



## ETUDE NUMERIQUE COMPARATIVE DES DISPOSITIFS DEPRIMOGENES DES RESERVOIRS ANTI-BELIER

AMARA L.<sup>1</sup>, BERREKSI A.<sup>2</sup>, AMIRECHE M.<sup>3</sup>, ACHOUR B.<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface - LARHYSS,  
Université de Biskra, B.P. 145, R.P., 07000,

Biskra, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Recherche Hydraulique Appliquée et Environnement (LR-HAE),  
Université de Bejaia, Algérie

<sup>3</sup> Enseignant chercheur, Université d'Oum El Bouaghi, Algérie

amara.lyes@yahoo.fr; ali\_berreksi@yahoo.fr; amiremoh@hotmail.com  
bachir.achour@larhyss.net

### RESUME

La protection des stations de pompes contre le phénomène transitoire du coup de bélier est d'une importance capitale. Elle s'effectue généralement par l'usage d'un réservoir anti-bélier (ballon d'air). On présente dans ce travail les résultats d'étude numérique comparative des dispositifs d'étranglement pratiqués pour cet organe de protection. Dans le calcul de la réponse transitoire du système, un soin particulier est donné à la mise en exergue de l'allure des fronts d'ondes et l'influence sur les volumes d'air. Il a été montré que, du point de vue hydrodynamique, le meilleur organe déprimogène est celui à dissipation unique tel que le clapet à battant percé. Les résultats sont précédés par un exposé succinct des équations du mouvement et la méthode numérique de résolution pour enfin présenter le cas d'étude analysé.

**Mots clés :** Ecoulement non permanent, réservoir d'air, organes d'étranglement, calcul numérique, méthode des caractéristiques,

### ABSTRACT

Protection of pumping stations against the transient water hammer is of most importance. It is usually done by the use of an air vessel. In this work we

present the results of numerical comparative study for throttle devices used in practice. In the calculation of the transient response of the system, special attention is given to the shape of the wave fronts and the influence on air volumes. It has been shown that in hydrodynamic point view, the best device is for single way dissipation. The results are preceded by a brief statement of the equations of motion and the numerical method of resolution to finally present the case study analyzed.

**Keywords:** Unsteady flow, air vessel, throttle devices, numerical computation, method of characteristics,

## INTRODUCTION

Dans un réseau de conduites véhiculant un fluide sous pression, si l'on modifie localement les conditions d'écoulement, comme par exemple une mise en route ou arrêt d'une pompe, manœuvre d'une vanne... etc., on introduit dans le fluide une discontinuité portant sur les paramètres de cet écoulement, à savoir la pression et le débit. C'est sous le vocable de coup de bélier que l'on regroupe l'ensemble de ces phénomènes transitoires, désignant ainsi une variation brutale du régime d'écoulement et pouvant avoir des conséquences fâcheuses telles que la rupture de canalisations et la détérioration d'appareils traversés par le fluide. Il est donc capital de prévoir et d'étudier ces phénomènes transitoires afin de réduire leurs effets par l'utilisation de dispositifs spéciaux et le dimensionnement correct des différents composants d'une installation hydraulique.

L'une des installations les plus vulnérables à ce phénomène est bien la station de pompage ou d'élévation des eaux. Pour pallier aux risques néfastes des régimes transitoires, plusieurs dispositifs anti-bélier sont utilisés. Excepté le cas des faibles hauteurs d'élévation, l'emploi d'une cheminée d'équilibre à la station de pompage est pratiquement irréalisable. Dans ce cas on fait appel à un autre dispositif de protection anti-bélier qui est le réservoir d'air. Appelé encore cloche ou ballon d'air, ce dispositif a reçu un vaste champ d'application et un emploi intensif dans la protection des conduites d'élévation, le rendant ainsi d'une utilisation quasi systématique dans les stations de pompage par suite des avantages innombrables qu'il présente.

Précédé par les expérimentations dues à Joukowski (Chaudhry, 2014), les premières études théoriques sur les conduites protégées par des réservoirs d'air reviennent à Rateau (Escande, 1971), Camichel (1918) et Vibert (Carlier, 1968; Dupont, 1979; Morel, 1994,). Mais ces études très simplistes font abstraction des pertes de charge et négligent la dilatation des enveloppes et la compressibilité du fluide, ce qui revient à considérer un mouvement en masse (théorie de la colonne rigide) (Jaeger, 1933, 1977). Or ces hypothèses simplificatrices sont fort bien éloignées de la réalité des phénomènes en jeu et

conduisent à des dimensionnements effarants dans le cas des grandes installations de pompage. Les réponses complètes du comportement des systèmes munis de cet organe de protection ont été apportées par la méthode graphique de Bergeron (1949) dans la moitié du siècle dernier, ultérieurement par l'emploi des méthodes d'intégration numériques des équations différentielles du mouvement.

Le présent travail se donne comme objectif d'étudier le phénomène du coup de bélier survenant sur une conduite élévatoire protégée par un réservoir d'air en ayant le soin de mettre en relief l'influence qualitative et quantitative de l'organe d'étranglement sur le régime transitoire et les volumes d'air en jeu. Cette analyse sera précédée par un exposé des équations de base et l'emploi de la méthode des caractéristiques pour ce problème.

## **EQUATIONS DU MOUVEMENT INSTATIONNAIRE**

Les équations gouvernant le phénomène du coup de bélier, en écoulement unidirectionnel, sont dérivées en appliquant le principe de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Ces équations décrivent la variation temporelle et axiale des variables du champ d'écoulement en régime instationnaire (Ghidaoui et al., 2005). Pour une section transversale de diamètre constant, ces équations s'écrivent comme suit (Chaudhry, 2014) :

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot j = 0 \quad (2)$$

Dans lesquelles,  $V$ ,  $H$  et  $a$  sont respectivement la vitesse, la charge et la célérité des ondes élastiques. Par ailleurs,  $j = \lambda V^2 / (2gD)$  représente le gradient de la perte de charge dans la conduite où  $\lambda$  et  $D$  correspondent dans l'ordre au coefficient de frottement et le diamètre de la conduite. Il est à noter que dans ces équations, les termes convectifs sont négligés étant donné leur très faible contribution en pratique (De Almeida et Koelle, 1992). Le modèle mathématique régissant le problème du coup de bélier est alors un système d'équations aux dérivées partielles hyperbolique à coefficient constant (Wylie et Streeter, 1978; Chaudhry, 2014). En raison de la présence du terme source non linéaire, une solution générale étant impossible. A cet effet, leur intégration s'effectue par l'usage de méthodes numériques. La méthode largement utilisée dans ce cas est bien la méthode dite des caractéristiques.

## SOLUTION NUMERIQUE

La méthode des caractéristiques consiste à transformer un système d'équations aux dérivées partielles en un autre système d'équations aux dérivées ordinaires (Abbott, 1966). Ainsi, l'équation de continuité et l'équation dynamique formant un système d'équations aux dérivées partielles sont converties en quatre équations aux dérivées totales. Les équations dites de compatibilité s'écrivent :

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + g \cdot j = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + g \cdot j = 0 \quad (4)$$

L'équation (3) est valide le long de la droite caractéristique  $dx/dt = +a$  et l'équation (4) le long de  $dx/dt = -a$ .

Ces équations de compatibilité peuvent être alors résolues numériquement par un schéma aux différences finies.

Pour obtenir la solution à l'extrémité de la conduite (frontières du domaine de calcul), une équation complémentaire à cet endroit est nécessaire pour déterminer le régime au temps  $t + \Delta t$ . Cette équation auxiliaire propre à l'appareil hydraulique (réservoir à niveau constant et ballon anti-bélier) présent au nœud considéré, est associée à l'équation de compatibilité pour trouver les variables  $H$  et  $Q$  (Parmakian, 1963; Zaruba, 1993; Larock, 2000). La stabilité du schéma numérique, qui est explicite, est dicté par la condition de stabilité de Courant, dite règle CFL (Courant-Friedrichs-Lewy), définie par :

$$C_r = a \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

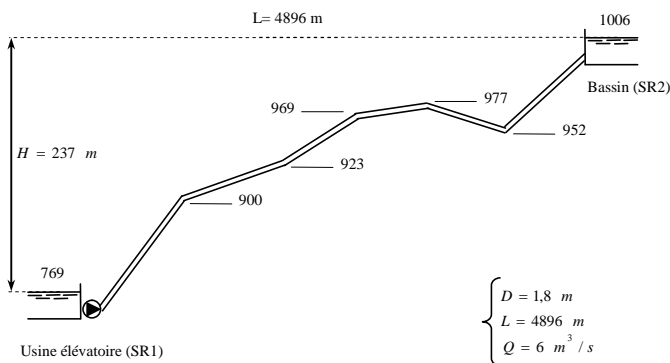
Ce nombre doit remplir la condition  $C_r \leq 1$  (LeVeque, 2002; Guinot, 2008).

## APPLICATION ET EXPERIMENTATION NUMERIQUE

Le cas d'étude choisi ici pour application est une usine élévatoire classique munie, pour sa protection anti-bélier, d'un réservoir à air comprimé logé au sein de la station. Cette installation d'élévation forme une partie intégrante d'un projet de transfert d'eau « SETIF-HODNA » système Ouest, dont la finalité est d'alimenter en eau potable (AEP) et eau brute à usage d'irrigation la région de SETIF. Ainsi, l'envergure des ouvrages de transfert et de protection anti-bélier font sa particularité d'où l'importance d'une étude minutieuse. Dans l'optique

d'une étude avec un penchant beaucoup plus qualitative, nous nous focaliserons dans ce qui suit à l'analyse de la protection anti-bélier d'un circuit de ce transfert protégé par des réservoirs d'air, et cela dans les trois scénarios d'analyse, à savoir :

1. ballon anti-bélier dépourvu d'organes d'étranglement à sa base;
  2. ballon muni d'un dispositif déprimogène de type tuyère;
  3. ballon pourvu d'un clapet shunté par un by-pass (ou clapet à battant percé).
- Ces analyses visent à mettre en relief l'influence des techniques d'étranglement mises en œuvre dans la pratique sur la dynamique transitoire du circuit, et les dimensions du dispositif anti-bélier et son optimisation, sans oublier l'allure du front d'onde qui en résulterait.



**Figure 1 :** Profil simplifié du circuit étudié

Les données complètes de l'installation sont regroupées dans le tableau (1) suivant :

**Tableau 1 :** Données complémentaires du circuit

Niveau bas de la bêche d'aspiration (SR1)	769 m
Niveau haut plan d'eau d'arrivée (SR2)	1006 m
Débit d'équipement	6 m <sup>3</sup> /s
Diamètre de la conduite	1,8 m
Matériau	Acier
Longueur	4896 m
Rugosité	0,1 mm
Célérité des ondes	1100 m/s
Capacité totale des ballons anti-bélier	141 m <sup>3</sup>

Notons que les ballons sont de type horizontal cylindrique, faisant 3 m de diamètre et 10 m de long, soit une capacité unitaire de 70 m<sup>3</sup> chacun. Ces deux ballons sont modélisés en un seul, reproduisant les mêmes effets avec une capacité de 141 m<sup>3</sup>.

Le calcul du régime transitoire ainsi effectué a pour base les paramètres suivants :

- durée de simulation :  $t_s = 100 \text{ s}$  ;
- discrétisation de la conduite :  $N = 10$  biefs ;
- volume initial d'air :  $[_0 = 70 \text{ m}^3$  ;
- exposant polytropique :  $\chi = 1,2$  ;

En ce qui est des pertes de charge singulières occasionnées par les organes déprimogènes analysés, ces dernières sont déterminées par usage du modèle classique  $J_s = \kappa \cdot V^2$ . Les valeurs du coefficient  $\kappa$  sont données dans le tableau (2).

**Tableau 2 :** Coefficient des pertes de charge singulières des différentes analyses

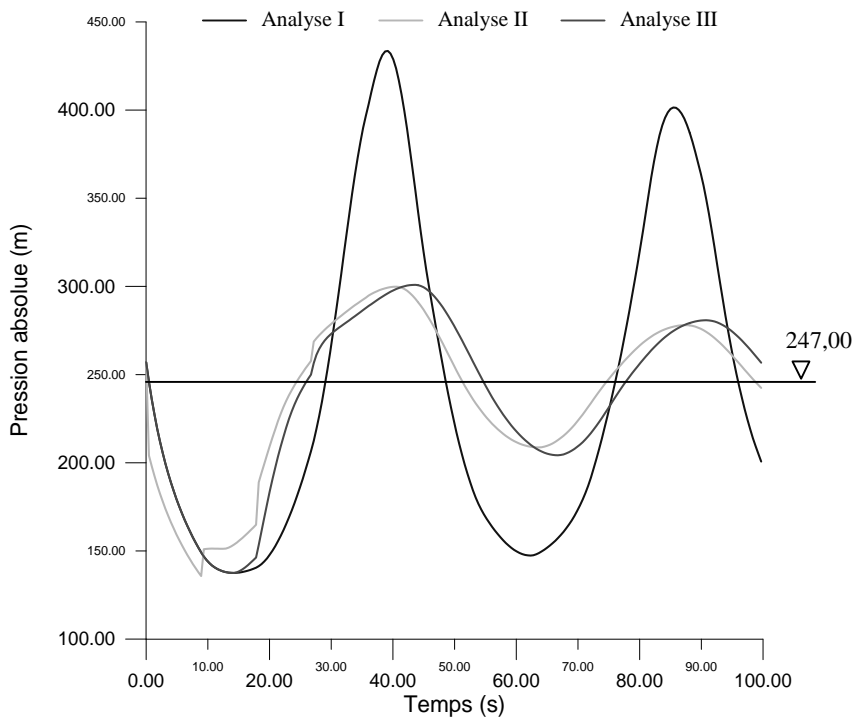
<i>Dispositif déprimogène</i>	<i>Coefficient <math>\kappa</math> à l'entrée du ballon</i>	<i>Coefficient <math>\kappa</math> à la sortie du ballon</i>
Sans étranglement	0	0
Tuyère	48	12
Clapet shunté par by-pass	48	0

Les résultats du calcul pour les divers cas d'analyse sont mis en courbes (Figure (2)) retraçant la variation de la pression absolue dans la conduite en fonction du temps, de même pour la figure (3) reliant au temps l'évolution du volume d'air du ballon. Les extremums de ces paramètres sont alors donnés dans le tableau (3) ci-dessous.

Il ressort de la figure (2) qu'en faisant abstraction de toute perte de charge sur le réservoir d'air, on serait conduit à des valeurs peut être inadmissibles de la surpression, ce qui nécessiterait inévitablement l'installation des soupapes de décharge à la station de pompage soulageant ainsi le matériel des pressions excessives. A l'opposé, en intercalant une tuyère sur la tubulure de branchement du ballon sur la conduite de refoulement, on réduirait significativement le volume d'air maximum (Fig. 3), donc les dimensions du ballon et l'économie générale de la protection anti-bélier envisagée. Cependant, on serait à l'origine de la manifestation d'un front d'onde raide (Fig.4), naissant de la perte de charge à la sortie du ballon.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'installation d'une tuyère comme organe déprimogène conduirait dans une telle situation à la création d'un front d'onde raide d'autant plus important que la perte de charge à la sortie du ballon

est considérable. Ceci aura pour répercussion la déformation de l'allure de l'onde élastique accentuant ainsi la dépression en chaque point du circuit.

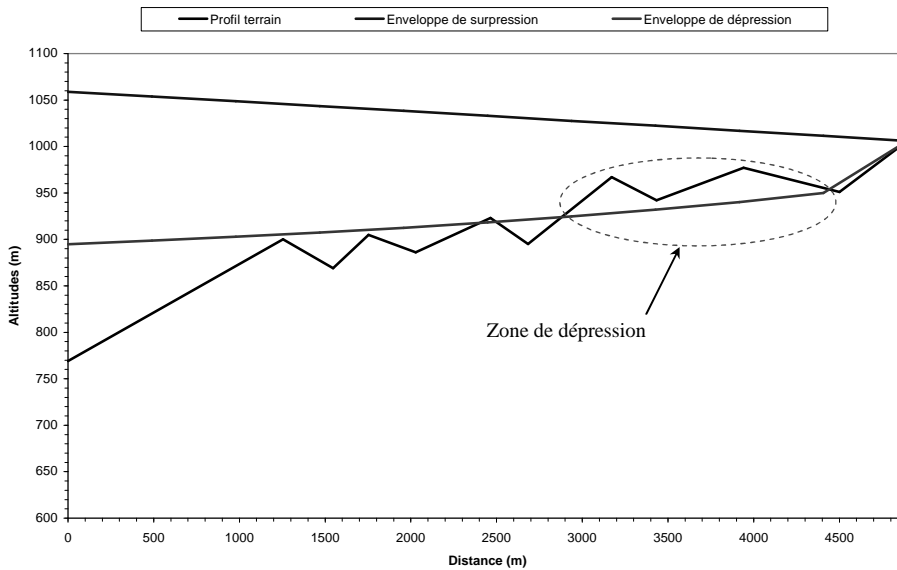


**Figure 2 :** Courbes comparatives de la pression dans la conduite issue des différentes analyses

On montre dans ce cas qu'on atteindrait une valeur maximale théorique de la dépression frôlant les  $-39\text{ m}$  (valeur théorique puisque le vide absolu est atteint à  $-10\text{ m}$ ) aux points hauts, soit  $61\%$  de plus que le cas analysé auparavant en absence d'étranglement

**Tableau 3 :** Récapitulatif des résultats des analyses

<i>Analyse</i>	<i>Pression absolue maximale (m)</i>	<i>Pression absolue minimale (m)</i>	<i>Volume d'air maximum (m<sup>3</sup>)</i>
Sans étranglement	433,58	137,50	117,89
Avec tuyère	299,86	135,74	108,92
Avec clapet shunté par by-pass	300,94	137,50	117,89



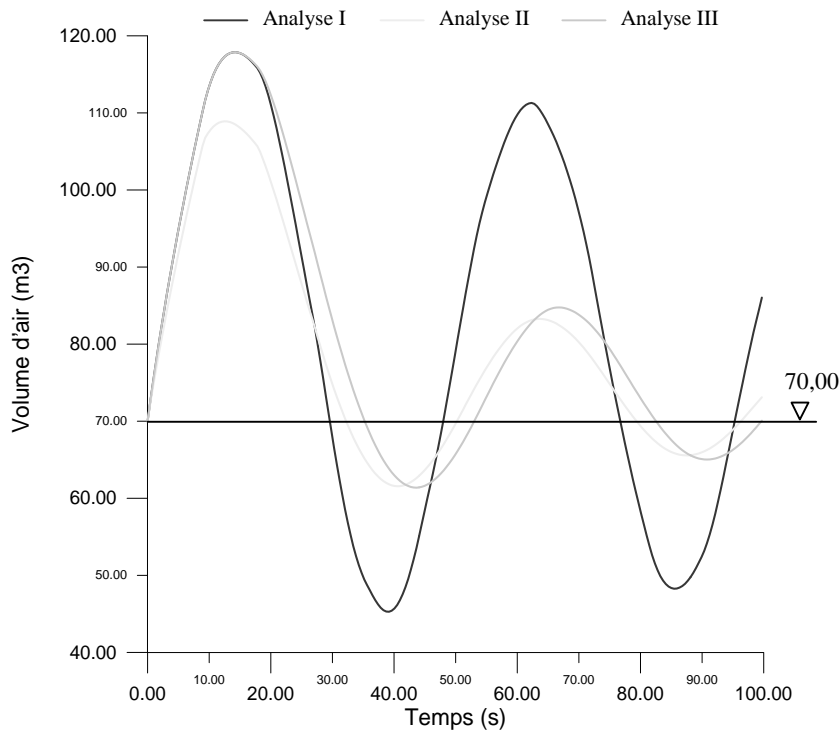
**Figure 3 :** Enveloppes des pressions avec un ballon anti-bélier muni d'une tuyère

La déformation de l'onde élastique matérialisée par un front raide ainsi créée, se propage sans affaiblissement (ou peu affaiblie) jusqu'au bassin de refoulement, qui selon le profil de la conduite, soumettrait le circuit à des dépressions excessives et parfois désastreuses. Dans ce cas, on serait amené à installer d'autres dispositifs de protection ou augmenter le volume d'air à des valeurs faramineuses, ce qui compromettrait l'économie de la protection.

Entre les deux extrêmes, une balance satisfaisante est réalisée en installant à la place de la tuyère un clapet shunté par un by-pass ou percé d'un trou, qui permet de réduire à la fois la surpression et la dépression. Cette technique permet, au moment de la dépression, de céder passage au fluide à gueule bée sans étranglement, et à son retour il trouvera un clapet fermé le contraignant à dévier voie sur un by-pass ménagé à cet effet en lui faisant subir une chute de pression, soit par une vanne ou autre organe remplissant cette tâche.

En pratique, on pourra aussi reproduire les mêmes effets en n'installant qu'un clapet à battant percé s'ouvrant à la sortie de l'eau lui donnant libre passage à travers la section de la tubulure, tandis qu'en retour le clapet retombe sur son siège ne laissant qu'un petit orifice, de diamètre voulu, créant ainsi une perte de charge en phase de surpression. Ces deux dispositifs permettent de réduire à la fois la surpression et la dépression.





**Figure 4 :** Courbes comparatives de l'évolution des volumes d'air issu des différentes analyses

## SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Dans ce travail, on s'est intéressé à l'analyse des dispositifs d'étranglement des réservoirs anti-bélier protégeant des usines élévatoires par voie d'expérimentation numérique. Cet aspect de conception est l'un parmi tant des dispositions et problèmes, souvent complexes, liés à l'équipement et dimensionnement des réservoirs d'air, que l'ingénieur rencontre usuellement dans son exercice.

Après avoir présenté le modèle mathématique gouvernant les régimes transitoire en charge ainsi que sa solution numérique via la méthode des caractéristiques, nous avons appliqué les résultats ainsi obtenus sur une installation industrielle employant les réservoirs d'air comme dispositif de protection anti-bélier. La première analyse du circuit hydraulique étudié, en dépourvoyant le dispositif de tout organe déprimogène a donné lieu à des surpressions d'une valeur élevée, et le phénomène ne sera que peu amorti. En équipant en second temps le ballon d'une tuyère, organe très évoqué en littérature, l'analyse a mis en relief les dessous de cette technique, d'apparences inoffensives, l'étendu des dommages

auxquels on serait exposé suite à l'apparition du front d'onde raide provoqué par la perte de charge en phase de dépression d'autant plus redoutable que ces dernières sont grandes. Un compromis est alors réalisé entre ces deux installations, en ne provoquant la perte de charge qu'au retour de l'eau dans le ballon, chose concrétisée par l'équipement soit par un clapet percé d'un orifice calculé à cette fin ou, mieux encore, par un shunt réalisé sur le clapet au bas du ballon. Quoiqu'on n'aura à réduire les dimensions du ballon dans ce cas, mais elle reste préférable aux cas qui ont précédés par suite du comportement dynamique stable qu'offre cette dernière technique.

Il est évident que la décision sur telle ou telle technique à adopter ne sera énoncée qu'après avoir complété l'analyse par une étude économique de chacune des techniques citées sur l'ensemble de la protection ainsi adoptée ce qui est légitime du fait que chaque projet est un cas particulier dont les spécificités sont à analyser de prêt.

L'intérêt de cette application réside en ce qu'elle montre la grande attention qui doit être apporté à tenir bien exactement compte des conditions du bon fonctionnement en régime transitoire dans les différents lieux de l'installation étudiée. Rien n'est automatique, ce n'est jamais une équation ou un procédé que l'on applique, c'est un phénomène physique que l'on reconstitue. Faute de comprendre et d'observer, on commettrait les plus grosses erreurs. Malgré la puissance et la confiance qu'offre le calcul numérique, il ne supprime guère le recours à l'intelligence, comme le fait souvent le calcul algébrique, mais elle implique la nécessité d'un éveil permanent chez l'Ingénieur dans ce genre d'étude, qui d'ailleurs à force de s'exercer va finir par développer son acuité et parfois deviner ce qui se passerait sans pour autant avoir effectué une simulation numérique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBOTT M.B. (1966). An introduction to the method of characteristics, Thames and Hudson.
- BERGERON L. (1949). Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité. Méthode graphique générale, Ed. Dunod, Paris.
- CAMICHEL C. (1918). Recherches sur les conduites possédant des réservoirs d'air, Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse, 3<sup>e</sup> série, Tome 10.
- CARLIER M. (1968). Machines hydrauliques, Ed. Eyrolles, Paris.
- CHAUDHRY M. H. (2014). Applied Hydraulic Transients, Springer.
- DE ALMEIDA B., KOELLE, E. (1992). Fluid transients in pipe networks, Computational Mechanics Publications, Elsevier Applied Science, Glasgow.
- DUPONT A. (1979). Hydraulique urbaine, Tome II, ouvrages de transport-élévation et distribution des eaux, Ed. Eyrolles.

- ESCANDE L. (1971). *Hydraulique Générale*, Tome 2, Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique.
- GUINOT V. (2008). *Wave Propagation in Fluids : Models and numerical techniques*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- JAEGER C. (1933). *Théorie générale du coup de bélier*, Thèse de Doctorat, Lausanne, Ed. Dunod, Paris.
- JAEGER C. (1977). *Fluid transients in hydro-electric engineering practice*, Blackie, London.
- LAROCK B.E. (2000). *Hydraulics of pipeline systems*, CRS Press.
- LEVEQUE R.J. (2002). *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, Cambridge.
- MOREL M. (1994). *Exercices de mécanique des fluides*, Tome II, Turbomachines- construction graphique et phénomènes transitoires, Chihab-Eyrolles.
- PARMAKIAN J. (1963). *Water hammer analysis*, Dover publications Inc., New York.
- WYLIE E.B., STREETER, V.L. (1978). *Fluid transients*, MacGraw-Hill, New York.
- Z RUBA J. (1993). *Water hammer in pipe-line systems*, Development in water science, 43, Elsevier.