



# Journal of Materials and Engineering Structures

## Research Paper

### Analyse du coup de bélier dans une conduite forcée dans le cas d'une fermeture de vanne. Partie 1 : Sans pertes de charges

Analysis of water hammer in a penstock in the case of valve closure. Part 1: Without pressure losses

*Hocine Hammoum<sup>a,\*</sup>, Akli Yahiaoui<sup>a</sup>, Bachir Achour<sup>b</sup>*

<sup>a</sup> *Département de génie civil, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algérie*

<sup>b</sup> *Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface, Université Mohammed Khider, Biskra, Algérie*

#### ARTICLE INFO

##### Article history :

Received 09 November 2015

Revised 30 January 2016

Accepted 12 March 2016

##### Mots clés:

Diagramme de Bergeron

Coup de bélier

Conduite forcée

Fermeture de vanne

##### Keywords:

Diagram of Bergeron

Water hammer

Penstock

Closing valve

#### RESUME

Nous développons, dans cette contribution, une méthode de calcul du coup de bélier inspirée de la construction graphique de Bergeron, que nous qualifions de méthode analytique. En nous aidant de ces graphes, nous tirons les relations qui permettent de calculer les débits et les pressions le long d'une conduite forcée. L'écoulement de l'eau s'effectue en adduction gravitaire reliant à l'amont un réservoir de mise en charge et à l'aval une vanne. Dans cette première partie, nous négligerons les pertes de charge. L'étude portera essentiellement sur le coup de bélier induit par la fermeture lente de la vanne. Un exemple de calcul pratique sera présenté à la fin de cet article pour illustrer la méthode de calcul exposée.

#### ABSTRACT

We develop, in this paper, a method of calculating the water hammer inspired by the graphic construction of Bergeron, which we qualify as analytical method. In helping us of these graphs, we get the relationships that allow calculating the flow rates and pressures along a penstock. The flow of water is carried out by gravity adduction connecting at upstream a storage tank and at downstream a valve. In this first part, we neglect the pressure losses. The study will focus on water hammer-induced by a slow closing of the valve. A practical example will be presented at the end of this work in order to illustrate the exposed method.

\* *Corresponding author. Tel.: +213 555928541.*

*E-mail address: hammoum\_hoc@yahoo.fr*

## 1 Introduction

Il est connu que le coup de bélier est un phénomène oscillatoire dont les causes les plus fréquentes sont les fermetures (ou ouvertures) instantanées ou trop rapide d'une vanne de sectionnement placée au bout d'une conduite d'adduction en charge. Dans les études d'ingénierie de l'eau, l'ingénieur concepteur est toujours tenu d'examiner ces conduites forcées du point de vue de la protection contre le coup de bélier. Comme la résolution numérique des équations d'Allievi régissant ce phénomène nécessite des calculs très longs et laborieux, l'ingénieur hydraulicien a souvent recours à des méthodes empiriques ou forfaitaires induisant une majoration importante de la surpression (ou de la dépression) dans la conduite. Cette manière de faire conduit généralement à un surdimensionnement des équipements (vannes, pompes, conduites et pièces spéciales) et par voie de conséquence à un surcout du projet étudié.

Ainsi, des solutions graphiques plus rapides ont été imaginées telles que la méthode dite de l'épure de Bergeron ou la méthode de l'abaque de Vibert. Ces méthodes nous permettent d'aboutir d'une manière satisfaisante et relativement simple à une solution générale du problème du coup de bélier, qui à première vue paraît des plus compliqué. Le lecteur intéressé par plus de détails sur ces méthodes peut consulter les références [1] et [2].

Cette question a déjà été fréquemment traitée dans la littérature, mais nous ne pouvons revenir sur ces divers articles. Comme publications, nous mentionnerons les travaux d'Escande [3-5] dans les quels le problème est traité sur une base analytique et de manière générale et élégamment résolu, pour chaque type de situation. Deux autres publications [6-7] méritent d'être citées, dans lesquelles les principes physiques, les méthodes mathématiques de base ainsi que les solutions apportées au phénomène du coup de bélier sont expliquées. Ces contributions couvrent les nombreuses causes ainsi que les solutions apportées d'une manière pratique. Ces références représentent une lecture intéressante et utile pour les ingénieurs travaillant dans le domaine des écoulements des liquides, dans les systèmes de tuyauterie.

Un nouvel examen de ce problème nous a semblé répondre à une certaine nécessité pratique. Aussi, la recherche d'une solution analytique à ce problème nous a amené à présenter une contribution faisant l'objet de la présente étude. Le principe général de notre approche réside dans la transposition du procédé graphique, traditionnellement utilisé, de l'épure de Bergeron au cas particulier du problème traité, qui dans notre cas est une fermeture de vanne sans la prise en compte des pertes de charges le long de la conduite. Avec cette approche, nous arrivons à tirer les relations qui nous permettent d'évaluer les débits et les pressions le long d'une conduite forcée, comme nous le verrons plus loin en section 3.

## 2 Position du problème et hypothèses de base

Considérons une conduite forcée reliant un réservoir de mise en charge en amont dont la surface libre est à la pression atmosphérique et muni à son extrémité aval d'une vanne de sectionnement qui conditionne le passage de l'eau (Fig. 1). L'écoulement gravitaire s'effectue du réservoir vers la vanne. Les pertes de charge le long de la conduite sont ici négligées.

Les coups de bélier prennent naissance au niveau de la vanne. Nous supposons que le réservoir est suffisamment grand pour que le niveau de l'eau reste constant pendant la durée du phénomène étudié. La conduite présente les mêmes caractéristiques sur toute la longueur  $L$  développée, c'est-à-dire le même diamètre intérieur  $D$  et la même épaisseur  $e$ .

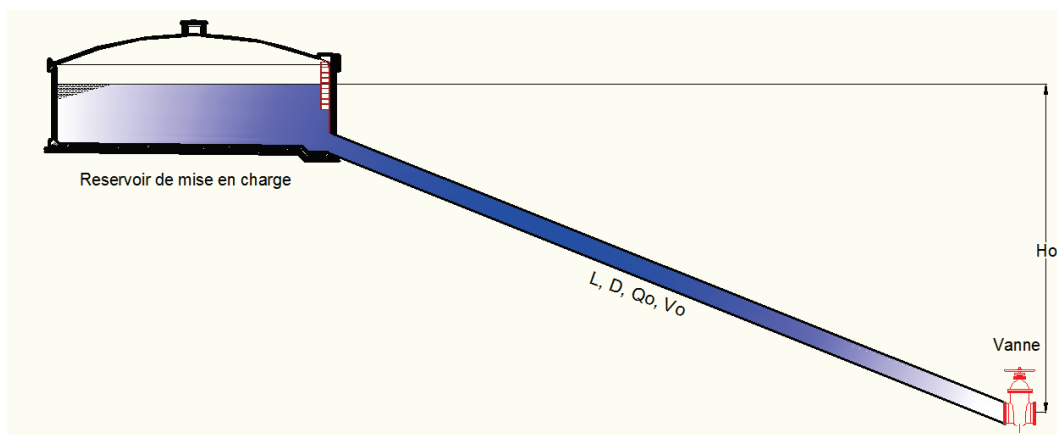


Fig. 1 - Dispositif pratique du problème posé

Nous proposons de calculer les débits et les pressions le long d’une conduite forcée en adduction gravitaire véhiculant un débit  $Q_0$  en régime permanent à la vitesse  $V_0$ . Le diamètre à pleine ouverture de la vanne est  $D$ . Le dispositif pratique du problème posé est représenté dans la figure 1.

La fermeture de la vanne s’amorce à l’instant  $t=0$ , et s’achève totalement au bout d’un temps  $T$ , représentant le temps de la fermeture totale. Le temps d’un aller retour de l’onde de choc, après fermeture de la vanne, est donné par :

$$T_r = 2 \cdot \frac{L}{C} \tag{1}$$

L’étude portera essentiellement sur la détermination du débit et de la pression au niveau de la vanne et du réservoir. Nous noterons sur le graphique de Bergeron, respectivement  $(jV)$  et  $(jR)$ , les points figuratifs au niveau de la vanne et du réservoir, correspondants au temps  $T_j$ , donné par la relation qui suit :

$$T_j = j \cdot T_x \tag{2}$$

Où,  $j$  est un entier naturel (variant de 0 à  $N$ ) et  $T_x$  le temps d’un aller simple de l’onde de choc qui sera d’ailleurs pris comme pas de temps pour la fermeture de la vanne et qui peut être donné par :

$$T_x = \frac{T_r}{2} \tag{3}$$

### 3 Méthode de resolution

Au temps zéro ( $T_0=0$ ), l’ouverture de la vanne est totale, par conséquent il n’y a pas de surpression  $H_{0V}=H_0$ . Le point  $(0V)$  est donc nécessairement sur l’axe  $OQ$  correspondant à  $A_{v0}=A$ , et nous avons d’ailleurs  $Q_{0V}=Q_0$  (Fig. 2).

Initialement, la vanne est assimilée à un orifice et nous pouvons écrire :

$$Q_{0V}=Q_0=m \cdot A_{v0} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{0V}} \tag{4}$$

Nous pouvons déduire alors le coefficient de débit par la relation :

$$m = \frac{Q_0}{A_{v0} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{0V}}} \tag{5}$$

Nous savons aussi qu’à l’extrémité supérieure de la conduite forcée (au niveau du réservoir), à chaque instant, la surpression est nulle. Par suite, le point figuratif sur le diagramme de Bergeron noté  $R$  représentant le réservoir aux différents instants  $T_j$  sont situés sur la droite  $B=0$ .

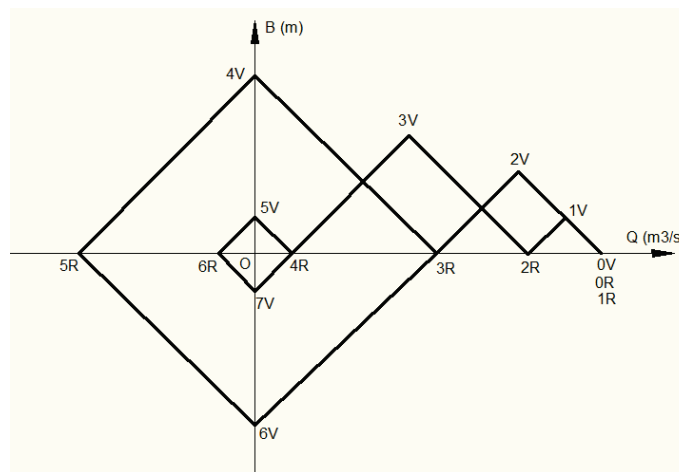


Fig. 2 - Construction graphique de Bergeron dans le cas d’une fermeture de vanne et sans pertes de charges

Pendant l'intervalle de temps compris entre 0 et  $T_r$  (temps d'un aller retour de l'onde de choc) aucune onde de retour réfléchiée par le réservoir ne vient frapper la vanne. En conséquence, le lieu du point figuratif  $V$  représentant la vanne entre 0 et  $T_r$  est sur la droite de pente  $(-C/gA)$  passant par  $(0V)$ . Ainsi donc, au temps  $T_x$  quand  $V$  est en  $(1V)$ , la vanne émet une onde de choc que nous noterons  $F_1$ . Au temps  $(2.T_x)$  quand  $V$  est en  $(2V)$ , la vanne émet une onde de choc que nous noterons  $F_2$ , et ainsi de suite.

Suivons l'onde  $F_1$  émise au temps  $T_x$ , elle se propage jusqu'au réservoir qu'elle touche au bout du temps  $(2.T_x)$ . Par suite le point de rencontre de la droite de pente  $(+C/gA)$  avec l'axe  $OQ$  (lieu des points  $R$ ) marque la position du point  $(2R)$  au temps  $(2.T_x)$ . De même, l'onde  $F_2$  émise au temps  $(2.T_x)$ , se propage jusqu'au réservoir qu'elle touche au bout du temps  $(3.T_x)$ . Par suite le point de rencontre de la droite de pente  $(+C/gA)$  avec l'axe  $OQ$  marque la position du point  $(3R)$  au temps  $(3.T_x)$ .

Mais en chaque point  $R$  passe une droite de pente  $(-C/gA)$  qui correspond à l'émission d'une onde réfléchiée descendante vers la vanne que nous noterons  $f$ . Ainsi en  $(2R)$ , part au temps  $(2T_x)$  une onde  $f_2$  caractérisée par la droite de pente  $(-C/gA)$ . Cette onde arrivera à la vanne au temps  $(3T_x)$  et nous obtenons ainsi le point  $(3V)$ . A partir de  $(3V)$  passe la droite de pente  $(+C/gA)$  qui coupe  $OQ$  en  $(4R)$  au temps  $(4T_x)$  et ainsi de suite.

Nous avons pu mettre successivement en place les points  $(0V)$ ,  $(1V)$ ,  $(2V)$ ,  $(3V)$ ..... ainsi que les points  $(0R)$ ,  $(1R)$ ,  $(2R)$ ,  $(3R)$ ... permettant d'évaluer aux instants  $(0, T_x, 2T_x, 3T_x \dots)$  les valeurs des coup de béliers et des débits au niveau de la vanne et du réservoir.

Mais viendra le moment où la vanne sera totalement fermée et où le lieu obligé du point figuratif  $V$  de la vanne sera l'axe vertical  $OB$ , correspondant au débit nul. Supposons qu'il en soit ainsi par exemple au temps  $(4.T_x)$ , comme c'est le cas sur la figure 2. Nous voyons que le point  $(4V)$  se trouve sur l'axe  $OB$ , à l'intersection de  $OB$  avec la droite de pente  $(-C/gA)$  qui part du point  $(3R)$ . Il en sera de même pour le point  $(5V)$  au temps  $(5.T_x)$ , qui doit se trouver sur l'axe  $OB$  (car la vanne est fermée) au point d'intersection avec la droite de pente  $(-C/gA)$  qui part du point  $(4R)$ .

Fort de cette remarque, si nous poursuivons la construction précédemment commencée, nous voyons qu'à partir des points  $(4V)$  et  $(5V)$ , les droites de pente  $(-C/gA)$  et  $(+C/gA)$  vont former des losanges. Autrement dit, le diagramme se ferme sur lui même, et dans le cas de la figure 2, il comprend deux losanges. Le phénomène devient périodique et indéfini et de période  $T_r$ , car nous avons admis que les pertes de charges étaient négligeables.

Par exemple sur la figure 2, entre les temps  $(4.T_x)$  et  $(8.T_x)$ , nous pourrions relever les valeurs successivement prises par le débit  $Q$  au niveau de la sortie du réservoir, il se produit des entrées et des sorties d'eau périodiques dans le réservoir accompagnant les surpressions et des dépressions dans la conduite. De même, nous pouvons suivre les variations du coup de bélier au niveau de la vanne en nous reportant aux ordonnées  $B$  des points  $(4V)$ ,  $(5V)$ ,  $(6V)$ ,  $(7V)$ ,  $(8V)$ ,  $(9V)$ .

### 3.1 Etude des points figuratifs ( $jV$ ) correspondants à la vanne

D'après la figure (2), nous établissons les relations suivantes :

$$H_{jV} = H_0 + B_{jV} = H_0 - C \cdot \frac{\Delta Q_j}{g \cdot A} \quad (6)$$

$$Q_{jV} = Q_{(j-1)R} + \Delta Q_j \quad (7)$$

En pratique, la fermeture totale de la vanne n'est jamais instantanée, mais s'opère plutôt progressivement. C'est au constructeur de fixer la loi de fermeture de la vanne en fonction du temps  $T_j$ . Après un certain temps  $T_j$ , la section d'ouverture de la vanne devient  $A_{vj}$ . Cette fermeture partielle de la vanne provoque une surpression et une variation de la vitesse de l'eau dans la conduite. Le débit à travers la vanne à cet instant  $T_j$ , peut s'écrire sous la forme :

$$Q_{jV} = m \cdot A_{vj} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{jV}} \quad (8)$$

En élevant la relation (8) au carré, nous obtenons :

$$Q_{jV}^2 = (m.A_{vj})^2 \cdot (2.g.H_{jV}) \quad (9)$$

Nous tirons  $\Delta Q_j$  de la relation (7)

$$\Delta Q_j = Q_{jV} - Q_{(j-1)R} \quad (10)$$

L'équation (6) s'écrit alors :

$$H_{jV} = H_0 - C \cdot \frac{(Q_{jV} - Q_{(j-1)R})}{g.A} \quad (11)$$

En remplaçant  $H_{jV}$  par son expression dans la relation (9), il vient :

$$Q_{jV}^2 + \frac{2.C}{A} \cdot (m.A_{vj})^2 \cdot Q_{jV} - 2g \cdot (m.A_{vj})^2 \cdot \left[ H_0 + \frac{C}{g.A} \cdot Q_{(j-1)R} \right] = 0 \quad (12)$$

### 3.1.1 Avant fermeture totale de la vanne : $Av_j \neq 0$

La résolution de l'équation (12) du second ordre, aboutit à deux racines réelles. Nous ne retiendrons que la solution qui a un sens physique, donnée par :

$$Q_{jV} = -\frac{C}{A} \cdot (m.A_{vj})^2 + \sqrt{\left[ \frac{C}{A} \cdot (m.A_{vj})^2 \right]^2 + 2g \cdot (m.A_{vj})^2 \cdot \left( H_0 + \frac{C}{g.A} \cdot Q_{(j-1)R} \right)} \quad (13)$$

De l'équation (9), nous tirons :

$$H_{jV} = \frac{Q_{jV}^2}{2.g \cdot (m.A_{vj})^2} \quad (14)$$

### 3.1.2 Fermeture totale de la vanne : $A_{vj} = 0$

Dans ce cas  $Q_{vj}=0$  et l'équation (11) s'écrit alors :

$$H_{jV} = H_0 + \frac{C}{g.A} \cdot Q_{(j-1)R} \quad (15)$$

### 3.2 Etude des points figuratifs $(j+1)R$ correspondants au réservoir

D'après le diagramme de Bergeron de la figure (2), il résulte :

$$Q_{(j-1)R} = Q_{(j-1)R} + 2.\Delta Q_j \quad (16)$$

En nous aidant de la relation (10), nous aboutissons finalement à :

$$Q_{(j+1)R} = 2.Q_{jV} - Q_{(j-1)R} \quad (17)$$

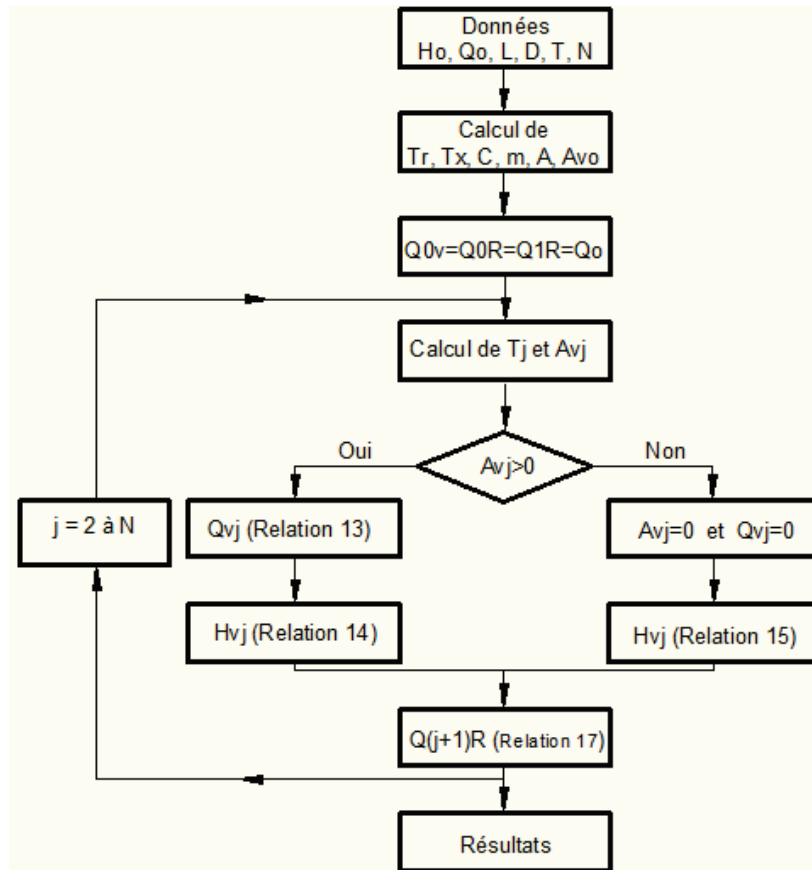
A la fermeture totale de la vanne, lorsque  $Q_{jV} = 0$ , cette dernière relation s'écrit :

$$Q_{(j+1)R} = -Q_{(j-1)R} \quad (18)$$

Nous en déduisons que le débit au niveau de la sortie du réservoir à l'instant  $t_{(j+1)}$  sera égal au débit en ce même point à un instant  $t_{(j-1)}$ , mais changé de signe. C'est-à-dire qu'il se produit des entrées et des sorties d'eau périodiques dans le réservoir.

**3.3 Organisation informatique de la méthode**

Les équations analytiques ainsi développées et traduisant le phénomène du coup de bélier tel que présenté sur les épures de Bergeron, s’y prêtent bien à la programmation. L’organigramme de la Figure 3 met en évidence les différentes phases de calcul. Pour démarrer le calcul, du fait que  $Q_{jV}$  dépend de la seule variable  $Q_{(j-1)R}$ , nous posons  $Q_{0V}=Q_{0R}=Q_{1R}=Q_0$ .



*Fig. 3 – Organigramme de calcul*

**4 Etude d’un exemple pratique**

Soit à déterminer les débits et les pressions à différents instants au niveau du réservoir de mise en charge et de la vanne contrôlant le passage de l’eau d’une conduite forcée en acier, ayant les caractéristiques données au tableau 1 [8].

**Tableau 1 – Données de l’exemple pratique**

Longueur développée	$L = 2000 \text{ m}$
Diamètre intérieur de la conduite	$D = 1,616 \text{ m}$
La charge statique	$H_0 = 50 \text{ m}$
Le débit véhiculé par la conduite	$Q_0 = 2 \text{ m}^3/\text{s}$
Coefficient dépendant du matériau constituant la conduite	$K = 0,50$
l’épaisseur de la conduite	$e = 0,01625 \text{ m}$
Le temps de fermeture totale de la vanne	$T = 10 \text{ s}$

L’aire de la section droite de la conduite est donnée par la relation qui suit :

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 2.05 \text{ m}^2 \quad (19)$$

La célérité de propagation de l'onde de choc est donnée par la formule suivante proposée par Allievi [1] :

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + K \cdot \frac{D}{e}}} = 1000 \text{ m/s} \quad (20)$$

Jusque là, nous n'avons fait aucune hypothèse sur la nature de la fermeture. Imaginons, pour cette application, le cas où la loi de fermeture de la vanne est linéaire, elle serait donnée par la relation suivante :

$$A_{vj} = A_{v0} \cdot \left( 1 - \frac{T_j}{T} \right) \quad (21)$$

Après analyse du phénomène du coup de bélier conformément à la méthode exposée en section 3, en suivant notamment l'organigramme, nous aboutissons aux différents résultats regroupés dans le tableau 2. Nous avons consigné en fonction des différents instants, la section d'ouverture de la vanne, le débit sortant (ou entrant) dans la conduite à partir du réservoir, la charge au dessus de la vanne ainsi que la valeur du coup de bélier déduit à partir de la relation (6) comme suit

$$B_{jV} = H_{jV} - H_0 \quad (22)$$

**Tableau 2 – Analyse du coup de bélier dans l'exemple pratique**

j	T <sub>j</sub> [sec]	A <sub>vj</sub> [m <sup>2</sup> ]	Q <sub>(j-1)R</sub> [m <sup>3</sup> /sec]	Q <sub>jV</sub> [m <sup>3</sup> /sec]	H <sub>jV</sub> [m]	B <sub>jV</sub> [m]	Q <sub>(j+1)R</sub> [m <sup>3</sup> /sec]
1	2,00	1,64	2,00	1,77	61,33	11,33	1,54
2	4,00	1,23	2,00	1,48	75,91	25,91	0,96
3	6,00	0,82	1,54	0,99	77,30	27,30	0,45
4	8,00	0,41	0,96	0,48	73,48	23,48	0,01
5	10,00	0,00	0,45	0,00	72,14	22,14	- 0,45
6	12,00	0,00	0,01	0,00	50,62	0,62	- 0,01
7	14,00	0,00	- 0,45	0,00	27,86	-22,14	0,45
8	16,00	0,00	- 0,01	0,00	49,38	- 0,62	0,01

Nous remarquons que la charge maximale de 77,30 m correspondant à une surpression de 27,30 m au niveau de la vanne est atteinte au temps (3.T<sub>x</sub>) soit 6s après le début de fermeture de vanne. Cet état est représenté sur le graphe de Bergeron (Fig. 4) par le point figuratif (3V) lorsque le taux de fermeture de la vanne est de 40%. La charge minimale de 27,86 m correspondant à une dépression de l'ordre de (-22,14 m) au niveau de la vanne est atteinte au temps (7.T<sub>x</sub>) soit 14s après le début de fermeture de vanne. Cet état est représenté sur le graphe de Bergeron (Fig. 4) par le point figuratif (7V) 4 secondes après la fermeture totale de la vanne.

Nous constatons qu'à partir de la fermeture totale de la vanne, il se produit des entrées et des sorties périodiques d'eau dans le réservoir alternativement tous les T<sub>r</sub>. Par exemple, pour le petit losange de la figure 4, nous déduisons qu'au point (5R), correspondant au temps (5T<sub>x</sub>), la conduite enregistre une entrée d'eau. Au point (7R), correspondant au temps (7T<sub>x</sub>), elle enregistre une sortie d'eau, soit donc après un temps d'un aller retour de l'onde de choc T<sub>r</sub>. Ce phénomène sera répété indéfiniment avec une récurrence entre les point figuratifs (5+4k)R et (7+4k)R désignant respectivement entrée d'eau et sortie d'eau, où (k) représente un entier naturel.

Quant au coup de bélier, il se produit des surpressions et des dépressions au niveau de la vanne alternativement tous les T<sub>r</sub>. Par exemple pour le grand losange de la figure 4, nous déduisons qu'au point (5V), correspondant au temps (5T<sub>x</sub>), la conduite enregistre une surpression. Au point (7V), correspondant au temps (7T<sub>x</sub>), elle enregistre une dépression, soit donc

après un temps d'un aller retour de l'onde de choc  $T_r$ . Ce phénomène sera répété indéfiniment avec une récurrence entre les points figuratifs  $(5+4k)V$  et  $(7+4k)V$  désignant respectivement la surpression et la dépression.

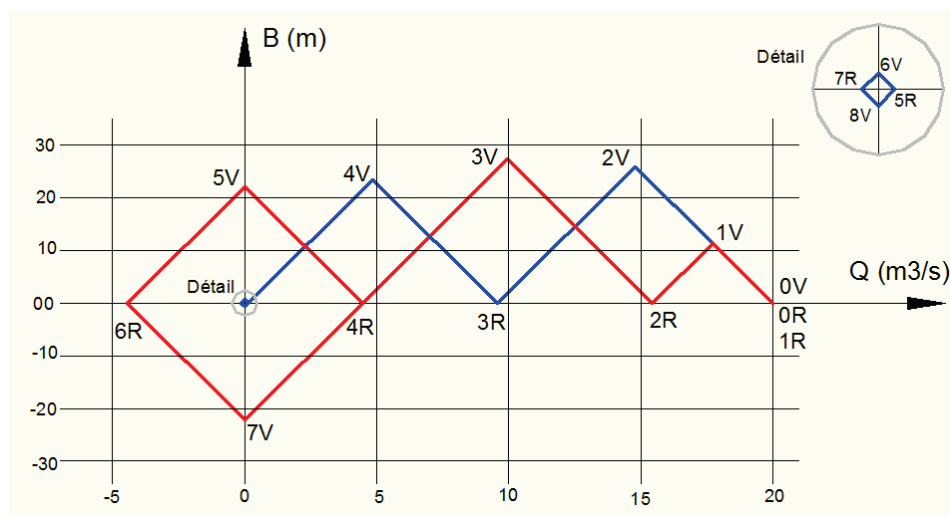


Fig. 4 - Construction graphique de Bergeron de l'exemple pratique

## 5 Conclusion

Avec un exemple pratique, nous sommes arrivés à mettre en évidence que l'approche analytique proposée présente des équations pas trop complexes et donne lieu à des résolutions simples. La démarche de résolution proposée n'est pas complexe d'utilisation, et s'accommode aisément d'une programmation avec Matlab ou tout simplement sur un classeur Excel. Cette approche reste transportable à d'autres types de loi de fermeture autre que linéaire telles que paraboliques par exemple, ce qui laisse présager un meilleur avenir pour cette méthode. Nous remarquons qu'après un calcul analytique nous pouvons revenir à l'épure de Bergeron sans trop de difficultés.

Dans cette partie, les pertes de charge dans la conduite sont négligées. Sauf que, dans la réalité elles ne sont pas négligeables, car elles se développent tout le long de la conduite. Elles interviennent favorablement pour diminuer la valeur du coup de bélier en raison de la dissipation d'énergie engendrée par le frottement de l'eau le long de la conduite. Aussi, dans les prochaines contributions, nous analyserons ce phénomène tenant compte des pertes de charge. Mais comme leur prise en compte conduit à des formulations très complexes, et pour simplifier la résolution du problème et le ramener au problème simple, nous admettrons que ces pertes de charge sont concentrées en un point de la conduite. C'est avec le même esprit et les mêmes hypothèses de bases, que nous examinerons en partie 2, le cas où ces pertes de charge sont concentrées au niveau de la vanne et en partie 3, le cas où ces pertes de charges sont concentrées en amont de la conduite, à la sortie du réservoir.

## 6 Principales notations utilisées

$A$  : Aire de la section droite de la conduite [ $m^2$ ]

$A_{V_j}$  : Aire de la section d'ouverture de la vanne à l'instant  $T_j$  [ $m^2$ ]

$B_{jV}$  : Coup de bélier (surpression ou dépression) au niveau de la vanne à l'instant  $T_j$  [m]

$C$  : Célérité de propagation de l'onde de choc [m/s]

$D$  : Diamètre intérieur de la conduite [m]

$e$  : Epaisseur de la conduite [m]

$g$  : Accélération de la pesanteur [ $m/s^2$ ]

$H_0$  : Charge statique au niveau de la vanne à l'instant initial  $T_0$  [m]

$H_{jV}$  : Charge au niveau de la vanne à l'instant  $T_j$  [m]

$K$  : Coefficient dépendant du matériau de la conduite (0.50 pour l'acier, 1.0 pour la fonte et 5.0 pour le plomb)

$L$  : Longueur développée de la conduite [m]

$m$  : Coefficient de débit [-]



$N$  : Nombre de points (jV) et (jR) à traiter [-]  
 $Q_0$  : Débit initial de l'eau dans la conduite forcée [ $m^3/sec$ ]  
 $Q_{jV}$  : Débit au niveau de la vanne à l'instant  $T_j$  [ $m^3/sec$ ]  
 $Q_{(j+1)R}$  : Débit au niveau du point R (réservoir) à l'instant  $T_{(j+1)}$  [ $m^3/s$ ]  
 $T$  : Temps de fermeture totale de la vanne [s]  
 $T_r$  : Temps d'un aller retour de l'onde de choc [s]  
 $T_X$  : Pas de temps [s]  
 $V_0$  : Vitesse moyenne de l'eau dans la conduite [m/s]

## REFERENCES

- [1]- M. Carlier, *Hydraulique générale appliquée*. Eyrolles, 1980.
- [2]- A. Dupont, *Hydraulique urbaine*. Eyrolles, 1979.
- [3]- L. Escande, J. Piquemal, C. Thirriot, Régime transitoire résultant de la fermeture d'une vanne placée en tête d'un tunnel d'amenée comportant une cheminée d'équilibre aval. *Revue générale des techniques de génie civil*, 1963.
- [4]- L. Escande, Surpression engendrée par la fermeture partielle instantanée d'une conduite avec aspiration d'air par l'extrémité aval. *Revue générale des techniques de génie civil*, 1963.
- [5]- L. Escande, Formules pour le calcul rapide des réservoirs d'air de stations de pompage. *Revue générale des techniques de génie civil*, 1964.
- [6]- B. Sharp, D.B. Sharp, *Water Hammer - Practical Solutions*, Ed. Elsevier science technology, UK, 1995
- [7]- J. Záruba, V. Basin, *Water Hammer in Pipe-Line Systems*, Ed. Elsevier, UK, 1993
- [8]- H. Hammoum, A. Yahiaoui, Contribution à l'étude du coup de bélier - Cas de fermeture de vanne, mémoire d'Ingénieur en génie civil, Université de Tizi Ouzou, 1990.