

COUP DE BELIER DANS UN RESEAU RAMIFIE ENTERRE EN REFOULEMENT

B.SALAH¹, A. KETTAB², F. MASSOUH³

1. Enseignant chercheur, Laboratoire de Recherche des sciences de l'eau LRS-EAU, Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P.)- Alger.

2. Professeur, Laboratoire de Recherche des sciences de l'Eau- LRS-EAU, Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P.)- Alger.

3. Laboratoire de Mécanique des fluides- L.M.F.I- E.N.S.A.M.-C.E.R. de Paris.

RESUME

Un aperçu bibliographique montre que le coup de bélier engendré dans une conduite en charge a été toujours étudié, en supposant que cette dernière est libre (non enterrée). La pression externe exercée par le sol n'a pas été considérée, et par conséquent la conduite peut se déformer librement dans le sens radial. Dans cette hypothèse, le calcul du coup de bélier ne nous informe pas sur la valeur susceptible d'exister réellement si les conduites sont soumises à la charge externe (sol).

Dans ce travail, la méthode des caractéristiques est appliquée à un réseau simple ramifié de rang 2, divergent libre et enterré, en refolement. Afin de montrer l'effet du sol sur le coup de bélier, le raisonnement s'est porté sur le cas des conduites en acier et en PVC libres et enterrées dans un sol de caractéristiques connues. Une comparaison a été présentée sous forme de courbes montrant ainsi la variation dans le temps des charges nodale et celle à la sortie de la pompe pour les deux types de matériau en cas libre et enterré.

Mots clés : régime transitoire- célérité- coup de bélier.- réseau ramifié.

ABSTRACT

The bibliographical summary shows that the water hammer generated in a loaded pipe was often studied, supposing that this latter is free (not buried). The external pressure practised by the ground was not taken into consideration, consequently the pipe can be freely deformed in the radial sense. In this hypothesis, the account of the water hammer doesn't in form us about the susceptible value that really exists in the pipes are submitted to the external charge (ground).

In this work, we apply the method of characteristics to a simple ramified network of rank « 2 » divergent free and buried, in suppression. In order to show the effect of the ground on the water hammer. The reasoning is on the case of steel and P.V.C. pipes free and buried in a ground of known characteristics. a comparison was presented under curved form showing thus the variation in time of nodale charges and those at the pump exit for the two types of material in a free and buried case.

Key words : Transitory regime , celerity, water hammer, ramified network.

I. INTRODUCTION

Le fonctionnement d'un réseau de conduites, en régime transitoire, est caractérisé par des pressions et vitesses variables dans le temps contrairement au cas du régime permanent. Ces variations sont accompagnées par le phénomène de propagation des ondes de pressions qui parcourent le réseau pendant un certain temps jusqu'à leur amortissement et l'établissement d'un nouveau régime permanent. Lors du dimensionnement des conduites d'adduction, travaillant notamment en refoulement, les conduites choisies après optimisation possèdent des pressions de service P_s définies, et qu'on ne doit pas dépasser. C'est justement là où intervient le calcul du réseau, en régime transitoire pour prévoir les pressions P_t susceptibles de se produire. Si la pression totale P_t est inférieure à la pression P_s de service, il n'y a évidemment pas de danger. Par contre, si le contraire s'observe, le danger existe, et l'on doit choisir entre les deux solutions suivantes :

- Changer la classe des conduites pour une pression de service supérieure.
- Atténuer les pressions transitoires par les moyens de protection (protection anti – bélièr).

Dans l'état actuel des choses, l'étude du régime transitoire sert à vérifier la tenue des conduites déjà choisies, mais il n'existe pas de méthode directe permettant le dimensionnement des conduites tout en tenant compte du coup de béliet. De même, ce raisonnement n'a pas pris en considération l'effet du sol sur les conduites enterrées.

Le phénomène du coup de béliet dans un réseau très faiblement ramifié, de type adduction, soit en refoulement, soit en gravitaire peut provoquer des effets plus nocifs à la canalisation. Ainsi lorsqu'un coup de béliet part de la pompe, ou d'une vanne placée à l'extrémité d'une conduite ; il diffuse dans toutes les ramifications. A chaque nœud de ramification, l'onde trouve un volume d'eau plus grand que sur la conduite par où elle arrive.

Dans cette étude, en s'inspirant des résultats déjà publiés [12], on contribue à l'étude de ce phénomène dans un réseau ramifié enterré de rang « 2 » sous pression en refoulement, qui est un cas simple couramment rencontré en pratique. Ainsi la prise en compte de la célérité de propagation réelle pour chaque conduite permet de renseigner sur la vraie grandeur du coup de béliet engendré, notamment à la première phase de la dépression, en cas d'arrêt d'une pompe. Le raisonnement à partir de la valeur majorante du coup de béliet s'avère donc très intéressant, dans le cas d'un réseau enterré.

L'emploi de la méthode des caractéristiques rend plus simple le calcul .Elle permet de renseigner sur la courbe enveloppe de la pression, à chaque nœud du réseau, et les débits de chaque tronçon, en tenant compte des pertes de charge. Les extrémités des conduites, formant le réseau, servent de conditions aux limites connues. [1, 2, 3].

II. CELERITE D'ONDE DE COUP DE BELIER DANS UNE CONDUITE ENTERREE

Dans la littérature, il existe plusieurs formules pour le calcul de la célérité de l'onde de coup de béliet dans les conduites sous pression. Cependant, la majorité de ces formules sont développées avec l'hypothèse d'une conduite à paroi simple non soumise à la pression externe [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Dans tous les cas, la forme originale, et générale donnant la célérité de l'onde de coup de béliet dans une conduite est exprimée par la relation suivante :

$$\frac{1}{c_0^2} = \rho \cdot \left[\frac{d\rho}{\rho dP} + \frac{dS}{SdP} \right] \quad (1)$$

Celle-ci montre l'effet de la compressibilité du liquide et de la déformabilité de la conduite respectivement par les termes $d\rho / (\rho dP)$ et $dS / (SdP)$.

Dans ses travaux de recherche, Salah [12] détermine cette déformabilité pour le cas d'une conduite à multi parois enterrée (blindage, béton, sol), en tenant compte des différents coefficients de Poisson des matériaux formant cette conduite. Ainsi dans l'hypothèse d'une élasticité linéaire, des déformations longitudinales nulles, et d'épaisseur de blindage e_m bien inférieure au rayon, l'auteur obtient :

$$\frac{dS}{SdP} = \frac{2da}{adP} = (1 - \nu_m^2)(1 - \alpha) \frac{2a}{E_m e_m} \quad (2)$$

avec :

$$\alpha = \frac{P_a}{P} = \frac{(1 + \nu_m)a}{(1 + \nu_m)a + \frac{E_m e_m}{E_c} G} \quad (3)$$

et :

$$G = \frac{E_c(1 - \nu_s)(1 - \nu_c)[b^2 + a^2(1 - 2\nu_c)] + E_s(1 - \nu_c)^2(1 - 2\nu_c)(b^2 - a^2)}{E_c(b^2 - a^2)(1 - \nu_m)(1 - \nu_s) + E_s(1 - \nu_c)(1 - \nu_m)[a^2 + b^2(1 - 2\nu_c)]} \quad (4)$$

A l'aide de l'équation (1) qui, après combinaison avec les équations (2), (3) (4) et arrangement, on obtient :

$$C_1 = \left[\frac{\rho}{K_e} \left(1 + K_e \frac{2a(1 - \nu_m^2)G}{(1 + \nu_m)aE_c + E_m e_m \cdot G} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

C_1 est une expression originale et générale qui permet de déterminer la célérité de l'onde dans les conduites enterrées et les galeries rocheuses [12].

Dans notre cas, il s'agit d'un réseau formé de conduites simples enterrées et à paroi mince, cette expression peut être facilement adaptée en considérant uniquement la présence du blindage (tôle). Ainsi, il suffit de faire tendre b vers a dans l'expression (4) pour aboutir à :

$$G = \frac{E_c(1 - \nu_s)}{E_s(1 - \nu_m)} \quad (6)$$

L'équation (5) devient alors :

$$c_1 = \left[\frac{\rho}{K_e} \left(1 + K_e \frac{2a(1 - \nu_m^2)(1 - \nu_s)}{(1 - \nu_m^2)aE_s + E_m e_m (1 - \nu_s)} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Dans le cas d'une conduite en PVC, il suffit de remplacer les caractéristiques du métal par celles du PVC dans l'expression (7).

III. MISE EN EQUATIONS

On utilise les systèmes des équations aux caractéristiques qui vont servir comme base de calcul pour le couple (charge, débit) engendrée par le régime transitoire dans le réseau considéré. On rappelle que ces systèmes sont de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} dx = +cdt \\ dH + \frac{c}{gS} dQ = -i.dx \end{array} \right. \quad (8)$$

et

$$\left\{ \begin{array}{l} dx = -cdt \\ dH - \frac{c}{gS} dQ = -i.dx \end{array} \right. \quad (9)$$

L'application de ces systèmes est plus simple notamment lorsqu'on considère que la quantité $C/(gS)$ est constante. On admet que la section est constante en face des variations de débits et de la cote piézométrique. En principe, l'utilisation des systèmes (8) et (9), permettent la détermination du couple (H, Q) en toute section de la canalisation en partant des conditions aux limites connues (états aux extrémités de la canalisation). Les hypothèses considérées dans l'exemple (figure 1) stipulent que :

- Le nœud n'est pas muni d'organes en dérivation.

- L'unité de temps est telle que $\frac{l_1}{c_1} = \frac{l_2}{c_2} = \frac{l_3}{c_3} = \dots = \frac{l_n}{c_n} = \Delta t = 1 \text{ sec}$

- Extrémités aval des tronçons : existence des réservoirs à plan d'eau supposé invariable.

L'exemple considère le cas d'un réseau télescopique enterré, dans un sol de caractéristiques homogènes. Afin de donner un sens au calcul, (effets de la surpression et de la dépression sous l'influence du sol), le réseau est considéré comme très faiblement ramifié, comportant un seul nœud d'aboutissement des conduites, et sans moyen de protection (figure 1).

Le réseau pris comme exemple, fonctionnant en refoulement, est constitué de conduites de caractéristiques uniques, de même matériau, qui alimentent deux réservoirs R_2 et R_3 . Pour mieux illustrer l'exemple, et à titre comparatif, on considère le cas d'un réseau libre et enterré pour deux natures de matériau de conduites différentes : le P.V.C et l'acier.

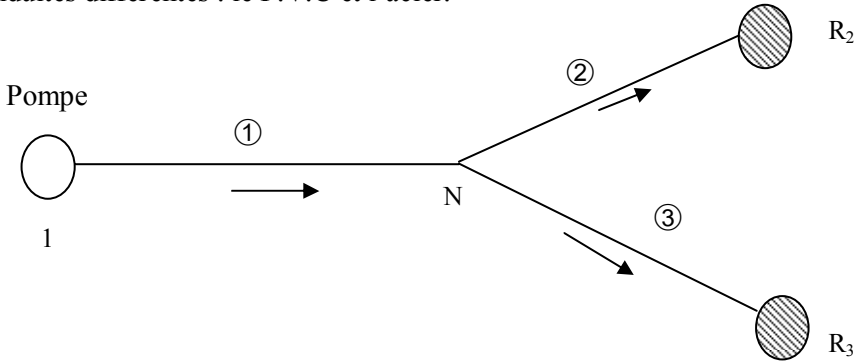


Figure 1 : Réseau de conduites en refoulement

On désigne par :

$H_p = H_1, H_2, H_3$ et q_1, q_2, q_3 , respectivement les charges et les débits connus en régime permanent au temps (t_0)

$H_N, Q_{1N}, Q_{2N}, Q_{3N}$ charge au nœud N et débits inconnus à l'instant ($t + 1$) en régime transitoire, aboutissant au nœud (N).

Par application des systèmes (8) et (9), à chaque conduite, on obtient :

- Pour la première conduite

$$H_N + \frac{c_1}{gS_1} Q_{N1} = H_1 - \frac{c_1}{gS_1} q_{1N} - R_1 Q_{N1}^2 + R_1 q_{1N}^2 \quad (10)$$

- Pour la deuxième conduite

$$H_N + \frac{c_2}{gS_2} Q_{N2} = H_2 - \frac{c_2}{gS_2} q_{2N} - R_2 Q_{N2}^2 + R_2 q_{2N}^2 \quad (11)$$

- Pour la troisième conduite

$$H_N + \frac{c_3}{gS_3} Q_{N3} = H_3 - \frac{c_3}{gS_3} q_{3N} - R_3 Q_{N3}^2 + R_3 q_{3N}^2 \quad (12)$$

D'autre part, on peut écrire au nœud (N) :

$$\sum_{i=1}^{n=3} Q_i = 0 \quad (13)$$

n – tant le nombre de tronçons aboutissant au nœud « N »

D'une façon générale, on peut écrire :

$$H_N + \frac{c_i}{gS_i} Q_{Ni} = H_i - \frac{c_i}{gS_i} q_{iN} - R_i Q_{Ni}^2 + R q_{iN}^2 \quad (14)$$

On pose, pour simplification :

$$\frac{c_i}{gS_i} = A_i \quad (15)$$

$$H_i - \frac{c_i}{gS_i} q_{iN} + R_i q_{iN}^2 = T_i$$

où :

$$c_i = \frac{\sqrt{K_e / \rho}}{\sqrt{1 + \frac{K_e D_i}{E_c \cdot e_i} \chi}} \quad (16)$$

$$R_i = \frac{8\lambda_i l_i}{g\pi^2 D_i^5} \quad (17)$$

avec $\chi = 1 - \nu^2$, comme mode d'ancrage caractérisant les déformations longitudinales nulles des conduites du réseau.

Le facteur λ , qui désigne le coefficient de frottement des pertes de charge linéaires, est donné par la relation suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon / D_i}{3,7} \right) \quad (18)$$

Les équations (15) sont des quantités connues, on aura le système :

$$\begin{cases} H_N + A_i \cdot Q_{Ni} + R_i Q_{Ni}^2 = T_i \\ \sum_{i=1}^n Q_{Ni} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Il n'y a pas de solution analytique, on procède alors par itération à partir du système suivant:

$$\begin{cases} H_N + (A_i + R_i |q_{Ni}|) Q_{Ni} = T_i \\ \sum_{i=1}^{n=3} Q_{Ni} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

On pose :

$$A_i + R_i |q_{Ni}| = W_i \quad (21)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \frac{H_N}{W_i} + Q_{Ni} = \frac{T_i}{W_i} \\ \sum_{i=1}^n Q_{Ni} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

Par conséquent:

$$H_N = \frac{\sum_1^n T_i / W_i}{\sum_1^n \frac{1}{W_i}} \quad (23)$$

$$Q_{Ni} = \frac{T_i - H_N}{W_i} \quad (24)$$

Ces équations seront résolues au moyen d'un programme à la base d'un exemple numérique simple. Les résultats sont déterminés à chaque pas de calcul $\Delta t = 1$ seconde

IV. DONNEES NUMERIQUES ET RESULTATS

Le but recherché est de calculer et de comparer le coup de belier par application des relations (7) et (16). Ces deux relations donnent respectivement la célérité d'onde en conduite enterrée et en conduite libre. Afin d'illustrer notre raisonnement, la figure 1 est prise comme une base de données. Elle représente un réseau de rang 2 symétrique, caractérisé par les données ci-dessous.

Il s'agit de trouver la variation des charges nodales H_N et celle H_p à la sortie de la pompe, en fonction du temps, dans les deux cas de réseaux libre [13] et enterré. Une représentation graphique sera ensuite présentée.

On considère de ce fait :

- Les propriétés du liquide :

- La masse volumique de l'eau : $\rho = 10^3 \text{ Kg/m}^3$.

- Le module d'élasticité de l'eau : $K_e = 2.10^9 \text{ Pa.}$

Les côtes des plans d'eau invariables des réservoirs d'extrémité :

$$H_2 = H_3 = 200 \text{ m}$$

- Les propriétés du sol :

- Le module d'élasticité : $E_s = 2.10^8 \text{ Pa.}$

- Le coefficient de Poisson : $\nu_s = 0,33$.

- Données de base du réseau :

Les données concernent les conduites en acier et en P.V.C. Les rapports diamètre/épaisseur ont été choisis selon les recommandations pratiques. Les longueurs géométriques des conduites et les célérités de propagation d'onde y correspondant, ont été choisies telles que leurs rapports, longueur/célérité, soient égaux. Cette hypothèse suppose que les ondes de pression arrivent en même temps au nœud, afin d'avoir leur superposition. (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques du réseau de la figure 1

Rugosité absolue 0,0001 mètre							
Conduites		Coeff. de Poisson	Débit s (l/s)	Longueur (m)	Diamètre (mm)	Rapport D/e	Mod. d'last. E_c (Pa)
Acier	1	0,3	22	1008,56	150	100	2.10^{11}
	2	0,3	11	1035,23	100	90	2.10^{11}
	3	0,3	11	1035,23	100	90	2.10^{11}
PVC	1	0,46	22	429,91	150	18,75	3.10^9
	2	0,46	11	453,46	100	16,67	3.10^9
	3	0,46	11	453,46	100	16,67	3.10^9

Les résultats seront présentés sous forme de courbes qui vont permettre de connaître la variation de la charge nodale H_N , et celle de la charge H_p juste à la sortie de la pompe. Ces grandeurs sont calculées en considérant l'arrêt brusque de la pompe. Dans les deux cas de figures, on remarque que la dépression ainsi créée, plus importante au début, se voit diminuée d'intensité au niveau du point de ramification (N).

Par suite, le même phénomène s'observe à l'arrivée de ce même point dans le cas d'une surpression. Cette atténuation d'intensité est due d'une part à l'effet de l'existence du point N de ramification (coefficients de réflexion et de transmission), qui est le foyer de changement des caractéristiques des conduites y aboutissant, et d'autre part, à l'effet des pertes de charge.

L'atténuation de la dépression et de la surpression s'accroît de plus en plus dans le temps et par conséquent la charge enveloppe (nodale) a tendance à s'aligner avec la charge statique. Dans le cas du réseau libre (non enterré) en acier, la charge libre H_p est plus importante soit en dépression ou en surpression que celle du nœud H_N . Le même phénomène s'observe pour le cas du réseau enterré. L'effet du sol est faible sur les conduites rigides en acier caractérisées par des célérités de l'ordre de 1200 à 1300 m/s. On remarque dans ce cas une confusion des courbes caractérisant le cas libre et enterré (figure 2).

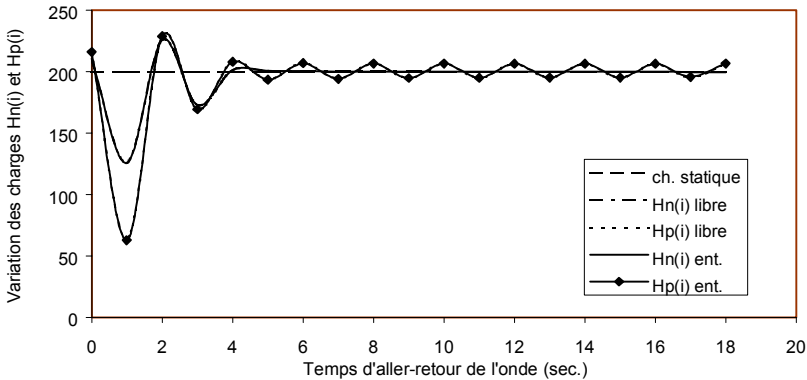


Figure 2 : Variation comparative des charges libres et enterrées.
Cas d'une conduite en acier

Pour le cas du réseau enterré, on remarque que les charges H_N et H_p sont plus accentuées que leurs correspondantes dans le cas du réseau libre. Cette différence, plus remarquable sur les figures 3 et 4, est due principalement à l'effet du sol qui tend à accroître la rigidité des conduites, et par conséquent augmente la célérité de l'onde de propagation. Dans le cas du réseau en matériau de P.V.C, les mêmes remarques s'observent. Néanmoins, la confusion des courbes est loin d'être constatée. Pour ce type de matériau, l'effet du sol sur les conduites est très remarqué.

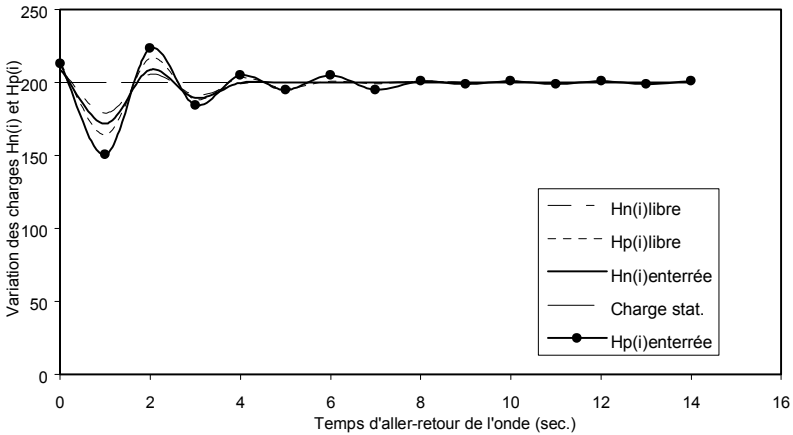


Figure 3 : Variation comparative des charges libres et enterrées.
Cas de la conduite en P.V.C

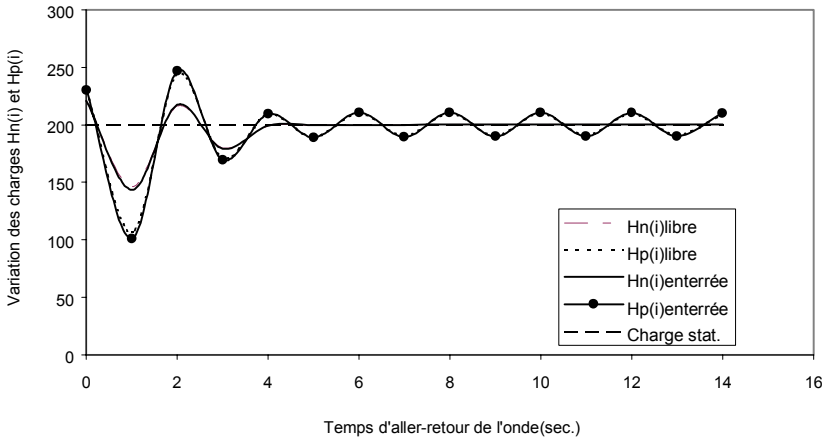


Figure 4 : Variation comparative des charges libres et enterrées.
Cas de la conduite en acier

V. CONCLUSION

A travers la littérature, il a été montré que le coup de bélier produit dans un réseau, même faiblement ramifié, n'est pas aussi nocif, comparativement à celui produit dans une conduite unique. Cette constatation a été faite, en considérant par hypothèse, que les conduites sont libres (non enterrées). Dans ce chapitre, par application de la méthode des caractéristiques, on a déterminé les charges nodale et celle à la sortie de la pompe.

Le calcul a été fait pour les conduites en acier et en P.V.C. supposées libres et enterrées. Il a été constaté que dans les deux types de conduites, se comportant comme rigides une fois enterrées, la célérité d'onde est plus importante. Celle-ci est plus remarquable, en pourcentage d'augmentation, dans le cas de la conduite en P.V.C.. Ainsi la valeur du coup de bélier résultante, et par conséquent la pression totale régnant dans la conduite peut être transmise d'une façon non négligeable à travers le nœud vers les conduites antennes.

En conséquence, il est intéressant de conclure que pour les réseaux, tout dépend du degré de ramification et de la configuration. Ainsi pour le cas d'un réseau très ramifié :

- L'onde de dépression consécutive à un arrêt de pompe s'atténue dans toutes les ramifications, car la somme des sections aval est supérieure à la section amont.
- A chaque extrémité d'antenne, l'onde de dépression atténuée se réfléchit en surpression (réservoir), ou dépression (bout mort).
- Comme les temps de parcours sont différents généralement, ces ondes réfléchies interfèrent entre elles de façon complexe généralement sans augmentation d'amplitude du coup de bélier, mais au contraire en s'amortissant rapidement.
- Par contre, dans un réseau comprenant un enchevêtrement de conduites de petit diamètre raccordés sur une canalisation principale de fort diamètre, un tel amortissement sera bien moindre car la grosse conduite conservera l'essentiel de l'amplitude des ondes.
- Cette étude, d'un intérêt pratique important, permet à l'ingénieur de conception, et de gestion, de maîtriser le phénomène afin de dimensionner d'une façon adéquate, les moyens anti-béliers.

SYMBOLES UTILISES ET LEUR UNITE

c	Célérité d'onde de coup de béliet [m/s]
H_N	Côte de charge nodale variable dans le temps [m]
i	Gradient de perte de charge
S	Section de la conduite [m ²]
Q	Débit de l'écoulement à l'instant « t » [m ³ /s]
H_p	Côte de charge de la pompe connue à l'instant « to » [m]
q	Débit connu à l'instant « to » [m ³ /s]
R	Résistance totale de la conduite [m ⁵ .s ²]
ρ	Masse volumique [Kg/m ³]
l	Longueur de la canalisation [m]
D	Diamètre intérieur de la canalisation [m]
E_c	Module d'élasticité du matériau formant la canalisation [Pa]
K	Module d'élasticité de l'eau [Pa]
e	Epaisseur de la canalisation [m]
χ	Coefficient tenant compte du mode d'ancrage de la canalisation
g	Pesanteur [m/s ²]
ε	Rugosité absolue de la paroi de la canalisation [m]

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. E. ROCHE, Principes généraux de calcul du coup de béliet, et de la protection anti – béliet, I.C.GREF, Paris, 1986.
- 2 .A. SCHLAG, La transmission du coup de béliet au travers d'une bifurcation, le Génie civil n 4, Avril 1968.
3. M. MEUNIER, Coups de béliet dans les réseaux sous pression, ENGREF, Paris, 1980.
4. L .ALLIEVI, Théorie du coup de béliet (traduit de l'italien), Dunod, Paris, 1921.
5. S.ch. BERGERON, Du coup de béliet en hydraulique ou coup de foudre en électricité, Edition Dunod, Paris, 1950.
6. E.B. WYLIE, V.L. STEETER, S. LISHENG, Fluid transients in Systems Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
7. A. CARON, Un diagnostic de coup de béliet établi par un modèle numérique, revue la Houille Blanche n  1/2 - 1986.
8. A. KHAMLIHI, Ondes élasto-plastiques de coups de béliet dans les tuyauteries, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1992.

9. E. HADJ – TAYEB, O. DAMAK, T. LILI, Influence de la déformabilité des parois de la conduite sur les écoulements transitoires diphasiques, pp. 54-63, revue Entropie n°209, 1998.
10. B. BAHRAR, E. RIEUTORD, R. MOREL, G. ZEGGWAGH, Modélisation du phénomène du coup de bélier avec prise en compte du comportement réel de la conduite, revue la Houille Blanche n°1,1998.
11. F. MASSOUH, Ondes de pression dans les conduites élastiques et visco élastiques - Comportement des sections circulaires et elliptiques, Thèse d'état de l'Université, Paris VI, 1984.
12. B. SALAH, A. KETTAB, F. MASSOUH, B. MBANGANGOYE, Célérité de l'onde de coup de bélier dans les réseaux enterrés, revue la Houille Blanche, n° 3/4, 2001.
13. B. SALAH, A. KETTAB, Coups de bélier dans un réseau ramifié de rang 2, en refoulement, méthode des caractéristiques - Cas libre, 2^{ème} séminaire national sur l'hydraulique, Biskra (Algérie), 26 et 27 Novembre 1996.
14. B. SALAH, A. KETTAB, F. MASSOUH, Propagation of a water hammer wave in buried pipes with a single or multi layers wall », 4th EUROMECH, Solid Mechanics Conférences, Metz (France), june 26-30, 2000.