

## Simulation numérique des écoulements mixtes hautement transitoires dans les conduites d'évacuation des eaux

### *Numerical Simulation of Highly Transient Mixed Flow in Sewer System*

FRANÇOIS KERGER\*, PIERRE ARCHAMBEAU, SEBASTIEN ERPICUM, BENJAMIN J. DEWALS\*, MICHEL PIROTTON

Université de Liège (Département ArGEnCo) – Chemin des Chevreuils, 1, 4000 Liège, Belgique  
Tél : +32 (0)4 3669004, Fax : +32 (0)4 3669558, e-mail : fkerger@ulg.ac.be, Michel.Pirotton@ulg.ac.be

\* Fonds de la Recherche Scientifique F.R.S.-FNRS

**L**a simulation numérique 1D des écoulements mixtes, caractérisés par la présence simultanée d'un écoulement à surface libre et d'un écoulement en charge, reste le sujet de nombreuses recherches actuelles. Les modèles disponibles présentent en effet certaines limites. Dans cet article, la méthode classique de la fente de Preissmann pour la simulation d'un écoulement mixte est exploitée grâce à un schéma volume fini. En particulier, un concept original de fente négative est proposé pour simuler des écoulements en charge à pression sub-atmosphérique, ce que la fente de Preissmann classique ne permet pas. La « fente négative » est ensuite validée sur des données expérimentales publiées et son utilité est illustrée par un exemple d'application pratique en hydraulique urbaine.

**N**umerical simulation of 1D mixed flow characterized by the simultaneous occurrence of free-surface and pressurized flow remains a current issue of scientific research. Usual models suffer indeed a number of shortcomings. In this paper, the classical Preissmann slot model for simulating mixed flow is used by means of a finite volume scheme. In particular, an original concept of "negative slot" is derived to simulate sub-atmospheric pressurized flow, as the classical Preissmann slot cannot handle with this kind of flow. This "negative slot" is then assessed by comparison with published experimental data and its utility is illustrated on the basis of a practical application in hydraulics.

### I ■ INTRODUCTION

Les écoulements mixtes sont, par définition, caractérisés par la présence simultanée dans un même événement hydrodynamique d'un écoulement à surface libre et d'un écoulement en charge. Ce type d'écoulement est fréquemment rencontré dans les systèmes de drainage des eaux de pluies, les réseaux de conduites d'eau, les prises d'eau dans les structures hydrauliques et bien d'autres ouvrages du génie civil et du génie sanitaire. En effet, certaines structures hydrauliques combinent, en fonctionnement normal, des tronçons d'écoulement à surface libre et des tronçons en charge (e.g. conduite de dérivation de rivière, prise d'eau de barrage, etc). De même, la transition dynamique d'un écoulement à surface libre dans une conduite fermée vers un écoulement en charge (et inversement) est un phénomène fréquent. Par exemple, lors d'un épisode de pluie extrême, les systèmes d'égouttage et de drainage urbain peuvent se remplir très rapidement et l'écoulement peut être localement mis en charge. Des transitions surface libre/en charge sont également observées lorsqu'une pompe démarre ou s'arrête dans un réseau de conduites basse pression.

Durant une transition surface libre/en charge, des phénomènes hautement instationnaires apparaissent et peuvent endommager les conduites [1, 2], éjecter des taques d'égout [3], engendrer des inondations, etc. En outre, les interactions air/eau peuvent devenir importantes, en particulier au niveau du front de transition [4].

Sur la base de ces considérations, l'occurrence d'un écoulement mixte devrait nécessairement être envisagée lors de la modélisation de toute structure hydraulique à section fermée. Pourtant, dans la majorité des cas, le dimensionnement est effectué en supposant que l'écoulement est soit totalement à surface libre, soit totalement en charge. Ceci s'explique par l'absence de méthode de calcul simple permettant de tenir compte des transitions. En fait, seule une modélisation physique à l'échelle permet d'appréhender complètement ce type de phénomène.

A cet effet, la « Computational Fluid Dynamics » (CFD) offre de nouvelles possibilités. En particulier, des recherches actuelles sont dédiées au développement d'un modèle mathématique qui tienne compte adéquatement des transitions possibles entre les écoulements, de leur effet sur les structures et des interactions entre phases dans la conduite. La simulation

numérique 1D des écoulements mixtes reste cependant un défi. La non-similarité entre les jeux d'équations décrivant les deux types d'écoulement empêche en effet la simulation unifiée de ceux-ci. De plus, la prise en compte des effets diphasiques, bien que nécessaire pour simuler correctement certaines situations hautement transitoires, nécessite de développer des modèles numériques complexes.

Ainsi, l'objectif général de cette recherche est de développer un modèle mathématique unifié pour décrire les écoulements mixtes. Dans cet article, les effets diphasiques ne sont pas envisagés et l'écoulement mixte est décrit dans le formalisme du modèle de Preissmann. Les auteurs proposent une méthode originale, dite fente de Preissmann négative, pour étendre le modèle classique aux écoulements en charge à pression sub-atmosphérique. Cet article décrit les modèles actuels dédiés aux écoulements mixtes et le modèle de Preissmann classique. Le concept de fente négative est introduit et validé avec des résultats expérimentaux publiés puis un exemple d'application pratique en hydraulique urbaine illustre l'utilité d'un tel modèle.

## II ■ APPROCHES ACTUELLES DE SIMULATION

La première famille de méthodes pour simuler les écoulements mixtes consiste à résoudre séparément la(les) partie(s) de l'écoulement en charge et celle(s) de l'écoulement à surface libre grâce à des systèmes d'équations et des schémas numériques différents. Les interfaces de transition sont traitées comme des conditions aux limites internes et mobiles. Ces méthodes ont été appliquées à un nombre restreint d'applications depuis qu'un premier modèle [5] utilisant la méthode des caractéristiques (MOC) a été proposé. Différents auteurs ont ensuite amélioré ce modèle [6,7]. Néanmoins, suivre avec précision l'existence et l'évolution de l'interface nécessite des algorithmes complexes et spécifiques.

Dans la deuxième famille de méthodes, dite « Rigid Water Column Approach », chacune des phases (eau/air) est traitée différemment sur base d'équations spécifiques [8]. Le modèle permet la simulation de configurations d'interface de transition complexe. Cependant, sa complexité et sa spécificité la rendent inapplicable à l'échelle d'un réseau.

Enfin, la troisième famille de méthode, dite méthode de la fente de Preissmann [9,10], permet de calculer de manière identique les écoulements à surface libre et les écoulements en charge sur base des seules équations relatives aux écoulements à surface libre. De nombreux schémas numériques utilisant la fente de Preissmann ont été développés, comme un schéma implicite [11], un schéma volume fini avec solveur de type Godunov [12] ou encore de type Roe [13], etc. La prise en compte « naturelle » de la transition explique la popularité de la fente de Preissmann. Néanmoins, deux limitations majeures lui sont connues [7]. Elle ne permet pas de simuler les écoulements en charge à pression sub-atmosphérique et les schémas numériques usuels présentent des instabilités lorsque la célérité de l'onde de pression de la conduite en charge devient trop importante.

Tout récemment, deux méthodes originales ont été proposées pour tenter de pallier les insuffisances des modèles classiques. Premièrement, une formulation cinétique couplée a été établie [14]. Les performances atteintes par ce modèle ne sont pas encore du niveau de la fente de Preissmann. Néanmoins, ses auteurs espèrent que l'utilisation d'une formulation cinétique permettra d'améliorer les performances actuelles. Deuxièmement, l'approche « two-component pressure » [15] découple le terme de pression dans les équations de Saint-Venant en un terme de pression hydrostatique et un terme de pression de surcharge. Ce découplage permet la simulation d'écoulements à surface libre et d'écoulements en charge, y compris les écoulements en charge à pression sub-atmosphérique. Ce modèle répond donc à la première limitation de la fente de Preissmann. Rien n'indique cependant que l'approche « two-component pressure » puisse résoudre la seconde limitation du modèle de Preissmann.

## III ■ MODÈLE DE PREISSMANN AMÉLIORÉ (FENTE NÉGATIVE)

Les écoulements unidimensionnels à surface libre sont traditionnellement décrits sur base du modèle mathématique de Saint-Venant [10], qui résulte de l'intégration des équations de Navier-Stokes sur une section d'écoulement présentant une surface libre. Les inconnues du système sont la section d'écoulement et le débit. La célérité de l'onde de pression varie en fonction de la section d'écoulement et de la largeur de la surface libre.

Les équations d'Allievi [16] sont habituellement utilisées pour décrire les écoulements unidimensionnels en charge. Les inconnues sont la pression et le débit. La célérité de l'onde de pression est posée a priori sur base de relations de la mécanique des matériaux et supposée constante tout le long de la simulation. Ce type d'écoulement est affecté par le phénomène du coup de bélier [16], qui résulte de la variation brusque de vitesse dans la conduite. Pour empêcher la propagation d'un tel type d'onde de pression, des dispositifs anti-bélier (cheminée d'équilibre, ballon,...) sont placés dans la plupart des conduites connectées à une pompe ou à une vanne. Un autre phénomène affectant les conduites en charge est le phénomène de cavitation, qui se caractérise par la croissance de bulles au sein du fluide suite à une pression sub-atmosphérique. Celle-ci provient soit d'un écoulement rapide soit du passage d'une onde de pression négative résultant d'un coup de bélier. L'impact de ces bulles sur les conduites peut provoquer des dégâts considérables. Pour pallier l'apparition de cavitation, des ventouses ou reniflards sont placés dans les zones où des pressions sub-atmosphériques sont susceptibles d'apparaître.

Les réseaux d'assainissement et de drainage urbain ont été traditionnellement dimensionnés pour fonctionner à surface libre uniquement (sans mise en pression). Le dimensionnement sur base des équations de Saint-Venant est dans ce cas suffisant. Pour des raisons techniques et économiques, les réseaux développés ces dernières années combinent fréquemment des tronçons en écoulement à surface libre et des tronçons en charge (voir exemple en section V). Ces derniers sont régulièrement connectés à des pompes, des

dispositifs anti-bélier et anti-cavitation,...Très clairement, le dimensionnement hydraulique de ce type de réseaux de drainage ne peut plus être basé sur les seules équations de Saint-Venant ou les seules équations d'Allievi. Il est nécessaire de modéliser des conditions hautement transitoires pour des écoulements à surface libre, des écoulements en charge et en particulier les pressions sub-atmosphériques. Négliger ces aspects entraînerait des mauvaises appréciations de pressions extrêmes (coups de bélier et cavitation) et de débits passant.

Le modèle mathématique classique de Preissmann permet de simuler dans un cadre unifiée les écoulements à surface libre et les écoulements en charge. Ce modèle est décrit en section III.1. Cependant, l'apparition de pression sub-atmosphérique n'est pas gérée, conduisant à une mauvaise appréciation de la dynamique des coups de bélier et du risque de cavitation. Le modèle mathématique de la fente de Preissmann négative que les auteurs proposent en section III.2 permet de pallier cette défaillance.

### ● III.1 MODÈLE CLASSIQUE DE PREISSMANN

La méthode de la fente de Preissmann exploite une analogie [9] entre les formes quasi-linéaire des équations décrivant un écoulement en charge [16] et à surface libre [17] dans les variables primitives (A,Q) :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left( cel^2 - u^2 \right) \frac{\partial A}{\partial x} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} = gA(i - J)$$

Avec  $cel^2 = \begin{cases} a^2 = A \frac{\partial p}{\partial (\rho A)} & \text{pour un écoulement en charge} \\ c^2 = \frac{gA}{\frac{\partial A}{\partial Z}|_{i, est}} & \text{pour un écoulement à surface libre} \end{cases}$  (1)

où  $A[m^2]$  est la section transversale,  $Q[m^3s^{-1}]$  est le débit,  $u[ms^{-1}]$  est la vitesse moyenne sur la section,  $g[ms^{-2}]$  est l'accélération de gravité,  $i[-]$  est la pente de fond,  $J[-]$  est un terme global pour le frottement de fond et les effets de viscosité,  $p[kg m^{-1} s^{-1}]$  est la pression du fluide,

$\rho[kg \cdot m^{-3}]$  est la densité du fluide et  $Z[m]$  est la hauteur d'eau. Par définition,  $cel[ms^{-1}]$  est la célérité de l'onde de pression, qui est différente selon que l'écoulement est en charge ou à surface libre.

Selon la formule (1), les équations relatives aux deux écoulements sont identiques à l'exception de l'expression de la célérité. En ajoutant une fente de largeur  $T_f$  au sommet de la section (figure 1), il apparaît un écoulement artificiellement à surface libre dont la célérité s'écrit  $c^2 = gA/T_f$ . Dès lors,

$$T_f = \frac{gA}{a^2} \rightarrow c^2 = a^2$$
 (2)

Nous pouvons en conclure que les écoulements en charge sont correctement décrits par les équations à surface libre si l'on ajoute une fente de largeur  $T_f$  au sommet de la section f. D'un point de vue physique, la capacité de stockage de la fente de Preissmann rend naturellement compte de la compressibilité du fluide et/ou de la dilatation de la conduite résultant d'une augmentation de pression dans la conduite en charge.

Du point de vue de l'hydraulique à surface libre, la relation Hauteur d'eau/Section mouillée (figure 1) contient la totalité de l'information hydrodynamique utile. La méthode de Preissmann revient donc à étendre de manière linéaire la courbe Hauteur-Section pour des hauteurs supérieures à la couronne de la conduite.

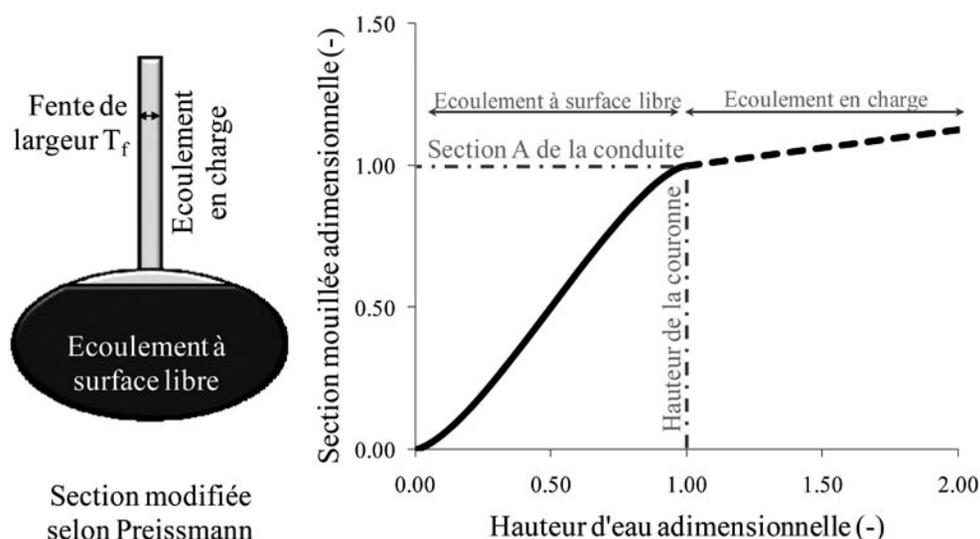


Figure 1. Deux représentations graphiques de la fente de Preissmann

### ● III.2 CONCEPT DE LA FENTE DE PREISSMANN NÉGATIVE

La méthode classique de Preissmann suppose que l'écoulement est correctement ventilé partout et ne permet donc pas de simuler les écoulements en charge à pression sub-atmosphérique pouvant apparaître dans les réseaux de drainage et d'assainissement combinant des tronçons en charge et à surface libre. Ceci, pour de nombreux auteurs, constitue une de ses limitations majeures [7,8]. Les auteurs proposent une méthode totalement originale, appelée fente de Preissmann négative, pour palier cette limitation.

En l'absence de point de mise à pression atmosphérique dans la conduite (conduite fermée), la diminution de la pression du fluide en écoulement dans une conduite sous la pression atmosphérique engendre une dilatation de l'air et/ou une contraction de la conduite. Dans le cadre de la théorie élastique linéaire de la mécanique des matériaux, les taux de dilatation/contraction est le même que pour un écoulement en charge. Autrement dit, la célérité reste identique à celle de l'écoulement en charge  $a^2$ [16]. En se basant sur cette conclusion, prolonger la « droite de Preissmann » du diagramme Hauteur/Section pour des hauteurs d'eau inférieures à la couronne de la conduite correspond à la situation d'un écoulement en charge à pression sub-atmosphérique (figure 2).

Les conditions d'aération du système dictent alors le choix entre les deux courbes valables pour les hauteurs inférieures à la couronne. Dans le cas d'un réseau d'assainissement par exemple, les conditions d'aération sont suffisantes si un reniflard ou un dispositif de mise à la pression atmosphérique correctement dimensionné est placé au voisinage de la zone. Dans ce cas, l'écoulement est à surface libre. En l'absence de tels dispositifs, la section mouillée est décrite de manière sécuritaire par la droite de Preissmann étendue aux pressions sub-atmosphériques. Dans tous les cas intermédiaires de dispositifs de mise à l'air mal dimensionnés, des écoulements diphasiques apparaissent et l'utilisation de codes spécifiques est nécessaire.

### ● III.3 SCHÉMA NUMÉRIQUE 1D

Dans le formalisme de Preissmann, la simulation 1D d'un écoulement mixte est donc possible grâce à un code de calcul uniquement dédié aux écoulements à surface libre [17] :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} + g \cos \theta \frac{\partial p_{\omega}}{\partial x} = -gA \cos \theta \frac{\partial z_b}{\partial x} - gA \cos \theta J + g \cos \theta p_x + gA \sin \theta \quad (3)$$

où  $\theta$  [-] est l'inclinaison moyenne,  $z_b$  [-] est l'altitude du fond de topographie,  $p_{\omega}$  est le terme de pression moyen le long de l'axe d'écoulement et  $p_x$  est le terme de réaction des parois de la conduite.

Le choix du schéma de discrétisation numérique est tout à fait indépendant de l'application de l'hypothèse de Preissmann et de son extension négative. Dans cet article, le schéma de discrétisation temporelle utilisé est un schéma de Runge-Kutta à 3 pas. Le fractionnement original du modèle WOLF1D (type « flux vector splitting ») est utilisé vu la simplicité et les performances qu'il offre [17]. Néanmoins, les évaluations classiques de flux de Roe [18], AUSM [19] et AUSM+ [20] ont été également utilisés avec des résultats sensiblement identiques.

Ce code de calcul fait partie de la suite intégrée de modélisation WOLF [21-24] initialement dédiée à la simulation d'écoulements à surface libre et développée depuis plus de dix ans au sein du *Laboratoire d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et des Constructions Hydrauliques (HACH)* de l'Université de Liège.

## IV ■ VALIDATION DU MODÈLE ORIGINAL

L'efficacité de la fente de Preissmann négative a été validée sur une série de résultats expérimentaux publiés. En

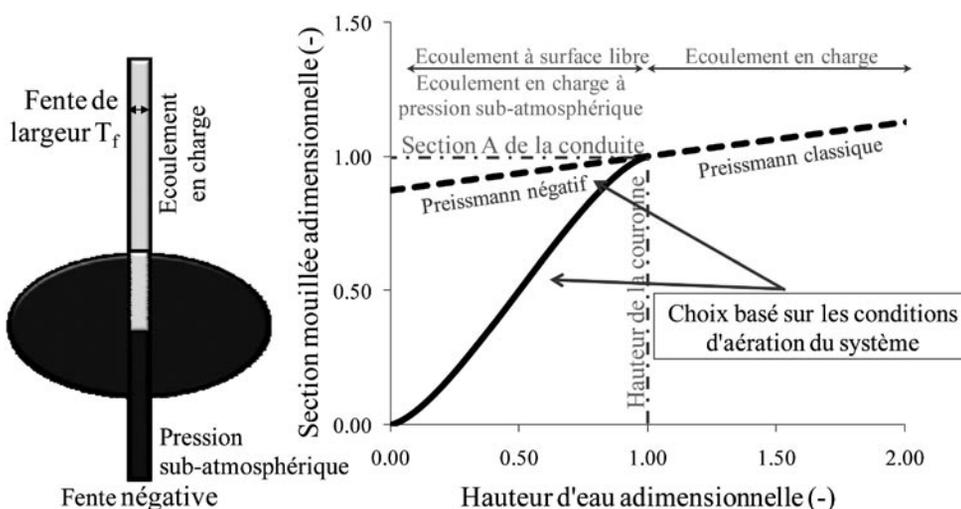


Figure 2. Deux représentations graphiques de la fente de Preissmann négative

particulier, sa capacité à simuler des écoulements en charge à pression sub-atmosphérique est établie par comparaison avec des résultats expérimentaux d'un essai en laboratoire [25]. Le dispositif expérimental, représenté sur la *figure 3*, comporte deux réservoirs reliés par une conduite en acrylique de 14.32 m de long présentant un sommet en son milieu. Initialement, le niveau de l'eau stagnante est fixé à 30 cm partout. Ensuite, une vidange rapide du système par le réservoir 1 crée un écoulement depuis le réservoir 2 vers le réservoir 1. Au cours de cette opération, trois types d'écoulements apparaissent : des écoulements à surface libre dans les deux réservoirs, un écoulement en charge dans la conduite et un écoulement en charge à pression sub-atmosphérique au niveau du sommet de la conduite.

Sur le premier graphique de la *figure 3*, les valeurs expérimentales données par [25] et les valeurs numériques calculées par WOLF de la charge sont comparées en deux points : à 9.9 m du réservoir 1 (sonde 1) et au niveau du réservoir 2 (sonde 2). La diminution générale de hauteur et les paliers correspondant à la propagation d'un coup de bélier sont correctement prévus par le modèle numérique. Enfin, des hauteurs de charge négatives apparaissent lorsque la pression dans l'écoulement devient sub-atmosphérique. Nous pouvons conclure que la fente de Preissmann négative :

- évalue correctement les intensités de pression sub-atmosphérique ;
- rend une célérité adéquate pour les écoulements en charge à pression sub-atmosphérique.

Ce dernier point est encore plus clairement observable dans le second graphique de la *figure 3*. Les valeurs expérimentales données par (Vasconcelos, Wright et al. 2004) et les valeurs numériques calculées par WOLF de la vitesse

d'écoulement y sont comparées à 9.9 m du réservoir aval (sonde 1). La simultanéité des extremums de vitesse est évidente. Dans cette validation, l'objectif n'est pas de caler le meilleur coefficient de frottement et la meilleure célérité. Néanmoins, il apparaît que le frottement préconisé par l'auteur et pris tel quel dans cette étude est sans doute légèrement sous-estimé puisque les oscillations s'atténuent moins rapidement dans le modèle numérique que dans le modèle expérimental.

## V ■ APPLICATION A UN RÉSEAU DE DRAINAGE URBAIN

Les applications de ce modèle sont nombreuses, y compris en drainage urbain. Par exemple, considérons ici la conduite d'évacuation des eaux de pluies d'une agglomération belge vers une station d'épuration. Celle-ci est alimentée par des pompes à déclenchement asservi. Par simplicité, nous considérons ici une seule pompe placée à l'amont de la conduite. La topographie de la conduite présente un point haut si bien que l'écoulement à son amont est principalement en charge et l'écoulement à son aval est principalement à surface libre, avec une transition prise naturellement en compte quelque soit sa position. Lors du démarrage de la pompe, le débit injecté suit la loi donnée sur la *figure 4*.

Sur le premier graphique de la *figure 5*, les profils relatifs aux 5 premières secondes de l'écoulement sont représentés. Très clairement, un coup de bélier progressif apparaît à l'amont et se propage vers l'aval à une vitesse de 1200 m/s. Au niveau du sommet, la transition en charge-surface libre joue naturellement le rôle de conditions aux limites et pro-

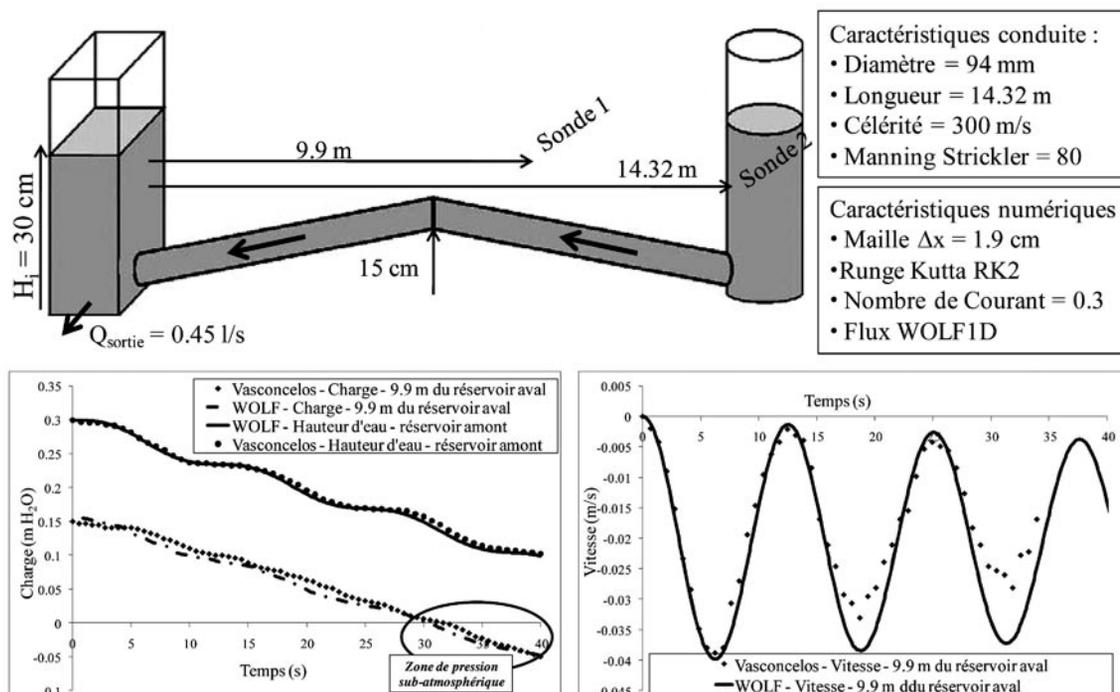


Figure 3. Validation du modèle avec des résultats expérimentaux

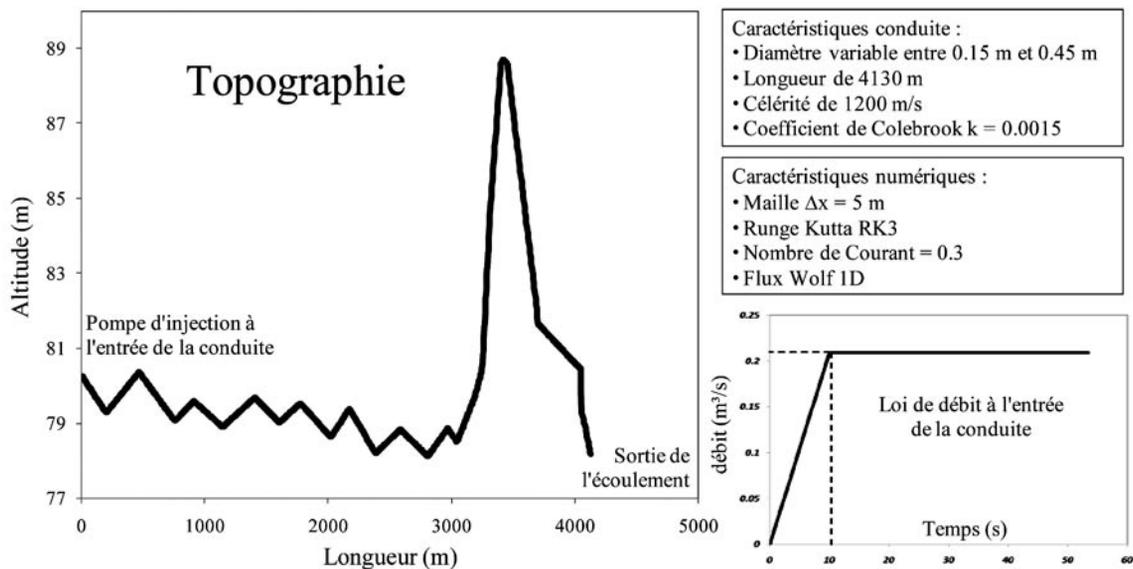


Figure 4. Exemple d'application- données

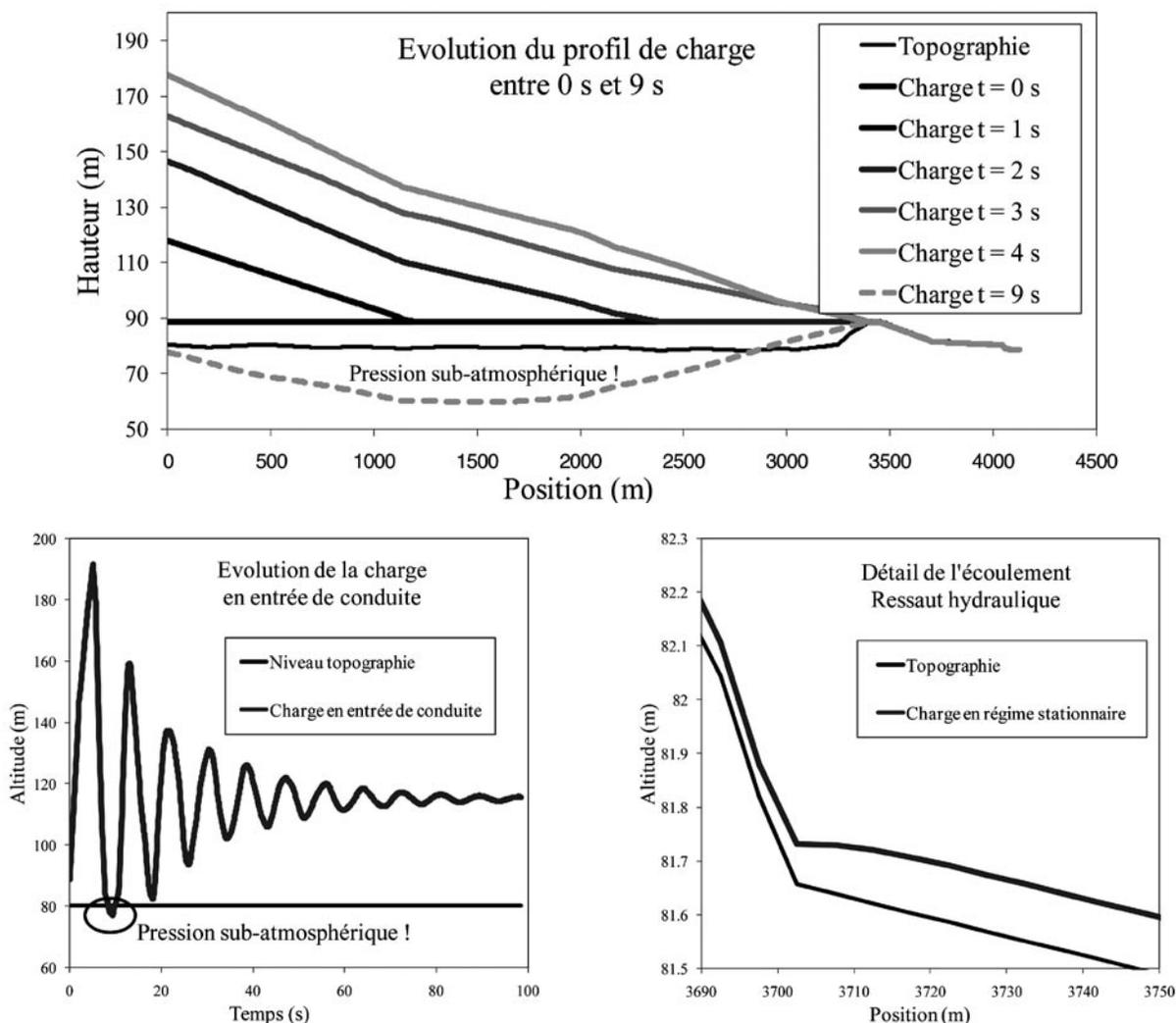


Figure 5. Exemple d'application – résultats

voque une réflexion du coup de bélier avec changement de signe. La dynamique du coup de bélier et son amortissement sont clairement illustrés sur le graphique 2, représentant l'évolution temporelle de la charge à l'entrée de la conduite. Il est en effet observé une oscillation amortie caractéristique. Qui plus est, il apparaît, grâce à la fente de Preissmann négative, de faibles pressions sub-atmosphériques dont la prise en compte correcte est indispensable pour le dimensionnement hydraulique de l'ouvrage. En effet, supposer un passage à surface libre provoque l'amortissement instantané du coup de bélier et une mauvaise évaluation de la pression dans toute la simulation pour les pas de temps suivants. Enfin, le troisième graphique se focalise sur une partie de l'écoulement à surface libre. A cet endroit se développe un ressaut hydraulique.

En conclusion, cette application montre l'intérêt du modèle proposé qui :

permet la simulation d'écoulement en charge, y compris les pressions sub-atmosphériques, dont on voit clairement sur la *figure 5* que la modélisation correcte est indispensable pour appréhender la dynamique du système ;

rend une célérité adéquate pour les écoulements en charge ;

permet la simulation d'écoulements à surface libre super-critique et infracritique ;

traite naturellement la transition.

## VI ■ CONCLUSIONS

Dans cet article, l'existence des écoulements mixtes dans les structures hydrauliques et leur incidence sur le dimensionnement ont été soulignées. Il a été également rappelé que de nombreuses recherches actuelles sont dédiées au développement d'un code de calcul CFD qui tienne compte adéquatement des transitions possibles entre les écoulements, de leurs effets sur les structures et des interactions entre phases dans la conduite. Une revue de la littérature existante montre cependant que les modèles actuels souffrent de certaines limitations.

Ainsi, il a été développé un algorithme de calcul unifié pour la simulation des écoulements mixtes. Le schéma proposé est basé sur le formalisme de Preissmann, qui permet de calculer un écoulement en charge sur base des seules équations à surface libre. En particulier, les auteurs proposent une méthode originale pour pallier une limitation de la méthode classique de Preissmann. Ainsi, une fente de Preissmann négative est introduite pour étendre le modèle classique aux écoulements en charge à pression sub-atmosphérique. Cette méthode originale est couplée à un schéma numérique volume fini initialement dédié aux écoulements à surface libre. L'efficacité de ce modèle est démontrée par comparaison avec des valeurs expérimentales publiées et son applicabilité a été illustrée pour un système de drainage urbain.

L'effort de recherche sur les écoulements mixtes est cependant toujours d'actualité. En effet, des oscillations numériques peuvent apparaître à l'amont des transitions hautement transitoires lorsque le gradient de célérité devient important.

Des schémas numériques adaptés semblent donc indispensables. En outre, la prise en compte des effets diphasiques, bien que nécessaire pour simuler correctement certaines situations hautement transitoires, nécessite d'étendre le modèle aux équations diphasiques.

## VII ■ RÉFÉRENCES

- [1] GUO. Q., C. SONG (1990) — Surging in urban storm drainage systems. *Journal of Hydraulic Engineering*. **116(12)** 1523-1537
- [2] ZHOU. F., F.E. HICKS, P.M. STEFFLER (2002) — Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air. *Journal of Hydraulic Engineering*. **128(6)** 625-634
- [3] GUO. Q., C. SONG (1991) — Dropshaft hydrodynamics under transient conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*. **117(8)** 1042-1055
- [4] VASCONCELOS, J., S. WRIGHT (2005) — Experimental investigation of surges in a stormwater storage tunnel. *Journal of Hydraulic Engineering*. **131(10)** 853-861
- [5] WIGGERT D. (1972) — Transient flow in free-surface, pressurized systems. *Journal of The Hydraulics Division, Proceedings of The American Society of Civil Engineers*. **98(1)** 11-26
- [6] CARDLE J., C. SONG (1988) — Mathematical modeling of unsteady flow in storm sewers. *International Journal of Engineering Fluid Mechanics*. **1(4)** 495-518
- [7] POLITANO, M., A.J. ODGAARD, W. KLECAN (2007) — Numerical evaluation of hydraulic transients in a combined sewer overflow tunnel system. *Journal of Hydraulic Research*. **133(10)** 1103-1110
- [8] LI, J., A. MCCORQUODALE (1999) — Modeling mixed flow in storm sewers. *Journal of Hydraulic Engineering*. **125(11)** 1170-1180
- [9] PREISSMANN A. (1961) — Propagation des intumescences dans les canaux et rivières. *First Congress of The French Association For Computation. Grenoble, France*.
- [10] CUNGE, J.A., M. WEGNER (1964) — Intégration numérique des équations d'écoulement de Barre de Saint Venant par un schéma implicite de différences finies. *La Houille Blanche*. 33-39
- [11] GARCIA-NAVARRO, P., F. ALCRUDO, A. PRIESTLEY (1994) — An implicit method for water flow modelling in channels and pipes. *Journal of Hydraulic Research*. **32(5)** 721-742
- [12] LEON, A., M. GHIDAOU, A. SCHMIDT, M. GARCIA (2006) — Godunov-Type Solutions For Transient Flows In Sewers. *Journal of Hydraulic Engineering*. **32(8)** 800-813
- [13] BOURDARIAS, C., S. GERBI (2007) — A finite volume scheme for a model coupling free surface and pressurized flows in pipes. *Journal of Computational And Applied Mathematics*. **209** 109-131
- [14] BOURDARIAS, C., S. GERBI, M. GISCLON (2008) — A kinetic formulation for a model coupling free surface and pressurized flows in closed pipes. *Journal of Computational And Applied Mathematics*. **218(2)** 522
- [15] VASCONCELOS, J., S. WRIGHT (2007) — Comparison between the two-component pressure approach and current transient flow solvers. *Journal Of Hydraulic Research*. **45(2)** 178-187

- [16] WYLIE, E.B. AND V.L. STREETER, FLUID T (1978) — *Fluid transients. Première ed, Ed. M.-H. Inc.* 385
- [17] ARCHAMBEAU P. (2006) — Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations. *Applied Hydrodynamics and Hydraulic Constructions, Liege.* 410
- [18] ROE P.L. (1981) — Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes. *Journal Of Computational Physics.* **43** 357
- [19] LIOU, M.-S. , C.J. STEFFEN (1993) — A New Flux Splitting Scheme : AUSM. *Journal of Computational Physics.* **107** 23-39
- [20] LIOU, M.-S., S (1996) — A Sequel to AUSM : AUSM+. *Journal of Computational Physics.* **129** 364-382
- [21] ERPICUM, S., T. MEILE, B.J. DEWALS, M. PIROTON, A. SCHLEISS (2009) — 2D Numerical flow modeling in a macro-rough channel.. *International Journal For Numerical Methods In Fluids.*
- [22] DEWALS, B.J., S.A. KANTOUSH, S. ERPICUM, M. PIROTON, A. SCHLEISS (2008) — Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins. *Environ. Fluid Mech.* **8(1)** 31-54
- [23] ROGER, S., B.J. DEWALS, S. ERPICUM, D. SCHWANENBERGER, H. SCHÜTTRUMPF, J. KÖNGETTER (2009) — Experimental und numerical investigations of dike-break induced flows (in press). *Journal Of Hydraulic Research.*
- [24] ERPICUM, S., B.J. DEWALS, P. ARCHAMBEAU, M. PIROTON, DAM-BREAK (2009) — Flow Computation Based On An Efficient Flux-Vector Splitting. *Journal of Computational And Applied Mathematics.*
- [25] VASCONCELOS, J., S. WRIGHT, P.L. ROE (2006) — Improved simulation of flow regime transition in sewers : the two-component pressure approach. *Journal of Hydraulic Engineering.* **132(6)** 553-562