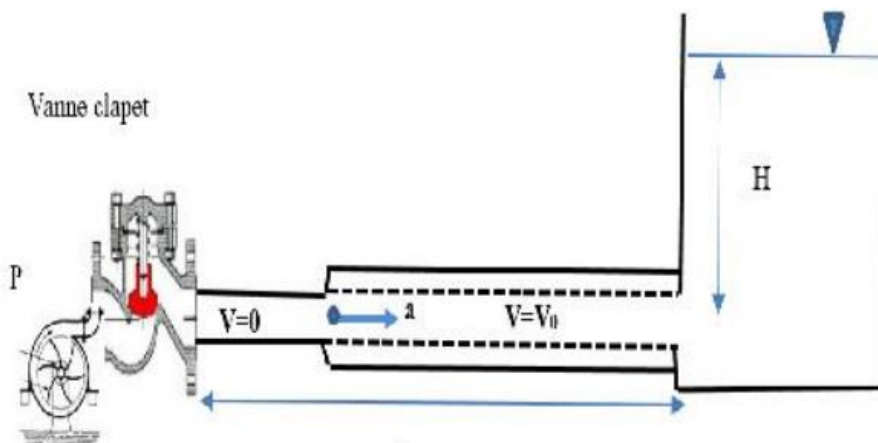
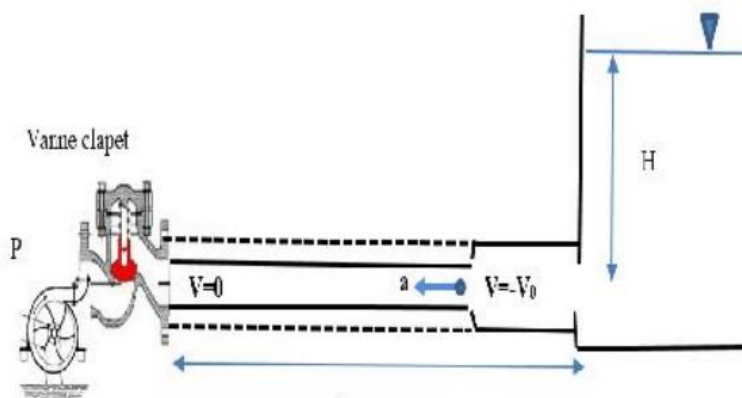


Figure I.8: Temps écoulé $t = \frac{L}{a}$ [3].

Phase2:

Lorsque l'onde de dépression atteint le réservoir, celle-ci se dissipe puisqu'il règne à cet endroit une pression constante, à ce moment précis, plus rien ne retient la mise en compression de conduite et elle commence à prendre sa forme à proximité du réservoir, l'augmentation du volume ainsi créée, entraîne le remplissage de la conduite à une vitesse équivalente à la vitesse initial du fluide puisque la déformation initial de la conduite est directement liée à cette dernière, ce phénomène a la même durée que

celle de l'étape précédente [3].



Chapitre I:Le phénomène transitoire.

Figure I.9: Temps écoulé $t = \frac{2L}{a}$ [3].

Phase3:

Au moment où toute la conduite a repris sa forme, la vitesse de l'eau doit s'annuler en frappant la vanne fermée, encore une fois, on doit avoir transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle par contre cette fois, l'énergie de pression est positive ; cette surpression met en tension la Conduite qui se dilate, la vitesse de l'onde de déformation « a » étant Constante, la durée de cette étape est identique à celle des précédentes [3].

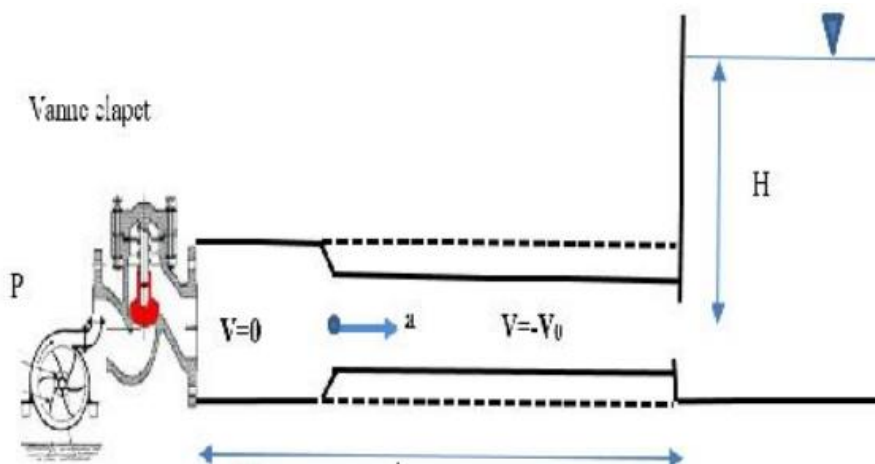


Figure I.10: Temps écoulé $t = \frac{3L}{a}$ [3].

Phase4:

Le surplus d'eau dû à l'augmentation du volume de la conduite commence à s'évacuer près du réservoir à une vitesse « 0 v » de façon à ce que la conduite reprenne son diamètre initial. À la fin de cette étape, toute la conduite aura retrouvé les conditions initiales et l'étape 1 pourra

Chapitre I:Le phénomène transitoire.

recommencer. Ce cycle de période $T = 4L/C$ se répéterait indéfiniment, s'il n'y avait pas de frottement. Les effets du frottement agissent essentiellement sur l'amortissement de l'amplitude de la variation de pression [3].

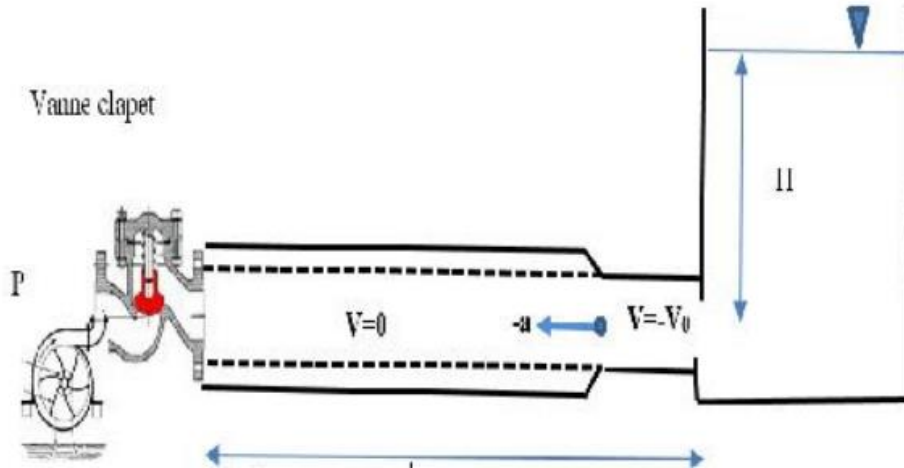


Figure I.11: Temps écoulé $t = \frac{4L}{a}$ [3].

I-4- Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons vu comment évolue un régime transitoire dans les conduites en charge après une manœuvre de vanne et de pompe, ainsi qu'une description sur l'analyse physique du phénomène du coup de bélier. On peut dire qu'un coup de bélier commençant par l'évolution de la pression est appelé coup de bélier positif et celui qui commence par une dépression est appelé coup de bélier négatif. Dans le chapitre qui suit on va voir en détails les causes les plus fréquents provoquant ce phénomène transitoire.

Chapitre II :

**Les causes principales provoquant le phénomène
transitoire**

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

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

II.2.1. Cas des conduites d'adductions gravitaires :

Dans le système d'adduction gravitaire, la conduite reliant entre le réservoir et la vanne véhicule un débit Q_0 dans le sens positif (du réservoir à la vanne), on ferme la vanne à l'instant $t=0$.

A l'instant $t=0$, l'onde de surpression se produit et part de la vanne suivant le sens négatif, elle atteindra le réservoir à l'instant $t = \frac{L}{a}$, parcourant le chemin reliant entre la vanne et le réservoir.

Si on traduit cette information dans le plan (x, t) , c'est la droite passant par les points $(V,0)$ et $(R, \frac{L}{a})$ suivant l'équation linéaire $x - x_0 = -a.(t - t_0)$.

Puis à l'instant $t = \frac{L}{a}$, l'onde d'équilibre part du réservoir vers la vanne au sens positif suivant le chemin qui relie entre les deux suivant l'équation $x - x_0 = -a.(t - t_0)$, elle atteindra la vanne à l'instant $t = 2\frac{L}{a}$.

Avec le même principe, on présente toutes les phases du phénomène dans le plan (x, t) . Concernant la présentation dans le plan (h,Q) , à $t = -\frac{L}{a}$, le régime dans la conduite relie le réservoir et la vanne est permanent, la charge piézométrique au niveau du réservoir est H_0 et le débit transporté est Q_0 à $t=0$ le débit s'annule et la charge augmente, mais nous avons montré précédemment que $h \pm \frac{a}{g.S} . Q$ est constant, donc on trace la droite de la pente $\frac{a}{g.S}$ qui passe par les points (h_0, Q_0) pour $(R, -\frac{L}{a})$ et $(h_1, 0)$ pour $(V, 0)$ [9] [1].

Nous avons $h_0 + \frac{a}{g.S} Q_0 = h_1 + \frac{a}{g.S} Q_0 = h_1$ ça veut dire que à l'instant $t=0$, l'annulation du débit génère une augmentation de pression d'une valeur de $\frac{a}{g.S} Q_0$ Avec se principe on trace toutes les droites qui présente le phénomène dans le plan (h,Q) . La présentation des équations aux caractéristiques est la suivante [9] [1]:

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

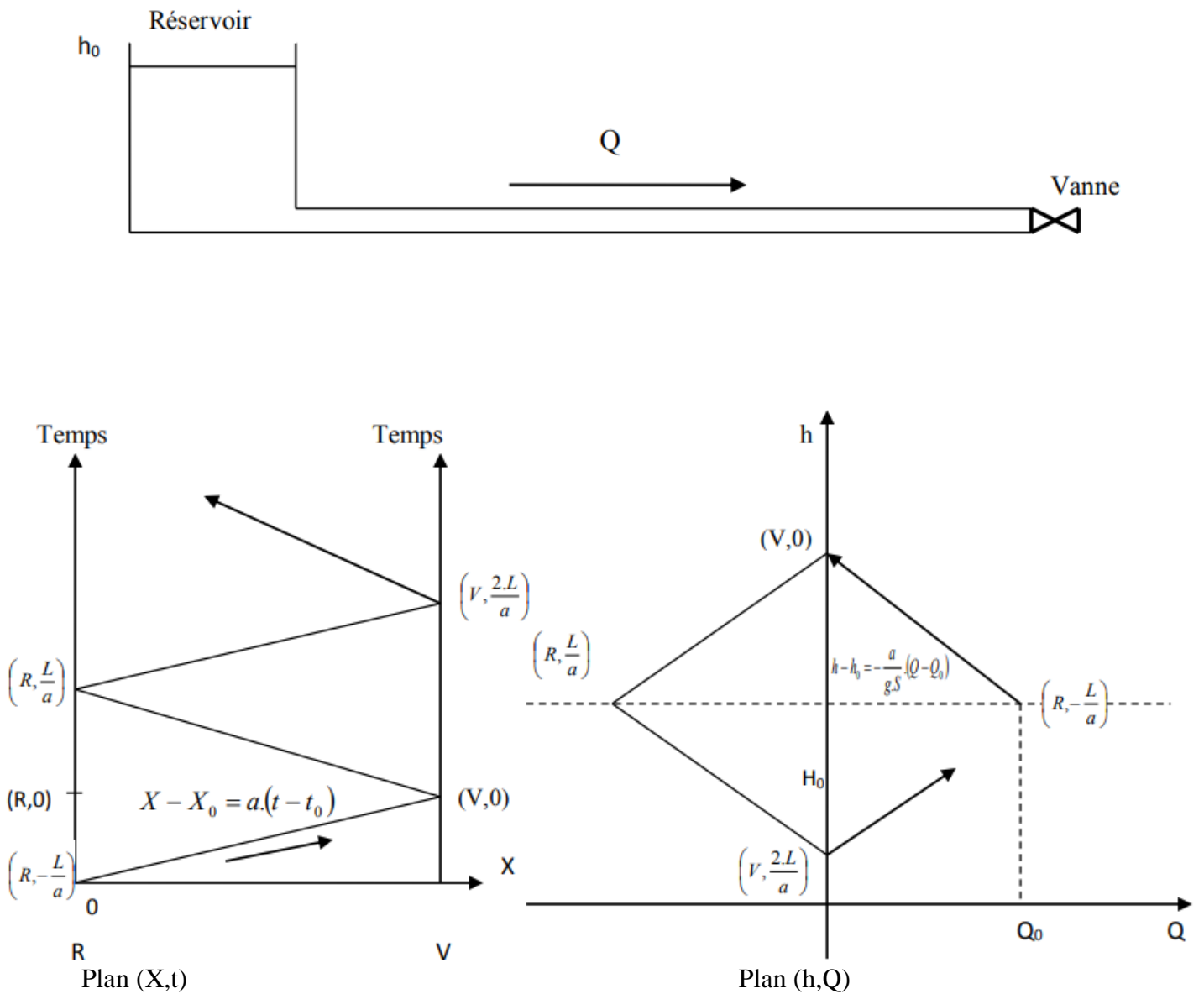


Figure II.1 : Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (h,Q) dans une conduite gravitaire libre[1].

II.2.2.Cas des conduites d'adductions par refoulement :

Concernant la présentation du coup de bélier dans le cas de refoulement dans le plan (x, t) , le principe est le même que pour le cas gravitaire sauf qu'au début il y a apparition d'une dépression [1][9].

Pour la présentation du phénomène sur le plan (h, Q) , on suit les mêmes étapes que le cas gravitaire.

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

A $t=0$, la pompe s'arrête, $-\frac{a}{g.S}Q_0$ l'onde de dépression se propage vers le réservoir, $h_0 - \frac{a}{g.S}Q_0 = h_1$, la dépression qui se produit est $-\frac{a}{g.S}Q_0$, on trace la droite de la pente $-\frac{a}{g.S}$ passant par les point $(P,0)$ et $(R, \frac{L}{a})$

La représentation des équations aux caractéristiques pour le cas de refoulement donne [1] :

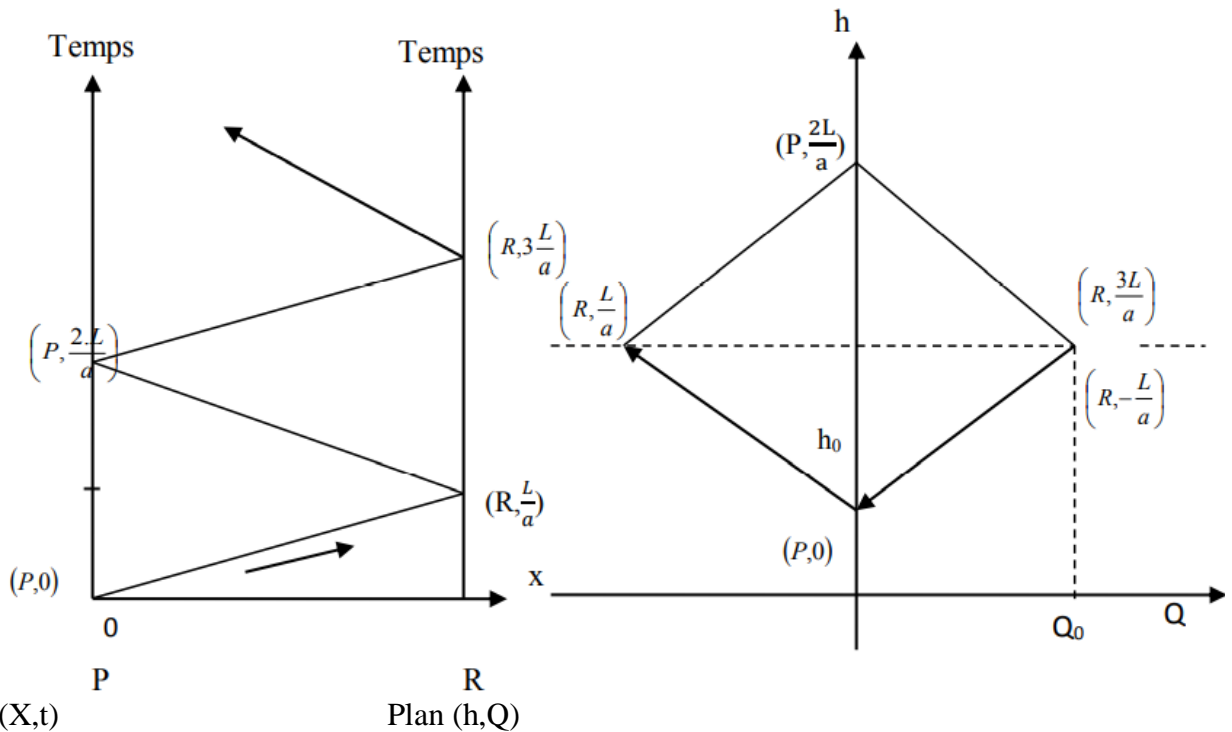
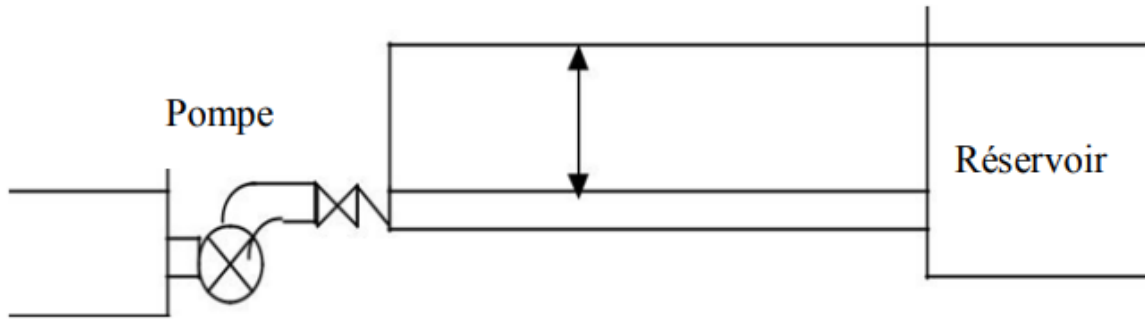


Figure II.2 : Déplacement d'une onde dans un plan (X,t) et dans un plan (H,Q) dans une conduite de refoulement libre[1].

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

II.3. Fermeture de vannes :

A- Cas de fermeture brusque :

Considérons une conduite issue d'un réservoir et comportant un robinet en A. soit L la longueur de la conduite [4].

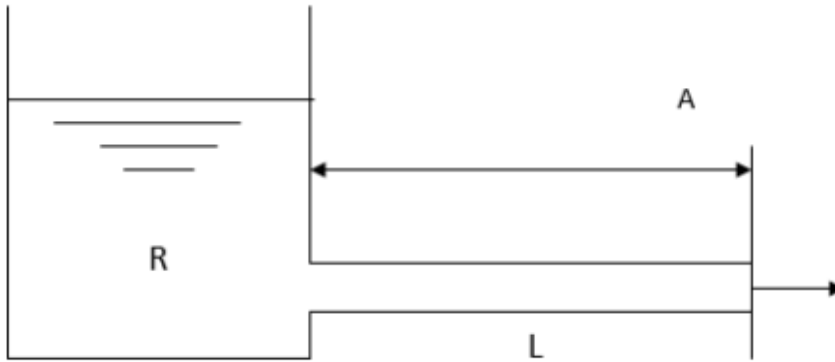


Figure II-3: Cas de la fermeture brusque[4].

Prenons comme unité de temps la valeur aL , a étant la célérité des ondes, aL 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 $0+$ 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 (figureII-4)[4][10].

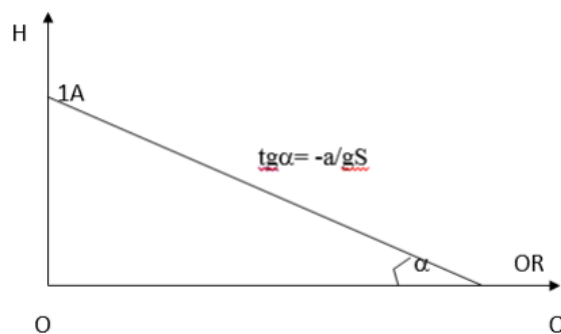


Figure II-4 : Caractéristique de la fermeture brusque [4].

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

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

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

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

Le point figuratif du régime au temps 1 sera en conséquence donné par l'intersection des deux caractéristiques et on aura[4] :

$$OH = Q_0.tg\alpha$$

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

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

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

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

Etant au-dessus de OQ, le point H correspond à une surpression. La valeur maximale du coup de bélier peut donc atteindre [4] [10].

$$H = \frac{aV_0}{g}$$

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 [4].

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

B- 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-5). En conséquence, la valeur de la surpression sera d'après (II.1) $b = \frac{a}{gS}(Q_0 - q)$ [5].

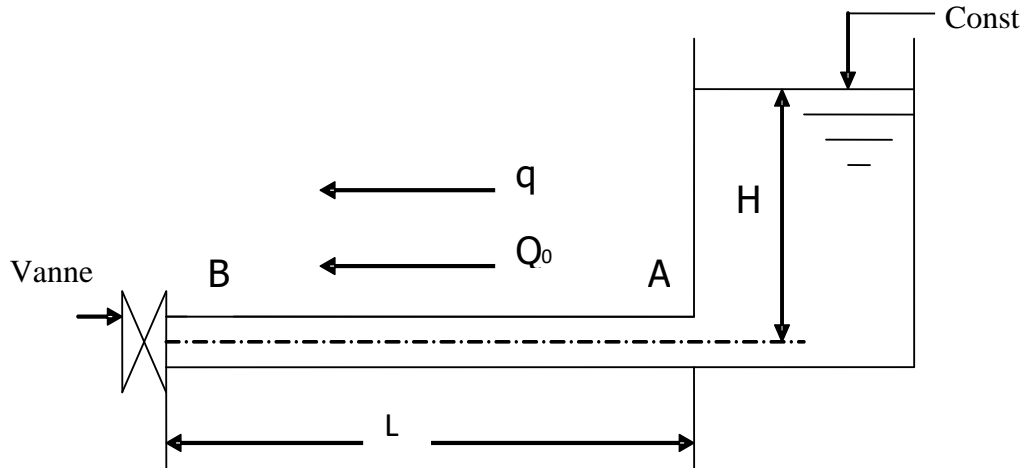


Figure II-5 : Cas de la fermeture lente [5].

Supposons que le temps de fermeture soit $T = n \frac{2L}{a}$ et que, pendant ce temps, le débit varie linéairement. Nous aurons[5][11] :

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

On en déduit :

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

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

Ou, puisque $Q_0 = SV_0$:

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

C'est la formule dite de MICHAUD.

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

Remarquons que si, dans cette formule, on fait $t = \frac{2L}{a}$, on retrouve la valeur du coup de bélier par fermeture brusque[5].

En conclusion :

Si $t \leq \frac{2L}{a}$, le coup de bélier a pour valeur maximale $B = \frac{aV_o}{g}$.

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

Ceci montre l'intérêt :

Pour les conduites d'adduction, d'adopter des robinets à fermeture lente, pour tomber dans le cas de la formule de MICHAUD [4].

Pour les conduites de refoulement, de connaître le temps mis par un groupe pour s'arrêter et qui devra, si possible, être supérieur à $\frac{2L}{a}$ [4].

II.4. Ouverture de vanne :

L'étude des ouvertures brusques ou lentes s'effectue de la même façon que celle de la fermeture toute fois dans le cas d'une fermeture brusque la surpression maximale est limitée ; Au contraire, dans le cas d'une ouverture, la dépression produite entraîne un ralentissement de l'écoulement, à la limite cette dépression ne peut dépasser y_0 en valeur absolue car pour cette valeur, la pression à la vanne devenant égale à la pression atmosphérique, l'écoulement s'arrêterait et tout se passerait comme si la conduite n'était pas ouverte. Alors que la surpression consécutive à une fermeture brusque n'est limitée que par la valeur initiale de V_0 la dépression consécutive à une ouverture ne peut dépasser y_0 [6].

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

II.5. Arrêt et démarrage brusque des pompes :

II.5.1. Cas de démarrage brusque de la pompe :

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 [4][12].

II.5.2. Cas d'arrêt brusque de la pompe :

Considérons donc un système, analogue à une situation de refoulement, où l'eau coule à une vitesse V_0 pour alimenter un réservoir dont le niveau est gardé constant. Le phénomène, peut être décrit en quatre phases [5].

- 1) Au temps $t = 0$, le débit à travers la pompe est brusquement interrompu. La vanne clapet située à l'amont du système est fermée, immédiatement et à proximité de la vanne, la vitesse d'écoulement s'annule, donc l'énergie cinétique fait de même et doit être compensée par un gain d'énergie potentielle sous forme d'une dépression puisque le mouvement initial de l'eau a tendance à tirer sur la partie de la colonne d'eau qui est immobile. Cette énergie de dépression se traduit mécaniquement par une énergie de déformation qui tend à réduire le diamètre de la conduite. Ce phénomène se poursuit jusqu'à ce que toute la conduite soit mise en compression, ce qui prend un temps égal au rapport de la longueur 'L' sur la célérité de l'onde de déformation 'a'.
- 2) Lorsque que l'onde de dépression atteint le réservoir, celle-ci se dissipe puisqu'il règne à cet endroit une pression constante. À ce moment précis, plus rien ne retient la mise en compression de la conduite et elle commence à reprendre sa forme à proximité du réservoir. L'augmentation de volume ainsi créé, entraîne le remplissage de la conduite à une vitesse équivalente à la vitesse initiale du fluide puisque la déformation initiale de la conduite est directement liée à cette dernière. Ce phénomène a la même durée que celle de l'étape précédente.

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

- 3) Au moment où toute la conduite a repris sa forme, la vitesse de l'eau doit s'annuler en frappant la vanne fermée. Encore une fois, on doit avoir transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle par contre, cette fois, l'énergie de pression est positive puisque l'inertie de l'eau tend à comprimer la partie immobile de la colonne d'eau. Cette surpression met en tension la conduite qui se dilate. La vitesse de l'onde de déformation 'a' étant constante, la durée de cette étape est identique à celle des précédentes.
- 4) Le surplus d'eau dû à l'augmentation du volume de la conduite commence à s'évacuer près du réservoir à une vitesse V_0 de façon à ce que la conduite reprenne son diamètre initial. À la fin de cette étape, toute la conduite aura retrouvé les conditions initiales et l'étape 1 pourra recommencer. Ce cycle de période $T = 4L/a$ se répéterait indéfiniment, s'il n'y avait pas de frottement. Les effets du frottement agissent essentiellement sur l'amortissement de l'amplitude de la variation de pression.

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.

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 [12] [4].

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

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[4].

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 [4].

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)[13][4].

II.5.3. 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 :

$$\Delta H = -\frac{a}{g}(V_0 - V)$$

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 :

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

$$\Delta H = -\frac{a}{g}V_0$$

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[4].

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 [4].

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.

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[4].

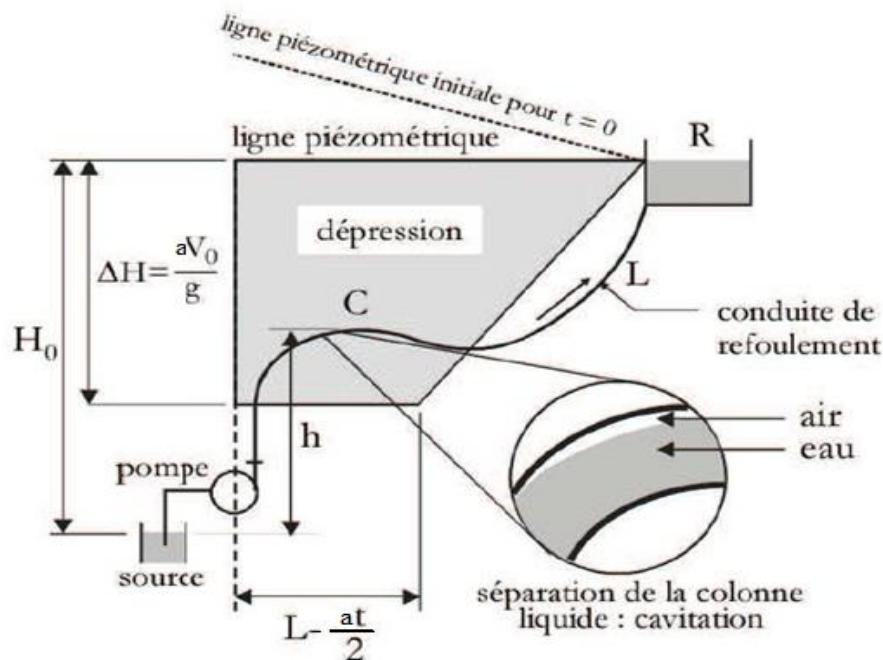


Figure II.6 : Répartition du coup de bélier : Arrêt brusque[4].

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

II.5.4. 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[4].

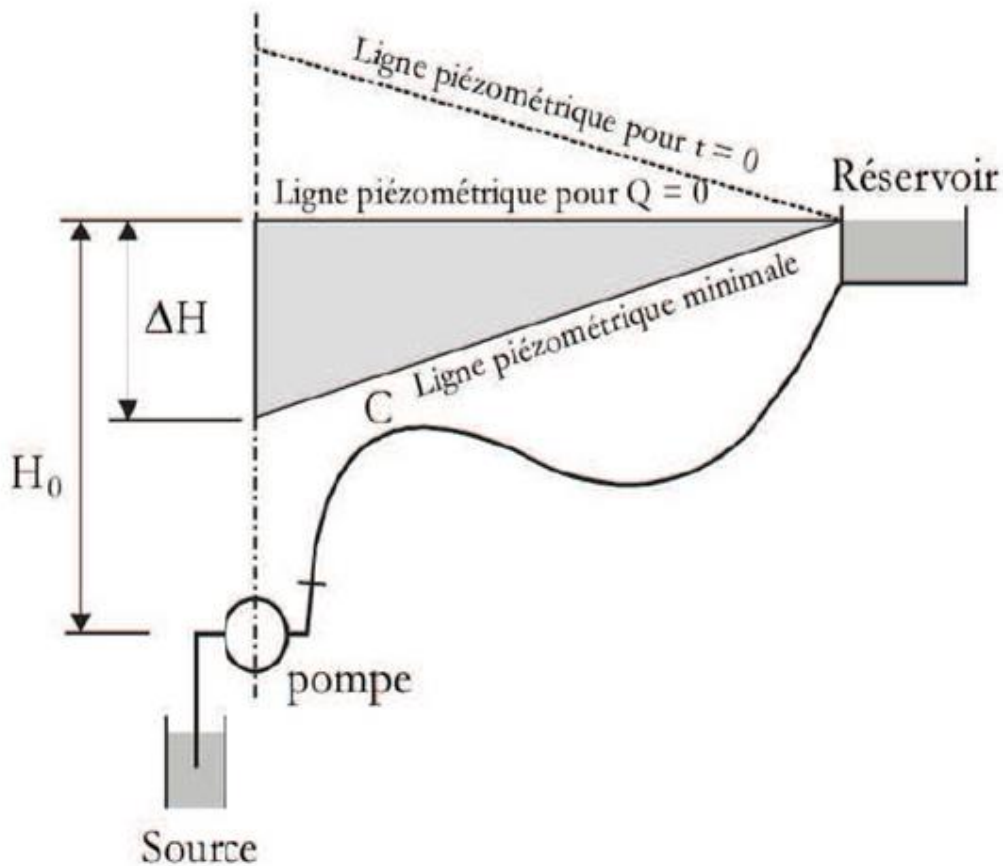


Figure II-7 : Répartition du coup de bélier, arrêt non instantané[13] [4].

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[13][4].

Chapitre II : Les causes principales provoquant le phénomène transitoire.

II.6. 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 amplitude 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 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 .

Chapitre III :

Protection des canalisations contre les variations brusques de pression

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

III.1. Introduction :

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

III.2. Protection contre la dépression (cas des volants d'inertie) :

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

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

Ce procédé est finalement utilisé pour la protection des conduites à longueurs de refoulement faibles ou moyennes et qui n'excèdent pas quelques centaines de mètres[6].

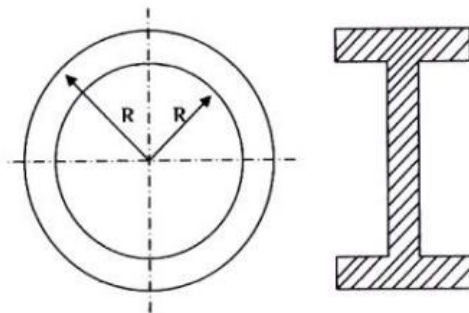


Figure III-1 : Volant d'inertie.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

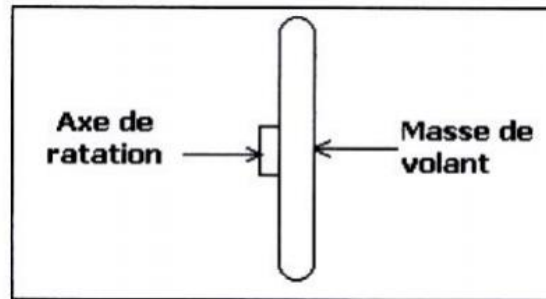


Figure III-2 : Concentration de la masse du Volant d'inertie.

III.3. Protection contre la surpression (cas des soupapes de décharge):

Le rôle d'une soupape (Figures III-3 et III-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 [6].

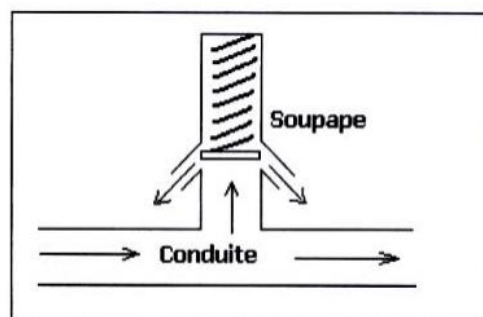


Figure III-3 : Soupape de décharge.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

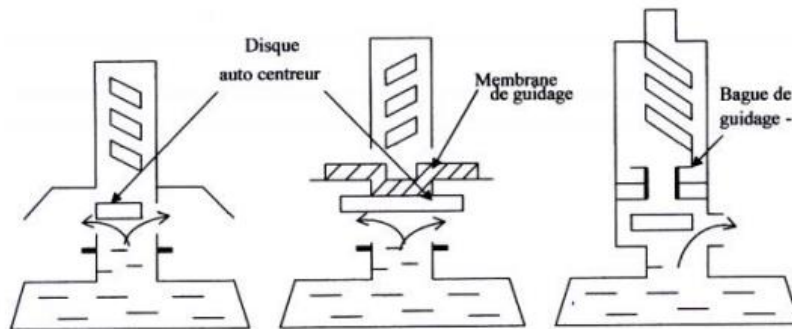


Figure III -4 : Fonctionnement d'une soupape de décharge.

III.3.1. 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[14][4].

Généralement, chez les constructeurs, deux systèmes sont utilisés pour assurer la fermeture de la soupape jusqu'à la pression de consigne [8][4] :

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

- 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-4.

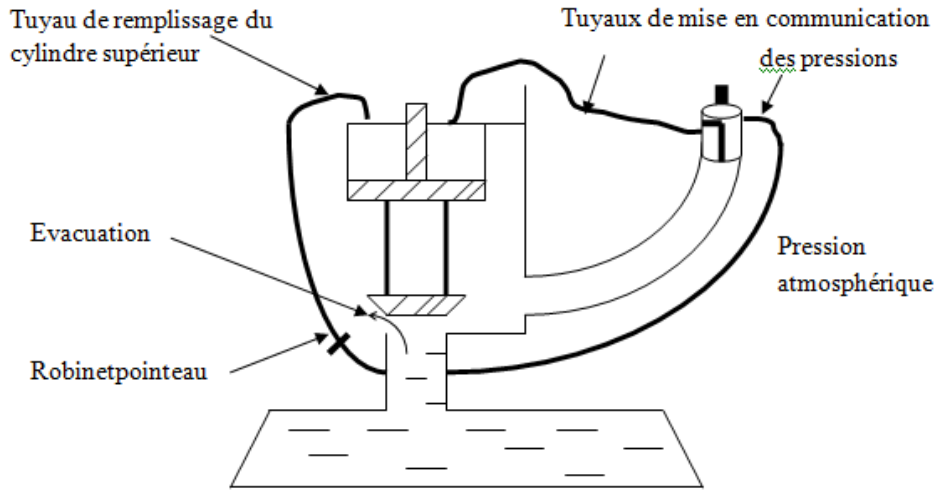
La seule différence de conception entre ces trois constructeurs, réside dans le dispositif de centrage du clapet : disque centré hydrauliquement pour Neyrtec et Bayard avec en plus une membrane de guidage pour Bayard et une bague de guidage pour Ramus.



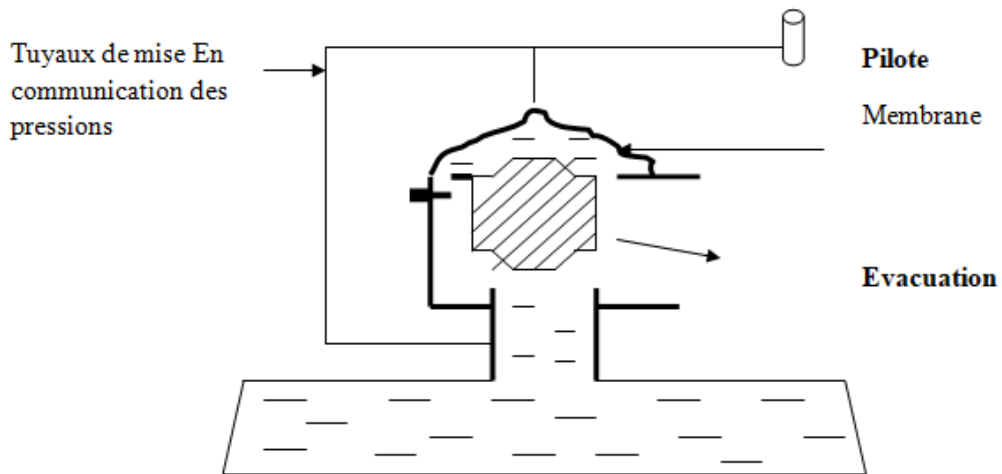
Figure III-5 : Soupapes de décharge Ramus.

- 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.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.



LEZIER



CLAYTON

Figure III-6 :Schémas de principe des soupapes pilotées.

III.4. Protection contre la depression et la surpression :

III.4.1. 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 III-7). 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 [8][4].

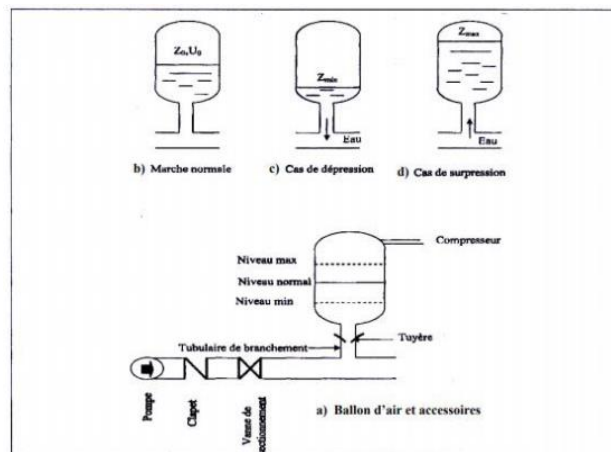


Figure III-7: Réservoir d'air.

III.4.2. Les ventouses (les reniflards) :

On distingue des ventouses à trois fonctions (Figure III-8) 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

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

provoquer des coups de bélier), d'où leur installation en des points hauts. Il y a également des ventouses à fonction unique (Figure III-9) 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[6].

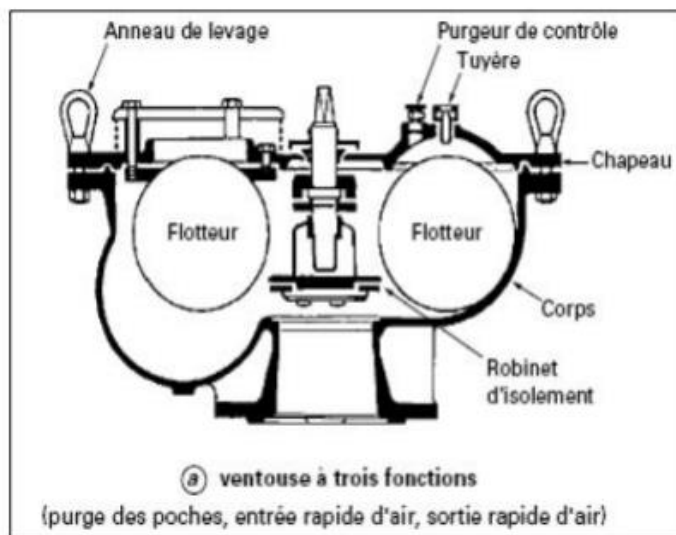


Figure III-8 : Ventouse à trois fonctions.

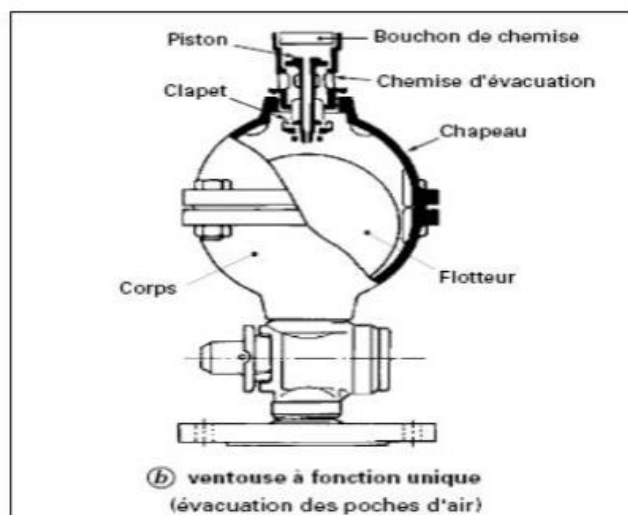


Figure III-9 : Ventouse fonctions unique.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

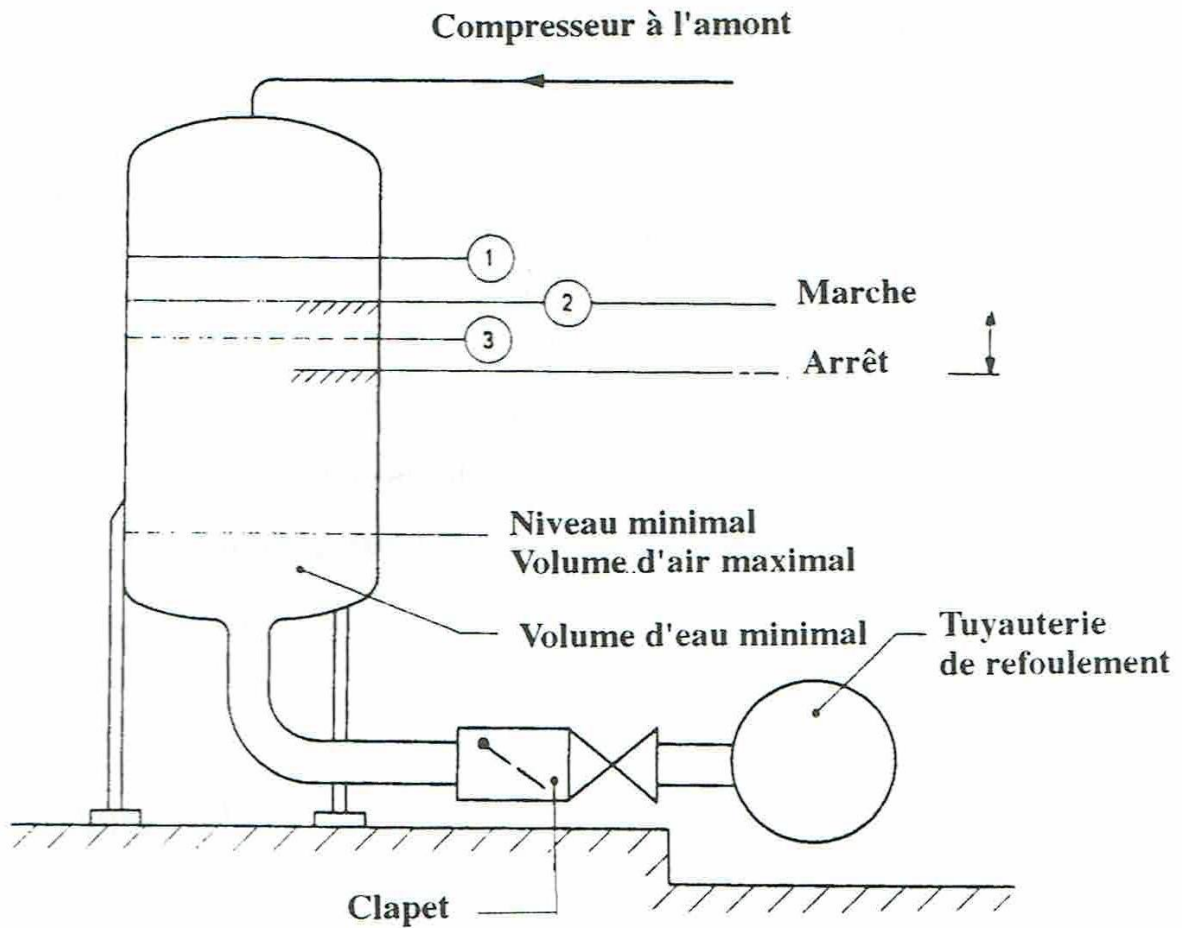


Figure III-10 : Schémas d'un réservoir d'air.



Figure III-11 : Réservoirs d'air.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

III.5. Cheminées 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 $\frac{4L}{a}$ 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.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

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 [15][16].



Fig. III-2 : Cheminée d'équilibre de St-Alban, Montevideo, Uruguay.



Fig.III-3 : Cheminée d'équilibre à Québec.

III.5.1. But de l'ouvrage ;

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

- Réduire la valeur des surpressions produites par le coup de bélier dans la conduite forcée.
- Diminuer les surpressions dues au coup de bélier dans la galerie d'amenée.
- Amortir les oscillations importantes.
- Assurer l'alimentation de la veine liquide, en diminuant les dépressions engendrées par l'arrêt du moteur actionnant la pompe [17] [4].

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

III.5.2. Domaine d'application :

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

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

Dans le domaine des réseaux sous pression, les cheminées sont rarement utilisées car il faudrait qu'elles aient une hauteur supérieure à la hauteur manométrique totale ; on n'imagine pas une telle cheminée dès que la hauteur de refoulement dépasse quelques mètres. Son emploi redevient d'ailleurs 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[8].

III.5.3. Types de cheminées :

Du point de vue construction, on a plusieurs types de cheminées[4]:

A. Cheminée à étranglement :

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

Réduction de l'amplitude des oscillations et par conséquent la hauteur atteinte par l'eau dans la cheminée.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

Amortissement des oscillations, qui s'ajoute à celui créé par les pertes de charge dans la galerie d'amenée[4].

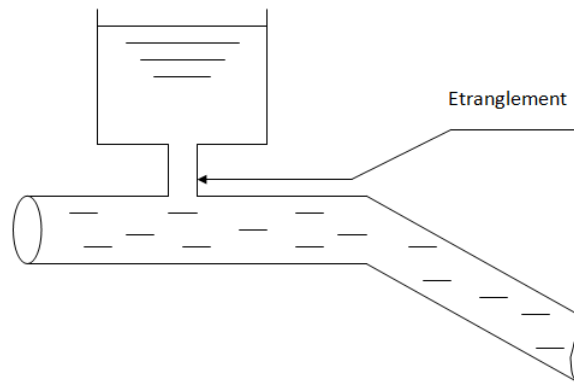


Figure III-14 : Cheminée à étranglement.

B. Cheminée à épanouissement :

Il est possible de réduire le volume total de l'excavation en donnant à la cheminée une forme évasée vers le haut [4].

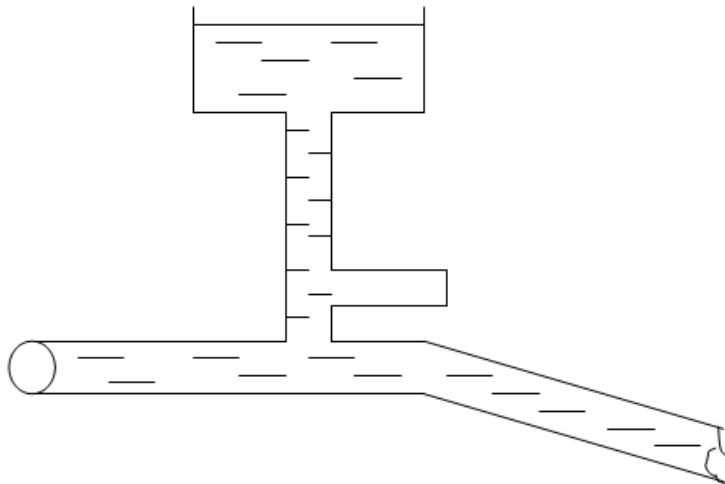


Figure III-15 :Cheminée à épanouissement.

C. Cheminée différentielle :

Elle comporte deux chambres C1 et C2 de sections différentes S1 et S2 alimentées en dérivation sur la galerie d'amenée [4].

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

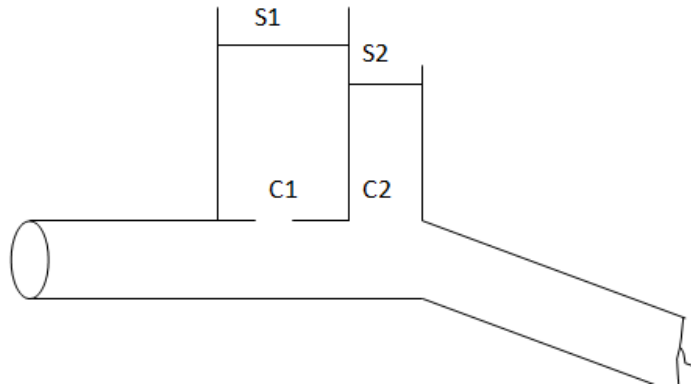


Figure III-16 : Cheminée différentielle.

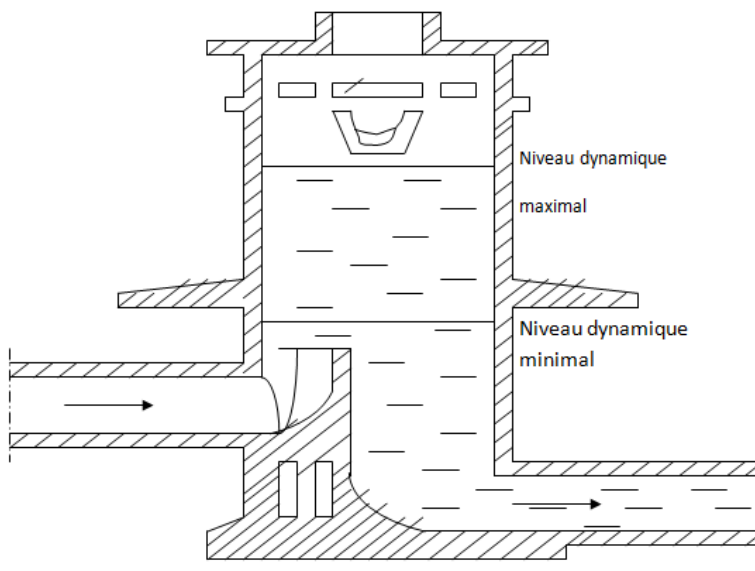


Figure III-17 : Coupe type de cheminée.

D. Description technologique :

Du point de vue technologique, on peut distinguer deux grands types de ballons [8]:

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

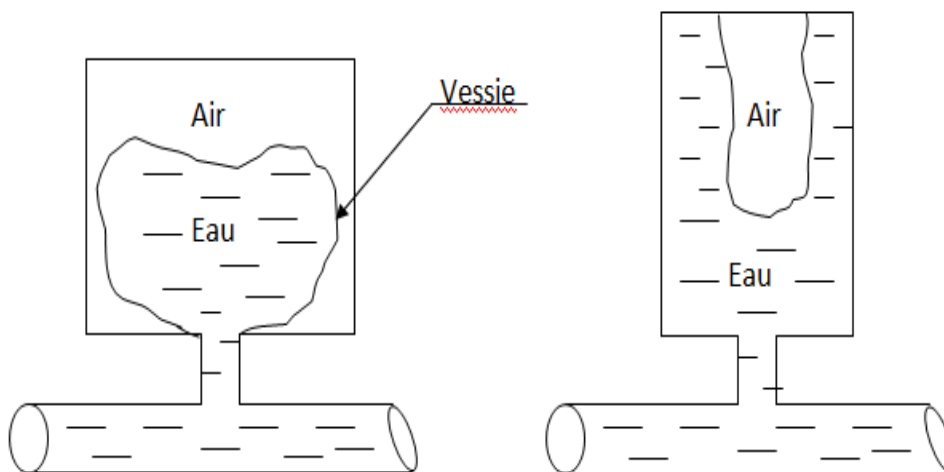
a) Les ballons à membrane ou à vessie :

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[4].

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 [4].



Ballon avec vessie

Ballon sans vessie

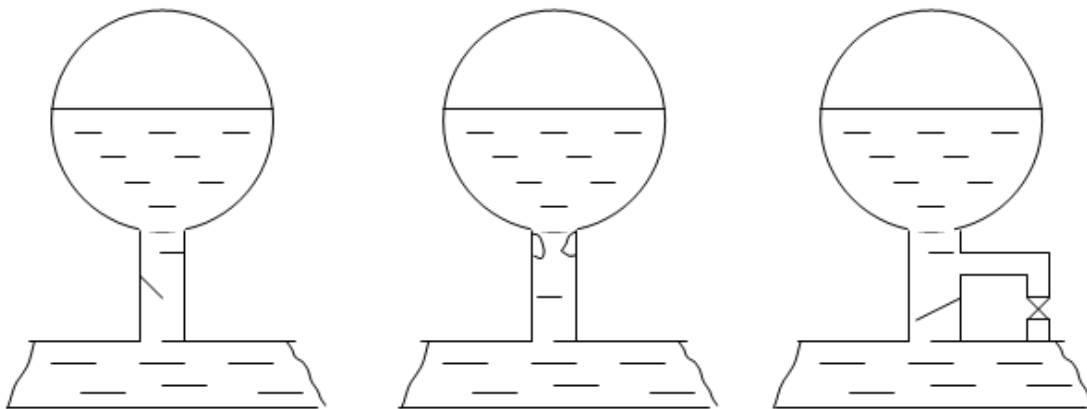
Fig.III-18 : Schémas de principe des ballons anti-bélier.

C. 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 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 [14][4].



Clapet percé

Tuyère

Clapet plein + dérivation

Fig.III-19 : Organes dissymétriques à la base des ballons anti-bélier.

III.6. Avantages et inconvénients des appareils anti-bélier :

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 fonctionner 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.7.Exemple de cas d'étude :

Dans cet exemple on va se focaliser sur l'utilisation du programme AFT Impulse qui utilise la méthode des caractéristiques pour la simulation des phénomènes transitoires comme le coup de bélier pour bien cerner le problème et protéger ces installations hydrauliques et ces systèmes hydrauliques en charges

III.7.1.Description générale du programme :

AFT Impulse fournit la possibilité d'utiliser, durant le dessin ou la conception d'un système, une interface graphique simple qui nous aide à analyser et à prévenir l'effet du coup de bélier et d'autres phénomènes transitoires pouvant se produire durant le fonctionnement d'un système hydraulique, indépendamment de sa taille et de sa complexité. AFT Impulse utilise deux algorithmes de calcul: Un qui applique des techniques matricielles de Newton Raphson, pour résoudre les équations du régime stationnaire, l'autre étant la méthode des caractéristiques pour résoudre les équations du régime transitoire. L'étude de l'état transitoire peut être réalisée dans un intervalle de temps donné ou par une succession d'évènements se produisant dans le système à cause notamment de:

- Ouvertures et fermetures de vannes.
- Démarrages et arrêts de pompes.

Cet outil vous permet d'étudier et de simuler le comportement dynamique d'un système et d'évaluer la grandeur des effets produits par les phénomènes transitoires, y-compris le contrôle de la cavitation.

III.7.2.Caractéristiques D'AFT Impulse :

- ❖ Le logiciel a été conçu de façon à permettre l'étude et l'analyse des phénomènes transitoires et du coup de bélier.
- ❖ Il peut modéliser des systèmes de n'importe quelle configuration générale et de n'importe quelle taille[18]:
 - Systèmes ouverts ou fermés.
 - Réseaux complexes.
 - Boucles.
- ❖ Interface graphique avancée.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

- ❖ Il peut modéliser des fluides aux propriétés variables et des fluides non newtoniens.
- ❖ Il peut modéliser des mélanges de fluides aux propriétés constantes ou variables.
- ❖ Il permet de créer de différents scénarios.
- ❖ Il est doté de base de données sur les fluides et les différents matériaux des conduites.
- ❖ Il admet les unités anglaises et celles du SI.
- ❖ AFT Impulse utilise deux algorithmes de calcul:
 1. Le régime stationnaire est calculé au moyen de techniques matricielles de Newton-Raphson pour résoudre les équations de conservation de la masse et de continuité.
 2. Le régime transitoire est calculé en utilisant la méthode des caractéristiques
- ❖ Il calcule la variation des forces hydrauliques se générant dans les tuyauteries durant un phénomène transitoire.

III.7.3.Exemple d'application: Le cas simple : réservoir- conduite- vanne- réservoir.

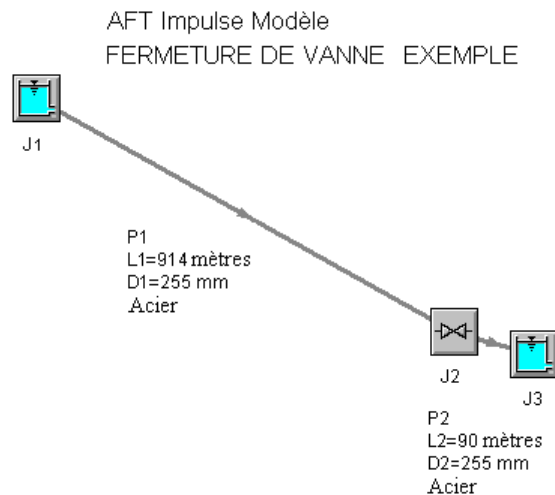


Fig.III-20 : Schéma de l'exemple dans AFT Impulse.

- ❖ **Les données du modèle :**
- ❖ Nombre de conduite : 2, Nombre de jonctions : 3.
- ❖ **Les réservoirs :**
- ❖ R1 à une hauteur de 152,4m ; R2 a une hauteur de 0m. Pression atmosphérique : 1 atm.
- ❖ **Propriétés du fluide constantes :**
- ❖ Température : 24,1 ° C ; Densité: $\rho = 997,3957 \text{ kg/m}^3$.
- ❖ Module d'élasticité : $E_{\text{eau}} = 2069,44 \text{ MPa}$; Viscosité : $9,0646 \times 10^{-4} \text{ kg/s.m}$.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

- ❖ **Modèle de viscosité** : Newtonien.
- ❖ **Debit initial**: $Q_0 = 0,04642 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ❖ **Propriétés des conduites** :
- ❖ **Matériau des conduites** : acier.
- ❖ $L_1 = 914,4\text{m}$, $D_1 = 255\text{mm}$, $e_1 = 3,65\text{mm}$, $\varepsilon_1 = 0,04572\text{mm}$.
- ❖ $L_2 = 90\text{m}$, $D_2 = 255\text{mm}$, $e_2 = 3,65\text{mm}$, $\varepsilon_2 = 0,04572\text{mm}$.
- ❖ **La vanne** :
- ❖ Hauteur : 0m. $C_v = 50$. Temps de fermeture : $T = 1$ secondes.

Tableau III-2 : C_v /Temps de la vanne.

Temps	0	0,25	0,50	1	2
C_v	50	20	5	0	0

- ❖ **Méthode matricielle** : élimination de Gauss.
- ❖ **Pas de temps** : $\Delta t = 0,06$ secondes.
- ❖ **Nombre totale de pas de temps** = 475.
- ❖ **Nombre de sections de contrôle** :
- ❖ Conduite1 : 10 sections, conduite2 : 1 section.
- ❖ **Temps de simulation** : 30 secondes.

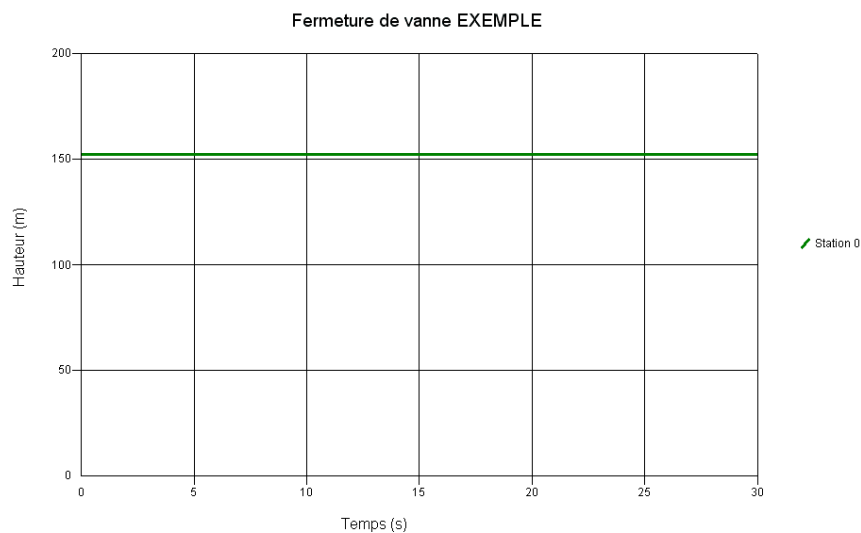


Fig.III-21 : Variation de la hauteur dans le réservoir.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

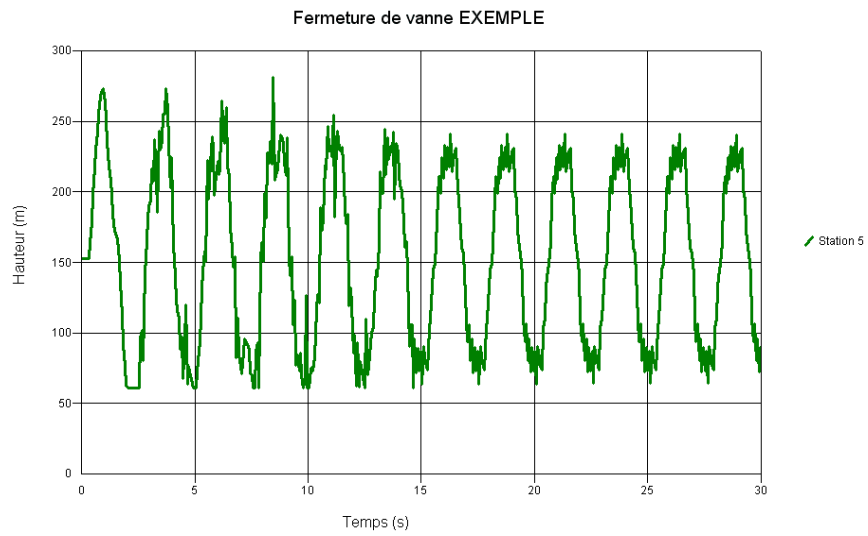


Fig.III-22 : Variation de la hauteur au point médian.

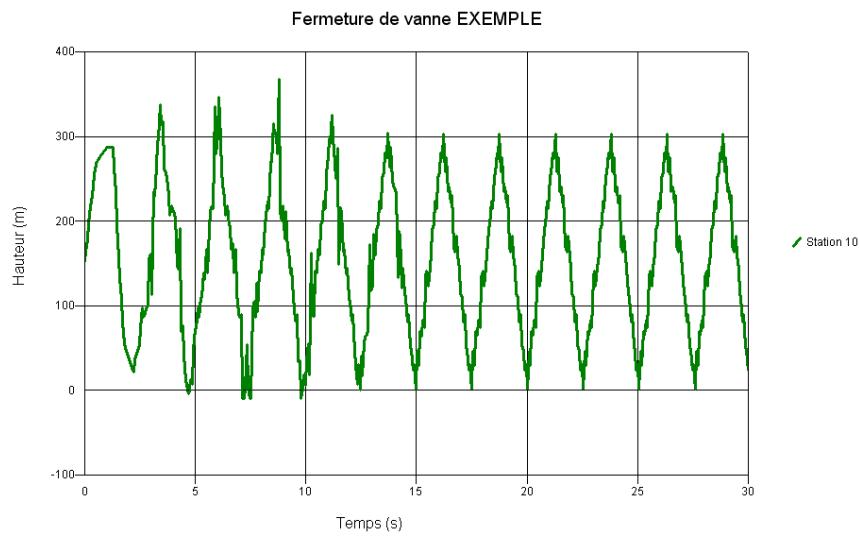


Fig.III-23 : Variation de la hauteur a la vanne.

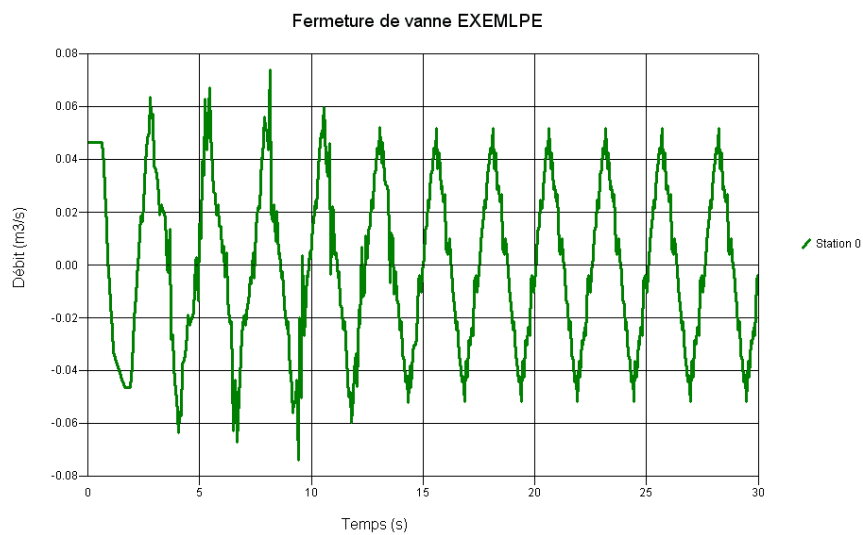


Fig.III-24 : Variation du débit dans le réservoir.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

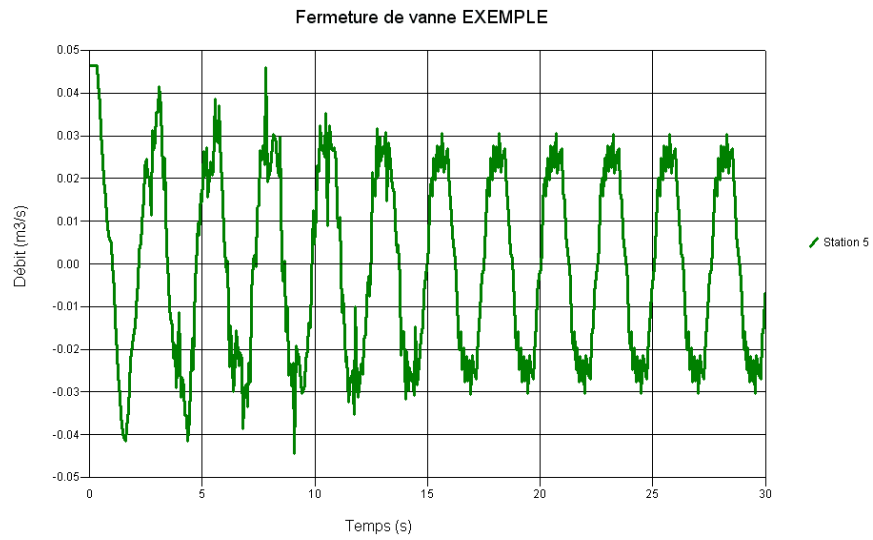


Fig.III-25 : Variation du débit au point médian.

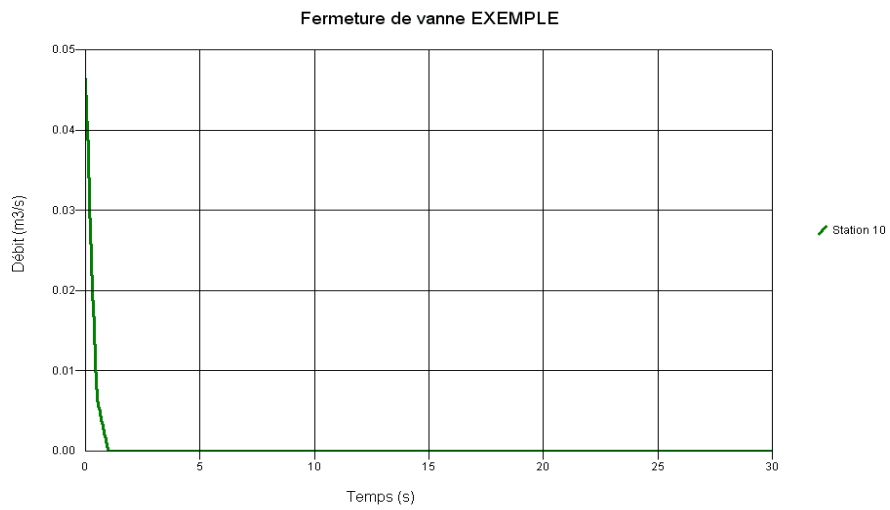


Fig.III-26 : Variation du débit a la vanne.

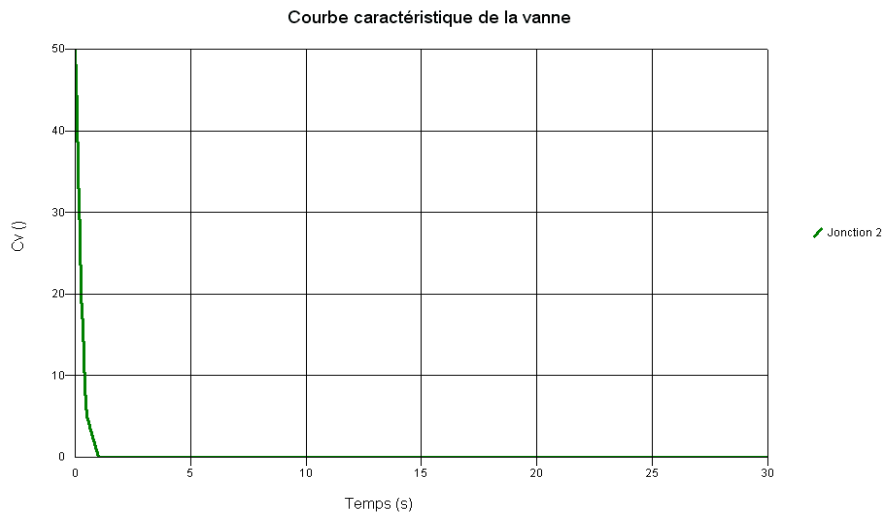


Fig.III-27 : Courbe caractéristique de la vanne.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

III.7.4. Modèle d'étude : Cas d'un écoulement gravitaire à partir de deux réservoirs R1 et R2 vers un réservoir R3 passant par un Té et une Vanne comme le montre le schéma.

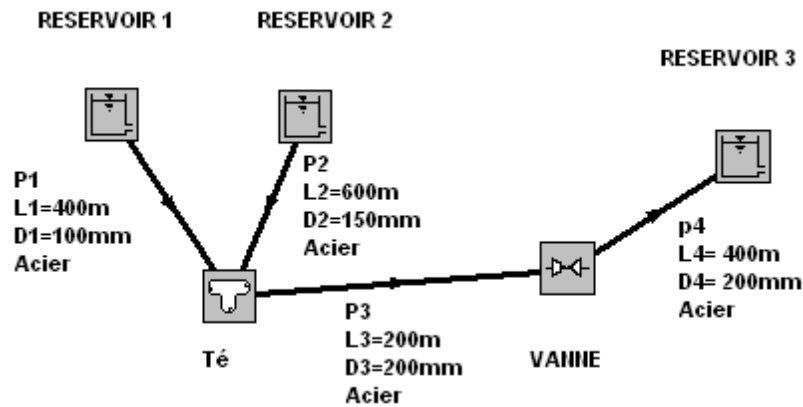


Fig.III-28: Schéma du modèle dans AFT Impulse.

Les données du modèle :

Nombre de conduites : 04, Nombre de jonctions : 05

Les Réservoirs :

R1 à une hauteur de 200m, R2 à une hauteur de 200m, R3 à une hauteur de 150m.

La pression de surface est la pression atmosphérique = 01 atm.

Propriétés du fluide constantes :

Température : 24°C

Densité : 997,4203 kg / m³

Module d'élasticité : 2068,703 MPa

Viscosité : $9,0865 \times 10^{-4}$ kg / s.m

Modèle de viscosité : Newtonien.

Propriétés des conduites :

Matériau des conduites : Acier.

L1 = 400m, D1 = 100mm, e= 7,1mm, $\epsilon = 0.04572$ mm

L2 = 600m, D2 = 150mm, e= 6,1mm, $\epsilon = 0.04572$ mm

L3 = 200m, D3 = 200mm, e= 7.3mm, $\epsilon = 0.04572$ mm

L4 = 300m, D4 = 200mm, e= 7.3mm, $\epsilon = 0.04572$ mm

Le Té :

Le Té est droit à 90°, et à une hauteur de 100 m.

Nombre de section de contrôle :

Conduite 1 : 3 Sections. Conduite 2: 5 Sections.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

Conduite 3 : 2 Sections. Conduite 4 : 2 Sections.

Débit initial : 0,8 m³/mn

Temps de simulation : 20 secondes.

La vanne :cas de lafermeture rapide de la vanne :

La vanne est à une hauteur de 100m. CV=50

Tableau.III-3 : CV / temps de la vanne

Temps (s)	0	0,1	0,3	0,5	0,8	1	2	3
Cv	50	40	30	20	10	0	0	0

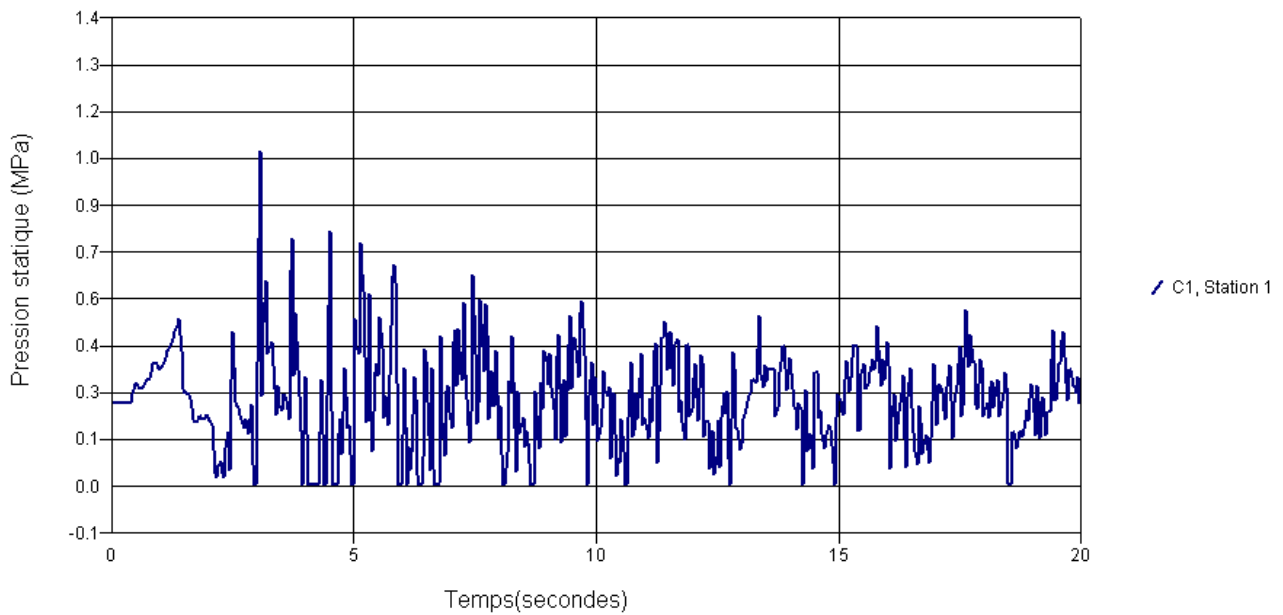


Fig III-29: Variation de la pression statique à la 1ere section de la conduite 1.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

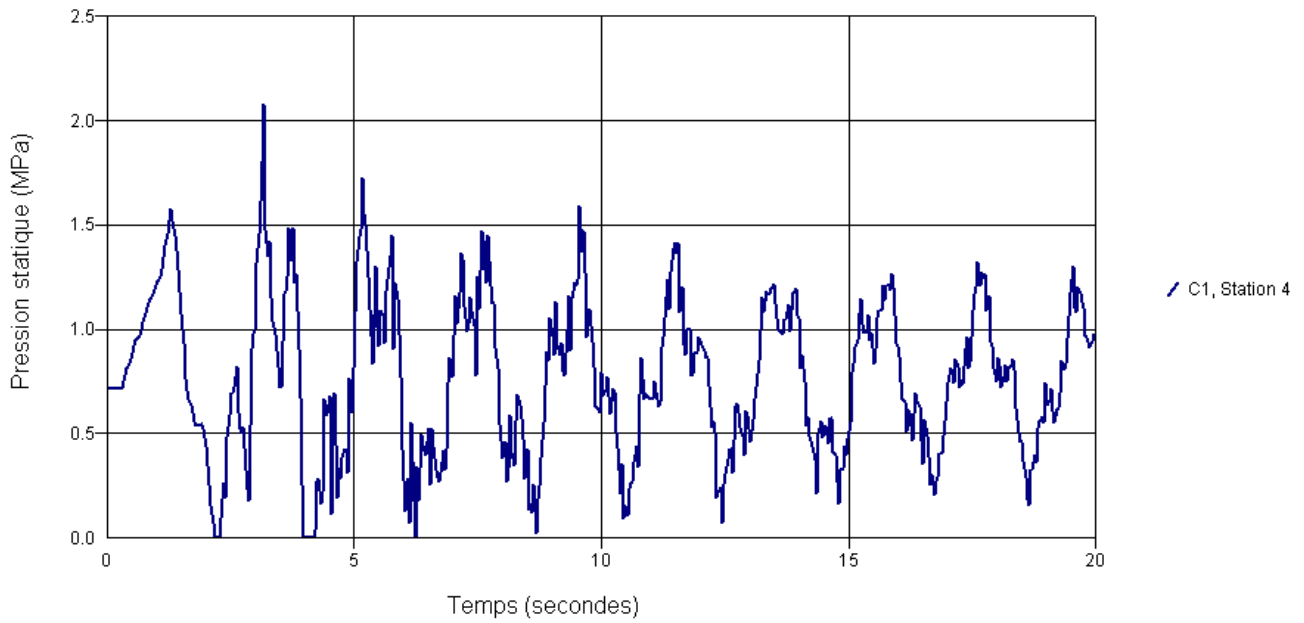


Fig. III-30: Variation de la pression statique au point médian 4 de la conduite 1.

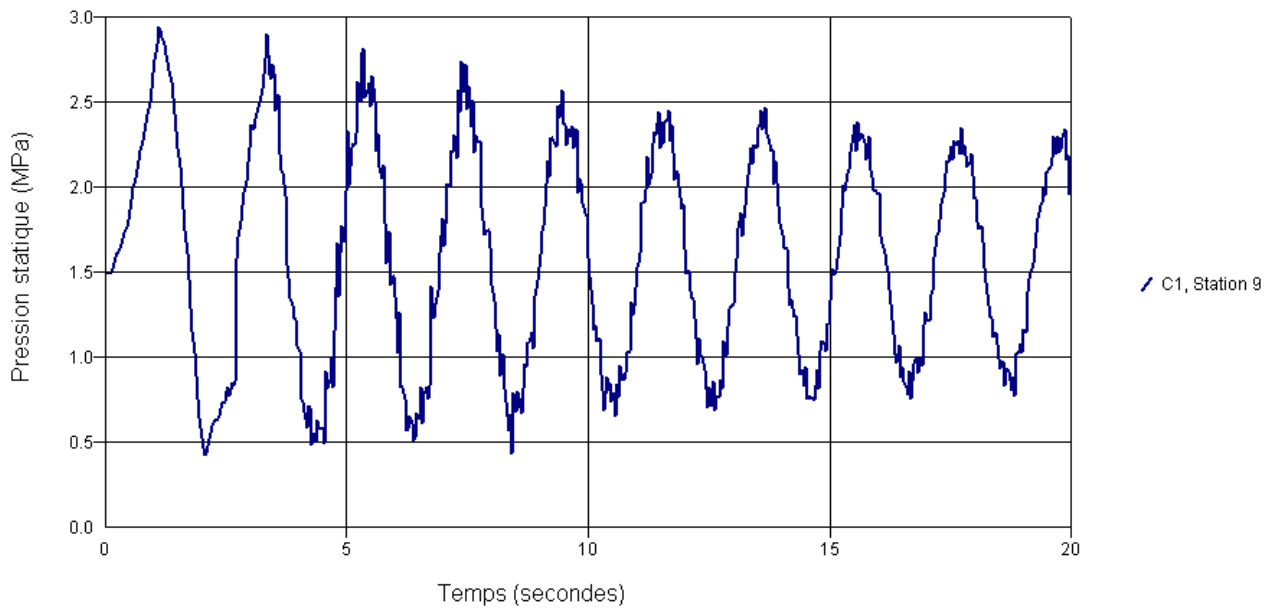


Fig. III-31: Variation de la pression statique à la dernière section 9 de la conduite 1

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

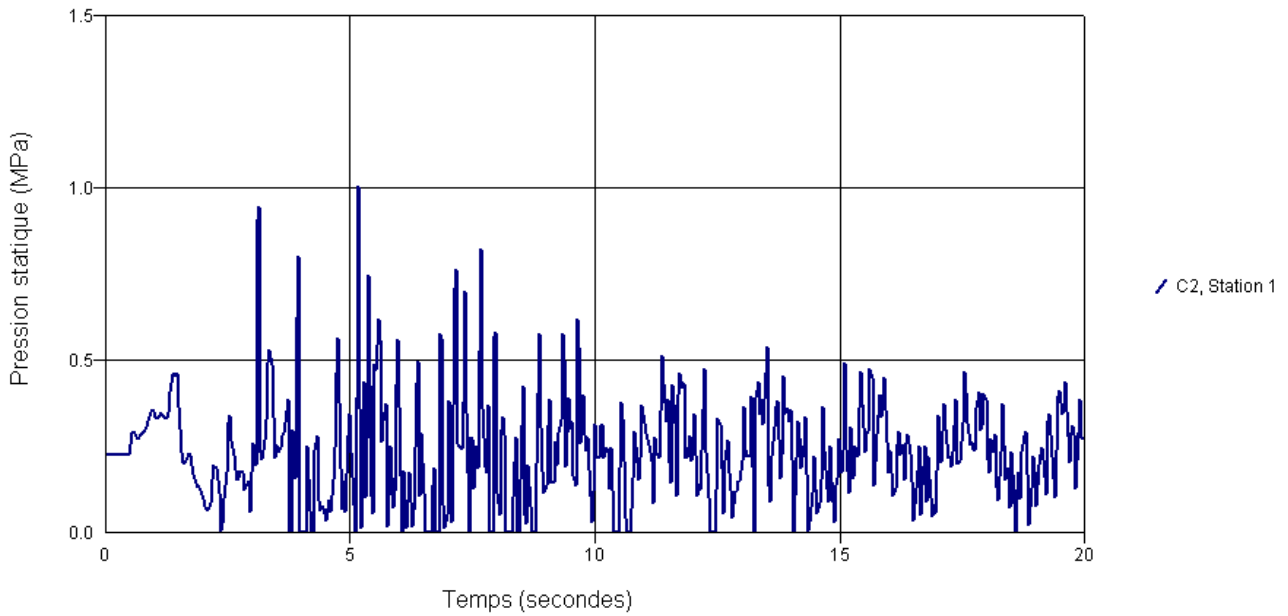


Fig. III-32: Variation de la pression statique à la 1ere section de la conduite 2

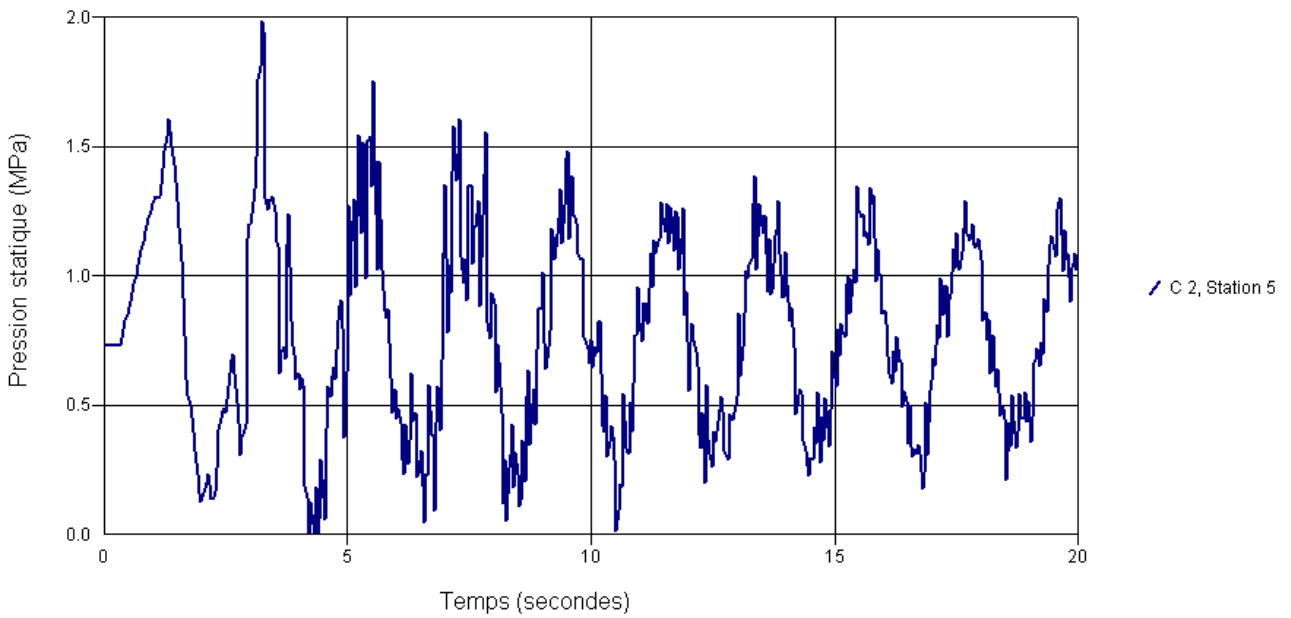


Fig. III-33: Variation de la pression statique au point médian 5 de la conduite 2

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

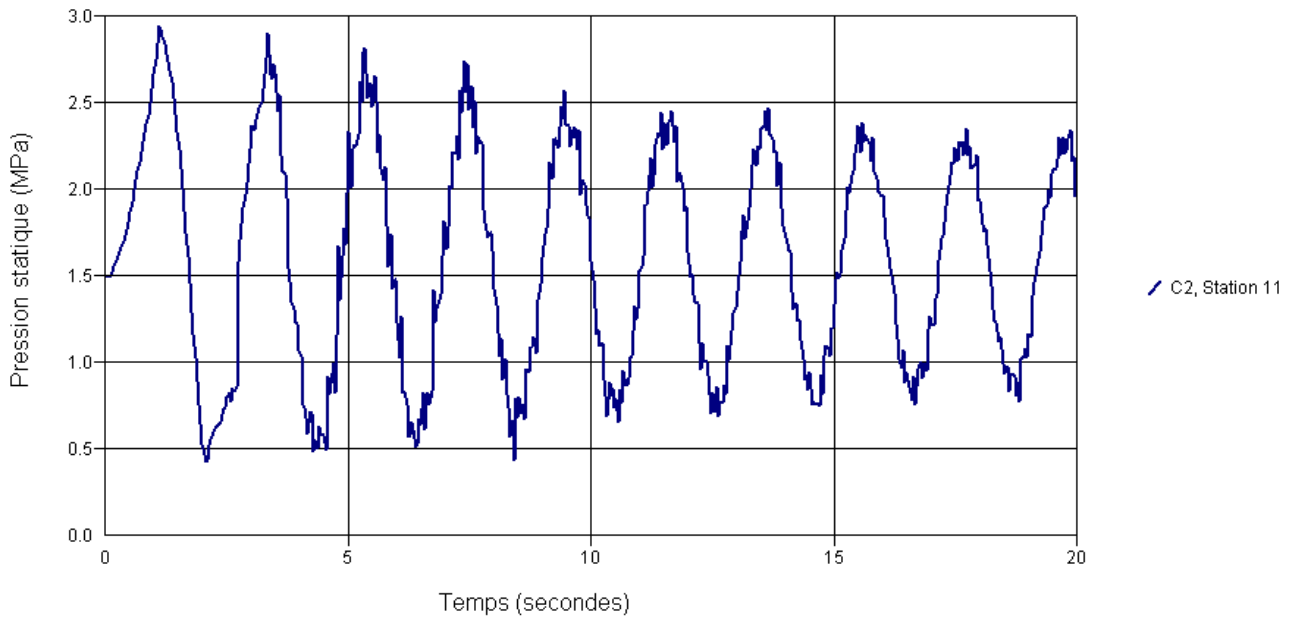


Fig. III-34: Variation de la pression statique à la dernière section de la conduite 2

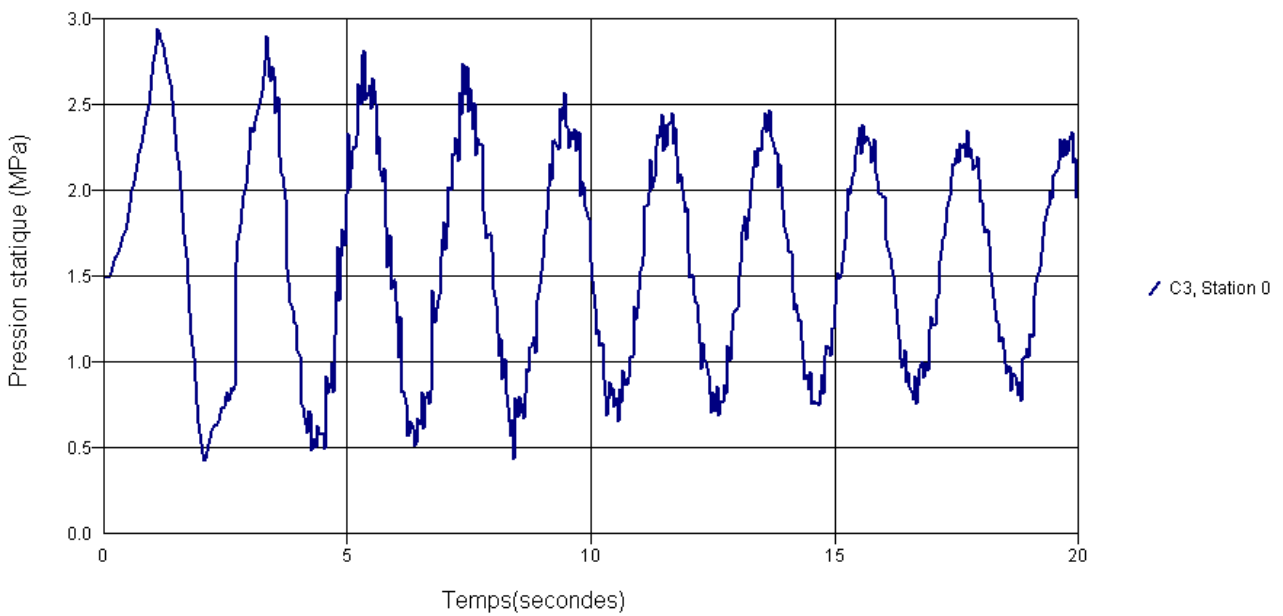


Fig. III-35: Variation de la pression statique au début de la conduite 3.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

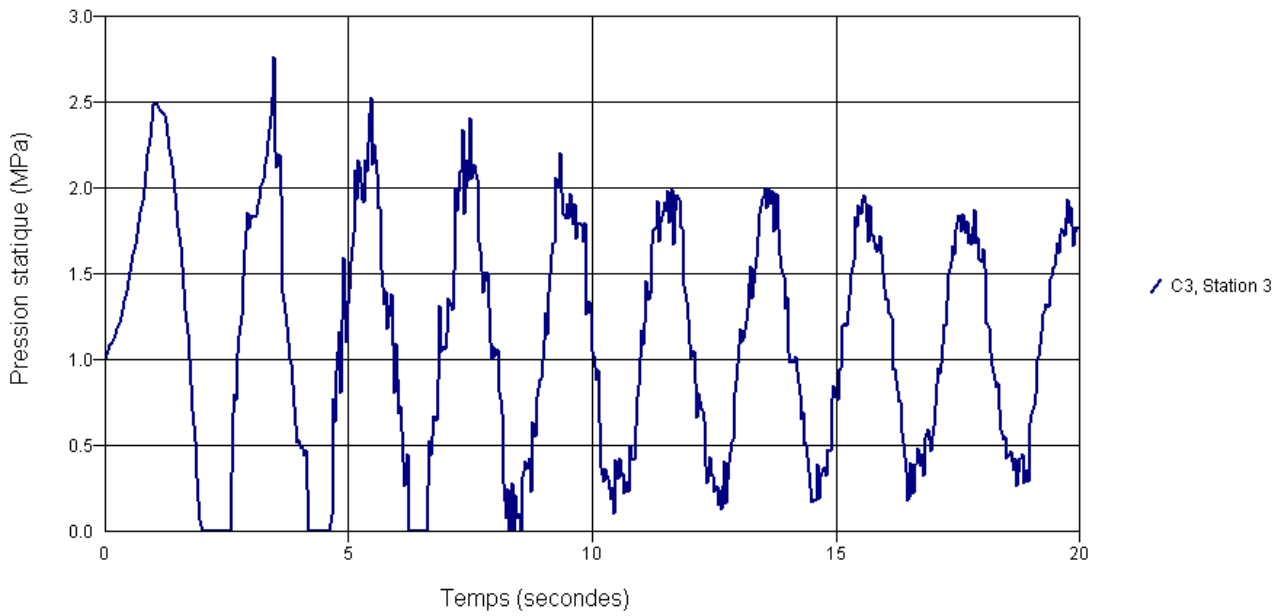


Fig. III-36: Variation de la pression statique à la fin de la conduite 3

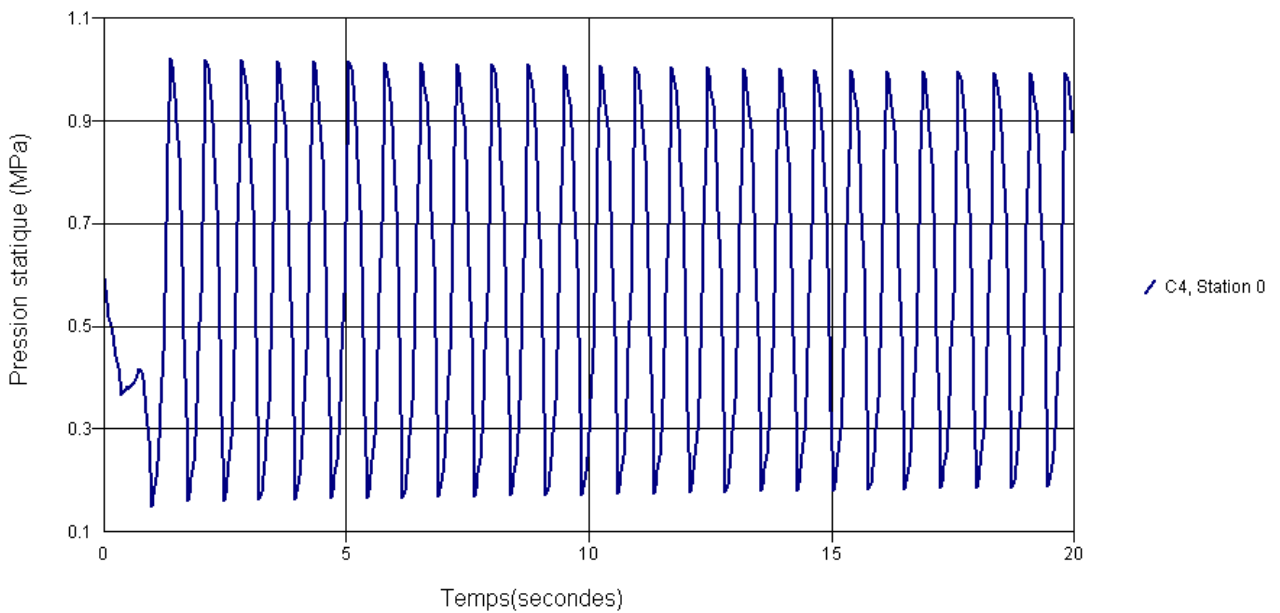


Fig. III-37: Variation de la pression statique au début de la conduite 4

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

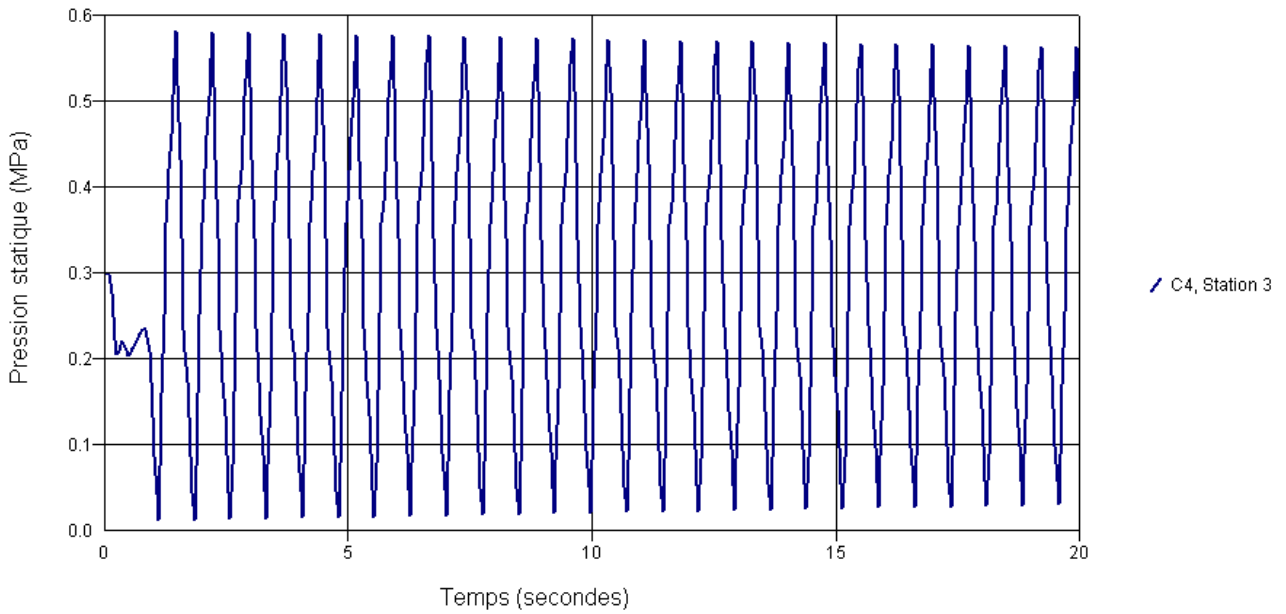


Fig.III-38: Variation de la pression statique au point médian 3 de la conduite 4

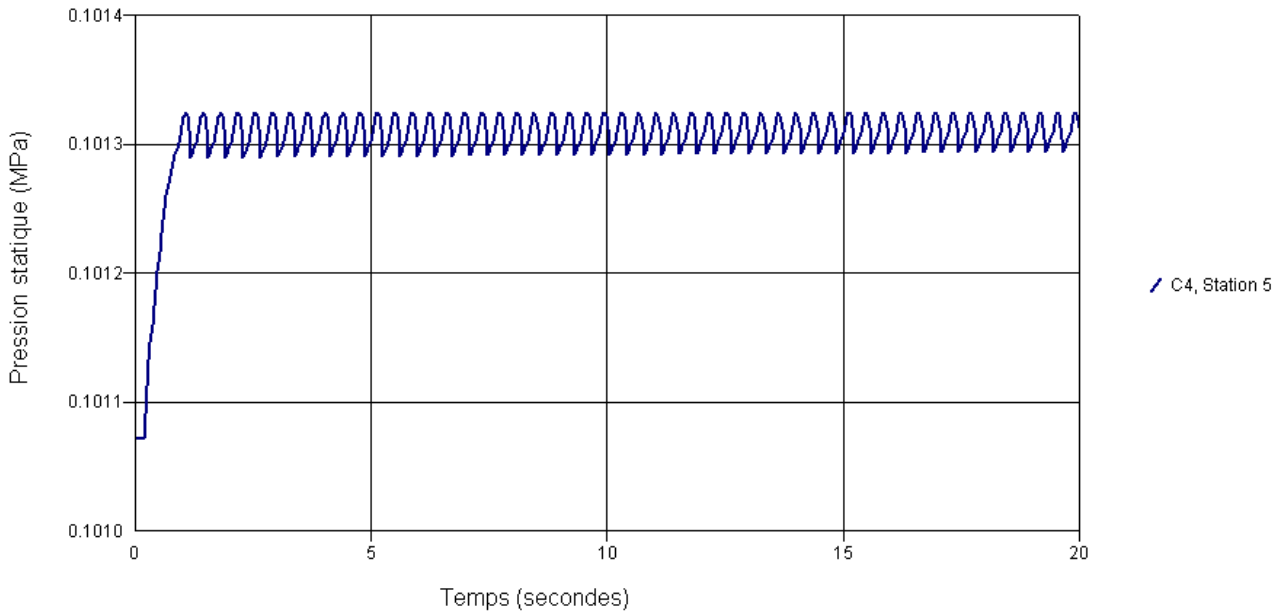


Fig.III-39: Variation de la pression statique à la dernière section de la conduite 4

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

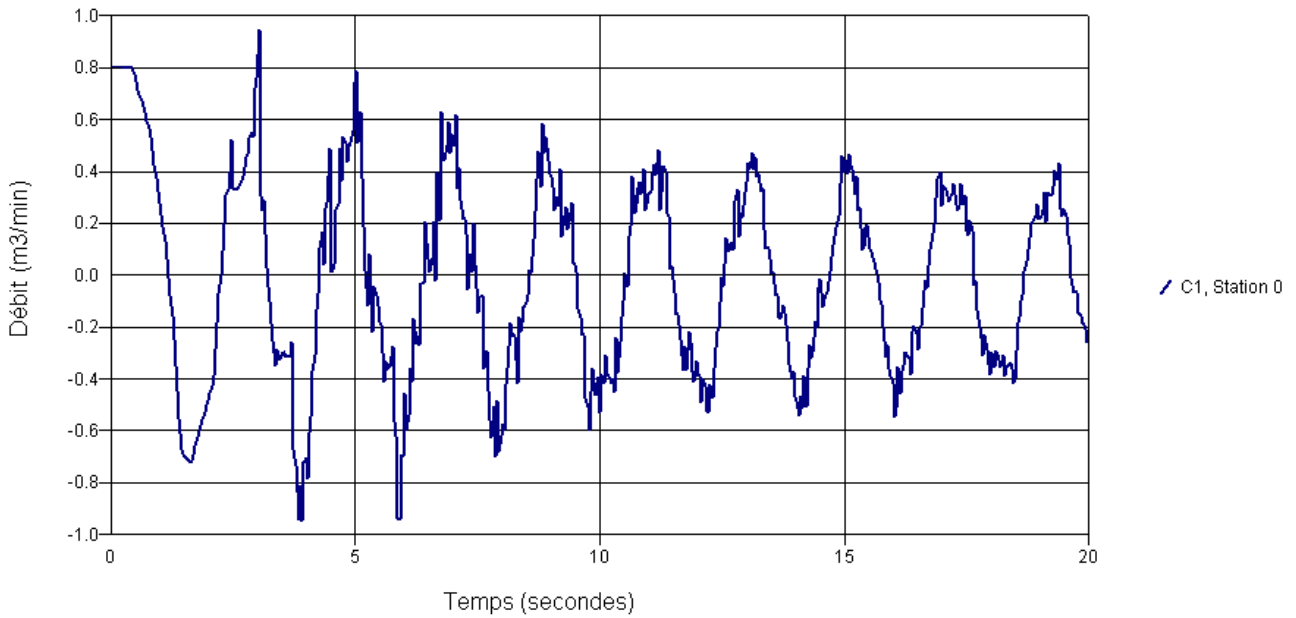


Fig.III-40: Variation du Débit à la 1ere section de la conduite 1

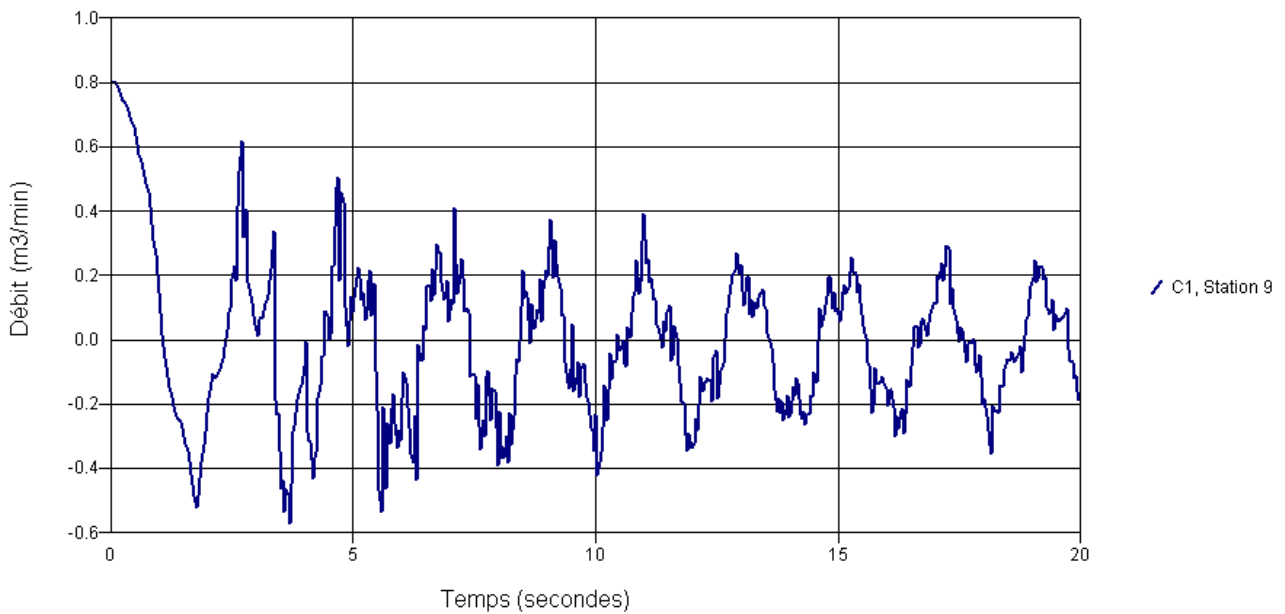


Fig.III-41: Variation du Débit à la dernière section 9 de la conduite 1

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

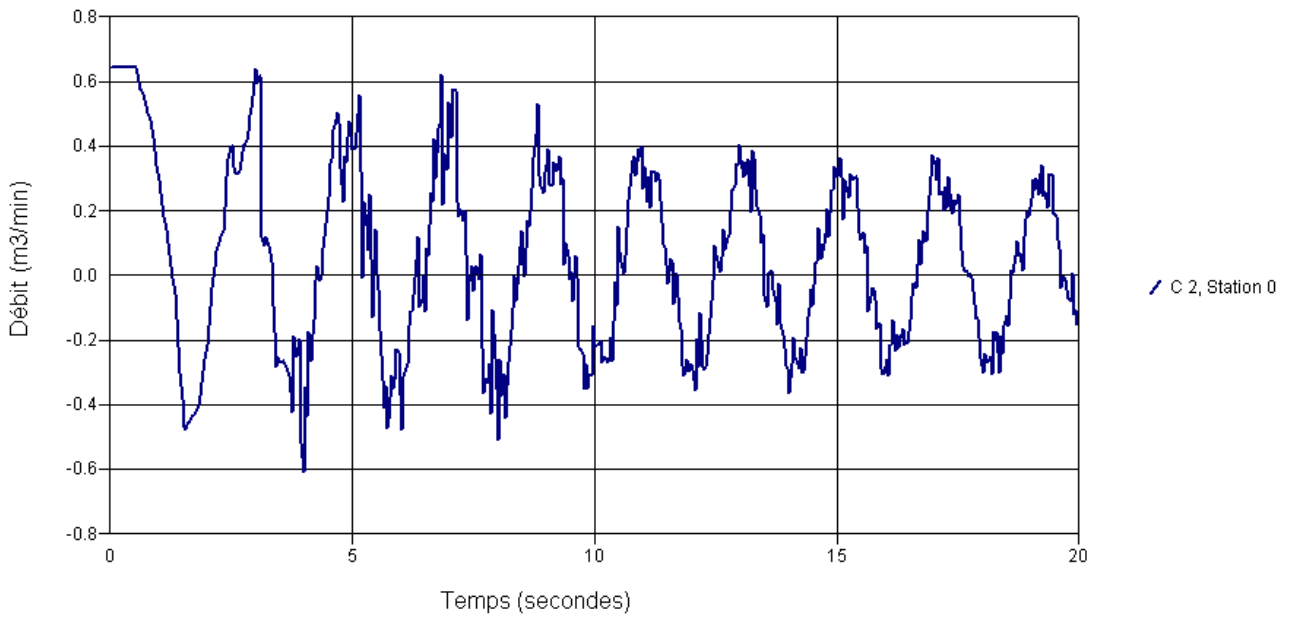


Fig.III-42: Variation du Débit au début de la conduite 2

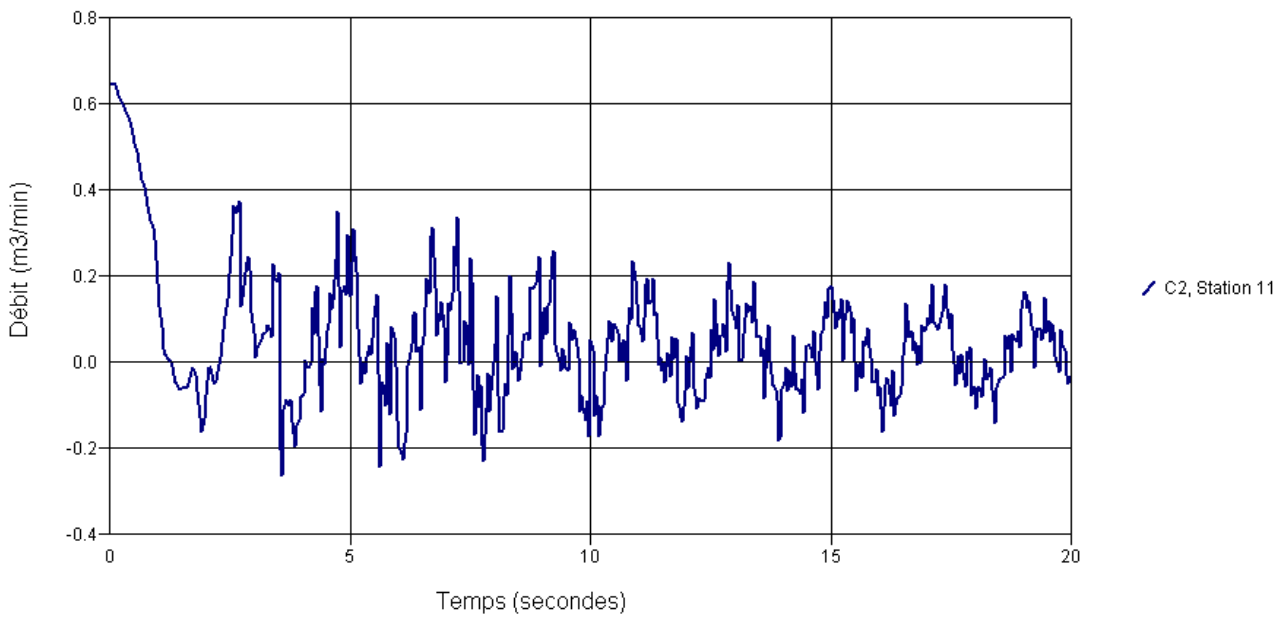


Fig.III-43: Variation du Débit à la dernière section 11 de la conduite 2

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

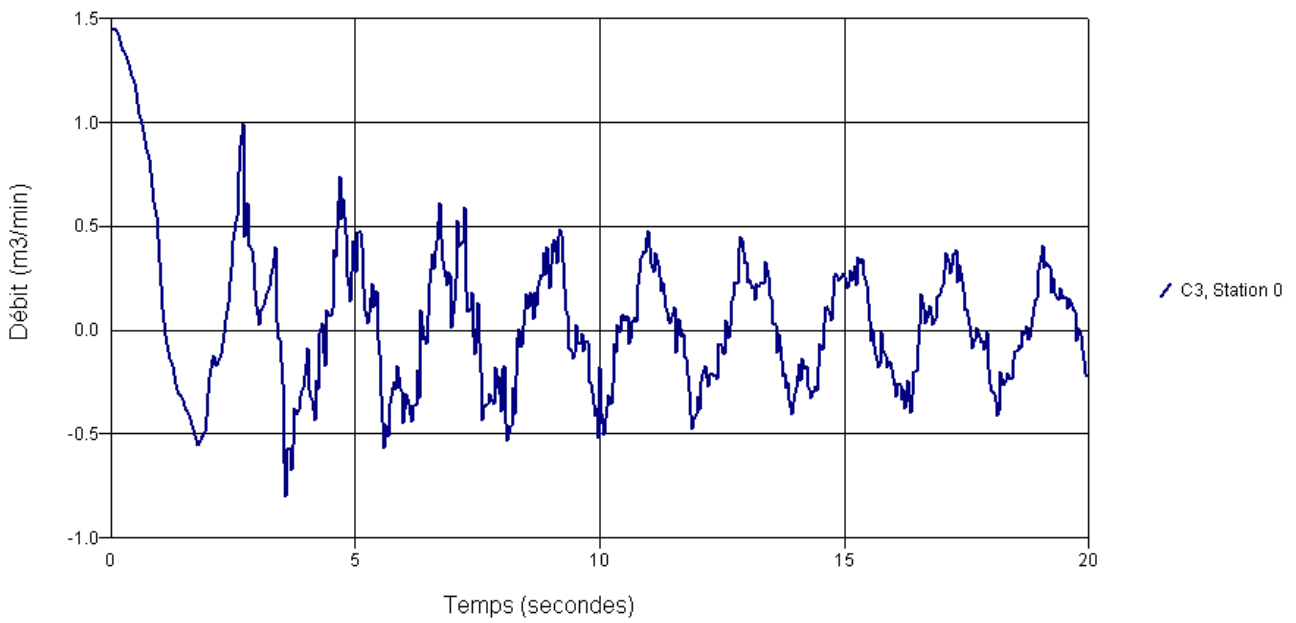


Fig.III-44: Variation du Débit à la 1ere section de la conduite 3

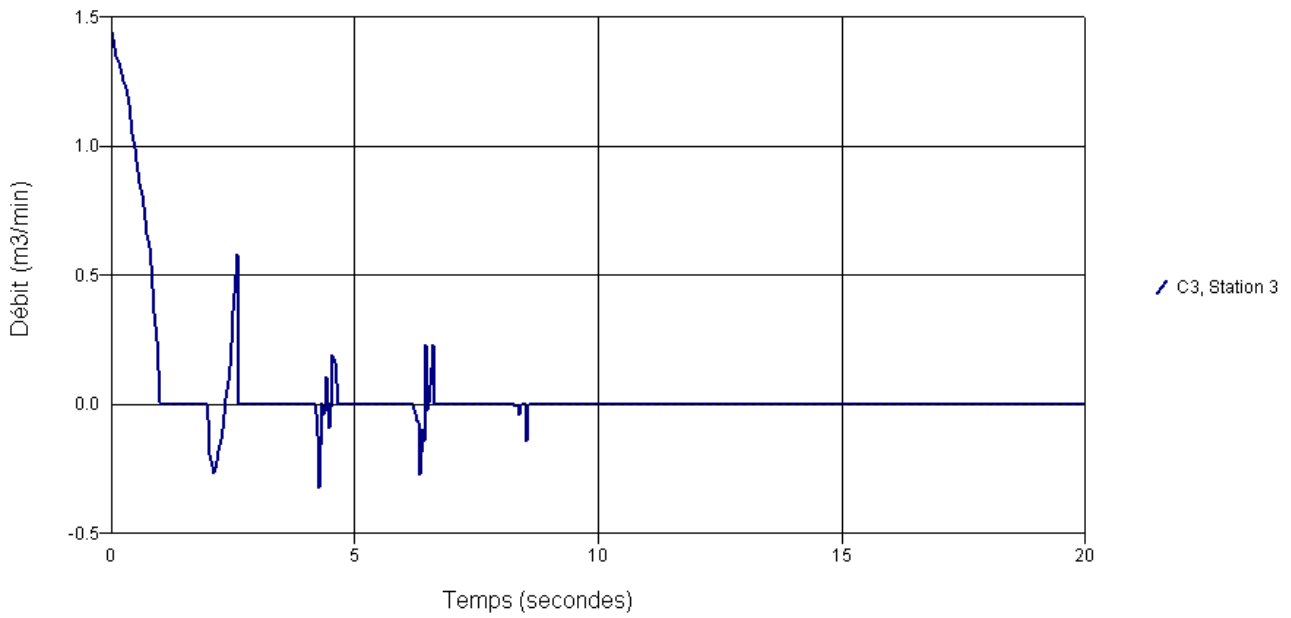


Fig.III-45: Variation du Débit à la dernière section 3 de la conduite 3

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

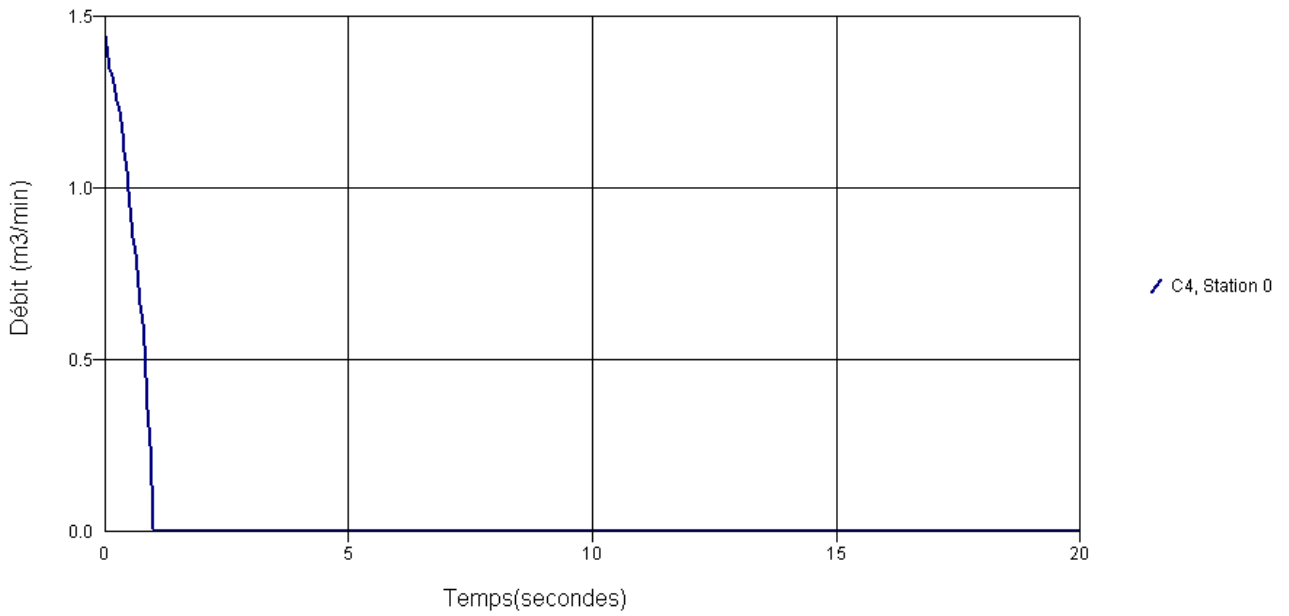


Fig.III-46:Variation du Débit au début de la conduite 4

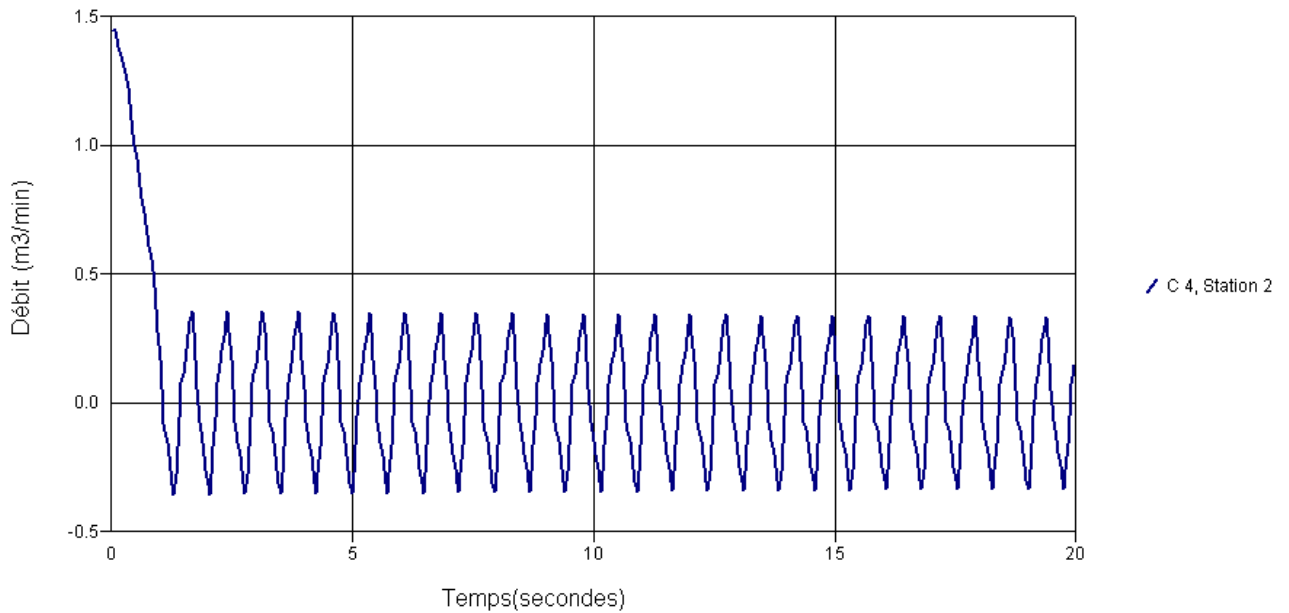


Fig.III-47:Variation du Débit au point médian 2 de la conduite 4

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

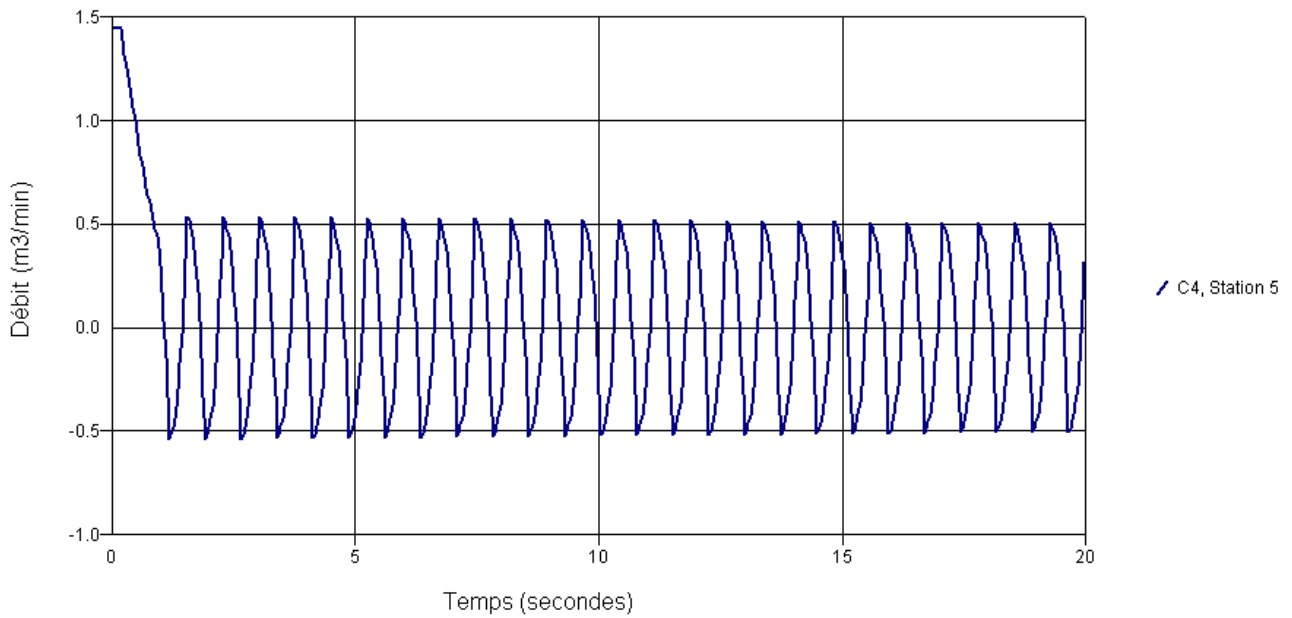


Fig.III-48:Variation du Débit à la fin de la conduite 4

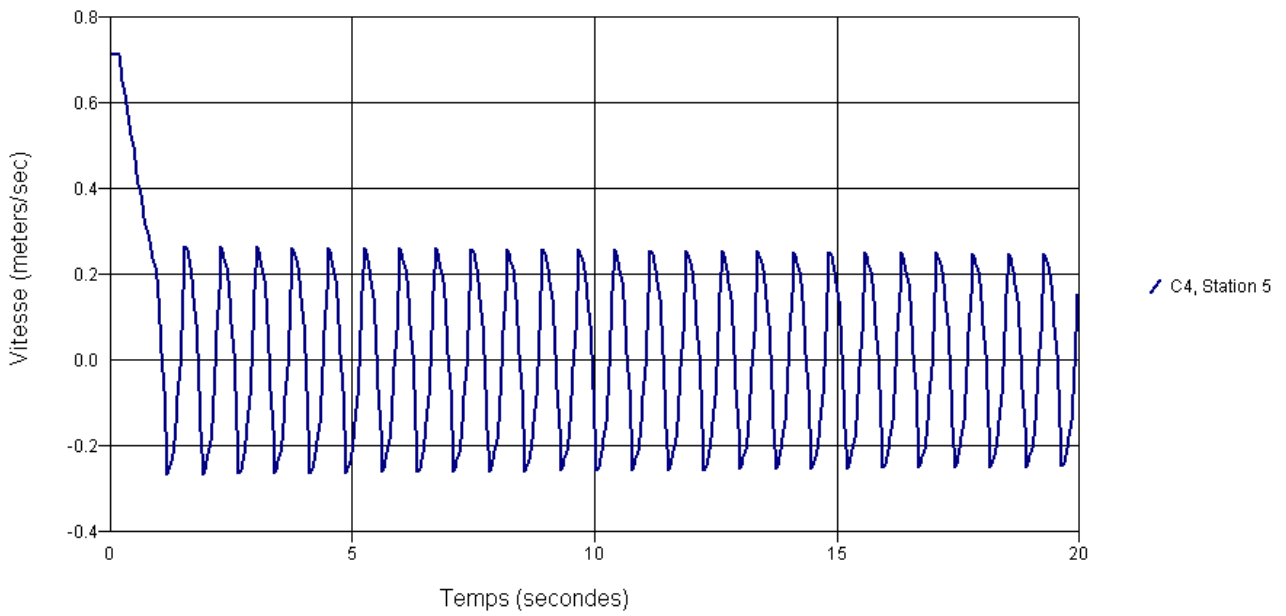


Fig.III-49:Variation de la vitesse à la fin de la conduite 4

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

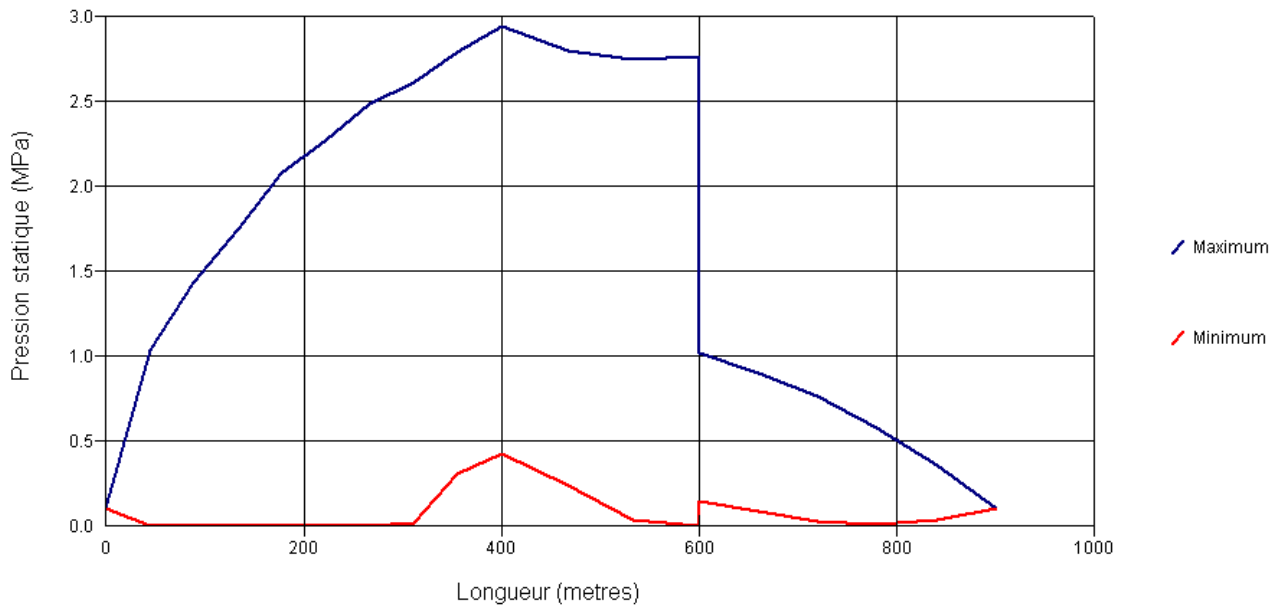


Fig.III-50:Variation (max/min) de la pression statique le long des conduites 1-3- 4.

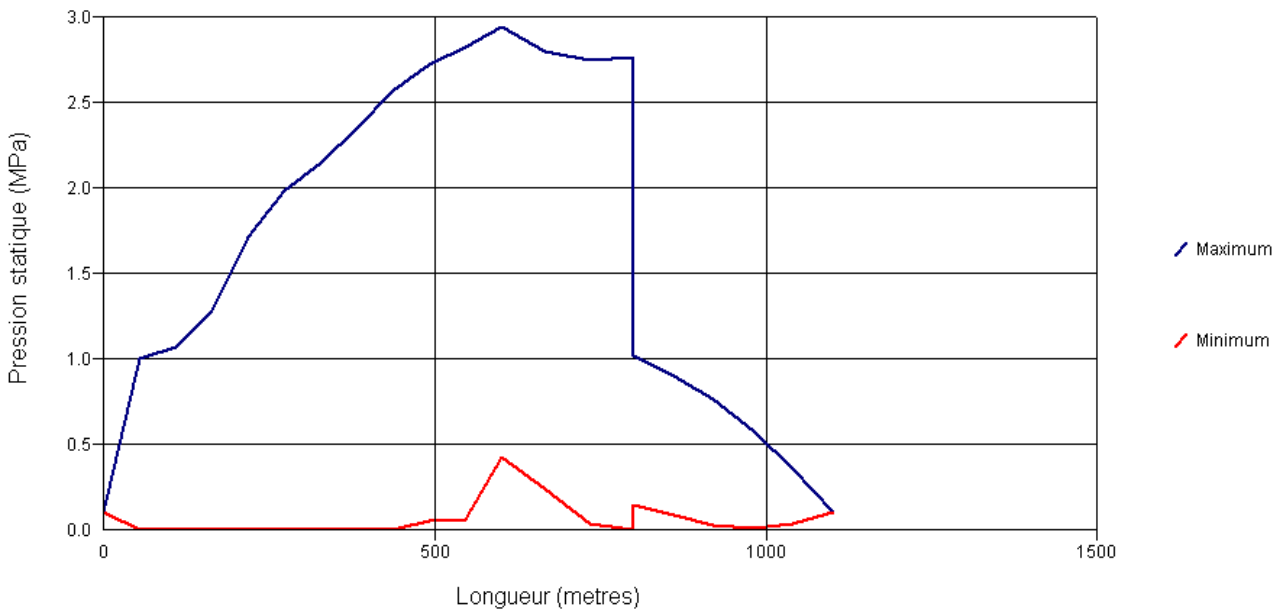


Fig.III-51:Variation (max/min) de la pression statique le long des conduites 2-3- 4.

III.7.4.Interprétations :

En ce qui concerne l'exemple simple [réservoir – conduite – vanne - réservoir] :

Au bout des trente secondes de simulations on remarque que :

- ❖ L'amplitude des variations du débit diminue du réservoir au point médian ;

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

- ❖ Les atténuations des fluctuations du débit sont plus rapides au point médian par rapport à celles au réservoir et deviennent de plus en plus rapide à chaque fois qu'on se rapproche de la vanne ;
- ❖ Les fluctuations de la hauteur oscillent autour de H_r ;
- ❖ L'amplitude des fluctuations de la hauteur piézométrique ou la pression augmente au point médian et devient maximale au niveau de la vanne ;
- ❖ Les atténuations des fluctuations de la hauteur sont moins rapides au point médian et deviennent de plus en plus lente à chaque fois qu'on se rapproche de la vanne.

En ce qui concerne le Modèle d'étude:

Il s'agit d'un écoulement gravitaire à partir de deux réservoirs R1 et R2 à des côtes différentes vers un réservoir R3 passant par une jonction (Té) qui relie les deux conduites C1 et C2 et une vanne médiane entre le Té et le réservoir final.

--Au niveau des conduites C1 et C2 on remarque que les amplitudes des fluctuations de la pression sont plus rapides et plus accentuées aux points de jonction réservoirs-conduites avec des valeurs maximum au début de la simulation et qui diminuent progressivement dans le temps.

--Aux points médians des deux conduites C1 et C2 les fluctuations de la pression sont identiques et atteignant des valeurs maximum et minimum qui varient de 0 à 2 MPa au début de la simulation en suite elles prennent des valeurs moins importantes.

--A la fin de C1 et C2 les fluctuations de la pression sont toujours importantes mais qui apparaissent plus régulières et avec des valeurs maximum et minimum qui s'atténuent dans le temps.

--Au niveau de la conduite C4; On remarque que les fluctuations sont très accentuées avec des oscillations plus importantes et qui demeurent plus dans le temps.

--Les fluctuations du débit sont très variés dans le temps et qui prennent des valeurs maximum et minimum positives et négatives, ce qui prouve que l'écoulement se fait dans les deux sens (va et vient).

--L'allure générale des graphes caractérisant la vitesse est identique à celle des débits, ce qui explique la proportionnalité qu'il y a entre eux.

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

III.7.5. Résultats :

Pour l'exemple :

- L'amplitude des fluctuations du débit dans le temps est très importante au niveau du réservoir puis elle diminue le long de la conduite et devient minimale au niveau de la vanne ;
- L'amplitude des fluctuations de la hauteur piézométrique devient importante le long de la conduite et atteint des valeurs maximales au niveau de la vanne.

Pour le modèle d'étude :

Dans le cas de fermeture brusque de la vanne; On remarque une grande influence sur les fluctuations de la pression, du débit et de la vitesse, tout le long du système et en particulier à la bifurcation et au niveau de la vanne où ces fluctuations atteignent des valeurs maximales et minimales ce qu'on appelle surpressions et dépressions, ainsi que l'alternance des fluctuations du débit entre les valeurs positives et les valeurs négatives ce qui explique le mouvement du liquide dans les deux sens d'écoulement en provoquant des cas du coup de bélier.

III.8. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre on s'est focalisé sur les moyens de protection et d'atténuation de cette variation brusque de la pression (dépression ou surpression) causée par les manœuvres des vannes ou encore la manipulation des pompes qui provoque des dégâts considérables au niveau des différentes installations hydrauliques ; stations de pompes, centrales hydroélectriques en utilisant les appareils adéquats tel que les volants d'inertie, soupape de décharge, réservoir d'air et cheminée d'équilibre en se focalisant sur leur système de fonctionnement, leur type, leur caractéristique et leur domaine d'application passant par leurs avantages et leurs inconvénients.

L'emploi du logiciel AFT Impulse qui est un puissant moyen de calcul, nous a permis d'aborder le problème avec une précision et une interprétation presque réelle. D'après les résultats graphiques obtenus de la variation de la hauteur piézométrique et du débit au cours du temps; il en résulte qu'il est nécessaire d'augmenter toujours le temps de la manipulation et de la manœuvre des vannes pour diminuer l'amplitude des variations de la hauteur piézométrique et du débit et surtout de les calculer pour qu'elle résistent à ces phénomènes de surpression et de dépression, et en particulier

Chapitre III : Protection des canalisations contre les variations brusques de pression.

elles devront résister à l'écrasement dû à la pression atmosphérique dans le cas où les dépressions seraient suffisantes pour créer la cavitation.

Conclusion générale :

Les régimes transitoires sont des phénomènes très complexes ils dépendent directement de variations brutales de la vitesse d'écoulement dans la conduite. Ces variations de vitesse sont à l'origine de variations de pression (également appelées coups de bélier).

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. 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.

Nous avons vu comment évolue un régime transitoire dans les conduites en charge après une manœuvre de vanne et de pompe, ainsi qu'une description sur l'analyse physique du phénomène du coup de bélier. On peut dire qu'un coup de bélier commençant par l'évolution de la pression est appelé coup de bélier positif et celui qui commence par une dépression est appelé coup de bélier négatif.

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 pour y remédier on doit impérativement protéger notre installation hydraulique en utilisant des appareils adéquats.

La soupape de décharge représente le moyen le plus efficace contre les surpressions sachant qu'elle est beaucoup plus utilisée dans l'adduction gravitaire. Pour le cas du volant d'inertie son utilisation est restreinte pour le cas des refoulements courts. Il peut rendre, néanmoins, service dans certaines installations, car il ne nécessite aucun entretien.

Cependant, le réservoir d'air est le moyen de protection le plus utilisé surtout dans les stations de pompage où il peut être surveillé. Dans tout projet de station de pompage, la protection anti-bélier doit donc être prise sérieusement en compte afin d'éviter des incidents aux conséquences très graves.

BIBLIOGRAPHIE

[1] **YOUCEF Sara**, Contribution à l'étude de l'effet du sol sur le coup de bélier, Ecole Supérieure d'hydraulique - Blida- ,47pages.

[2] **BEN ALI AYOUB**,(Juin 2018) : Résolution des équations du régime transitoire par la méthode des caractéristiques dans une conduite sous pression, l'Université 08 Mai 1945 de Guelma,58 pages.

[3] **BOUABDELI imadeddine**,(Novembre – 2014) :MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS TRANSITOIRES DANS LES CONDUITES EN CHARGE, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah,61pages.

[4] **HAMZA KHALED**, (Juin 2018) : Méthodologie de la recherche sur la protection des canalisations, Université Mohamed khider-Biskra.

[5] **BOURAGBI Houssam**,(Juin 2016) : CONTRIBUTION A L'ETUDE DU PHENOMENE DU COUP DE BELIER, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique,77pages.

[6] **AissaniChafik**,(2020) : METHODOLOGIE DE RECHERCHE SUR LES PHENOMENES TRANSITOIRES EN ADDUCTION D'EAU, Université Mohamed khider-Biskra,65 pages.

[7] **Mescand. L**, Hydraulique générale, Tome II, édition Paris 1971.

[8] **M.MEUNIER** "Les coup de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression", ENGREF, Paris 1980

[9] **PERNES, P.** Hydraulique unidimensionnelle partie2,éd. Cemagref, France 2001.

[10] **A. DUPONT**, (1977) Hydraulique urbaine, Tome II : Ouvrage de transport, élévation et distribution des eaux, 3éme Editions Eyrolles, Paris, France

[11] **M.BOUMARAH, A.GOURDIN** " Méthodes numériques appliquées ", OPU, Edition1993.

[12] **CARLIER.M**,(1972) Hydraulique générale et appliquée, Edition Eyrolles , Paris. France

- [13] **S.BENNIS**, (2009) hydraulique et Hydrologie 2eme édition. , école de technologie supérieure, Université du Québec, CANADA. 475p
- [14] **OURAGH.Y**, (1994) Ecoulement forcé en hydraulique, Tome2, Edition O.P.U, Alger.
- [15] **A.G.H.T.M**, (1991) Lesstation de pompage d'eau, travaux de la commission Distribution de l'eau de l'Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux, Lavoisier, Paris, France.
- [16] **J.L.BOILLAT, P de SOUZA**, (2004), HYDRAULIC SYSTEM- Modélisation des systèmes hydrauliques à écoulements transitoires en charge, communication Numéro 16 Du laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, suisse.
- [17] **R.Ginocchio, P-L.viollet**, (2012) L'énergie hydraulique, collection EDF R&D. 2 ème Édition Lavoisier.
- [18] Le guide du logiciel AFT Impulse 2.0.