



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Thème :

*Etude et mise au point du banc d'essai des
phénomènes transitoire dans les conduites.*

Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme

De Master

Option : Génie Energétique

Présenté

Et soutenu publiquement par

Mr. AZIR belqassim

Mr. MEKRI Mohamed

Devant le jury et le président ci –dessous

President: Mr. AZZI. Ahmed

Encadreur: Mr. ALIANE. Khaled

Examineurs: Mr. SEBBANE. Omar

Mr. .MIMOUN Okacha

Dédicaces

Je dédie ce travail aux êtres les chers dans ma vie

Le plus grand merci revient a mon dieu et a mes très cher parents, pour leur sacrifices et leur encouragements, et qui grâce a mon dieu et a eux j'ai pu achever mes études.

A mes sœur Hanane, Sarah, Darine et mes frères Mohammed, Féçal.

A toute ma famille (AZIR &CHAFIE)

A tout mes amis et mon groupe de karkabou fourssene hadja maghnia sans exception et en particulier : Bihi Ishak, bouhmidi youcef.

A tout mes amis de MASTER 2 de Génie Energétique

Promotion 2011/2013

A mon binôme MEKRI MOHAMMED

Enfin a tous ceux qui de près ou de loin, et a tout ce qui m'aiment.

Belqassim

Dédicaces

Le plus grand merci revient à mon dieu qui lui seul ma guidé. Dans le bon sens durant ma vie et qui m'aide à réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce mémoire :

A mon père.

A tout ma famille (mekri&bendjabbore)

A tous mes amis Rahoui Laredje et son frère Rahoui Mohamed Et sans exception.

A tous mes amis de master 2 de Génie Energétique

Promotion 2010 / 2013

A mon binôme AZIR BELQASSIM

Enfin un grand merci à tous mais amis et ma famille, et ils sont trop nombreux pour être cites.et merci aussi pour leur encouragements m'ont permis d'en arriver la.

Mohammed.

REMERCIEMENT

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé sous la direction de Monsieur ALIANE Khaled, à la Faculté de Technologie, Université d'Abou Bekr Belkaid à Tlemcen.

Nous sommes conscients de la reconnaissance qu'on doit à notre encadreur pour avoir dirigé ce travail et aussi pour les conseils éclairés et les encouragements qu'ils nous ont sans cesse prodigués tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements vont aux membres de jury, SEBBANE OMAR, MIMOUN OKACHA Qu'ils trouvent à travers ces expressions nos sincères remerciements pour l'honneur qui m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Nous remercions également Monsieur AZZI AHMED, d'avoir accepté de présider ce jury, nous lui en sommes très reconnaissants.

Il est agréable d'exprimer nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé élaborer ce mémoire et à toute personne ayant participé à notre "confection" que ce soit sur le plan éducatif ou instructif.

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces (<i>Belqassim</i>).....	II
Dédicaces (Mohamed).....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Liste des notations.....	VII

INRODUCTION GENERALE.....01

CHAPITRE 1 Etude théorique du phénomène transitoire

I.1- Description des phénomènes physique en jeu	05
I.2- Description détaillé du phénomène transitoire.....	05
I.2.1- Définition	05
I.2.2- Les sept facteurs déterminant la sévérité de la propagation et l'onde de Pression ou du coup de Béliet	06
I.2.3- Visualisation physique.....	07
I.2.4- Modélisation du coup de Béliet pour une conduite à section constante.....	09
I.2.5- Les vannes.....	11
I.2.6- Le système continu (eau-conduite).....	12
I.2.7- Classification des écoulements instationnaires ou des phénomènes transitoires.....	12
A-Oscillation en masse ou montée subite.....	12
B-Coup de Béliet ou écoulement transitoire	13
C-Oscillations de la pression ou résonance	13
D-Oscillation de la structure.....	14
I.2.8- Méthode de contrôle de la pression transitoire.....	14
A-Méthode de réduction de la vitesse de l'onde	14

B-Réduction du taux de changement d'écoulement.....	15
C-Méthode de limitation de la pression.....	15
D-d'autres méthodes.....	15
I.3-Description du phénomène de coup de Bélier.....	15
I.3.2- Description.....	15
I.3.2- Couplage acoustique de deux tubes montés en série.....	27

CHAPITRE 2

Présentation du dispositif expérimental

II.1- Introduction.....	33
II.2- Présentation générale de banc d'essai.....	34
II.2.1- Description.....	34
II.2.2- Exigences d'installation.....	39
II.3- Présentation de l'instrumentation.....	40
II.6.1- Mode opératoire du banc d'essai.....	44

CHAPITRE 3

Résultats et interprétation

III.1 -Introduction.....	47
III.2 – les résultats théoriques.....	47
III.3- présentation des expériences.....	53
III.4 – Les résultats des expériences.....	54
III.5-Conversion des résultats.....	60
III.6 –Interprétation et dépouillement des résultats.....	61
III.6.1-Interprétation des graphes.....	61
III.6.2-la durée de l'impulsion.....	63
III.6.3-La variation des pressions.....	64
III.5- Conclusion	

CONCLUSION GENERALE.....	65
---------------------------------	-----------

Référence bibliographique	66
--	-----------

I. Introduction général

Depuis plus d'un siècle, nombreuses ont été les études théoriques et expérimentales portant sur les écoulements transitoires en conduites. Du point de vue pratique et industriel, on s'est surtout intéressé à l'estimation des pressions provoquées par le phénomène dit de coup de Bélier, au nom suffisamment évocateur des dommages possibles sur les canalisations et le matériel hydraulique. Les circonstances où peuvent apparaître ces variations de pression suite de perturbations volontaires (changement de régime) ou accidentelles (rupture de conduites, arrêt de pompes) sont nombreuses.

A coté du cas historique des conduites forcées d'usine hydroélectrique qui fut à l'origine du développement de bien de méthodes de calcul, citons pour mémoire les réseaux urbains de distribution d'eau potable, les systèmes de conduites d'irrigation et les oléoducs en génie pétrolier. En écoulement transitoire, turbulent ou laminaire, la part essentielle de la dissipation d'énergie provient des pertes de charge dues au frottement du fluide sur les parois, c'est pourquoi plusieurs modèles de frottement en régime transitoire ont été développés.

Le transitoire, dans les installations hydrauliques constitue un danger permanent, qui peut survenir à tout moment suite aux diverses manipulations des éléments du réseau.

Le régime transitoire occasionne l'apparition de pressions très élevées ou très faibles, qui engendrent des conséquences désastreuses pour la survie de l'installation, il est source de plusieurs dégâts (détérioration des conduites) qui occasionnent des coûts d'équipements et d'entretien habituellement non prévus son étude et sa maîtrise présentent des intérêts remarquables, lors de la conception et l'implantation des réseaux, en ce sens qu'elle permet, lors du dimensionnement d'en tenir compte pour le choix des diamètres des conduits ou pour l'installation d'éléments pouvant atténuer les effets indésirables.

La prévention du transitoire exige l'utilisation de gros diamètre et d'épaisseurs élevées, ce qui revient toujours cher mais néanmoins garantit une certaine sécurité vis à vis des conséquences qu'il peut entraîner.

Le transitoire est un phénomène complexe, qui prend naissance à la suite d'une variation de l'écoulement. Ce dernier possédant une certaine vitesse, qui fonction de sa masse lui communique une énergie cinétique qui peut s'annuler à la suite d'une manipulation sur le réseau.

En vertu de la loi de Conservation de l'énergie, l'énergie initiale ne peut disparaître instantanément, en fait-elle se transforme en énergie potentielle sous forme d'ondes de surpression et de vitesse, qui se propagent le long de la conduite avec une célérité fonction de l'élasticité du matériau et de la compressibilité du fluide.

Dans les réseaux hydrauliques, figurent divers éléments qui peuvent engendrer la variation de l'écoulement, donc création d'un régime transitoire, parmi ces éléments :

- ✓ les vannes qui occasionnent un phénomène transitoire dont la sévérité dépend des conditions de manipulation

(ouverture-fermeture, brusque, continue, ou lente) et

De la constitution du réseau.

- ✓ -les pompes et turbines qui provoquent le transitoire par leurs

Démarrages, arrêts, ou pertes de puissance.

II. problématique

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

Cette perturbation, dont l'amplitude peut être importante et qui se propage, est communément appelé onde. Dans le domaine de l'hydraulique, elle est connue sous le nom de coup de Bélier, cette désignation ayant pour origine la variation de pression extrêmement brutale qui est souvent observées.

Dés lors, l'étude des régimes transitoires (régime subissant des perturbation ou des variations) peut être traité de façon générale, avec prise en compte de l'élasticité du milieu et de la compressibilité du fluide, ce qui conduit à une évaluation précises des paramètres (pression, débit, etc....) en chaque point du fluide et quelque soit le temps considéré, c'est la théorie du coup de Bélier, appelé aussi onde de choc ou choc hydraulique.

CHAPITRE 1

Etude théorique du phénomène transitoire

I.1- Description des phénomènes physique en jeu

I.1.1 -Etat d'équilibre d'un système hydraulique

Les phénomènes transitoire hydraulique apparaissent lorsque l'équilibre des forces agissant sur un système est modifié. Quand un liquide est en mouvement dans une conduite et que ce mouvement ne varie pas dans le temps, il y a un état d'équilibre permanent. En fait, il y a un équilibre entre l'énergie disponible (ou potentielle) et l'énergie due au mouvement (cinétique) et qui sera perdue par le frottement, ce qui définit un mouvement permanent.[5]

Cette vision est macroscopique car, à une échelle plus petite, on observe que les vitesses fluctuent constamment autour d'une valeur moyenne, c'est une manifestation de la turbulence. Pour les besoins de l'analyse que nous ferons ici, nous allons considérer les effets moyens dans le temps, de la turbulence, notamment en ce qui concerne l'évaluation des forces de frottements qui sont les responsables majeurs des pertes de charges, selon le régime d'écoulement.

I.2- Description détaillée du phénomène transitoire

I.2.1- Définition

Quand le régime d'écoulement dans une conduite fermée se trouve modifié brusquement, il se produit une série d'ondes de pressions, qui se propagent sur toute la longueur de la conduite, et qui s'amortissent progressivement produisant des modifications de la pression dynamique du fluide ou plus précisément créant des trains d'ondes de pressions peut présenter un risque de « coup de élier ».

Les causes les plus fréquentes de création de trains d'ondes de pression (et de dépression) d'amplitudes importantes sont les suivantes :

- Un démarrage ou arrêt d'une pompe.
- Une modification de position de vanne.
- Une ouverture ou fermeture de vanne.
- Un changement de vitesse.

-
- Une panne d'alimentation d'énergie.
 - Des opérations incontrôlées.

Hormis les deux derniers cas, les autres opérations sont des actions délibérées qui peuvent être accomplies sans risque. Par contre, les pannes d'énergies ou opérations incontrôlées représentent des cas extrêmes qui doivent être pris en compte des dispositifs supplémentaires adéquats.

Les trains d'ondes se réfléchissent aux extrémités et se propagent dans un sens puis dans un autre, ces trains d'ondes successifs créent des pressions et des dépressions suivant leur sens de propagation et suivant les différents points considérés de la conduite.

La variation de pression qui s'ajoute algébriquement à la pression normale qui règne peut en résulter des surpressions qui peuvent devenir dangereuses conduisant à la formation d'occlusions gazeuses dont la résorption peut amplifier dangereusement l'onde de surpression à l'amont de son retour.

Donc généralement le coup de Bélier est considéré comme une onde de choc qui se propage dans un tronçon de conduite lors d'un changement d'une de ses conditions aux limites. Le phénomène est répétitif (mais il devient stable avec l'intervention des forces de frottements) et il se reproduit avec une période qui est égale à $4L/C$ ou C désigne la célérité ou la vitesse de propagation de l'onde de pression dans la conduite de longueur L . [6]

I.2.2.- Les sept facteurs déterminant la sévérité de la propagation et l'onde de pression ou du coup de Bélier :

- La vitesse d'écoulement en régime initial (généralement le régime est permanent) dans la conduite (V).
 - Le module d'élasticité du matériau constituant la conduite (E_c).
 - Le module d'élasticité de l'eau (E_{eau}).
 - Le diamètre intérieur de la conduite (D).
 - L'épaisseur des parois de la conduite (e).
 - La durée de fermeture de la vanne (T).
 - La longueur de la conduite (L). [7]
-

I.2.3- Visualisation physique

Analysons le cas général d'une fermeture instantanée d'une vanne aval à l'instant $t_0 = 0$. la propagation du coup de Bélier ainsi générée se subdivise en quatre phases (figure 1.1) :

Le rapport $t_{ca}=L/C$ est défini comme étant le temps caractéristique du tronçon de conduite.

Phase 1 : $0 < t < t_{ca}$:

Remontée d'une onde de surpression à partir de la vanne.

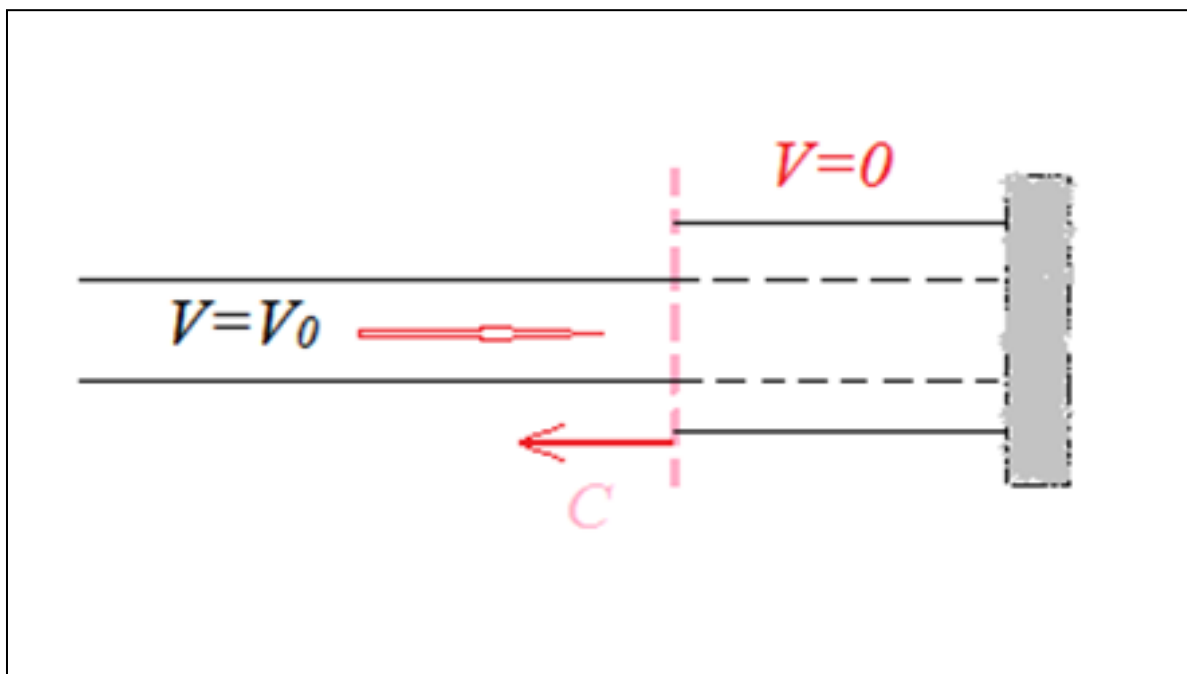


Figure 1-1 : schéma de phase 1

Phase 2 : $t_{ca} < t < 2t_{ca}$:

Descente de l'onde après réflexion totale au réservoir, qui joue le rôle d'un nœud de pression ; le diamètre de la conduite reprend sa valeur initiale.

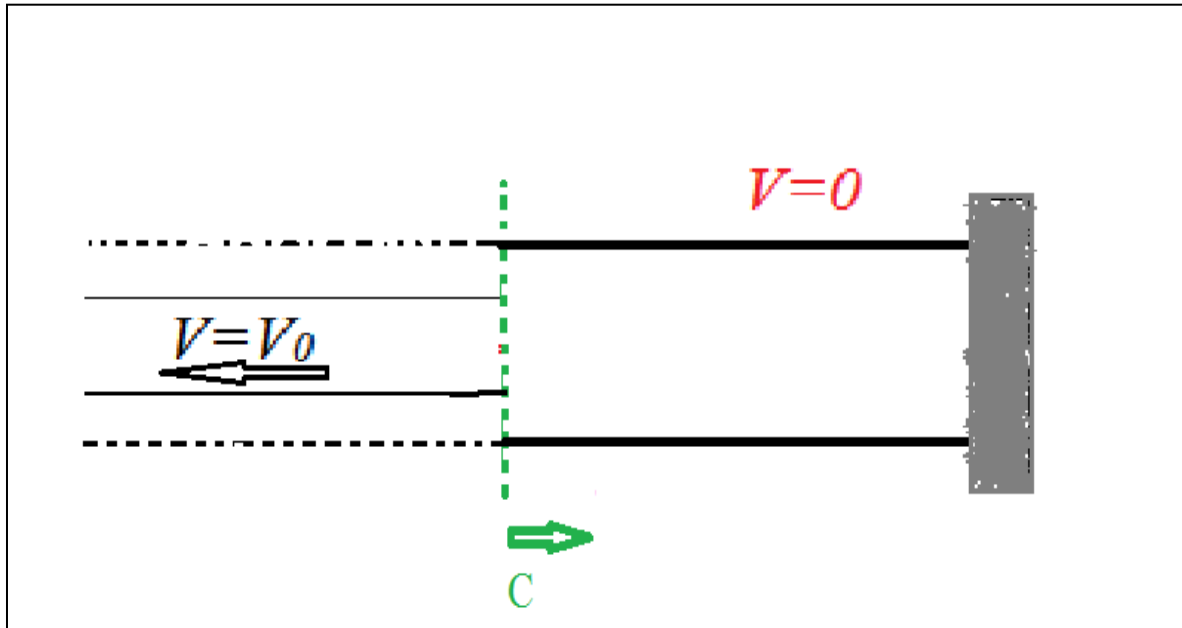


Figure 1-2 : schéma de phase 2

Phase 3 : $2t_{ca} < t < 3t_{ca}$:

Remontée de l'onde sous forme d'une onde de dépression, produite par la réflexion totale à la vanne aval, qui représente un nœud de débit. la conduite se contracte.

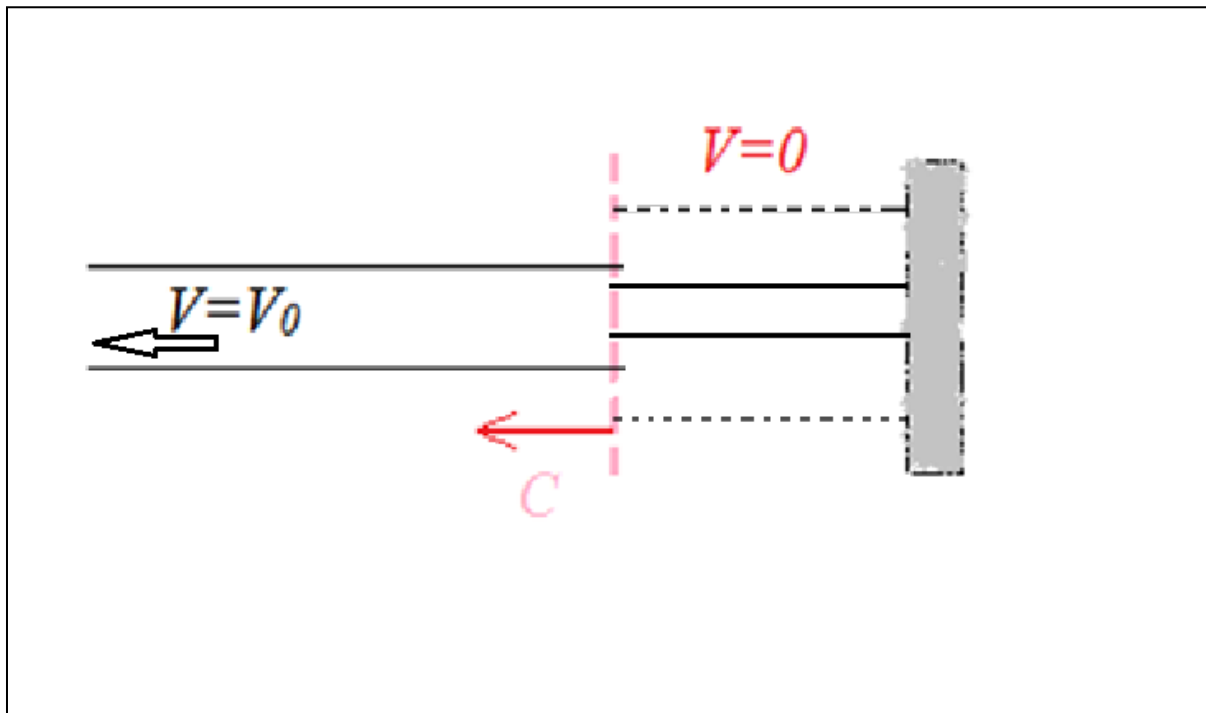


Figure 1-3 : schéma de phase 3

Phase 4 : $3t_{ca} < t < 4t_{ca}$:

Redescente de l'onde de dépression. la conduite reprend sa forme initiale.

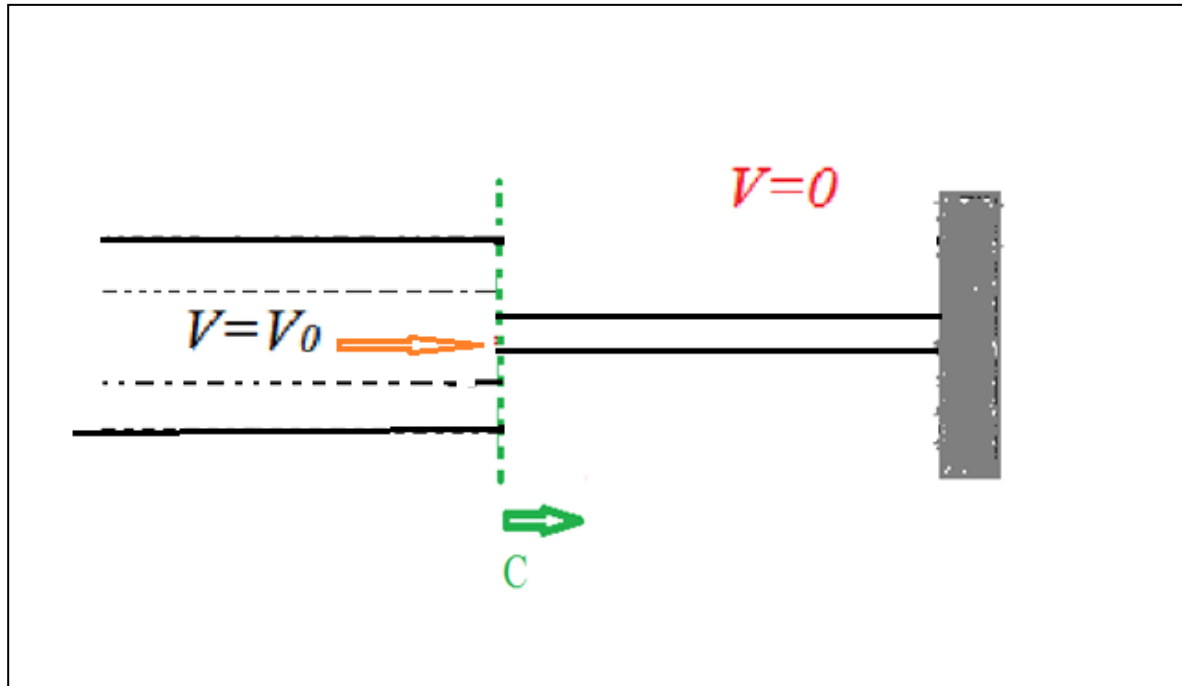


Figure1-4 : schéma de phase 4

I.2.4.- Modélisation du coup de Béliier pour une conduite à section constante :

Considérons un tronçon de conduite comme volume de contrôle. Pour simplifier, la variation de la section de conduite est négligée. En remontant la conduite suite à une fermeture complète et instantanée de la vanne aval, l'onde de choc modifie la densité de l'eau ρ , ainsi que la vitesse de l'écoulement ($\Delta V = -V$ pour une fermeture complète)

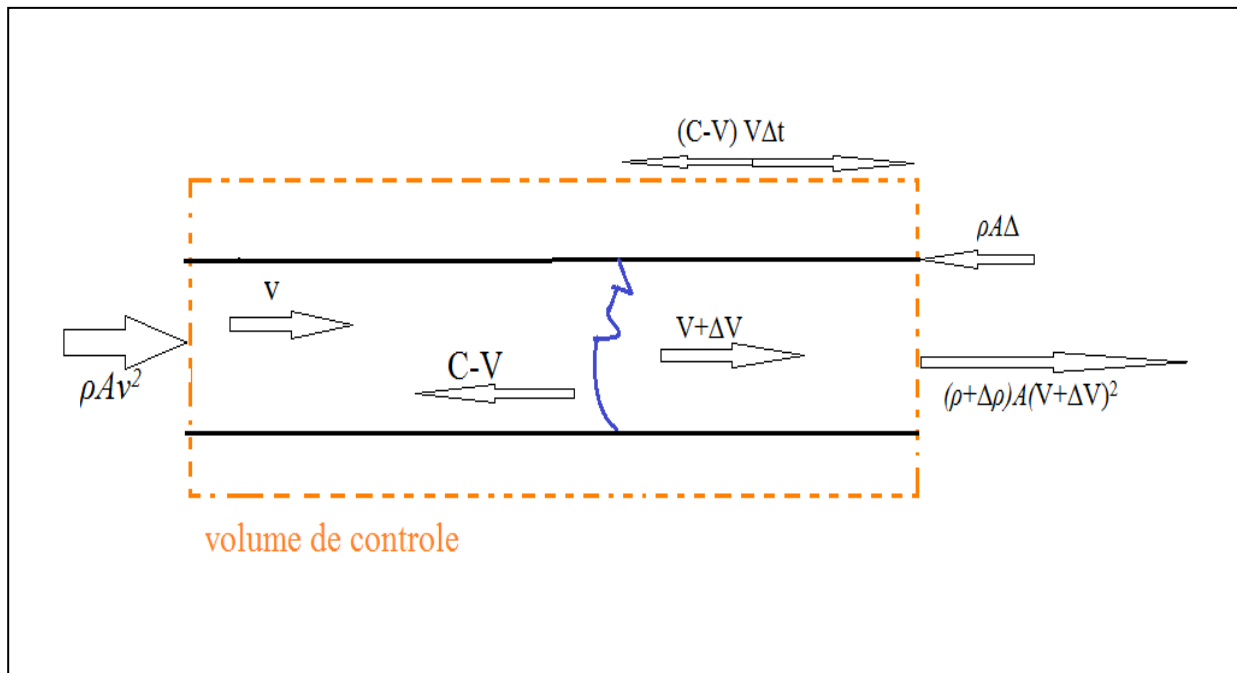


Figure 1-5 : schéma simplifié d'une onde de pression remontant une conduite

a) D'après la figure 2.2, l'équation de continuité peut s'écrire :

$$\rho AV - (\rho + \Delta\rho)A(V + \Delta V) = \frac{A(C-V)\Delta t[(\rho + \Delta\rho) - \rho]}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Le second membre exprime le gain en masse résultant du changement de la densité, donc de la compression de l'eau.

Remarque :

Théoriquement on peut considérer les liquides comme incompressibles quand les variations de pression mise en jeu sont faibles devant les pressions absolues. Toutefois les milieux réels présentent une certaine compressibilité d'où il faut tenir compte s'il se produit de rapides variations de pressions (même très petites). Car ce sont les phénomènes de compressibilité qui permettent d'expliquer la propagation des ondes élastiques dans les milieux matériels.

b) L'équation de la conservation de la quantité de mouvement s'exprime par :

$$-\Delta p A = A(C - V)[(\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V) - \rho C] + A(\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V)^2 - A\rho V^2 \quad (1.2)$$

Après simplification et combinaison des équations (2.1) et (2.2), on obtient :

$$\Delta p = -C_p \Delta V \quad (1.3)$$

Ceci montre que, pour une fermeture complète, l'amplitude du coup de Bélier est directement proportionnelle à la vitesse initiale de l'écoulement dans la conduite. Cette vitesse dépend principalement du débit et de la section de la conduite, donc des conditions d'exploitations, ainsi que des dimensions de l'installation.

De plus, l'équation montre que la surpression est d'autant plus importante que la vitesse de l'onde est élevée ; Δp serait donc infiniment grand pour un écoulement parfaitement incompressible et des conduites rigides.

I.2.5- Les vannes

Une vanne est un dispositif qui sert avant tout à arrêter le débit. Pour contrôler le débit d'un fluide on utilise surtout un robinet à soupape. Le robinet à vanne est une barrière à l'écoulement d'un solide pulvérulent s'écoulant comme un fluide, dans une conduite fermée ou dans un ouvrage ou appareil à écoulement libre, tels qu'un canal d'irrigation ou silo.

Différentes sortes de vannes :

On peut ranger les vannes dans différents catégories :

- Par la taille : depuis le simple robinet jusqu'à la vanne de régulation du débit d'arrivée d'eau dans une centrale hydroélectrique.
- Par la fonction : vanne régulatrice de débit, vanne de purge, vanne d'arrêt...
- Par le principe employé : vanne papillon, vanneau opercule, vanne trois voies....
- Par le système de commande : manuelle, électrovanne, hydraulique... [8]

I.2.6- Le système continu [eau-conduite] :

En général les systèmes continus sont composés de masses réparties et déformables, ainsi que d'éléments élastiques et dissipatifs continus et liés en général directement aux propriétés constitutives des masses associés. Un réseau hydraulique ou une station hydroélectrique sont des exemples d'un système continu. Une perturbation appliquée au fluide se propage à travers le système avec une vitesse finie due à la compressibilité du fluide et de l'élasticité des conduites.

Une analyse qui prend en compte ce phénomène de propagation d'onde est appelée une analyse en paramètres répartis, donc pour les réseaux hydraulique ou installations hydroélectriques une analyse en paramètres répartis s'impose pour déduire un modèle mathématique adéquat.

Et afin de pouvoir décrire les phénomènes transitoires, on considère le liquide comme un enchainement de tranches infinitésimalement minces.

I.2.7-Classification des écoulements instationnaires ou des phénomènes transitoires :

A-Oscillation en masse ou montée subite :

Ce terme se réfère à des situations d'écoulements instationnaires où le changement initial du mouvement du fluide est lisse et où le temps pour que les conditions importantes imposées changent est lent comparé avec le temps mis par une onde de pression pour passer à travers la colonne de fluide.

Dans les stations de pompes cette situation peut être provoquée par exemple par l'installation des chambres à air (pour protéger la ligne de charge) ou des réservoirs de montée subite (pour protéger la conduite d'aspiration). Dans ces systèmes les effets élastiques sont petits comparés aux effets d'inertie de la colonne liquide. Un changement de

mouvement régulier du fluide causera des oscillations de masse avec un long temps d'oscillation. Le comportement de la colonne liquide dans un système de montée subite peut être évalué en utilisant la théorie de la colonne rigide (théorie d'écoulement incompressible).

La théorie de la colonne rigide considère que toute la colonne du fluide en s'accélération ou en ralentissant à la même valeur dans toute sa longueur et se comporte comme un solide incompressible et considère le système de conduites comme son élastique. [9]

B-Coup de Bélier ou écoulement transitoire :

Ce terme se réfère à des situations d'écoulements transitoires où le changement du mouvement du fluide est comparativement rapide et le temps pour que les conditions imposées changent est court comparé avec le temps mis par une onde de pression pour passer à travers la colonne de fluide. Le comportement de la pression transitoire est régi par l'inertie du mouvement de l'eau et l'élasticité combinée de l'eau et du système de conduites. En général ces deux paramètres qui sont l'inertie et l'élasticité sont pris en compte, c'est la théorie de l'écoulement compressible. [10]

C-Oscillations de la pression ou résonance :

Le terme de résonance se réfère à un phénomène oscillatoire dans les systèmes de conduites dans lesquels l'amplitude des oscillations instationnaires s'accumule avec le temps jusqu'à ce qu'une défaillance se produise ou jusqu'à ce que l'écoulement oscillatoire stationnaire atteigne une amplitude considérable. La résonance se produit seulement dans /près d'une des périodes normales. Fondamentales ou harmoniques d'un système. Il doit y avoir un mécanisme imposé qui produit un afflux d'énergie pendant chaque cycle par des oscillations d'écoulements ou des pressions induites

L'amplitude des oscillations excitées peut être très petite, mais si la fréquence rencontre une des périodes normales du système, il se produit une amplification des perturbations et une résonance rapide. Plusieurs excitations sont bien connues par exemple oscillation de la vanne automatique de contrôle d'écoulement ou de pression, sortie de palpitation d'une

pompe à mouvement alternatif fonctionnement d'une turbopompe dans la partie instable de la courbe caractéristique de la pompe, vibration des ailettes de guidage.

Les études sur les écoulements oscillatoires peuvent être effectuées par la méthode d'impédance, qui utilise des fonctions de transfert pour la pression, l'écoulement, et l'impédance. Cette méthode comporte l'utilisation l'arithmétique complexe.

D-Oscillation de la structure :

Sous les conditions de l'écoulement transitoire des effets alternatifs entre le fluide et le système de conduites peuvent causer les mouvements axiaux et radiaux instable de la structure. Des force dans la fondation peuvent se produire selon les conditions statique du système de conduites, qui dépassent les force durant les conditions de l'écoulement stationnaires .en particulier, les fluctuations de l'oscillation stationnaires peuvent être dangereuses. [11]

I.2.8- Méthode de contrôle de la pression transitoire

➤ classification des méthodes préventives :

Les changements soudains de l'écoulement dans un système de conduites mèneront toujours aux variations transitoires de la pression .pour les restituer dans des limites tolérables plusieurs méthodes de contrôle des phénomènes transitoire sont disponible .d'un point de vue analytique les méthodes suivant peuvent être distinguées.

A-Méthode de réduction de la vitesse de l'onde :

Par exemple en purgeant l'air dans le fluide .cette méthode n'est pas employée dans des systèmes d'approvisionnement en eau comme mesure de protection contre la pression transitoire .seulement une forme divers est connu qui purger l'air pour réduire la sévérité de la cavitation dans des pompes

B-Réduction du taux de changement d'écoulement :

Par exemple par une fermeture plus lente de la vanne (taux de la fermeture),

Augmentation de l'inertie de la pompe.

C-Méthode de limitation de la pression :

Par exemple par des réservoirs de montée, subite (des anti-Béliers), des chambre d'air (réservoir d'air).

D-d 'autres méthodes :

Par exemple valves d'admission d'air, soupapes de décharge, by-pass.

Le choix finale des dispositifs de contrôle de pression se fait normalement après une considération de la fiabilité, des inconvénients, de la quantité d'entretien exigé et du coût.

I.3- Description du phénomène de coup de Bélier.

I.3.1- Description

Le coup de Bélier est très connu des hydrauliciens et trouve sa justification dans le principe de la conservation de l'énergie d'un écoulement, et plus particulièrement dans la conversion entre énergie cinétique et pression. Ce phénomène est généré par l'ouverture rapide (ou la fermeture) d'une vanne qui engendre de brusques accélérations (ou décélérations) du fluide, conduisant à des fluctuations de pression et de débit qui peuvent quelquefois être destructrices. De nombreux paramètres régissent le coup de Bélier. On peut citer notamment les caractéristiques du circuit (géométrie, matériaux), du fluide (compressibilité) ainsi que la vitesse d'ouverture de la vanne.

Considérons une conduite cylindrique indéformable de diamètre D , et de longueur L dans laquelle un fluide parfait est au repos (volume V_0). Les propriétés pertinentes de ce dernier sont la masse volumique ρ et le module de compressibilité β (inverse de la grandeur thermodynamique appelée compressibilité) qui caractérise l'évolution de la pression d'un domaine fluide lors de son changement de volume. Ainsi, un fluide incompressible présente une compressibilité nulle et donc un module de compressibilité infini.[12]

$$\beta(P) = \left(\Delta P \frac{Vol}{\Delta Vol} \right) = \frac{1}{X(P)} \quad (1.4)$$

On constate que la compressibilité est une grandeur dépendante notamment de la pression du liquide. C'est la raison pour laquelle nous utilisons comme fluide de l'Isane, produit calibré aux propriétés établies.

La figure 1.6 présente l'évolution de la compressibilité de l'Isane en fonction de la pression, les mesures étant réalisées à température ambiante. La dépendance de la compressibilité de l'Isane à la pression suit donc une loi linéaire sur la plage de variation considérée (de 0 à 200 bars).

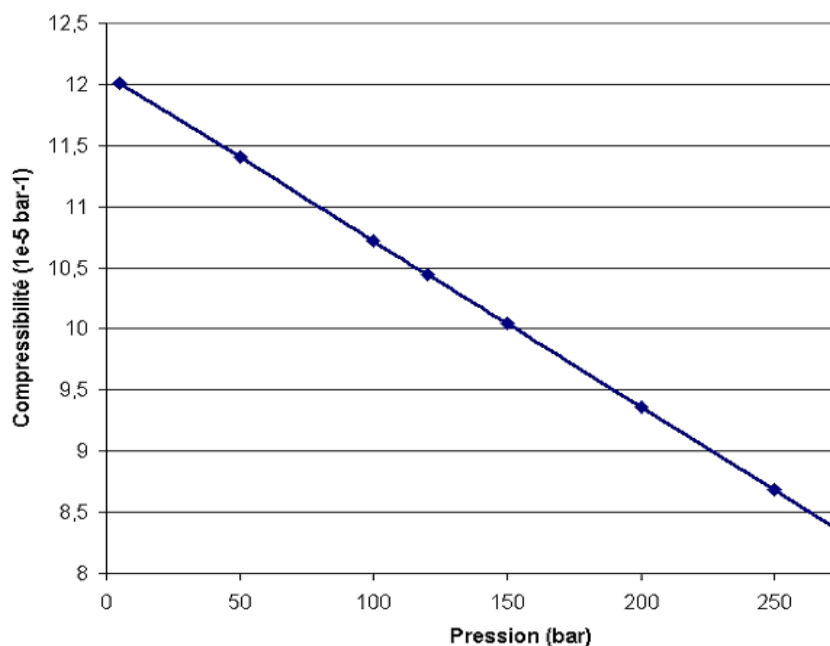


Fig. 1.6 – Compressibilité de l'Isane en fonction de la pression.

Il est alors évident que la pression du liquide ne peut être considérée comme un paramètre sans influence sur la compressibilité de l'Isane qui présente une variation de plus de 10 % sur un intervalle de pression compris entre 100 et 200 bars. Cette dépendance sera aussi valable pour l'analyse de la compressibilité équivalente définie et sera prise en compte lors de la modélisation des systèmes.

Considérons à présent l'ouverture instantanée d'une vanne. Une onde de dépression d'amplitude ΔP , due à la mise en mouvement du fluide (vitesse débitante X), se propage de la vanne vers l'autre extrémité de la conduite à la célérité du son (notée C). Une fermeture

de vanne génère symétriquement une onde de surpression d'amplitude ΔP de célérité C . Les grandeurs ΔP et C sont définies à partir des équations 1.2 et 1.3 suivantes.

$$C = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad (1.5)$$

$$\Delta P = \beta \frac{\Delta Vol}{Vol} \quad (1.6)$$

L'expression de la célérité du fluide ne dépend donc, dans le cas d'une conduite indéformable, que des propriétés de densité et de compressibilité du fluide. La fluctuation de pression dépend de la compressibilité du fluide mais aussi de la géométrie du circuit (sa longueur). Enfin, le débit moyen de la vanne conditionne le volume de fluide injecté, ΔVol .

La détermination de la variation de volume liée à cette fluctuation de pression peut être facilitée par l'illustration graphique du coup de Bélier du fait du caractère in stationnaire, et même périodique de ce phénomène, se perpétuant de plus indéfiniment dans le cas d'un fluide parfait.

Considérons donc cette même conduite indéformable définie précédemment au sein de laquelle une onde de pression est générée par la fermeture instantanée d'une vanne située en $x=L$, l'origine de la conduite étant en $x=0$ (figure 1.2). On définit ici la grandeur sans dimension correspondant au nombre de trajets de l'onde dans la conduite (définition 1.4).

$$\mu_{CDB} = \frac{t}{\frac{L}{c}} \quad (1.7)$$

A $\mu_{\text{CDB}} = 0$, on ferme instantanément la vanne ce qui a pour effet de stopper immédiatement la tranche fluide localisée en $X = L$, générant alors une onde de surpression qui se propage ensuite vers le réservoir à la vitesse C (sens inverse de l'écoulement).

Tout au long de la remontée de l'onde ($0 < \mu_{\text{CDB}} < 1$) les particules fluides sont successivement informées de la fermeture de la vanne et s'arrêtent instantanément à leur tour, contribuant localement à une élévation de pression.

On illustre cette surpression par un gonflement schématisé de la conduite (figure 1.7) L'écoulement en amont du front d'onde continue sa progression du réservoir vers la vanne fermée avec un débit $Q_0 = U.S.$

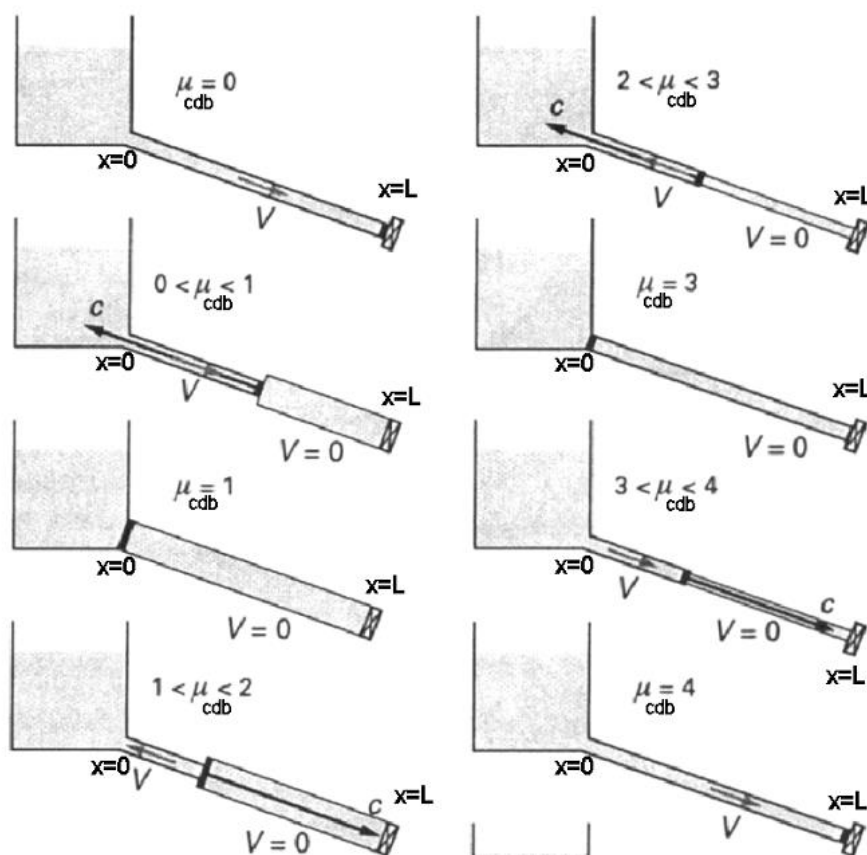


Fig. 1.7 – Evolution temporelle du phénomène de coup de Bélier. Les surpressions (dépressions) sont représentées schématiquement par un gonflement (rétrécissement) de la conduite.[5]

L'onde arrive alors au réservoir ($\mu_{\text{CDB}} = 1$) et tout le fluide contenu dans la conduite est alors immobile, en surpression par rapport à son état initial. Ce fluide comprimé, en équilibre

instable avec le fluide du réservoir, va donc se détendre vers ce dernier. Une nouvelle onde de pression se dirige cette fois-ci du réservoir vers la vanne. L'information transmise concerne alors la valeur de la pression au réservoir, inférieure à celle de la conduite, et donc la mise en mouvement inverse de l'écoulement, "vidangeant" la conduite dans le réservoir.

Le sens de l'écoulement (conduite vers réservoir), le sens de l'onde de pression (réservoir vers vanne) et son information (mise en mouvement) pour $1 < \mu_{CDB} < 2$ sont exactement les inverses de ceux rencontrés

Pour $0 < \mu_{CDB} < 1$. La mise en mouvement de l'écoulement de débit $-Q_0$ induit un retour au champ de pression initiale observé pour $\mu_{CDB}=0$.

Au terme de ce premier retour, l'onde de pression est alors localisée à la vanne, en $X=L$. La conduite a repris sa forme initiale et présente un écoulement uniforme de débit $-Q_0$, orienté vers le réservoir et inversé par rapport au débit d'origine.

La vanne étant une extrémité fermée, l'onde incidente de dépression est réfléchiée en une même onde de dépression de sens inverse, remontant la conduite vers le réservoir pour $2 < \mu_{CDB} < 3$ stoppant l'écoulement au fur et à mesure de sa propagation. La représentation géométrique de la conduite en terme de pression est donc une conduite de section inférieure à la section initiale puisque 'en dépression. L'écoulement n'ayant pas été encore atteint par l'écoulement est toujours orienté vers le réservoir alors que les domaines fluides "informés" sont au repos.

L'intégralité de la conduite est alors en dépression ($\mu_{CDB}=3$) conduisant de nouveau à un équilibre de pression instable entre réservoir et conduite au pro...t du réservoir cette fois-ci qui, étant une extrémité ouverte, impose une onde réfléchiée de nature différente de l'onde incidente. C'est donc une onde de surpression qui va se propager vers la vanne recréant au fur et à mesure de son avancement ($3 < \mu_{CDB} < 4$) un écoulement aux propriétés analogues à celles de l'écoulement avant fermeture (débit, sens et pression). L'écoulement uniforme présent pour $\mu_{CDB}=4$ est le même que lors de la fermeture de la vanne ($\mu_{CDB}=0$).

En l'absence de dissipation visqueuse (fluide parfait), l'énergie est entièrement conservée au cours de chaque cycle de période $t = \mu_{cdb} \frac{L}{c} = \frac{4L}{c}$. La fréquence du coup de Bélier en conduite simple est notée F_{cdb} et est donnée par la relation 1.8 (configuration acoustique de type ouverte-fermée).

$$F_{cdb} = \frac{c}{4L} \quad (1.8)$$

A partir de cette analyse qualitative présentant l'écoulement en tous points pour certains temps caractéristiques, on peut évaluer de manière beaucoup plus directe la surpression ΔP due à la fermeture de la vanne (relation 1.8).

En effet, l'équation 1.3 permet le calcul de cette surpression à partir du volume de la conduite ($V=S*L$) et de la variation du volume de fluide maintenant (équation 1.9).

$$\Delta V = U * S * t = U * S * \frac{L}{c} \quad (1.9)$$

Par la définition de la célérité de l'onde de pression (relation 1.9), on peut exprimer ΔP en fonction de la masse volumique du fluide, de sa compressibilité et de la vitesse débitante fixée par la vanne et la charge de la conduite (équation 1.10).

$$\Delta P = \rho * C * U \quad (1.10)$$

Le suivi temporel des fluctuations de pression en plusieurs endroits distincts est aussi d'un grand intérêt et complémentaire du raisonnement précédent. Ainsi, l'évolution temporelle de la pression à l'extrémité amont de la conduite (réservoir $x=0$) à l'extrémité aval (vanne $x=L$) ou en tout autre point sera différente.

Les observations suivantes se basent sur la figure 1.7 (donnant la pression pour tout x et à des temps donnés) et sont retranscrites dans la figure 1.8 (donnant la pression pour tout t et à des endroits donnés).

Ainsi, l'extrémité aval de la conduite (vanne, $X=L$) présente une surpression constante de $\mu_{CDB} = 0$ à $\mu_{CDB} = 2$ puis une dépression constante de $\mu_{CDB} = 2$ à $\mu_{CDB} = 4$, l'évolution de la

pression en ce point est donc un signal créneau centré sur la pression à la fermeture et d'amplitude crête à crête de $2\Delta P$.

Un capteur de pression placé au centre de la conduite ($x = \frac{L}{2}$) indiquera quant à lui une pression constante et égale à la pression initiale jusqu'à $\mu_{\text{CDB}} = 0.5$ où l'onde de surpression d'amplitudes ΔP arrive de la vanne. Cette surpression perdure jusqu'au retour de l'onde porteuse de l'information de la pression du réservoir, c'est-à-dire jusqu'à $\mu_{\text{CDB}} = 1.5$.

La pression conserve cette valeur jusqu'au deuxième retour de l'onde ($\mu_{\text{CDB}} = 2.5$), réfléchiée cette fois sur la vanne fermée et imposant une dépression d'amplitude ΔP . De manière analogue à la première onde de surpression, la dépression perdure jusqu'à ($\mu_{\text{CDB}} = 3.5$) avec un retour de l'écoulement à la pression initiale, jusqu'au prochain passage de l'onde ($\mu_{\text{CDB}} = 4.5$).

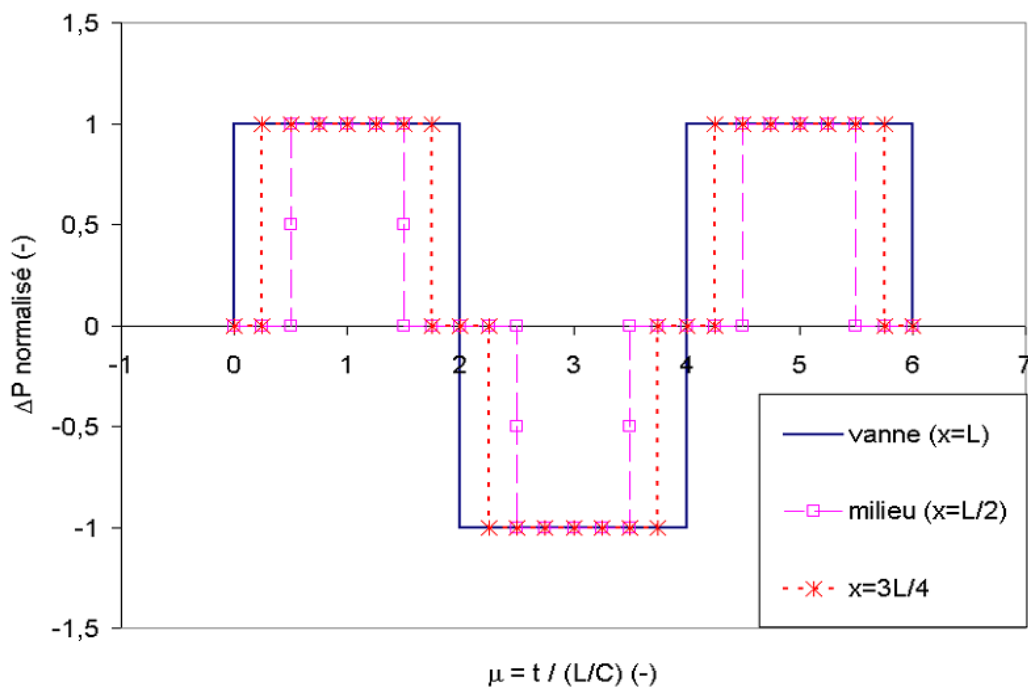


Fig. 1.8 – Evolution temporelle de la pression en différents points du circuit [4]

Il est alors évident que la mesure d'un écoulement à différents endroits d'un circuit conduira à des résultats différents comme illustré sur la figure 1.8 par les trois premières courbes de pression en trois points de la conduite.

Cette observation est très importante lors de l'utilisation de la méthode de reconstruction car la mesure de débit liquide instantané est effectuée en amont de l'injecteur, dans le tube de mesure en Pyrex. Ce débit instantané mesuré n'est pas le même que celui en sortie de l'injecteur. La complexité des circuits de carburant utilisés et de l'injecteur nécessite une modélisation plus poussée et l'utilisation d'un code de calcul approprié.

De plus, les considérations précédentes ne concernent qu'un cas idéal concernant un écoulement de fluide parfait, généré par une fermeture instantanée de vanne, qui plus est dans une conduite indéformable. Ainsi, l'utilisation de plusieurs conduites conduira à une prise en compte de leur couplage acoustique dans la détermination des modes propres du système

La déformation des conduites induira un changement de la compressibilité (dépendant uniquement du fluide, relation 1.10) vers une compressibilité équivalente prenant en compte les propriétés du circuit.

D'autre part, l'hypothèse de fluide parfait (viscosité nulle) sous-tend une mise en mouvement uniforme instantanée du fluide alors qu'un écoulement de fluide réel nécessitera un temps d'établissement à chaque passage de l'onde porteuse d'information de changement de pression.

Enfin, la vitesse de fermeture de la vanne conditionnera quant à elle l'amplitude des fluctuations de pression (de débit) suivant la loi de Michaud dépendant du rapport entre durée de manœuvre et temps d'aller-retour de l'onde $\frac{2L}{c}$

Quoi qu'il en soit, et dans la configuration précédente, la valeur maximale de l'amplitude de pression sera celle donnée par la relation 1.7.

➤ Compressibilité équivalente

Comme évoqué précédemment, la compressibilité d'un fluide est uniquement dépendante de la masse volumique et de la célérité du son en son sein. Elle intervient notamment dans l'évaluation des amplitudes et fréquences des oscillations de pression (débit) et constitue donc une grandeur critique de cette étude in stationnaire.

Cependant, lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite déformable, la compressibilité n'est plus uniquement liée aux propriétés du fluide mais aussi à celles de la conduite. Son élasticité contribue en effet à la dynamique du système et on peut imaginer qu'une conduite en caoutchouc et une conduite en acier (moins élastique) ne réagiront pas de la même façon à la même variation de pression.

Dans l'étude concernant le système de carburant moyenne pression, un flexible est utilisé pour assurer la liaison entre sur presseur et tube de mesure. La dynamique de l'écoulement sera plus "influencée" par les parties souples du circuit que par les composants rigides tels que le tube en Pyrex ou les raccords hauts pression.

L'analyse suivante permet de quantifier l'influence des différentes conduites du circuit sur la compressibilité et la célérité équivalente.

Le concept de compressibilité équivalente est donc incontournable lorsque la déformation des conduites affecte de manière significative la propagation des ondes de pression. Il ne faut alors plus considérer le fluide seul, mais le couple "conduite-fluide" aux propriétés équivalentes à celles d'un fluide actif dans une conduite équivalente.[13]

La compressibilité de la conduite (équation 1.8) dépend des paramètres de la conduite que sont le diamètre (d), l'épaisseur (e), le module d'Young du matériau (E), son coefficient de Poisson (ν) et l'épaisseur relative $r = 2 * \frac{e}{d}$

Le module de compressibilité et la célérité du son de ce nouveau fluide sont définis par les équations 1.9 et 1.10 qui pourraient être celle d'un fluide aux propriétés équivalentes dans une conduite indéformable.

$$X_{\text{conduite}} = \frac{1}{\beta_{\text{conduite}}} = \frac{2}{e \cdot E} \left[\frac{1+r+0.5 \cdot r^2}{1+0.5 \cdot r^2} + \vartheta \cdot r \right] \quad (1.12)$$

$$\beta_{\text{équivalente}} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{\text{fluide}}} + \frac{1}{\beta_{\text{conduite}}}} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{\text{fluide}} + \beta_{\text{conduite}}}} = \frac{1}{X_{\text{équivalente}}} \quad (1.13)$$

$$C_{\text{équivalente}} = \sqrt{\frac{\beta_{\text{équivalente}}}{\rho_{\text{fluide}}}} \quad (1.14)$$

La célérité et la compressibilité d'un fluide pourront donc être modifiées de façon différente en fonction du type de conduite utilisée. Dans le cas d'un gaz par exemple, de compressibilité très éloignée de celle d'un liquide, et encore plus d'une conduite indéformable, la compressibilité équivalente est dans la plupart des applications assimilée à la compressibilité du gaz.

Considérons des conduites déformables de géométries identiques (même épaisseur relative ($r = 2 \cdot \frac{e}{d}$), diamètre et épaisseur de 4 mm) mais de matériaux différents. La figure 1.9 présente l'évolution de la célérité équivalente d'une onde de pression en fonction du module de compressibilité du liquide et du module d'Young de la conduite.

La masse volumique du fluide est constante et égale à 763 kg/m³. L'intervalle de variation du module d'Young permet de considérer des matériaux variant de la matière plastique souple ($E=5 \cdot 10^3$ bars) à l'acier ($E=2 \cdot 10^6$ bars).

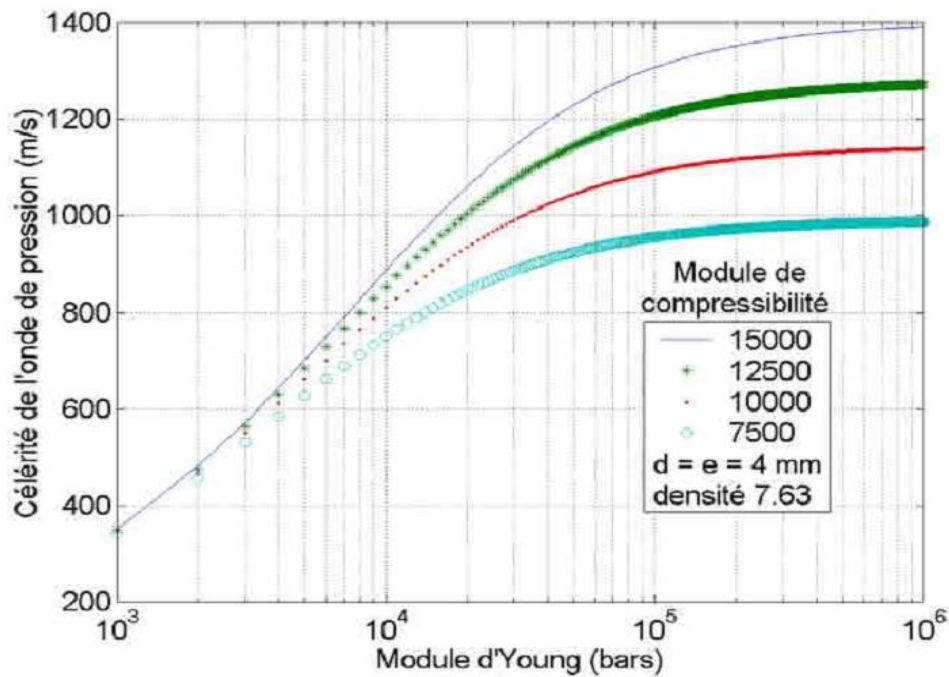


Fig. 1.9 – Célérité équivalente d'une onde de pression. Dépendance au module de compressibilité du liquide et à l'élasticité de la conduite [1].

Le graphique 1.9 met en évidence que, quels que soient les modules de compressibilité considérés, la célérité équivalente d'une onde de pression dans une conduite est d'autant plus élevée que la conduite dans laquelle elle se propage est rigide. Plus une conduite sera rigide, plus son module d'Young sera élevé, et par analogie avec un fluide, plus son module de compressibilité équivalente sera grand (ou sa compressibilité équivalente faible).

La sensibilité de la célérité équivalente du fluide vis-à-vis de la variation de l'élasticité de la conduite (seul le module d'Young varie ici) dépend du module de compressibilité du fluide. La figure 1.10 présente l'évolution du rapport entre célérité du fluide dans une conduite déformable et célérité intrinsèque du fluide en fonction du module d'Young de la conduite.

En considérant l'expression de la compressibilité équivalente (définition 1.9), on constate que la contribution de la conduite est du même ordre que celle du fluide ce qui implique que si la compressibilité du fluide est beaucoup plus importante que celle de la conduite, la compressibilité équivalente n'en sera que très peu affectée.

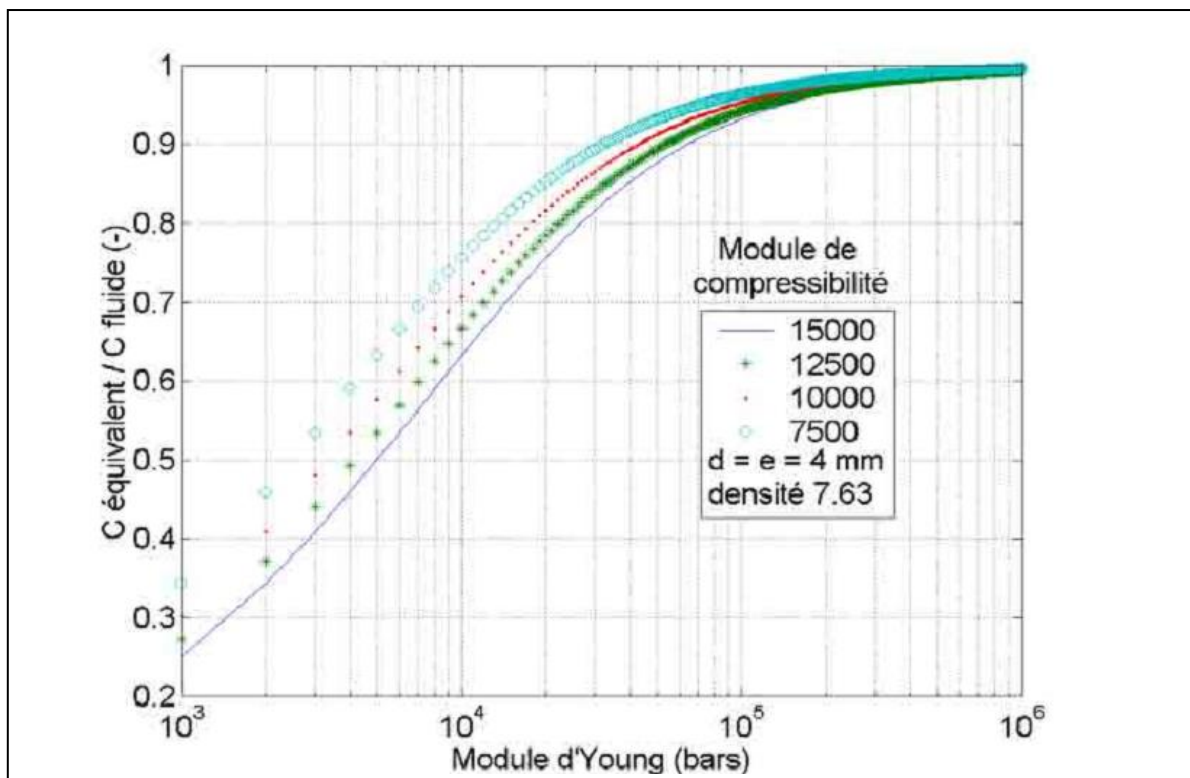


Fig. 1.10– Rapport entre célérités équivalente et intrinsèque. Dépendance au module de compressibilité du liquide et à l'élasticité de la conduite [2].

Cette dépendance de la célérité équivalente au module d'Young est notamment fonction de la compressibilité initiale du fluide. Les valeurs de module d'Young pour lesquelles la célérité équivalente chute à 90 % de la célérité du fluide sont notées $E_{0,9}$ (tableau 1.1).

Le seuil de modification de la célérité pour le fluide le moins compressible ($B_{\text{fluide}} = 15000$ bars) est atteint pour des modules d'Young de 63000 bars. Plus un fluide est compressible, plus cette valeur est faible, définissant la zone où l'élasticité de la conduite est un paramètre d'influence.

		Isane (100 bars)		Isane (200 bars)		
$\beta_{\text{fluide}} \text{ (bars)}$	7500	9350	10000	10690	12500	15000
$E_{0,9} \text{ (bars)}$	31000	39000	42000	45000	53000	63000

Tableau 1.1 : Module d'Young (H) de la conduite conduisant à une célérité équivalente égale à 90 % de la célérité intrinsèque de fluides de modules de compressibilité différents(B) [3].

Il sera donc nécessaire de prendre en compte la déformation du flexible en raison de la faible valeur de son module d'Young estimé (de l'ordre de 40000 bars, $B_{\text{White-spirit}} = 10450$ bars sous 120 bars).

En revanche, les composants rigides du circuit tels que le tube en pyrex ($E_{\text{pyrex}} = 6.10^5$ bars), les raccords haute pression ($E_{\text{Raccord}} = 2.10^6$ bars) et les conduites du système haute pression ne requerront pas une telle attention.

I.3.2- Couplage acoustique de deux tubes montés en série

Approche théorique

L'onde générée par le coup de Bélier constitue pour le système d'alimentation en carburant une excitation acoustique. L'écoulement est alors sollicité suivant certaines fréquences privilégiées appelées modes propres. Dans notre cas, le système de conduites est constitué de plusieurs tubes en série dont les modes propres isolés peuvent être calculés par la relation 1.8.

Dans le cas d'un système constitué de deux tubes différents placés en série, les modes propres du circuit diffèrent de ceux de chaque tube et requiert la prise en compte du système dans son intégralité. En effet, les ondes acoustiques présentes dans un tel système vibrent suivant des modes issus du couplage des deux tubes et doivent respecter les critères de continuités des oscillations de pression et de débit à leur jonction. Les considérations

suivantes sont tirées de le calcul des modes propres du circuit composé de deux tubes déformables de longueurs L_1 et L_2 , de diamètres D_1 et D_2 et de surfaces S_1 et S_2 , les indices 1 et 2 distinguant le tube considéré (figure 1.6) peut se faire de la manière suivante : La célérité équivalente est notée C et il faut insister sur le fait qu'elle dépend du tube dans lequel l'onde se propage.[14]

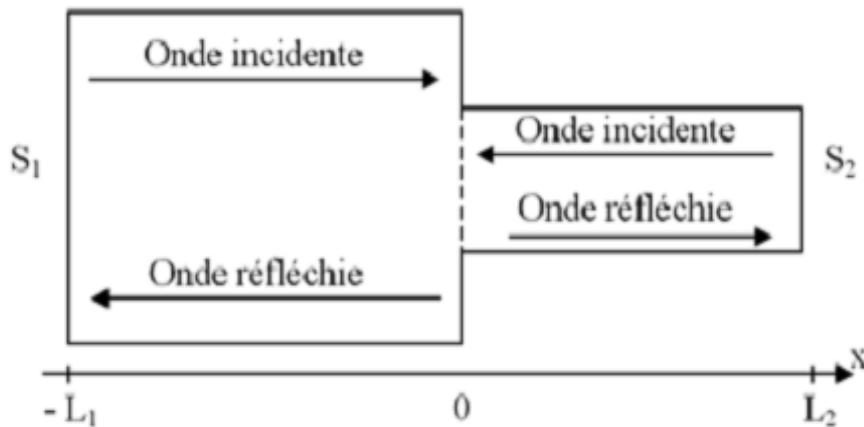


Figure1.11- Schéma du système à deux tubes considéré.

Quel que soit le tube considéré, les fluctuations de pression, $\delta P(x,t)$, et de vitesse, résultent de la contribution de deux ondes, une incidente (indice i) et une réfléchie sur la jonction (indice r). Il est donc possible d'exprimer chacune de ces fluctuations par les expressions 1.15 et 1.16 suivantes :

$$\delta P(x,t) = \delta P_i(x,t) + \delta P_r(x,t) \quad (1.15)$$

$$\delta U(x,t) = \delta U_i(x,t) + \delta U_r(x,t) \quad (1.16)$$

Lorsque le système entre en état de résonance, les ondes acoustiques adoptent une formulation particulière en raison de leur état stationnaire et peuvent être exprimées en fonction des intensités des ondes de pression incidente et réfléchie (notées respectivement B_i et B_r), de la pulsation et du nombre d'onde du mode propre (notés respectivement ω et $k = \frac{\omega}{c}$).

Les expressions 1.13 à 1.16 caractérisent les fluctuations de pression et de vitesse dans les deux tubes, différant essentiellement par leurs amplitudes et les sens des ondes en raison de l'orientation contraire des ondes dans chaque tube par rapport à l'axe des x .

$$\delta P_1(x,t) = B_{i1} \exp^{i(\omega t - k_1 x)} + B_{r1} \exp^{i(\omega t + k_1 x)} \quad (1.17)$$

$$\delta U_1(x,t) = \frac{1}{\rho c_1} \{ B_{i1} \exp^{i(\omega t - k_1 x)} + B_{r1} \exp^{i(\omega t + k_1 x)} \} \quad (1.18)$$

$$\delta P_2(x,t) = B_{i2} \exp^{i(\omega t - k_2 x)} + B_{r2} \exp^{i(\omega t + k_2 x)} \quad (1.19)$$

$$\delta U_2(x,t) = \frac{1}{\rho c_2} \{ B_{i2} \exp^{i(\omega t - k_2 x)} + B_{r2} \exp^{i(\omega t + k_2 x)} \} \quad (1.20)$$

Il est alors nécessaire de définir les 4 conditions aux limites imposées par l'acoustique, une à chaque extrémité de tube ($x = -L_1$ et $x = +L_2$) et deux à la jonction ($x = 0$).

Trois configurations peuvent être choisies selon que les extrémités libres de chaque tube sont considérées comme étant acoustiquement ouvertes ou fermées. On peut ainsi avoir un système entièrement ouvert, entièrement fermé ou ouvert à une extrémité et fermé à l'autre. Nous détaillons ici la dernière configuration correspondant au circuit d'alimentation moyenne pression. L_1

$$\delta P(-L_1, t) = 0 \quad (1.21)$$

Le tube 2 est quant à lui fermé à son extrémité ce qui implique que ce sont alors les fluctuations de vitesse qui sont nulles. On pose donc :

$$\delta U(L_2, t) = 0 \quad (1.22)$$

La dernière considération acoustique à exploiter est la continuité des fluctuations de pression et de débit (et non pas de vitesse) à la jonction. Alors que les deux conditions précédentes ne permettaient pas d'établir de relation entre les propriétés de chacun de deux tubes (équations 1.16 et 1.19), c'est ici chose faite comme en témoigne les équations 1.22 et 1.23.

$$\delta P_1(0,t) = \delta P_2(0,t) \text{ soit } B_{i1} + B_{r1} = B_{i2} + B_{r2} \quad (1.23)$$

$$S_1 \delta U_1 = S_2 \delta U_2(0,t) \text{ soit } B_{i1} - B_{r1} = S_{21} (B_{i2} - B_{r2}) \text{ avec } S_{21} = \frac{S_2}{S_1} * \frac{C_1}{C_2} \quad (1.23)$$

La détermination des modes propres peut alors être faite en considérant le système matriciel composé des quatre équations 1.16, 1.19, 1.22 et 1.23 et se mettant sous la forme suivante (équation 1.24) :

$$[A][Bm_n] = [0] \text{ avec } [Bm_n] = [B_{i1} \ B_{r1} \ B_{i2} \ B_{r2}] \quad (1.24)$$

Les modes propres du système (notés w) satisfont à l'équation 1.25, tirée de la condition de nullité du déterminant de la matrice A du système précédent (équation 1.24). Il existe donc une infinité de solutions qui dépendent du rapport de section des tubes mais aussi de leur longueur et de la célérité des ondes de pression en leur sein.

On peut notamment constater que dans le cas de conduites strictement indéformables, ou beaucoup plus rigides que le fluide considéré (gaz par exemple), la célérité dans les deux tubes sera la même, soit $C_1 = C_2$.

$$\cos\left(\frac{\omega}{C_1} L_1\right) \cos\left(\frac{\omega}{C_2} L_2\right) - S_{21} \sin\left(\frac{\omega}{C_1} L_1\right) \sin\left(\frac{\omega}{C_2} L_2\right) = 0 \quad (1.25)$$

n retrouve en particulier le cas d'école du coup de Bélier dans une conduite indéformable de diamètre constant dont les conditions acoustiques sont de type "ouverte-fermée". En effet, l'équation 1.22 se simplifie alors très fortement et conduit à une solution analytique simple définissant une infinité de pulsations propres (équation 1.26).

La première solution de cet ensemble $F=C/4L$, est bien celle obtenue par L'analyse graphique du phénomène de coup de Bélier menée en début de chapitre pour une configuration analogue.

$$L_1=L_2=\frac{L}{2} \quad \}$$

$$d_1 = d_2 \quad \} \quad \Rightarrow \csc^2\left(\frac{\omega L}{2C}\right) \sin^2\left(\frac{\omega L}{2C}\right) = 0$$

$$C_1=C_2 \quad \}$$

$$F_k = \frac{1}{\omega k} = \frac{C}{4L} + K \frac{C}{2L} (k = 0,1,2 \dots \dots) \quad (1.26)$$

CHAPITRE 3

Résultats et interprétations

III.1 -Introduction

Dans cette partie on présente l'ensemble des résultats théoriques et ceux réalisés sur le banc d'essai pour les différentes expériences faites au laboratoire de mécanique des fluides de la faculté de technologie de l'université de Tlemcen.

Ces résultats permettent de caractériser le phénomène transitoire du coup de Bélier dans une conduite.

III.2 – les résultats théoriques

❖ La théorie pertinente

Le phénomène du coup de Bélier se manifeste après la fermeture instantanée de la vanne. L'énergie cinétique de mouvement de la colonne de liquide dans le tuyau est convertie en énergie potentielle sous la forme d'une montée en pression, dont la valeur maximale peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$P = \rho * v * c \quad (3.1)$$

La fermeture de la vanne génère une onde de pression qui se déplace avec une vitesse d'onde ou célérité C vers le réservoir à une distance L .

Le déplacement de l'onde de pression se réfléchit au réservoir et revient à la vanne au temps :

$$t = \frac{2L}{c} \quad (3.2)$$

- les caractéristiques théoriques du coup de Bélier sont calculé a partir des débits suivants :

$$Q1= 0.42l/s$$

$$Q2= 0.35l/s$$

$$Q3= 0.32l/s$$

$$Q4= 0.23l/s$$

$$Q5= 0.15l/s$$

C'est débits sont choisis a partir de la capacité de la pompe existante sur le banc d'essai du laboratoire.

❖ la vitesse de son

Vitesse de son et donnée par la relation suivant :

$$C = \sqrt{\frac{k}{\rho * (1 + \frac{k * D}{t * E})}} \quad (3.3)$$

Avec :

$$D = 22.0\text{mm}$$

$$k = 22.05 \text{ GN} * \text{m}^{-2}$$

$$t_p = 0.90\text{mm}$$

$$E = 215.3\text{GN} * \text{m}^{-2}$$

Donc :

$$C = \sqrt{\frac{22.05 * 10^9}{1000(1 + \frac{22.05 * 22 * 10^{-3}}{0.90 * 10^{-3} * 215.3})}}$$

$$C = 2508.73 \text{ m/s}$$

❖ Les vitesses d'écoulements

Pour Q1= 0.42l/s

$$Q_1 = v * S \Rightarrow v = \frac{Q_{\max}}{S} = \frac{4 * Q_{\max}}{\pi * d^2}$$

$$v = \frac{4 * \frac{0.42}{1000}}{\pi * (22 * 10^{-3})^2}$$

$$v = 1.105 \text{ m/s}$$

Pour Q2= 0.35l/s

$$Q_2 = v * S \Rightarrow v = \frac{Q_2}{S} = \frac{4 * Q_2}{\pi * d^2}$$

$$v = \frac{4 * \frac{0.35}{1000}}{\pi * (22 * 10^{-3})^2}$$

$$v = 0.921 \text{ m/s}$$

Pour Q3= 0.32l/s

$$Q_3 = v * S \Rightarrow v = \frac{Q_3}{S} = \frac{4*Q_3}{\pi*d^2}$$

$$v = \frac{4*\frac{0.32}{1000}}{\pi*(22*10^{-3})^2}$$

$$v = 0.842 \text{ m/s}$$

Pour Q4= 0.23l/s

$$Q_4 = v * S \Rightarrow v = \frac{Q_4}{S} = \frac{4*Q_4}{\pi*d^2}$$

$$v = \frac{4*\frac{0.23}{1000}}{\pi*(22*10^{-3})^2}$$

$$v = 0.605 \text{ m/s}$$

Pour Q5= 0.15l/s

$$Q_5 = v * S \Rightarrow v = \frac{Q_5}{S} = \frac{4*Q_5}{\pi*d^2}$$

$$v = \frac{4*\frac{0.15}{1000}}{\pi*(22*10^{-3})^2}$$

$$v = 0.394 \text{ m/s}$$

❖ Les pressions

Pour Q1= 0.42l/s

$$P_1 = \rho * v * c$$

$$= 1000 * 1.105 * 2508.73$$

$$P_1 = 27.72 \text{ bar}$$

Pour Q2= 0.35l/s

$$P_2 = \rho * v * c$$

$$= 1000 * 0.921 * 2508.73$$

$$P_2 = 23.10 \text{ bar}$$

Pour Q3= 0.32l/s

$$P_3 = \rho * v * c$$

$$= 1000 * 0.842 * 2508.73$$

$$P_3 = 21.12 \text{ bar}$$

Pour Q4= 0.23l/s

$$P_4 = \rho * v * c$$

$$= 1000 * 0.605 * 2508.73$$

$$P_4 = 15.18 \text{ bar}$$

Pour Q5= 0.15l/s

$$P_5 = \rho * v * c$$

$$= 1000 * 0.394 * 2508.73$$

$$P_5 = 9.90 \text{ bar}$$

Voici le tableau des valeurs obtenus :

Le débit (l /s)	La vitesse (m/s)	La pression (bar)
0.42	1.105	27.72
0.35	0.921	23.10
0.32	0.842	21.12
0.23	0.605	15.18
0.15	0.394	9.90

Tableau 3-1 : variation de pression en fonction de la vitesse et le débit

Le tableau des résultats ci-dessus montre que la pression de l'onde de choc et augmente lorsque ont augmenté le débit et la vitesse.

Donc la variation de pression est proportionnelle à la valeur de débit.

❖ Durée de la première impulsion

$$T = \frac{2L}{C} \quad (3.4)$$

Avec :

L : La longueur de la conduite $L = 3.0\text{m}$

C : La vitesse du son on a calculé précédemment

$$C = 2508.73 \text{ m/s}$$

$$\text{Donc } T = \frac{2 \cdot 3}{2508.73}$$

$$T = 2.4\text{ms}$$

Donc la durée théorique de l'impulsion $T = 2.4 \text{ ms}$

III.3 - présentation des expériences

On a vu précédemment dans le chapitre 2 que le banc d'essai contient deux circuits d'eau pour réaliser deux types d'expériences.

Dans notre expérience on a utilisé le circuit de coup de Bélier qui il contient la vanne à action rapide.

❖ Manipulation

La manipulation des expériences consiste à changer les débits d'écoulements d'eau dans la conduite.

Après les fermetures de la vanne à action rapide, les impulsions de pression générées seront stockées apparaissent sur l'écran de l'oscilloscope.

Remarque :

Puisque la vanne est fermée de façon très rapide ont considéré que le temps de fermeture est nul.

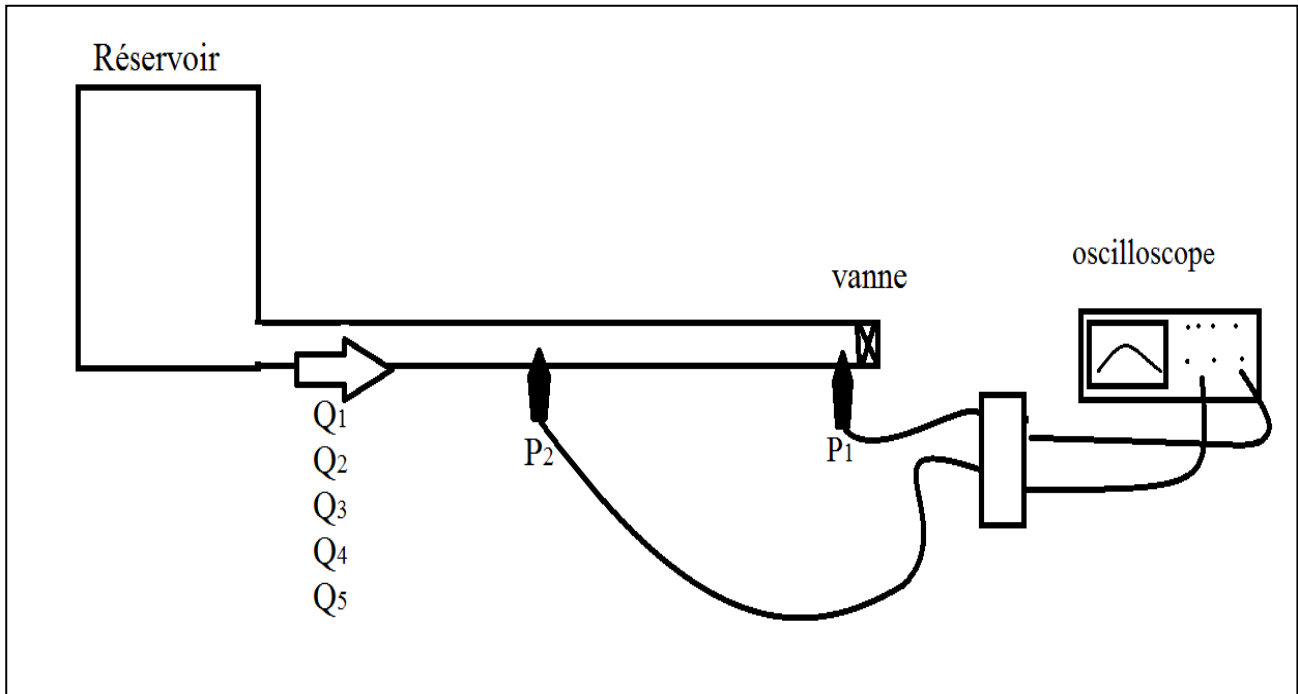


Figure 3-1 : schéma de manipulation

Les valeurs des débits sont :

$$Q_1 = 0.42 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 0.35 \text{ l/s}$$

$$Q_3 = 0.32 \text{ l/s}$$

$$Q_4 = 0.23 \text{ l/s}$$

$$Q_5 = 0.15 \text{ l/s}$$

III.4 – Les résultats des expériences

L'oscilloscope est calibré pour les données suivantes :

Amplitude 50Mv/div

La base de temps 2ms /div

Voici ci-dessous les signaux provenant de l'oscilloscope pour les différentes expériences :

Expérience 1 :

Pour : $Q_{MAX} = 0.42l/s$

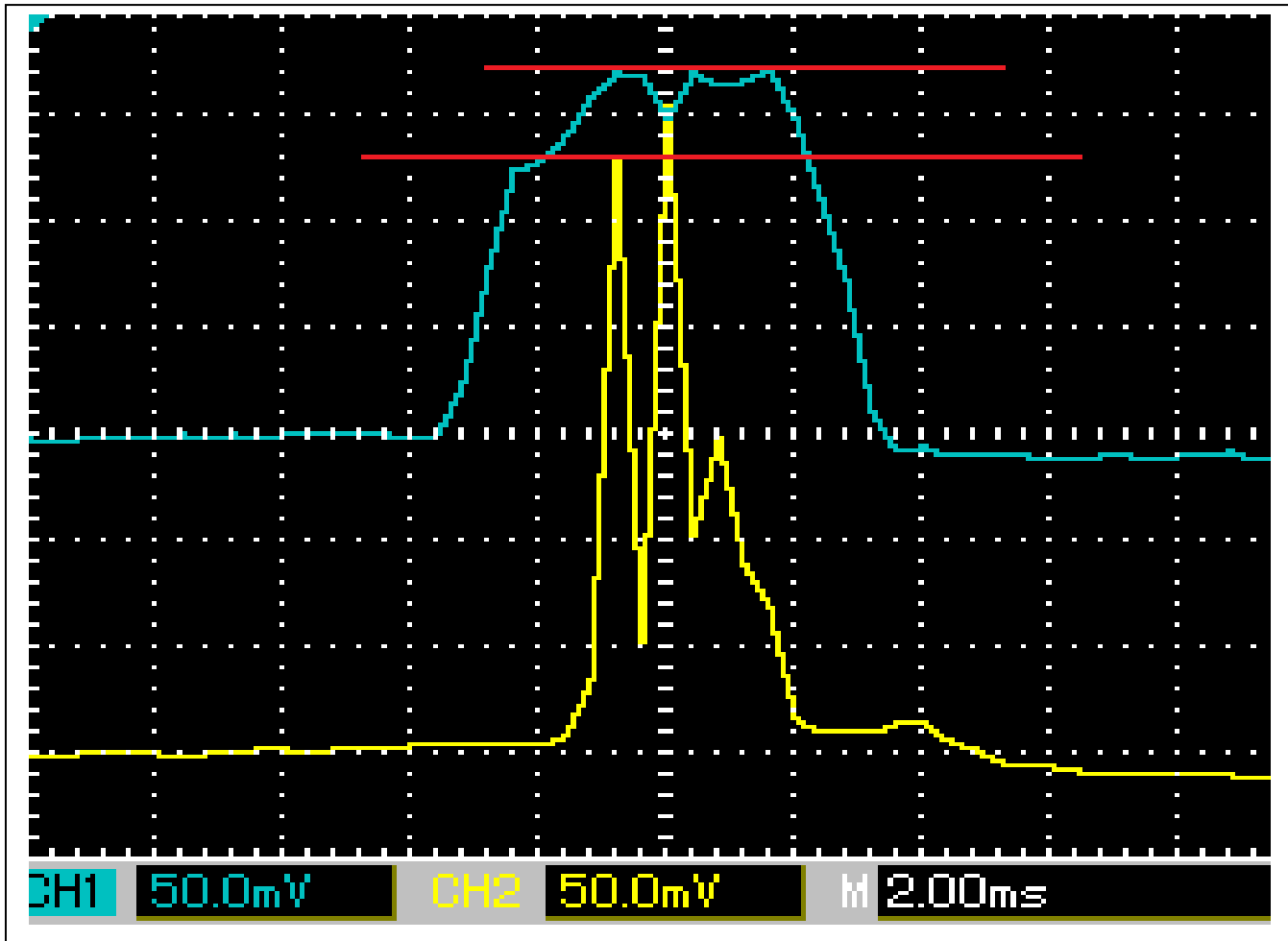


Figure 3-2 : les signaux correspondent à l'expérience 1

- Signal 1

Les amplitudes : 166.5mV pour les deux pics \Rightarrow amplitude moyenne = 166.5mV

Les pics : 1.33ms ; 2.66ms

La durée de l'impulsion : 3.33ms

- Signal 2

Amplitude moyenne : 280mV ; 300mV ; 150mV \Rightarrow 243 mV

Le pic : 1.2ms ; 2ms ; 2.4ms

La durée de l'impulsion : 2ms

Expérience 2 :

Pour : $Q_2 = 0.35\text{l/s}$

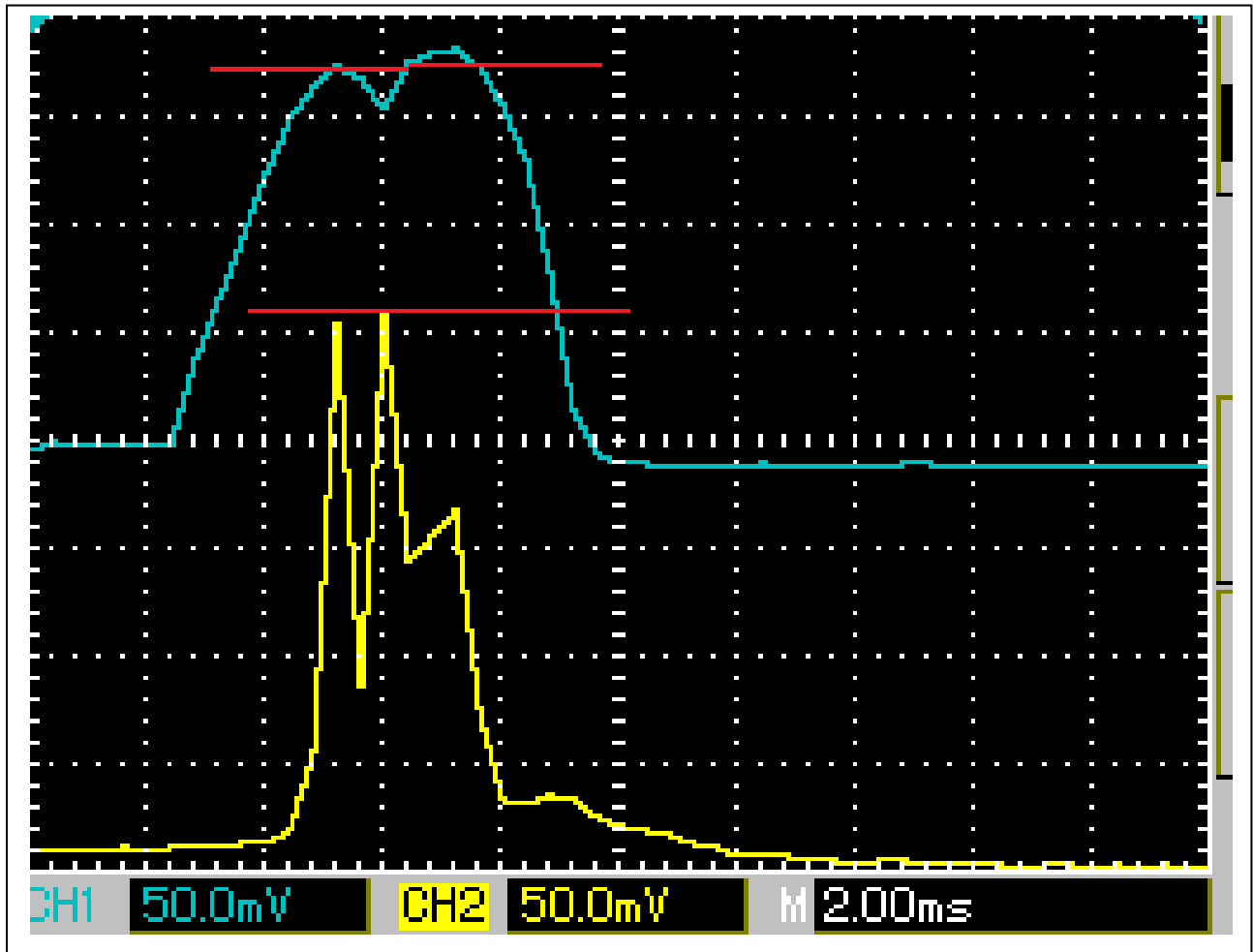


Figure 3-3 : les signaux correspondent à l'expérience 2

- Signal 1

Amplitude moyenne : 160mV ; 165mV \Rightarrow 162mV

Les pics : 2.66ms ; 4.66ms

La durée de l'impulsion : 3.33ms

- Signal 2

Amplitude moyenne : 250mV ; 250mv ; 170mV \Rightarrow 223 mv

Les pics : 1.2ms ; 2ms ; 3.2ms

La durée de l'impulsion : 2ms

Expérience 3 :

Pour : $Q_3 = 0.32\text{l/s}$

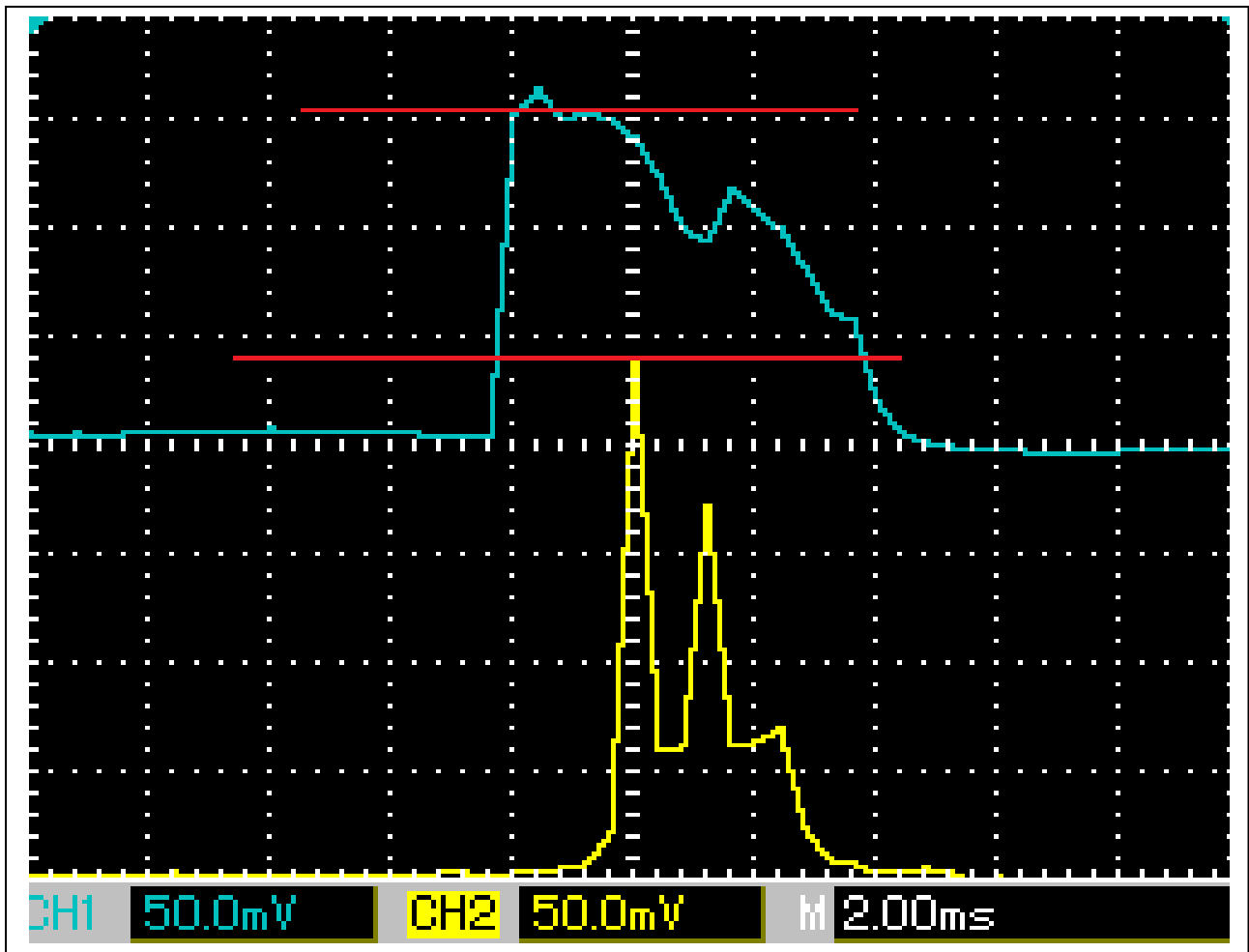


Figure 3-4 : les signaux correspondent à l'expérience 3

- Signal 1

Amplitude moyenne : 160mV ; 120mV \Rightarrow 140 mV

Les pics : 0.8ms ; 6ms

La durée de l'impulsion : 3.33ms

- Signal 2

Amplitude moyenne : 240mV ; 175mV ; 70mV \Rightarrow 161 mV

Les pics : 0.8ms ; 2ms ; 3ms

La durée de l'impulsion : 2ms

Expérience 4 :

Pour : $Q_4 = 0.23\text{l/s}$

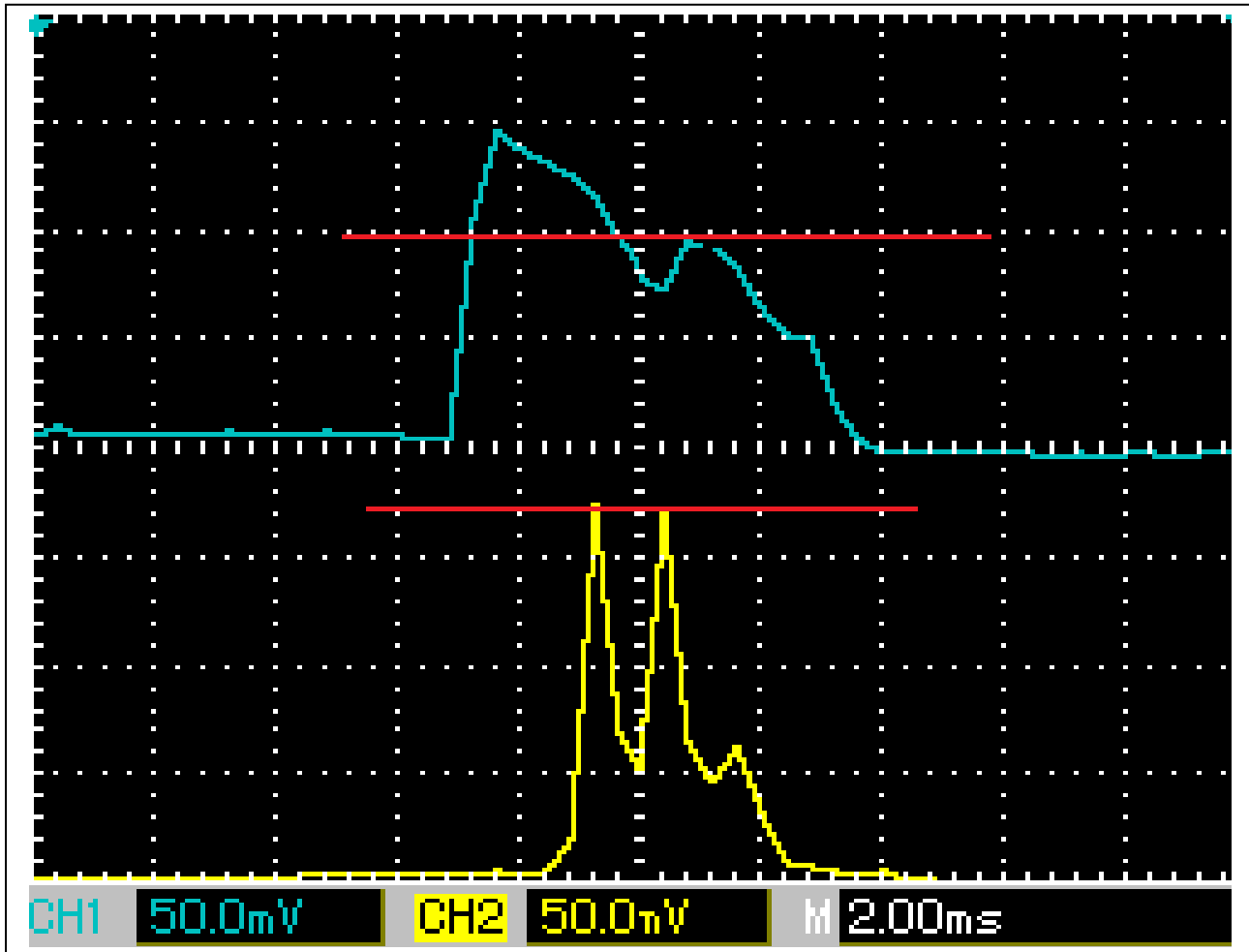


Figure 3-5 : les signaux correspondent à l'expérience 4

- Signal 1

Amplitude moyenne : 150mV ; 100mV ; 50mV \Rightarrow 100mV

Les pics : 0.8ms ; 4ms ; 6 ms

La durée de l'impulsion : 3.33ms

- Signal 2

Amplitude moyenne : 170mV ; 167mV ; 50mV \Rightarrow 129 mV

Les pics : 1.2ms ; 1.6ms ; 3.2ms

La durée de l'impulsion : 2ms

Expérience 5 :

Pour : $Q_5 = 0.15\text{l/s}$

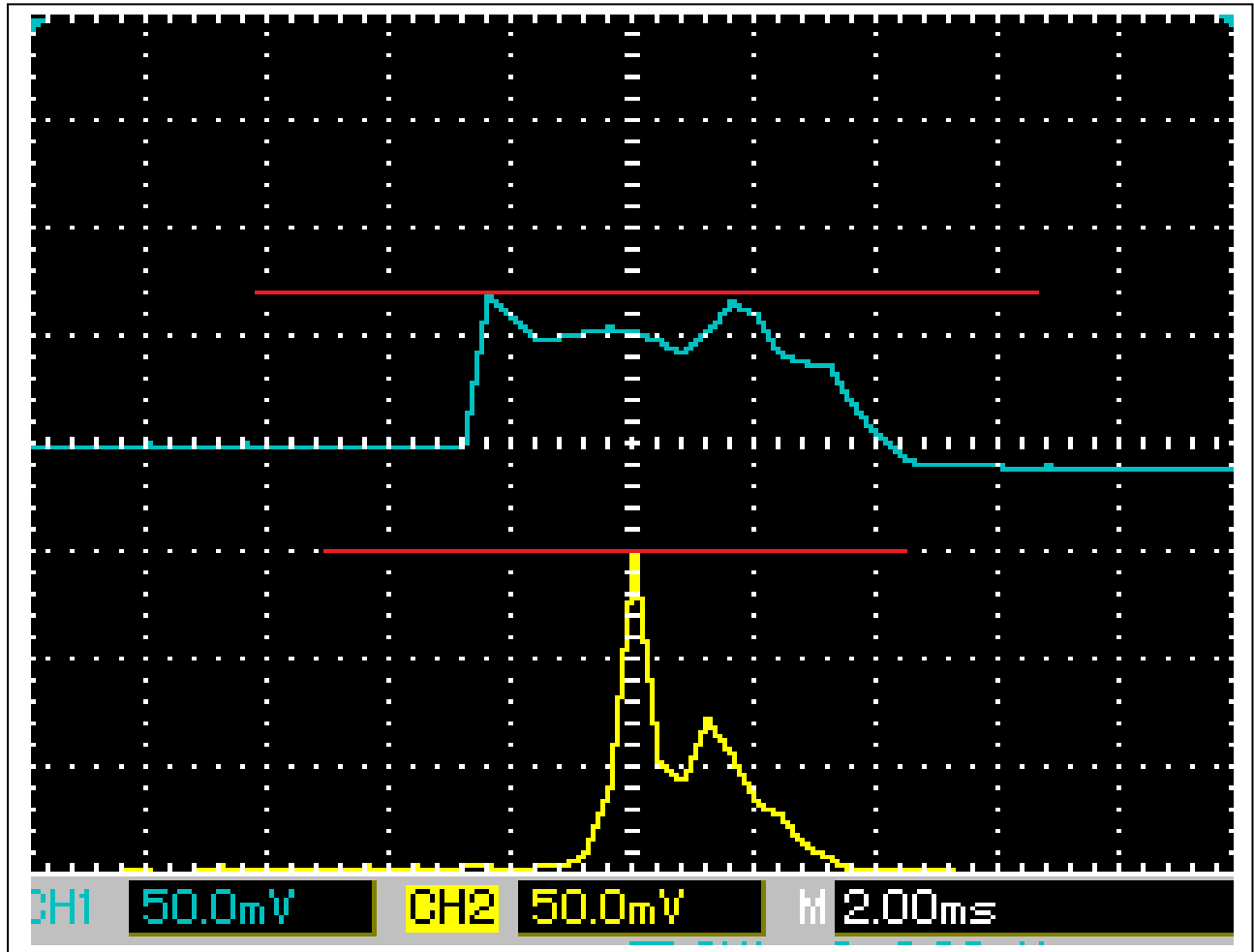


Figure 3-6 : les signaux correspondent à l'expérience 5

- Signal 1

Amplitude moyenne : 70mV ; 65mV \Rightarrow 67.5mV

Les pics : 0.4ms ; 4.4ms

La durée de l'impulsion : 3.33ms

- Signal 2

Amplitude moyenne : 150mV ; 70mV \Rightarrow 110 mV

Les pics : 1ms ; 2.4ms

La durée de l'impulsion : 2ms

III.5 - Conversion des résultats

Les résultats affichés par l'oscilloscope correspondent à des grandeurs électriques (en milli-volts), une conversion en pression demeure une opération nécessaire avant tout dépouillement des résultats.

L'oscilloscope est calibré de telle sorte que l'amplitude du signal de 8.0mv volts correspond à 1,0 bar de pression au niveau du transducteur.

$$8.0\text{mv}=1\text{bar}$$

La pression au niveau de conduite avant la fermeture de la vanne est égale à la pression atmosphérique qui est égale 1bar.

Donc pour l'expérience 1

La pression au point 1 : $\Delta P = 20,81 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

La pression au point 2 : $\Delta P = 30,37 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

L'expérience 2

La pression au point 1 : $\Delta P = 20,25 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

La pression au point 2 : $\Delta P = 27,92 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

L'expérience 3

La pression au point 1 : $\Delta P = 17,5 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

La pression au point 2 : $\Delta P = 20,13 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

L'expérience 4

La pression au point 1 : $\Delta P = 12,5 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

La pression au point 2 : $\Delta P = 16,13 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

L'expérience 5

La pression au point 1 : $\Delta P = 8,44 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

La pression au point 2 : $\Delta P = 13,75 \text{ bar} + P_{\text{atm}}$

Voici le tableau des valeurs obtenus :

Les débits (l/s)	La pression 1(bar)	La pression 2 (bar)
0.42	21.81	31.37
0.35	21.25	28.92
0.32	18.5	21.13
0.23	13.5	17.13
0.15	9.44	14.75

Tableau 3-2 : les pressions expérimentales

Pour comparer les résultats théoriques et expérimentaux voilà le tableau qui ci-dessous de comparaison des résultats :

Le débit (l/s)	La pression 1 (Bar)	La pression 2 (Bar)	La pression théorique (Bar)
0.42	21.81	31.37	27.72
0.35	21.25	28.92	23.10
0.32	18.5	21.13	21.12
0.23	13.5	17.13	15.18
0.15	9.44	14.75	9.90

Tableau 3-3 : comparaison des pressions théorique et expérimentale

Ce tableau donne toutes les pressions calculées à partir de la théorie et les pressions déduites de l'expérience.

III.6 –Interprétation et dépouillement des résultats

IV.6. 1- Interprétation des graphes

Les figures 3.3 ; 3.4 ; 3.5 ; 3.6 ; 3.7 présentent l'évolution dans le temps de la propagation de la pression dans la conduite ou s'effectue le coup de Bélier.

Les figures correspondent à la prise de pression juste en aval de la vanne à action rapide et au point médiane de la conduite.

Concernons l'amplitude, les résultats sont différent pour chaque expérience

➤ Expérience 1 : (fig3.3)

- pour le premier débit en constate qu'il y a deux lieu de maximale le premier a 1.33 ms et un deuxième pic à 2.66 ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 21.81 bar

-pour la deuxième sonde de pression en constate qu'il y a trois pic, le premier a 1.2 ms le deuxième 2 ms et la troisième 2.4 ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 21.81 bar

➤ Expérience 2 : (fig3.4)

- pour le deuxième débit en constate qu'il y a deux lieu de maximale le premier a 2.66 ms et un deuxième pic à 4.66 ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 21.25bar

-pour la deuxième sonde de pression en constate qu'il y a trois pic, le premier a 1.2 ms le deuxième 2 ms et la troisième 3.2 ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 28.92 bar

➤ Expérience 3 : (fig3.5)

- pour le troisième débit en constate qu'il y a deux lieu de maximale le premier a 0.8 ms et un deuxième pic à 6 ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 18.5bar

-pour la deuxième sonde de pression en constate qu'il y a trois pic, le premier a 0.8 ms le deuxième 2 ms et la troisième 3ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 21.13 bar

➤ Expérience 4 : (fig3.6)

- pour le quatrième débit en constate qu'il y a trois lieu de maximale le premier a 0.8 ms et un deuxième pic à 4 ms.et le troisième a 6ms

L'amplitude moyenne correspondent vaut 13.5bar

-pour la deuxième sonde de pression en constate qu'il y a trois pic, le premier a 0.52 ms le deuxième 2 ms et la troisième 3.33ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 17.13 bar

➤ Expérience 5 : (fig3.7)

- pour le cinquième débit en constate qu'il y a deux lieu de maximale le premier a 0.4 ms et un deuxième pic à 4.4 ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 9.44bar

-pour la deuxième sonde de pression en constate qu'il y a deux pic, le premier a 1 ms le deuxième 2.4 ms.

L'amplitude moyenne correspondent vaut 14.75 bar

III.6 .2-la durée de l'impulsion

En constate que la durée d'impulsion et égale à 3.33ms pour la premier sonde de pression et 2ms pour la deuxième sonde de pression et cela quelque soit le débit circulons dans la conduite.

Il faut noter que l'impulsion théorique est égale à 2.4 ms qui est une valeur moyenne très proche de celle déterminée par l'expérience ($(3.33+2)/2=2.65\text{ms}$).

III.6 .3-La variation des pressions

D'après le tableau 3-3 des comparaisons des pressions on constate en peut déduire ce qui suit :

- les pressions développées dans le tuyau et les valeurs obtenues à partir de la théorie sont très proches par exemple pour le premier débit, la pression théorique est égale à 27.72 bar qui est une valeur moyenne très proche de celle déterminée par l'expérience (26.7 bar).
- Et cela quelque soit le débit circulant dans la conduite, et qui s'implique l'exactitude des deux méthodes.
- Tous les pressions développées au point 2 sont supérieures à celle du point 1 qui ce implique que il ya une augmentation de pression au sens contraire d'écoulement
- Il ya une diminution de pression lorsque on détermine le débit d'écoulement Qui s'implique une relation proportionnelle entre le débit et l'onde du choc

III.5 Conclusion

- ✓ On peut conclure, que les résultats expérimentaux et théoriques sont proches.
- ✓ Pour une fermeture complète de la vanne, l'amplitude de coup de Bélier est directement proportionnelle à la vitesse initiale d'écoulement dans la conduite .cette vitesse dépend principalement du débit donc les conditions d'exploitation.
- ✓ Le coup de Bélier provoque une onde de pression qui traverse le milieu dans le sens contraire de l'écoulement. L'accroissement de la pression lors des phénomènes du coup de Bélier peut aller jusqu'à 31.37 fois plus que la pression qui règne c'est-à-dire 31.37 bars.

CHAPITRE 2

Présentation du dispositif expérimental

II.1-introduction

L'énergie cinétique de l'eau qui s'écoule dans un tuyau peut être très importante et une diminution de la vitesse d'écoulement lors d'une soupape est ajustée à l'extrémité aval du système, peuvent nécessiter la dissipation d'une grande quantité d'énergie. Cette dissipation d'énergie se traduit par une montée en pression dans le pipeline qui peut avoir des effets destructeurs. La réduction de l'écoulement dans une canalisation d'alimentation hydro-électrique, disons de trois miles de long par exemple, pourrait générer des pressions suffisantes pour la rupture du tuyau ou de dommages la vanne de régulation.

De même, dans les petits systèmes hydrauliques, la fermeture rapide de la vanne pour arrêter l'écoulement peut mettre en place des impulsions de pression égale à plusieurs fois la pression normale d'écoulement régulier.

Ces impulsions se déplacent en sens inverse de l'écoulement le long de la canalisation à la vitesse de bruit et de vibrations du son. Le "coup de Bélier" est un terme étant utilisé à cet effet.

Assurer une bonne dissipation de l'énergie dans un pipeline sur la réduction du débit peut être réalisé avec une cheminée d'équilibre ou de réservoir fixé à l'extrémité aval du system. Lé banc d'essai expérimental contient deux systèmes indépendants de tubes: l'un montre l'utilisation de la cheminée d'équilibre et les ondes de choc générées par les coups de Bélier causé par la fermeture rapide des vannes.

II.2- présentation générale de banc d'essai

II.2.1 -description

Le banc d'essai comprend une pompe auto-amorçant centrifuge qui aspire l'eau du réservoir du carter et le délivre à la cuve à niveau constant par l'intermédiaire de la conduite d'alimentation.



Figure 2-1: Photographie de la pompe

Le réservoir de vidange est muni d'une vanne de vidange pour faciliter la vidange.

L'eau trop-plein est renvoyée au réservoir de vidange par l'intermédiaire d'une conduite de retour.

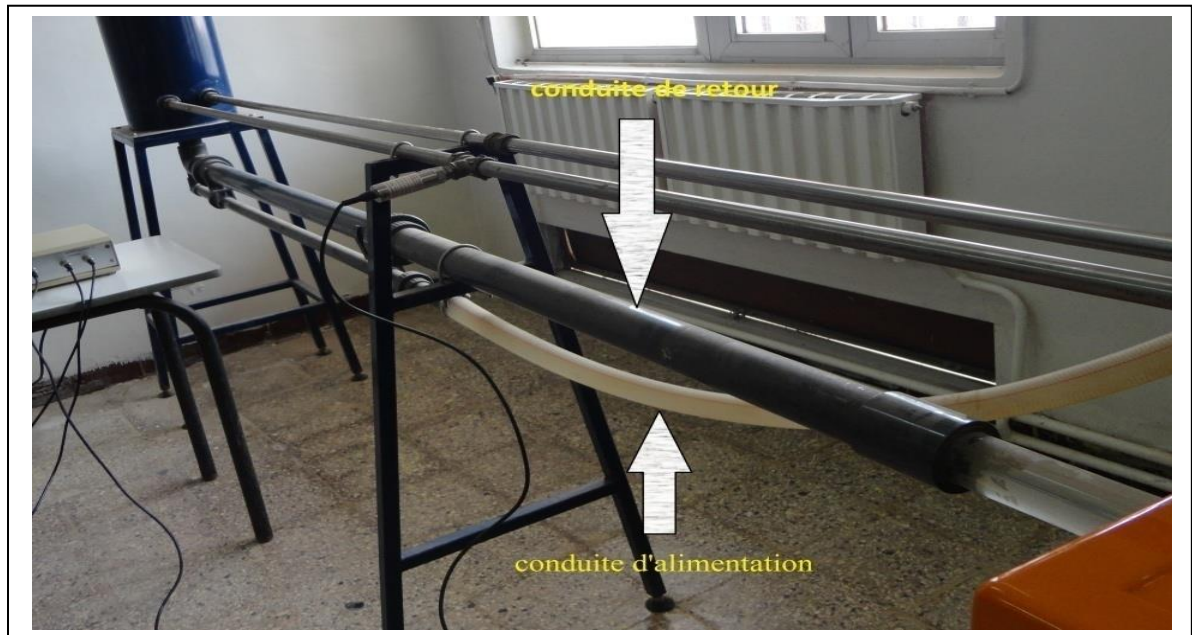


Figure 2-2 : photographié de conduite de retour et d'alimentation

La soupape de commande d'écoulement dans la conduite d'alimentation permet de régler le débit d'eau.

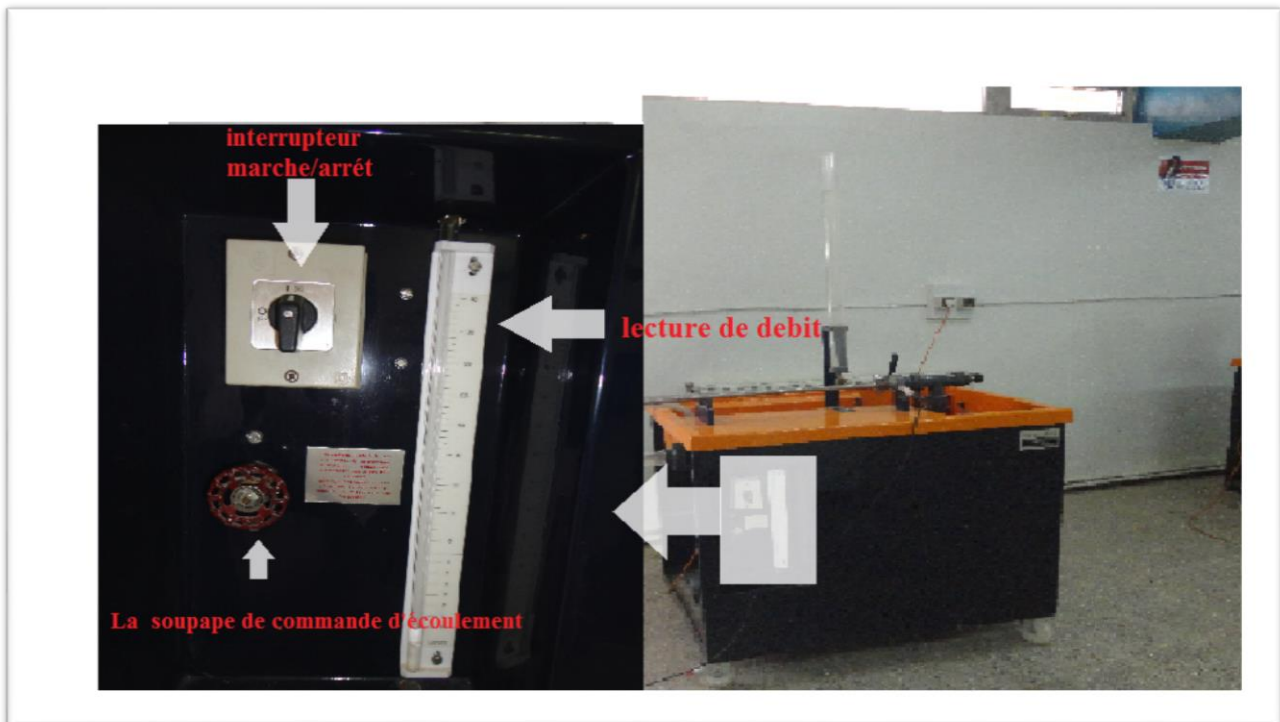


Figure2-3 : photographie de l'armoire de command

Le réservoir fournit l'eau à la cuve à niveau constant qui est situé sur un châssis de support d'environ 2,5 m à partir du réservoir.



Figure 2-4 : photographie A/ de la cuve ; B/ du module de service

Les conduites d'alimentation en débit se terminent au niveau des raccords appropriés sur la partie supérieure du réservoir. L'écoulement à travers les deux systèmes est introduit dans le réservoir volumétrique.



Figure2-5 : photographie des conduites des expériences

Ces conduites est d'environ 3,0 m de long et se compose de deux sections de tube en acier inoxydable.

Elle se termine par une buse en plexiglas transparent avec une échelle, une vanne actionnée par un levier et en fin une vanne de régulation de débit.

Le coup de Bélier s'effectue dans les deux sections de conduites, où à la fin la conduite se termine par une soupape à action rapide, suivi d'une vanne de régulation de débit.

L'unique soupape à action rapide est conçue de telle sorte que la navette se déplaçant à l'intérieur de la vanne avec le courant d'eau, ce qui permet d'avoir un taux très élevé de fermeture.



Figure2-6 : photographie de la soupape à action rapide

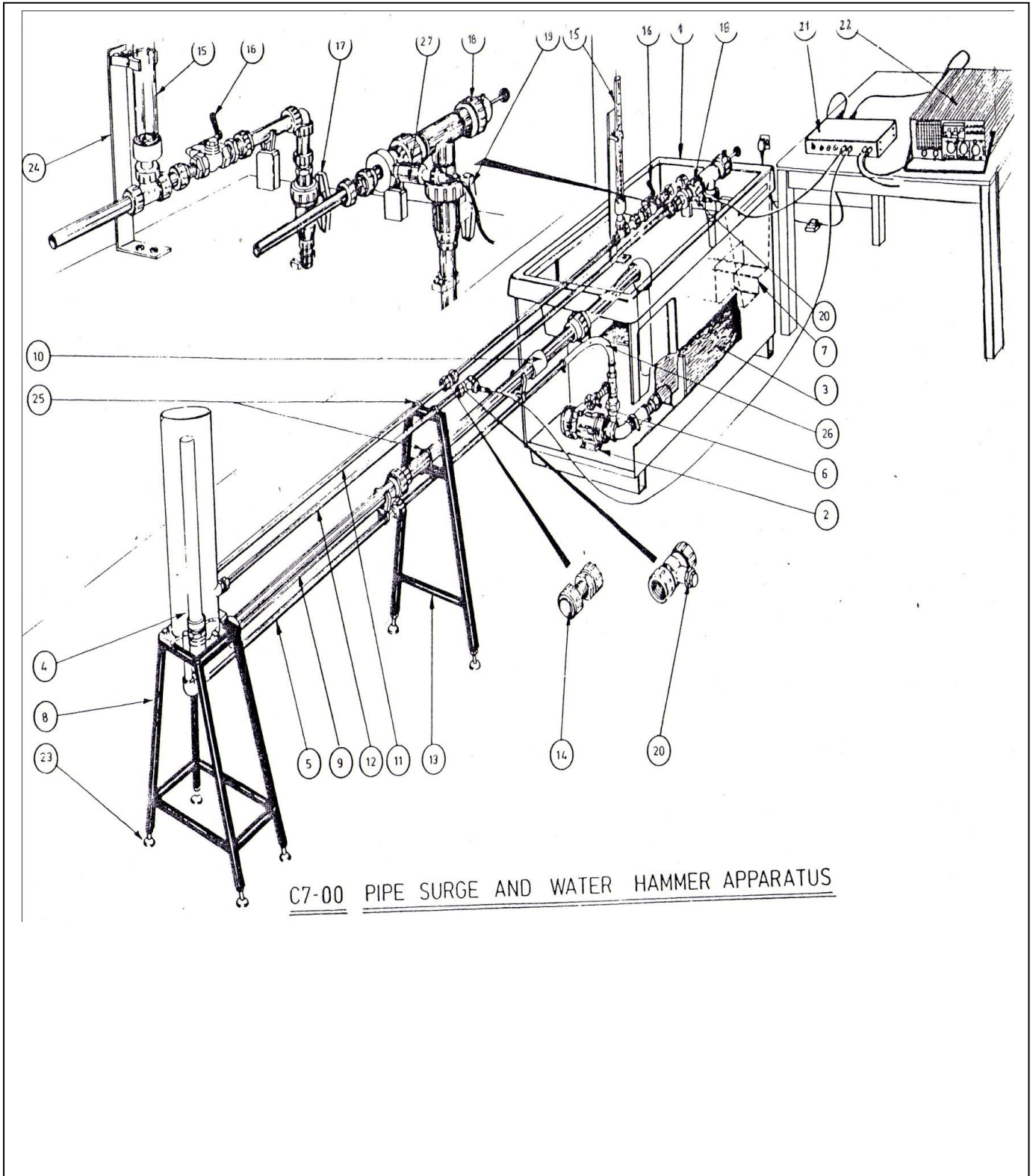


Figure 2-7 : schéma du banc d'essai



Figure 2-8 : photographie de banc d'essai

II.2.2 -Exigences d'installation

L'équipement est conçu pour un montage au sol sur une surface fermée et plane.

Le module de service et le module de conditionnement nécessitent une connexion monophasique d'électricité (220Volts). Quatre mètres de câble d'alimentation sont fournis avec l'équipement.

les dimensions du banc sont:

HAUTEUR - 1.865m

LARGEUR - 0.725m

LONGUEUR - 3.875m

II.3- Présentation de l'instrumentation

- En ce qui concerne l'instrumentation, deux exigences principales ont été identifiées :
- 1/ des capteurs permettant une mesure dans des gammes de fréquences.

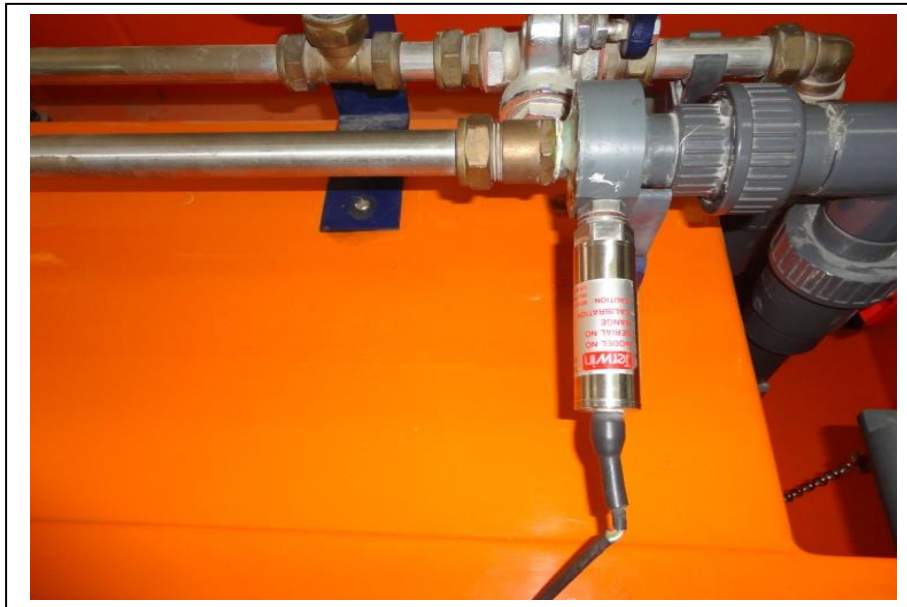


Figure 2-9 : photographie de capteur de pression N°1



Figure 2-10 : photographie de capteur de pression N°2

Des taraudages pour les capteurs de pression sont prévus sur la soupape à action rapide et à mi-chemin le long de la conduite d'essai.

2/ un oscilloscope simultanément des signaux.

Les signaux électriques provenant des transducteurs de pression sont envoyés à un module électronique et ensuite à un oscilloscope à mémoire double trace qui permet les variations transitoires de pression après fermeture de la vanne.

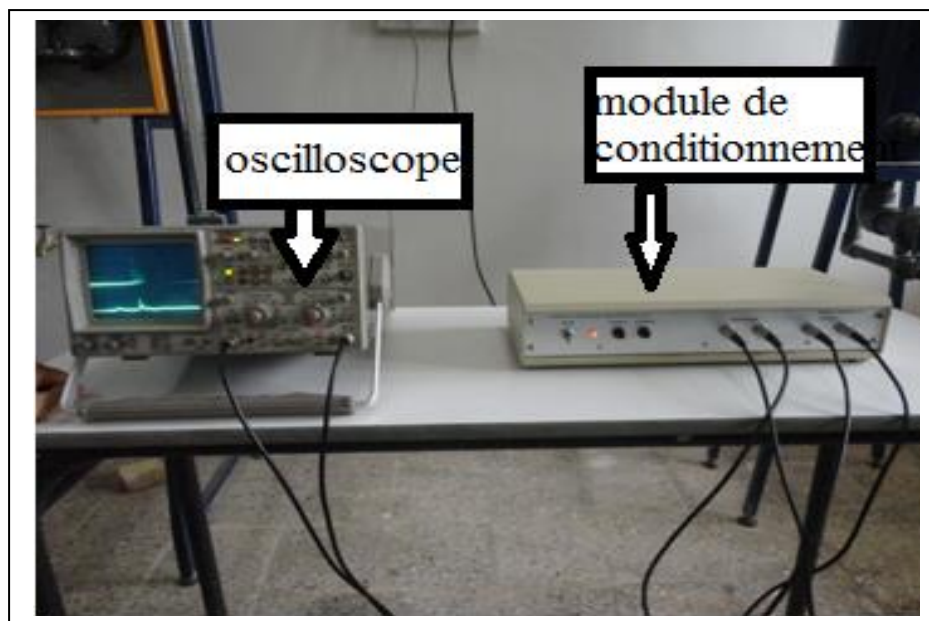


Figure 2-11 : Photographies de l'oscilloscope et le module de conditionnement

L'oscilloscope est un instrument électronique qui convertit des signaux électriques (Principalement une tension) en une trace visible sur un écran.

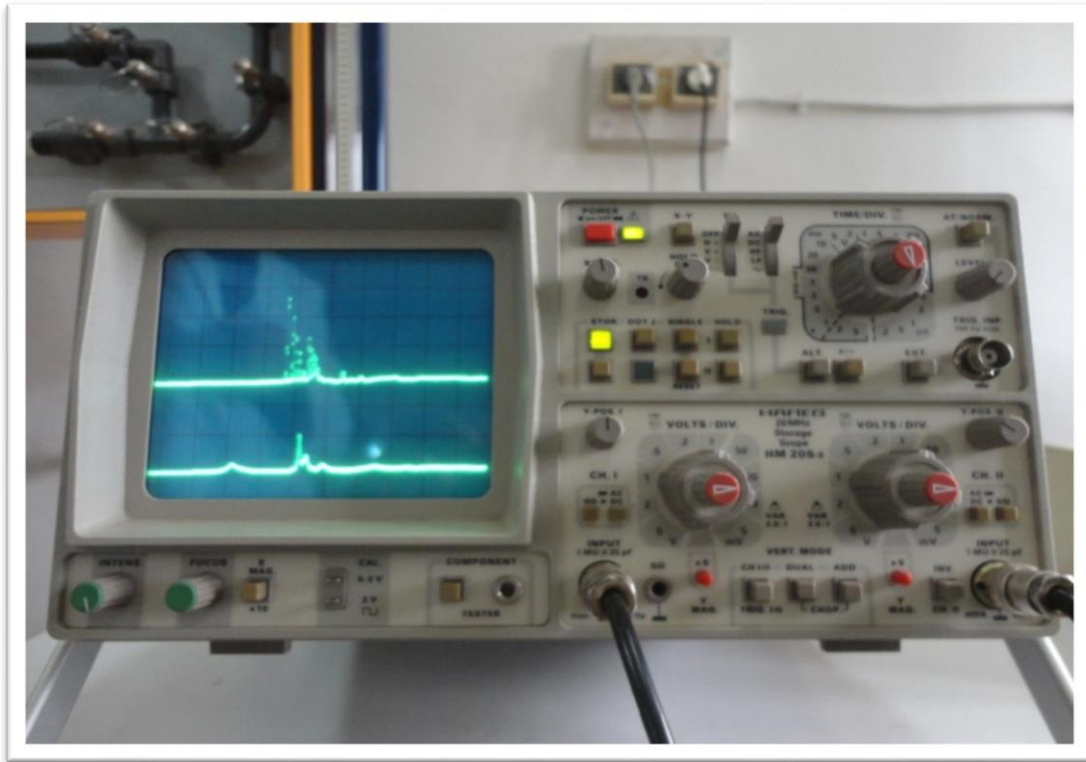


Figure 2-12 : photographie de l'oscilloscope

La **figure 5** représente l'oscilloscope que utilisé dans les expériences, les boutons sont rangés en colonnes « Horizontal », « Vertical », « Trigger »

. **Horizontal:** pour régler la base de temps (le balayage) qui doit être adaptée au signal étudié.

Vertical: régler la sensibilité verticale en fonction de l'intensité du Signal.

Trigger: Le menu qui permet de synchroniser le signal avec la Base de temps

- Principales commandes de l'oscilloscope

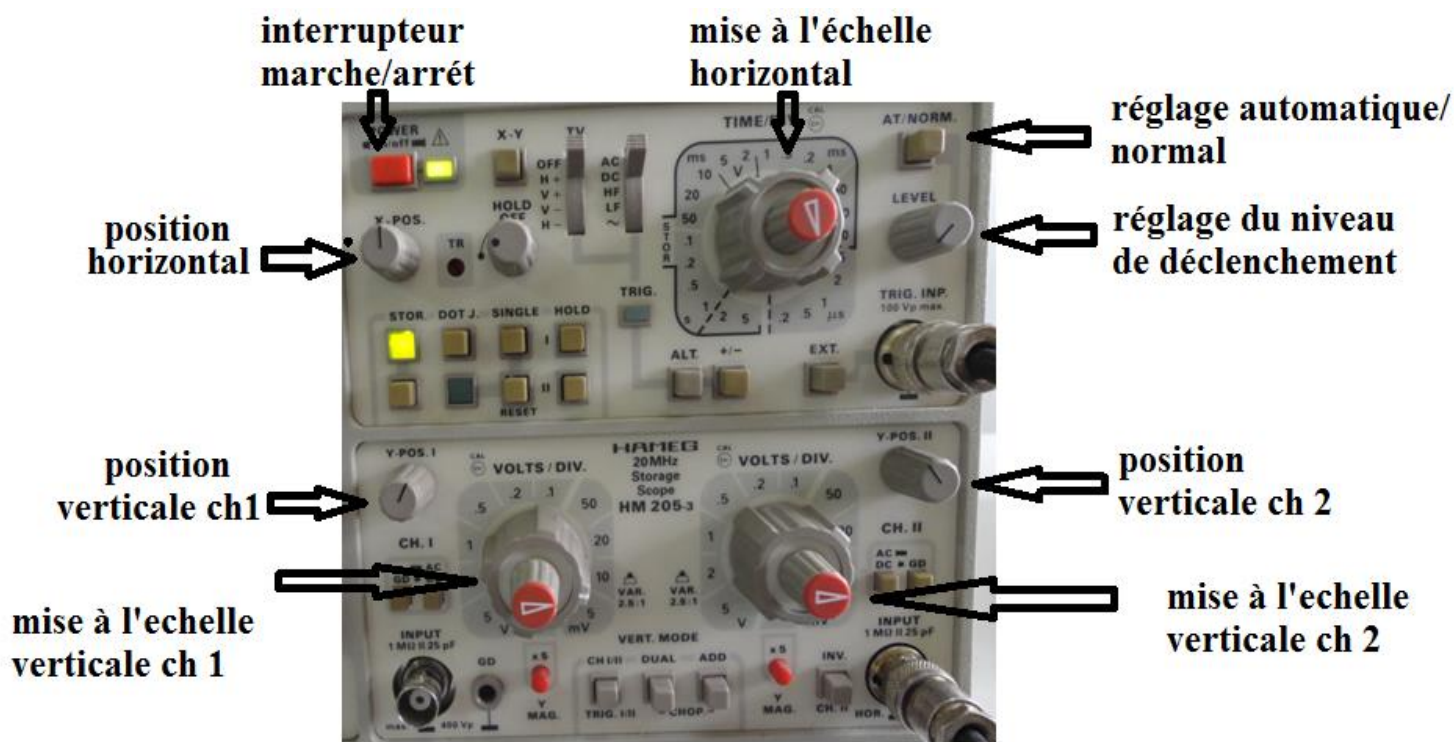


Figure 2.13 : photographie de commande de l'oscilloscope

II.4-Mode opératoire du banc d'essai

- 1). Tout d'abord vérifier que la vanne de vidange du réservoir collecteur du module de service est fermée.
- 2). Remplir le réservoir de vidange
- 3). La haute tension est présente dans l'oscilloscope ne doit pas ce placé sur le dessus du module de service. Les câbles de signaux longs sont prévus pour permettre au module de conditionnement de signal et l' oscilloscope de se placer loin du module de service pour éliminer la possibilité des projections d'eau sur ces appareils électroniques.
- 4). Connecter les capteurs de pression au module de conditionnement du signal à l'aide des câbles blindés longues fournies.
- 5). Connecter les câbles blindés courts entre les prises de sortie du signal sur le module de conditionnement de signal et les prises d'entrée de l'oscilloscope. Pour le bon fonctionnement du système, le signal provenant du transducteur à proximité de la soupape à action rapide doit être connecté à l'entrée 1 de l'oscilloscope (connecteur d'entrée de gauche sur l'oscilloscope) via le module de conditionnement de signaux.
- 6). Connecter la ligne d'alimentation secteur -oscilloscope à la prise d'entrée à l'arrière du module de conditionnement de signaux.
- 7). Connecter le module de service et le module de conditionnement de signaux pour l'alimentation électrique
- 8). Fermer toutes les vannes de l'équipement et commencer par l'interrupteur de démarrage de la pompe.
- 9). Ouvrir lentement la vanne de commande d'alimentation pour remplir le réservoir à niveau constant, le niveau étant indiqué dans la cheminée d'équilibre en plexiglas. Quand en arrive au bon niveau, l'excès d'eau va apparetre dans la section affichage dans le tuyau de retour reflue vers le réservoir collecteur.

- 10). Ouvrir complètement la vanne à levier et le régulateur de débit dans le tuyau de test du tube tranquilisateur. Vérifier que l'eau s'écoule volumétrique dans la cheminée d'équilibre doit descendre à une position proche du fond.
- 11). fermer la vanne de régulation de débit dans le tuyau de test tube tranquilisateur
- 12). Ouvrir la soupape à action rapide en appuyant sur le bouton noir sur la tige de soupape dans la soupape. Vérifier que les débits d'eau dans l'volumétrique
- 13). Fermer la vanne à action rapide en appuyant sur le bouton d'acier inoxydable. Vérifier que la vanne se ferme avec un bruit de choc métallique et que l'écoulement s'arrête.
- 14). vérifier l'étanchéité du système et resserrer tous les joints si suspect.
- 15). l'alimentation de réseau de commutation de signal de module de conditionnement. Vérifier que voyant d'alimentation est allumé.
- 16). allumer oscilloscope. Vérifier que voyant est allumé et que l'écran est éclairée.
- 17). éteindre oscilloscope, le module de conditionnement de signal et le module de service.

Conclusion générale

- ❖ Les phénomènes transitoire dans les conduites est un domaine très complexe.
- ❖ Dans notre travaille ; on a étudié la propagation des ondes de pression qui représente un problème majeur dans les installations hydrauliques à grandes dimensions telles que les centrales hydroélectriques ou les stations de pompages.
- ❖ Pour cerner ce problème, on a fait une étude théorique et expérimentale sur le phénomène du coup de Bélier.
- ❖ L'étude expérimentale consiste à réaliser des essais sur le banc d'essai de coup de Bélier existant au laboratoire de Mécanique des Fluides de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen.
- ❖ Les principaux résultats théoriques ont été confirmés par les résultats expérimentaux.
- ❖ Grâce aux résultats théoriques et expérimentaux obtenus nous avons pu estimer une approximation réaliste de l'allure et de l'amplitude de ce phénomène très complexe qui cause un problème majeur dans le domaine de l'hydraulique transitoire et qui est de plus en plus d'actualité.
- ❖ Comme solution proposées pour lutter contre ce phénomène on peut citer comme équipement additionnelle l'installation :
 - Un Ballons anti-béliers
 - Une Cheminées d'équilibre
 - Des réservoirs anti-bélier à régulation automatique ou cheminées ballons
 - Des Dispositifs d'entrée d'air
 - Des Soupapes anti-bélier
 - Une Aspiration auxiliaire
 - Un Volants d'inertie

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1-1 : schéma de la phase 1.....</i>	<i>07</i>
<i>Figure 1-2 : schéma de la phase 2.....</i>	<i>08</i>
<i>Figure 1-3 : schéma de la phase 3.....</i>	<i>08</i>
<i>Figure1-4 : schéma de la phase 4.....</i>	<i>09</i>
<i>Figure 1-5 : schéma simplifié d'une onde de pression remontant conduite</i>	<i>10</i>
<i>Figure1.6- Compressibilité de l'Isane en fonction de la pression.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure1.7-Evolution temporelle du phénomène de coup de bélier. Les surpressions (dépressions) sont représentées schématiquement par un gonflement (rétrécissement) de la conduite.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure1.8-Evolution temporelle de la pression en différents points du circuit.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure1.9-Célérité équivalente d'une onde de pression. Dépendance au module de compressibilité du liquide et à l'élasticité de la conduite.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure1.10-Rapport entre célérités équivalente et intrinsèque. Dépendance au module de compressibilité du liquide et à l'élasticité de la conduite.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure1.11-Schéma du système à deux tubes considéré.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 2.1: Photographie de la pompe.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 2.2 : photographié de conduite de retour et d'alimentat.....</i>	<i>35.</i>
<i>Figure2.3 : photographie de l'armoire de commande.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 2.4 : photographie A/ de la cuve ; B/ du module de service.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure2.5 : photographie des conduites des expériences.....</i>	<i>36</i>

<i>Figure 2.6 : photographie de la soupape à action rapide.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 2.7 : schéma du banc d'essai.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 2-8 : photographie de banc d'essai.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 2.9 : photographie de capteur de pression N°1.....</i>	<i>40.</i>
<i>Figure 2.10 : photographie de capteur de pression N°2.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 2.11 : Photographies de l'oscilloscope et le module de conditionnement.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 2.12 : photographie de l'oscilloscope.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 2.13 : photographie de commande de l'oscilloscope</i>	<i>43</i>
<i>Figure 3.1 : schéma de manipulation.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3.2 : les signaux correspondent à l'expérience 1.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 3.3 : les signaux correspondent à l'expérience 2.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 3.4 : les signaux correspondent à l'expérience 3.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 3.5 : les signaux correspondent à l'expérience 4.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 3.6 : les signaux correspondent à l'expérience 5.....</i>	<i>59</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1 : Module d'Young (H) de la conduite conduisant à une célérité équivalente égale à 90 % de la célérité intrinsèque de fluides de modules de compressibilité différents(B).....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 3-1 : variation de pression en fonction de la vitesse et le débit.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 3-2 : les pressions expérimentales.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 3-3 : comparaison des pressions théorique et expérimentale.....</i>	<i>61</i>

Liste des notations

<i>Symboles</i>	<i>désignations</i>	<i>unité</i>
A	Section transversale du réservoir de surpression	m ²
a	section transversale de tuyau	m ²
B _i	intensité d'onde incidente	-
B _r	intensité d'onde réfléchie	-
C	célérité d'onde du coup de bélier	m/s
D	diamètre du tuyau	mm
E	module d'élasticité du matériau constituant de la conduite	GN * m ⁻²
E _C	Module d'Young	MPa
E _{eau}	Module d'élasticité du liquide ou compressibilité de l'eau	MPa
k	module en vrac de liquides (eau à NTP)	GN * m ⁻²
L	longueur de tuyau	m
p	pression développée	N/m ²
Δp	dépression	-
Q	débit	l/s
r	rayon du tube de mesure	m

t	temps	sec
td	durée de l'impulsion	sec
ts	temps entre les lectures successives	sec
tp	épaisseur du tube	m ²
v	vitesse du liquide	m/s
V	volume	l
ρ	densité du liquide	kg * m ⁻³
β	module de compressibilité	-
μ	viscosité dynamique	-
μ_{CDB}	nombre de trajets de l'onde de coup de Bélier	-
Δ	erreur relative	-
δ	longueur de stokes	-
ω	pulsation	-

- + [1] AFCP/CETIM (1997) : Guide acoustique des installations de pompage .En collaboratio.publications CETIM.
- + [2] AVELLAN FRANCOIS (2001) : Ecoulement in stationnaires : phénomènes de propagation
- + [3] E.RIEUTORD (1985) : Mécanique des fluides sous I.N.S.A DE Lyon.
- + [4]M.CARLIER (1985) : hydraulique générale et applique.
- + [5]Bird R.B, Stewart W.E & Light foot E.N (1960) “transport phenomena”.
- + [6]BERGERONL : du coup de bélier en hydraulique au coup de fonder en électricité.
- + [7]SCHLAG.A : coup de bélier. Oscillations en masse .in hydraulique générale. Paris dunod éditeur.
- + [8]LEHOUCQ.R COURTY J.M : des ondes dans les conduites.
- + [9]ROCARDY : dynamique générale des vibrations quatrième édition.
- + [10]B.BAHRAR.E, E. RIUTORD ; Modélisation du phénomène du coup de bélier avec prise en compte du comportement réel de la conduite
- + [11]B .SALAH, A.KETTAB : coup de bélier dans un réseau ramifié de rang.
- + [12]B .SALAH, A.KETTAB, F.MASSOUH : célérité de l’onde de coup de bélier dans les réseaux enterrés.
- + [13]E.ROCHE, principes généraux de calcul du coup de bélier .paris 1986.
- + [14]A.SCHLAG : la transmission du coup de bélier .paris 1980.

Summary

The transient wave propagation phenomena represent a major problem in the field of hydraulics especially in large hydraulic installations such as hydroelectric plants and pumping stations or pipe sizes are very important, and the phenomenon of water hammer may be the cause of massive damage. In the present study it was projected on one of the causes of the wave propagation, that is to say that a sudden stop of the water supply pipes. As was brought to equate this phenomenon is taking as the key point change operating conditions << flow >> on one side is closing the valves. An oscilloscope to study the pressure developed in the results were very interesting leads are used it is for non variables characteristic lines.

Key words: Water hammer, propagation, wave, transient phenomena.

Résumé

Les phénomènes transitoire de propagation d'onde représentent un problème capital dans le domaine de l'hydraulique surtout dans les grandes installations hydraulique comme les centrales hydroélectriques et les stations de pompages ou les dimensions des conduites sont très important et ou le phénomène du coup de Bélier peut être à l' origine de dégâts énormes. Dans cette présente étude on s'est projeté sur l'une des causes de la propagation des ondes, c'est –a-dire celui d'un arrêt brutal de l'alimentation en eau des conduits. Comme en a été amené à mettre en équation c'est phénomènes en prenant comme point essentiel la variation de condition d'exploitation << le débit >> d'un coté est la fermeture des vannes. On utilise un oscilloscope pour étude la pression développé dans la conduit les résultats obtenus ont été très intéressants on se qui concerne les conduits a caractéristique non variables.

Mots clés : coup de Bélier ; propagation ; onde ; phénomène transitoire.
