

Développements récents d'un code de simulation des écoulements mixtes dans des conduites d'aménagements hydrauliques à écoulement temporaire (FlowMix)

Christian BOURDARIAS¹, Stéphane GERBI¹
Victor WINCKLER²

¹ Laboratoire de Mathématiques, UMR CNRS 5127 - Université Savoie Mont Blanc
73376 Le Bourget du Lac, France - christian.bourdarias@univ-smb.fr

¹ Laboratoire de Mathématiques, UMR CNRS 5127 - Université Savoie Mont Blanc
73376 Le Bourget du Lac, France - stephane.gerbi@univ-smb.fr

² Electricité de France, Centre d'Ingénierie Hydraulique - Savoie Technolac
73373 Le Bourget du Lac cedex, France - victor.winckler@edf.fr

Un aménagement hydroélectrique peut comporter certains composants hydrauliques, qui ne sont sollicités que de façon temporaire. L'écoulement dans ces conduites peut être mixte, c'est-à-dire simultanément à surface libre et en charge. Le code FlowMix est un code 1D non permanent permettant de modéliser ce type d'écoulement. Il est basé sur la similarité qui existe entre les équations d'Euler incompressibles et de Saint Venant, et utilise une méthode originale qui associe ces deux systèmes d'équations. Cet article présente les méthodes numériques qui ont été développées pour ce code, les hypothèses de modélisation et les possibilités de calcul de ce logiciel. Le code FlowMix est issu nombreuses années de recherches, grâce à un partenariat entre le Laboratoire de Mathématiques de l'Université Savoie Mont Blanc (LAMA) et le Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF (CIH), qui a conduit à produire une version industrielle en 2016. Enfin, quelques cas d'application sur des aménagements existants sont présentés : conduite A, Rizzanese, la Coche.

Mots-clefs : surface libre, écoulement en charge, volumes finis, équations d'Euler, Saint Venant.

Latest developments of a mixed flows software in hydroelectric conduits with temporary flows (FlowMix)

A hydroelectric powerplant can involve some adductions which are not used all the time, but temporally. The flow in such conduits can become mixed, that is the conduit is partially concerned with a pressurized flow and a free-surface flow at the same time. The FlowMix software is a one dimensional and unsteady code, able to model this type of flow, based on the similarities between the Euler incompressible equations and the Saint-Venant equations (shallow water equations) and an original method to associate these two systems of equations. This paper presents the numerical methods which were developed for this code, the physical hypothesis which were chosen, and the possibilities of modelization of the software. The FlowMix software is issued from several years of researches between two partners : the Mathematical Institute of the Savoie Mont Blanc University (LAMA) and the Hydraulic Engineering Centre of EDF (CIH), which lead to an industrial version in 2016. Finally, some industrial cases from the EDF hydropowerplants park are presented : Conduit A, Rizzanese, la Coche.

Key words: free-surface flow, pressurized flow, finite volume, Euler equations, shallow water equations,

I INTRODUCTION

En général, les circuits principaux d'aménagements hydroélectriques d'EDF comportent un réservoir amont, une galerie d'amenée avec un écoulement en charge, ou des canaux à surface libre, puis une conduite forcée sous pression, des turbines, permettant de produire l'électricité, suivies d'un canal de fuite ou d'une galerie de fuite sous faible pression.

En parallèle de ces circuits principaux, il existe des conduites à écoulement temporaire. Pour ces conduites, l'écoulement peut être mixte, c'est-à-dire en partie à surface libre et en partie en charge.

Les conduites de décharge permettent de dériver temporairement un débit, lorsque celui-ci ne passe plus par les turbines suite à un déclenchement ou un arrêt normal. On trouve ce type de conduite sur les centrales d'Avrieux, Calypso, Les Saucés, Loudenvielle, Luz,, Pralognan, Sabart.

Par exemple pour la centrale des Saucés, située en amont de la retenue de Roselend, en Savoie, lorsque les groupes s'arrêtent, l'eau est temporairement déviée vers la retenue de La Gittaz, par l'ouverture de la vanne SF3bis (figure 1).

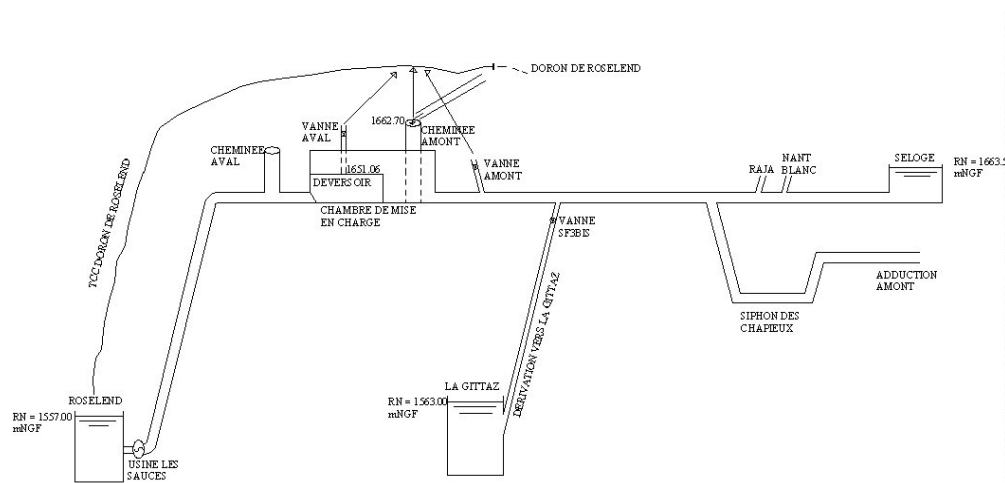


Figure 1 : Schéma de l'aménagement des Saucés

Les conduites de transfert permettent de transférer de l'eau entre deux réservoirs, ou de passer sous un ouvrage : conduite A, Rizzanese.

Les conduites de drainage servent à récupérer l'eau qui arrivent des galeries de dérivation et qui ne peuvent pas passer par la conduite forcée, lorsque celle-ci est en travaux pour maintenance. C'est le cas de la conduite de drainage de La Coche par exemple.

Le code FlowMix, qui modélise les écoulements mixtes en 1D, est le résultat de nombreuses années de recherche mathématique et de mise au point au Laboratoire de Mathématiques (LAMA), en collaboration avec EDF Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH), les deux entités étant présentes sur le site de l'Université Savoie Mont Blanc à Chambéry.

En janvier 2016, une version dite « industrielle » du logiciel a été livrée par le LAMA à EDF, plus convivial pour les utilisateurs (fichiers de données plus clairs, conditions limites écrites dans des fichiers fortran remplacés par des fichiers texte), comportant une documentation complète : notice d'utilisation, notice de principes, notice de validation adaptée aux études d'ingénierie et notice informatique pour les développeurs.

II OBJECTIFS ET DOMAINE DU LOGICIEL

Le logiciel FlowMix est dédié aux calculs d'écoulements instationnaires mixtes en 1D. Il peut être bien sûr utilisé dans le cadre d'écoulements complètement à surface libre en canaux ou conduites fermées ainsi que dans le cadre d'écoulements complètement en charge.

Le domaine de validité est déterminé par un certain nombre d'hypothèses physiques :

1. Les conduites considérées sont à section constante ou à changement progressif de section. Elles restent dans un même plan vertical et leur pente est graduellement variée. Les parois sont imperméables et non déformables. La conduite possède un axe privilégié d'écoulement : le vecteur vitesse moyenne d'écoulement est parallèle à cet axe et la vitesse peut être considérée comme constante dans toute section perpendiculaire à cet axe.
2. Dans un écoulement à surface libre, l'eau est incompressible, l'écoulement est irrotationnel et les accélérations dans la direction perpendiculaire à l'axe d'écoulement sont négligeables (hypothèse hydrostatique).

3. Dans un écoulement en charge, le liquide est légèrement compressible et homogène. La loi de pression utilisée est barotrope et s'écrit : $p_{abs} = p_{atm} + c^2(\rho - \rho_0)$, avec p_{abs} pression absolue, p_{atm} est la pression atmosphérique, supposée constante pour tout le circuit, ρ_0 et ρ les masses volumiques de l'eau respectivement à la pression p_{atm} et à la pression p_{abs} . La vitesse d'onde en charge est alors c . On prend ici $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$. Les variations spatiales de ρ dans une section de conduite sont considérées comme négligeables devant les variations longitudinales.
4. Les effets de viscosité à l'intérieur du fluide sont négligeables par rapport aux frottements sur les parois, lesquels sont pris en compte par une loi empirique (loi de Strickler).
5. Les interactions entre l'air et l'eau ne sont pas modélisées. Par contre il n'y a pas d'hypothèse de pente faible.

II.1 Description du modèle physique

Nous donnons ci-dessous les modèles d'écoulement à surface libre et en charge établis sous les hypothèses précédentes. Leur couplage aboutit au modèle d'écoulement mixte à la base de FlowMix. Pour une description complète de ce modèle, voir [Bourdarias, 2014]

II.2 Écoulements à surface libre

Le système de Saint-Venant pour les écoulements à surface libre dans un canal ou une conduite fermée, basé sur la conservation de la masse et de la quantité de mouvement, s'écrit sous forme matricielle :

$$\partial_t U + \partial_x F(x, U) = G(x, U)$$

avec

$$U = (A, Q)^t, F(x, U) = \left(Q, \frac{Q^2}{A} + gI_1(x, A)\cos\theta(x) \right)^t$$

$$G(x, U) = (0, -gA(\partial_x Z_F + z_G \partial_x \cos\theta(x) + S_f) + gI_2(x, A)\cos\theta(x))^t$$

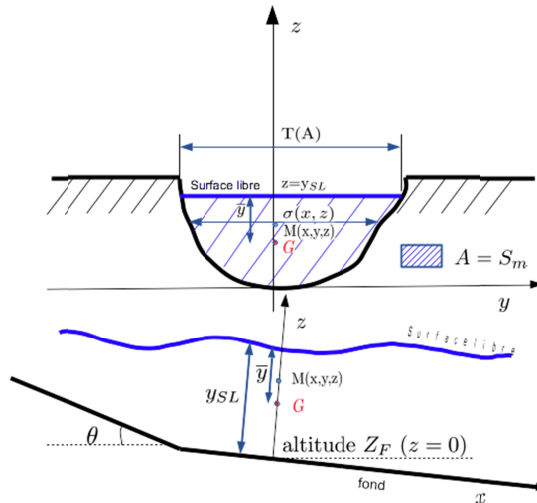


Figure 2 : Écoulement à surface libre en canal quelconque

Où t est la variable temps et x l'abscisse curviligne le long d'une courbe choisie comme « axe privilégié d'écoulement » et définie par sa cote $Z = Z(x)$: nous avons fait ici le choix du fil d'eau ($Z = Z_F$). Les inconnues sont la section mouillée $A = A(x, t)$, notée aussi S_m , et le débit $Q = Au = Q(x, t)$. Les autres termes sont (voir la figure 2 ci-dessus) :

- $gI_1 \cos\theta$: terme de pression dans le flux
- $gI_2 \cos\theta$: terme source de pression

Sous l'hypothèse hydrostatique nous avons :

$$I_1 = \int_0^{y_{SL}} (y_{SL} - z) \sigma(x, z) dz = A \bar{y} I_2 = \int_0^{y_{SL}} (y_{SL} - z) \partial_x \sigma(x, z) dz$$

$$I_2 = \int_0^{y_{SL}} (y_{SL} - z) \partial_x \sigma(x, z) dz$$

avec

- $y_{SL} = y_{SL}(x, t)$: hauteur d'eau entre le fond et la surface libre, mesurée dans la direction perpendiculaire à l'axe d'écoulement
- $\sigma = \sigma(x, z)$: largeur du bief à la position x le long de la conduite et à la hauteur z au-dessus du fond dans la direction perpendiculaire au radier
- $\theta = \theta(x)$: angle orienté entre l'horizontale et la base de la conduite. On a donc aussi $\partial_x Z_f = \sin \theta$,
- y : distance entre la surface libre et le centre de gravité G de la section mouillée.
- g : accélération de la pesanteur
- Z_F : altitude du point d'abscisse x du radier
- z_G : ordonnée du centre de gravité G de la section mouillée. On a $h = z_G + y$
- S_f : terme de frottement, donné par la formule de Strickler :

$$S_f = \frac{Q|Q|}{A^2 K_s(x)^2 R_h(x, A)^{\frac{4}{3}}}$$

où K_s , fonction de la position x , est le coefficient de Strickler, $R_h = \frac{A}{P_m}$ est le rayon hydraulique et P_m le périmètre mouillé, fonction de x et A .

Ce système est strictement hyperbolique pour $A > 0$. La matrice jacobienne du flux s'écrit

$$D_U F(U) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ c^2 - u^2 & 2u \end{pmatrix}$$

avec $u = \frac{Q}{A}$ (vitesse moyenne du liquide dans une section, suivant l'axe d'écoulement) et une vitesse d'onde $c = c(x, A)$ donnée par

$$c^2 = \frac{\partial g I_1 \cos \theta}{\partial A} = \frac{g A}{T} \cos \theta$$

où $T = T(x, A)$ désigne la largeur au miroir. Les valeurs propres sont $\lambda_1 = u - c$ et $\lambda_2 = u + c$ auxquelles on peut associer les vecteurs propres à droite

$$r_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ u - c \end{pmatrix} \text{ et } r_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ u + c \end{pmatrix}$$

II.3 Écoulements en charge

Le système décrivant les écoulements en charge dans le cas d'une conduite non dilatable de section $S = S(x)$ est obtenu à partir des équations d'Euler compressibles (avec la loi de pression barotrope explicitée dans les hypothèses) écrites dans un repère lié au fil d'eau. Ces équations sont intégrées suivant les sections perpendiculaires au fil d'eau suivant un processus analogue à celui qui conduit aux équations de Saint-Venant. Il s'écrit :

$$\partial_t U + \partial_x F(U) = G(x, U) \tag{1}$$

$$U = (\bar{\rho} S, \bar{\rho} Q)^t = (M, D)^t, F(U) = \left(D, \frac{D^2}{M} + c^2 M \right)^t$$

$$G(x, U) = \left(0, -gM\partial_x Z + c^2 M \partial_x \ln(S) - gMz_G \partial_x \cos\theta - g \frac{1}{K_S^2 R_h^3} \frac{D[D]}{M} \right)^t$$

Les variables $\rho = \rho(x, t)$ et $Q = Q(x, t)$ sont respectivement la masse volumique moyenne de l'eau dans une section et le débit. On a $Q(x, t) = S(x).u(x, t)$ où u désigne la vitesse d'écoulement moyenne dans une section. Ici, la quantité R_h est uniquement liée à la géométrie. Nous avons adopté par défaut la même loi de frottement que dans le modèle d'écoulement à surface libre. Ce système est lui aussi strictement hyperbolique pour $M > 0$, ce qui est garanti pour un écoulement en charge. La matrice jacobienne du flux et les éléments propres sont identiques à ceux du système de Saint Venant mais avec une vitesse d'onde c constante.

II.4 Couplage

Les deux systèmes précédents sont formellement très proches, les différences provenant essentiellement de la loi de pression. La recherche d'un couplage « naturel » des deux modèles invite à utiliser un seul jeu de variables conservatives et nécessite un flux continu à travers les *points de transition*, c'est à dire là où se produit un passage d'un écoulement à surface libre vers un écoulement en charge ou inversement. Divisons les deux membres de chaque équation du système d'écoulement en charge par la constante ρ_0 et posons

$$A^* = \frac{\bar{\rho}S}{\rho_0} \text{ et } Q^* = \frac{\bar{\rho}Q}{\rho_0}$$

nous obtenons des variables qui s'expriment dans les mêmes unités que celles du modèle à surface libre (m^2 pour A^* et m^3/s pour Q^*). Au passage d'un type d'écoulement à l'autre, les variables A (surface libre) et A^* (charge) coïncident, de même que Q et Q^* car on a alors $\rho = \rho_0$. La vitesse d'écoulement satisfait

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{Q^*}{A^*}$$

Pour réaliser le couplage, il est nécessaire d'utiliser un jeu unique de variables noté $(\tilde{A}, \tilde{Q})$. Nous introduisons en outre un indicateur d'état E égal à 0 à surface libre et à 1 en charge. Précisons alors $(\tilde{A}, \tilde{Q})$:

- pour $E = 0$ on a $\tilde{A} = A = S_m \leq S$
- pour $E = 1$ on a $\tilde{A} = A^* > 0$. Le cas $A^* < S$ correspond alors à une dépression.

Avec ces notations, le terme de pression dans le flux du modèle à surface libre est $gI_1(x, \tilde{A}).\cos\theta(x)$ tandis que le terme de pression dans le flux du modèle en charge est $c^2 \tilde{A}$. Lorsque le calcul des flux, au niveau numérique, se fait de part et d'autre d'un point de transition, la continuité est assurée par l'ajout de la constante $gI_1(x, S).\cos\theta(x)$ au flux en charge. Notons que l'autre terme du flux mixte, à savoir $\frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{A}}$ est évidemment continu aux points de transition. La vitesse d'onde est par contre discontinue aux points de transition : cela nécessite une méthode adaptée de calcul des flux numériques qui est l'un des points clefs de FlowMix.

III DESCRIPTION DES MÉTHODES NUMÉRIQUES

On utilise dans la suite le jeu de variables mixtes, noté simplement (A, Q) . Le sens à donner à ces variables dépend donc de l'état de l'écoulement mais il n'y a jamais d'ambiguïté. Le schéma utilisé est de type Volumes Finis. Après discrétisation du domaine, un tel schéma effectue dans chaque maille un bilan des variables conservatives (masse, quantité de mouvement) basé sur un calcul des flux aux interfaces, la façon de définir ces flux (solveur) caractérisant le schéma. Nous avons choisi un couplage entre deux solveurs spécialisés : un solveur cinétique pour les zones d'écoulement à surface libre, un solveur VFRoe décentré pour les zones d'écoulement en charge. Le couplage s'effectue aux points de transition par l'intermédiaire des flux calculés de part et d'autre et après application de la correction de continuité précisée précédemment.

III.1 Notations

L'axe de la conduite est divisé en N mailles $m_i = [x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$, $1 \leq i \leq N$ de sorte que si L désigne la longueur de la conduite, on a $x_{1/2} = 0$ et $x_{N+1/2} = L$. Le centre de m_i est noté x_i et sa longueur h_i (figure 3).

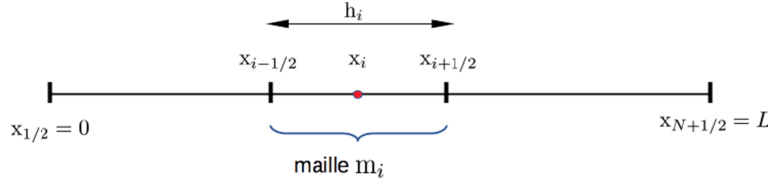


Figure 3 : Maillage

La discrétisation spatiale n'est pas nécessairement uniforme. Le pas de temps, variable, est noté Δt (sans indice, pour simplifier). On pose alors $t_0 = 0$, et pour $n \geq 0$, $t_{n+1} = t_n + \Delta t$.

Les inconnues discrètes sont les vecteurs

$$U_i^n = \begin{pmatrix} A_i^n \\ Q_i^n \end{pmatrix} \quad 1 \leq i \leq N, 0 \leq n \leq n_{max}$$

où n_{max} est tel que $(n_{max} + 1) \cdot \Delta t > T$, avec $T =$ temps final. On peut considérer U_i^n comme une approximation de la valeur moyenne de la solution exacte $U(x, t_n)$ sur la maille m_i .

Les valeurs aux frontières amont et aval seront associées à deux mailles fictives numérotées respectivement 0 et $N + 1$ et aux vecteurs colonnes U_0^n, U_{N+1}^n .

III.2 Solveur cinétique pour les écoulements à surface libre

Le solveur cinétique que nous avons développé est adapté des travaux de [Botchorishvili, 2003] et [Perthame, 2001] au cas d'un écoulement à surface libre en conduite ou en canal non nécessairement rectangulaire. Il permet de prendre en compte de façon naturelle les fonds secs (mise en eau sur fond sec ou assèchement) et permet un décentrement simple de tous les termes sources de façon à préserver les états stationnaires (conservation de l'eau au repos, en particulier). Il assure la préservation de la positivité de A sous condition de restriction du pas de temps de type CFL.

III.3 Solveur VFRoe décentré pour les écoulements en charge

Dans ce paragraphe, nous rappelons le principe du schéma explicite VFRoe avec traitement décentré du terme de pente, appliqué au système (1) écrit avec les variables mixtes sans prise en compte des conditions limites. En conséquence on considère ici que l'indice de maille, i , parcourt $\mathbb{Z}$. La référence principale est [Gallouet, 2003]. Suivant une idée de [Greenberg et LeRoux, 1996], l'altitude du radier (ou fil d'eau) est décrite par une fonction Z constante par maille et on adjoint au système l'équation $\partial_t Z = 0$: cette méthode permet d'intégrer le terme de topographie dans les flux, la nouvelle variable d'état étant alors $(Z, A, Q)^t$.

Nous étendons cette méthode en discrétisant également la section S par une fonction constante par maille et donc finalement le terme $Z - \frac{c^2}{g} \ln S$ qui apparaît dans l'équation de la quantité de mouvement. Enfin, on peut, à chaque pas de temps, prendre en compte les frottements dans la définition de la pente (notion de *pente dynamique*) en posant

$$\tilde{Z} = Z - \frac{c^2}{g} \ln S + \int_0^x K(s, A, E) u|u| ds$$

et ainsi décentrer la totalité des termes sources. Nous posons également $Z_1 = \cos \theta$ (qui est par principe constant par maille dans le contexte de l'étude) et adjoignons au système (2) les équations $\partial_t \tilde{Z} = 0$ et $\partial_t Z_1 = 0$. La nouvelle variable d'état sera ainsi $W = (\tilde{Z}, Z_1, A, Q)^t$. On obtient alors le système :

$$\partial_t W + \partial_x \Phi(x, W) + g A \partial_x \tilde{Z} + g A z_G \partial_x Z_1 = TS(W) \quad (2)$$

avec

$$\Phi(x, W) = \left(0, Q, \frac{Q^2}{A} + c^2 A\right)^t \text{ et } TS(W) = \left(0, 0, -\frac{gK(A)Q|Q|}{A}\right)^t$$

Cette façon de discrétiser la pente et la géométrie introduit, lors de la résolution du problème de Riemann aux interfaces entre mailles, des ondes stationnaires liées aux sauts de Z, S et $\cos\theta$.

Notons W_i^n l'inconnue discrète, approximation de la valeur moyenne de W sur $]x_{i-1/2}, x_{i+1/2}[$.

Par intégration de (2) sur $]x_{i-1/2}, x_{i+1/2}[\times [t_n, t_{n+1}[$ on est conduit à écrire le schéma Volumes Finis sous la forme :

$$W_i^{n+1} = W_i^n - \frac{\Delta t}{h_i} \left(\Phi \left(W_{i+\frac{1}{2}}^*(0^-, W_i, W_{i+1}) \right) - \Phi \left(W_{i-\frac{1}{2}}^*(0^+, W_{i-1}, W_i) \right) \right) + \Delta t TS(W_i^n)$$

où, suivant Gallouët *et al.* ([3]), $W_{i+\frac{1}{2}}^*(\xi = x/t, W_i, W_{i+1})$ est la solution exacte du problème de Riemann linéarisé à l'interface $x_{i+1/2}$, avec W_i et W_{i+1} respectivement comme états gauche et droit. Les termes de pentes, de géométrie et de frottement ne figurent donc pas explicitement dans le schéma mais seront utilisées pour calculer W^* : là réside le décentrement.

III.4 Couplage : solveur mixte

Par principe, un point de transition est toujours localisé à une interface entre mailles. Il s'agit alors de définir une méthode de calcul des flux de part et d'autre d'une interface qui est un point de transition. Il se peut qu'en un tel point figurent également une ou plusieurs discontinuités géométriques (rupture de pente, changement de section) ou physique (changement de vitesse d'onde en charge). La stratégie retenue consiste en la résolution de problèmes de Riemann partiels dans des zones homogènes du point de vue du type d'écoulement et des caractéristiques géométriques. On distingue deux cas "génériques" : la montée en charge et la descente à surface libre selon la direction de propagation du point de transition et le type d'écoulement qui se propage. La vitesse estimée du point de transition issu d'une interface est notée w et il suffit, par symétrie, de préciser les cas correspondant à une vitesse positive. Nous ne présentons ici que le cas d'une montée à surface libre, le plus simple (figure 4). Les états à prendre en considération sont :

- UG et UD états (connus) respectivement à gauche et à droite de l'interface courante, de même type (SL ou CH),
- UTM et UTP états à gauche et à droite du point de transition, de types distincts,
- UM et UP états respectivement à gauche et à droite de l'interface courante : ce sont ces états qui doivent être calculés en vue du calcul des flux. Ils sont de même type, sauf cas exceptionnel.

La direction de propagation du point de transition est prédite via le signe de sa vitesse estimée par une relation de saut associée à la discontinuité du gradient de flux :

$$w_{pred} = \frac{QD - QG}{AD - AG}$$

Nous supposons ici $w_{pred} > 0$. La couleur rouge est associée aux zones en charge et la couleur bleue aux zones à surface libre.

On résout trois problèmes de Riemann linéarisés partiels (dans lesquels les états servant à définir la matrice de flux peuvent faire partie des inconnues) dans les zones suivantes :

zone1 : $-\infty < \xi \stackrel{\text{def}}{=} \frac{x}{t} < 0$ (c'est à dire $x < 0$), **zone2** : $0 < \xi < w$, **zone3** : $w < \xi < +\infty$ Dans chaque zone, l'altitude et les paramètres géométriques et physiques sont constants, de plus nous ne prenons pas en compte le frottement. Il en résulte que seules les variables A et Q sont à prendre en compte. Les zones 1 et 2 sont connectées en écrivant la conservation de la charge. On cherche une solution satisfaisant la condition de [Song, 1983], de sorte que les caractéristiques de vitesses $\xi = \tilde{u}_d + \tilde{c}_d$ (surface libre) et $\xi = \tilde{u}_g + c_g$ (charge) sont hors domaine de validité et ne sont pas prises en compte : on parle « d'ondes fantômes ». Il en va a fortiori de même de la caractéristique de vitesse $\xi = \tilde{u}_d - \tilde{c}_d$ (surface libre).

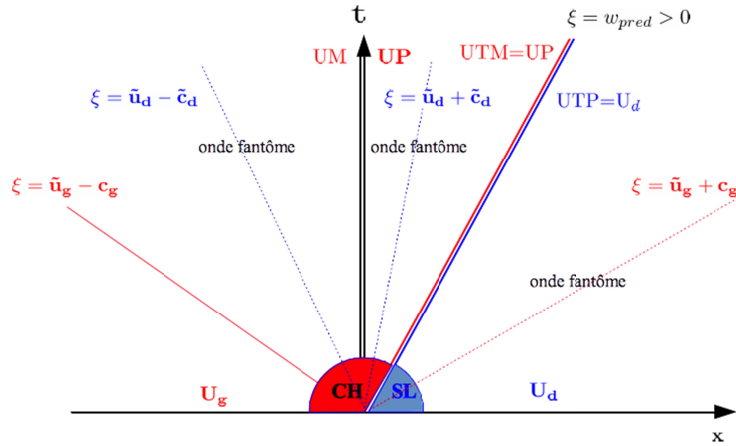


Figure 4 : Montée en charge à vitesse positive

On a donc $UTP = UD$, $UTM = UP$: les seules inconnues sont donc UM et UP . D'autre part la relation de saut associée à la conservation de la masse à travers l'interface $\xi = 0$ donne $QP - QM = \xi.(AP - AM) = 0$, donc $QP = QM$, quantité que nous notons Q .

Il reste finalement trois inconnues, AM , AP et Q et un système de trois équations non linéaires à résoudre :

- 1) saut à travers la caractéristique gauche (en charge)
- 2) conservation de la charge à l'interface (en charge)
- 3) saut à travers la ligne de transition (mixte) pour la masse et la quantité de mouvement à la même vitesse.

III.5 Conditions aux limites

Les conditions limites amont et aval (indépendamment) traitées par FlowMix sont le débit ou la hauteur d'eau ou la charge. Il est également possible de prendre en compte une vanne aval avec sa loi d'ouverture. La condition imposée est affectée à la maille fictive externe correspondante et n'est prise en compte que si l'écoulement est sous-critique, ce qui est supposé être toujours le cas si l'écoulement est en charge. Comme la méthode requiert la connaissance d'un état complet (A et Q), une équation est associée à la donnée manquante : elle consiste à écrire que le saut (masse ou quantité de mouvement) à travers la caractéristique sortante est nul (i.e. l'onde associée est fantôme). Un changement d'état amont ou aval éventuel est détecté et pris en compte en adaptant la méthode exposée en section III.4.

III.6 Mise à jour de l'état d'une maille. Cas d'une cheminée d'aération

Considérons une maille interne d'indice i , dont l'état est connu au temps n et noté E_i^n . La mise à jour de la variable E dans cette maille, c'est à dire la valeur de E_i^{n+1} est basée sur un principe résumé dans la figure ci-dessous. Il permet la prise en compte de mailles en charge et en dépression. Néanmoins le code prévoit de tenir compte de la présence d'une cheminée d'aération en interdisant les dépressions : dans ce cas seulement $A_i^{n+1} \leq S \implies E_i^{n+1} = 0$ (figure 5).

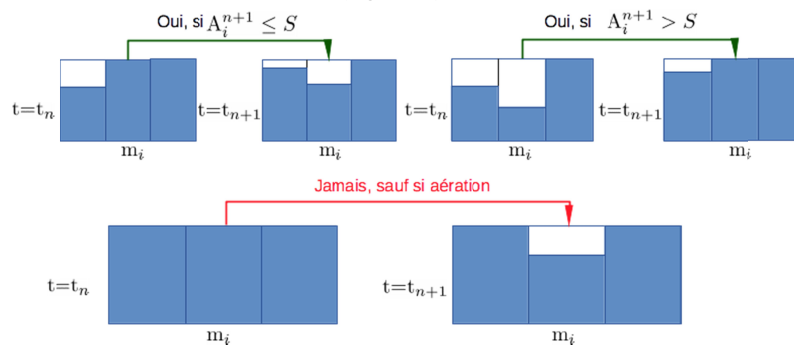


Figure 5: Illustration de la loi d'état

IV EXEMPLES D'APPLICATIONS INDUSTRIELLES

IV.1 Conduite de transfert A

Le but de cette étude était de calculer le débit transitant par une conduite en fonction du niveau d'eau existant en entrée de conduite, qui peut varier de 0 (conduite vide) jusqu'à 19 m lors d'un épisode pluvieux. Les résultats de Flowmix sont ensuite comparés à une autre méthode de calcul simplifiée, adaptée aux objectifs du projet.

Ses caractéristiques sont données à la figure 6. Cette conduite présente une cassure de pente au milieu avec une admission d'air possible.

Dimensions (m x m)	Longueur (m)	Section (m ²)	Pente (%)	Débit (m ³ /s)	Vitesse (m/s)
2 x 1.20	270	0.9 à 1.90	entre 0.2 et 4	de 2 à 19	de 2 à 10

Figure 6 : Caractéristiques de la conduite

Pour des raisons de stabilité de calcul, pour les débits supérieurs à 7 m³/s, un tronçon supplémentaire a été ajouté à l'aval de la conduite, représentant l'élargissement brusque situé en sortie de conduite. La géométrie de ce tronçon n'a pas d'impact sur la hauteur amont tant que l'écoulement est torrentiel avec une hauteur d'eau inférieure à la hauteur de la conduite dans ce tronçon, ce qui a été vérifié a posteriori.

Condition limite amont : hydrogramme de débit (débit < 7 m³/s) variant de 1m³/s au débit d'objectif, ou hauteur d'eau imposée (débit > 7 m³/s), variant de 1m à la hauteur d'objectif.

Condition limite aval : hauteur d'eau fixe de 1 m est imposée pour tous les débits. Il est à noter que les écoulements étaient toujours torrentiels en amont immédiat de la sortie (forte pente et surface libre), cette condition limite aval n'influence donc pas les résultats.

Pour des débits inférieurs à 4.5 m³/s, FlowMix détermine un écoulement à surface libre avec un passage en torrentiel en milieu de conduite. Pour des débits de 4.5 à 12 m³/s, FlowMix met en évidence un écoulement en charge jusqu'au milieu puis un écoulement à surface libre et en régime torrentiel (voir figure 7). Enfin, pour des débits supérieurs à 12 m³/s, FlowMix calcule un écoulement en charge tout le long de la conduite.

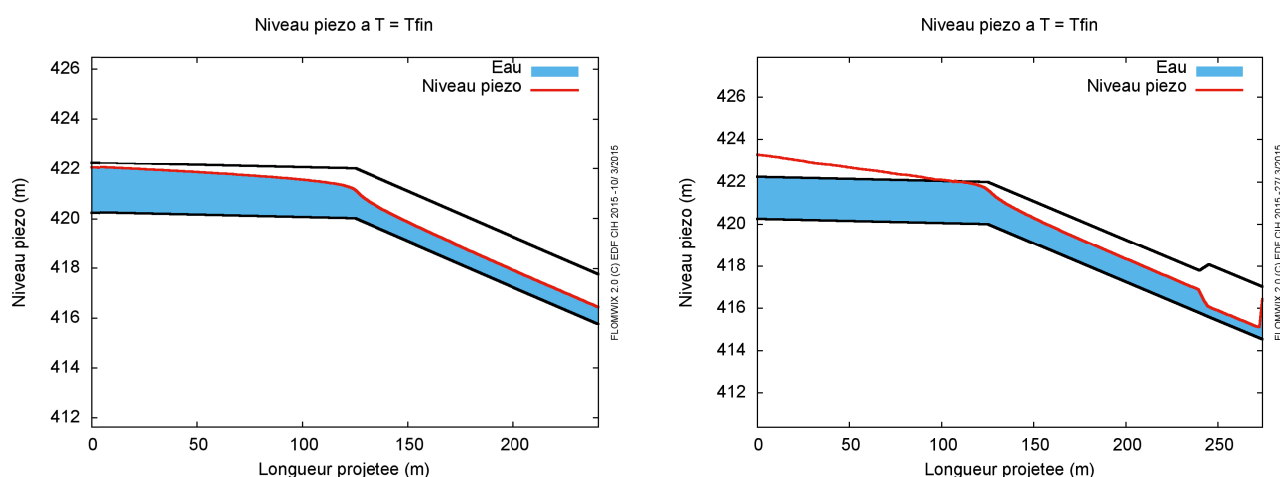


Figure 7 : Conduite A : niveau piézométrique en fonction de la longueur projetée pour des débits de 4 m³/s (à gauche) et 7 m³/s (à droite)

IV.2 Galerie de transit sédimentaire de Rizzanese

Cette galerie fait partie de l'aménagement de Rizzanese, en Corse, mis en service par EDF en 2013. Elle permet le transit des sédiments entre la retenue et l'aval du barrage. Ses caractéristiques sont

données à la figure 8.

Un modèle réduit de la galerie au 1/30^e a été confié au Laboratoire Hydraulique des Constructions de l'Université de Liège (ULg), dans le but de vérifier son fonctionnement hydraulique, en particulier pour des cotes basses, pour lesquelles apparaissent des phénomènes de vortex, d'entraînement d'air et d'écoulements mixtes [Epicum, 2008].

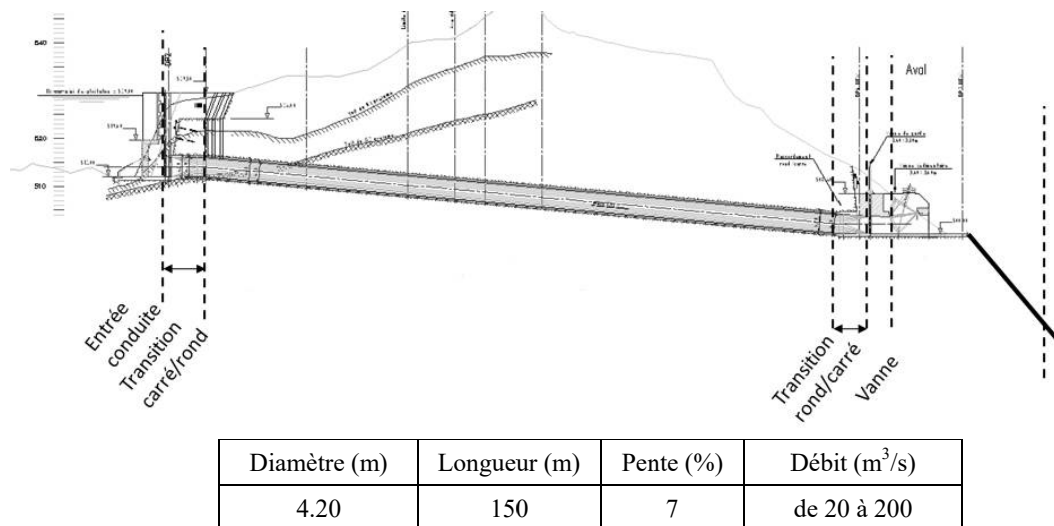


Figure 8 : Schéma et caractéristiques de la galerie

Les vitesses d'écoulement maximales observées sur modèle sont de l'ordre de 20 m/s pour les écoulements en charge et de l'ordre de 15 m/s pour les écoulements à surface libre.

Des transitions carré / rond en amont et en aval de la galerie assurent le raccordement avec les sections carrés et rectangulaires où se trouvent la vanne batardeau amont et la vanne segment aval. Des reniflards sont prévus en amont de la galerie.

Le modèle est alimenté en amont par un débit injecté dans un bac d'alimentation tranquillisateur. Le niveau dans la retenue s'établit naturellement en fonction des capacités d'évacuation de la galerie.

Le modèle a été équipé de deux débitmètres électromagnétiques placés sur la conduite d'alimentation amont, et de 9 prises de mesure piézométriques positionnées sur le fil d'eau de la galerie pour mesurer les niveaux d'eau pour les écoulements à surface libre.

Une comparaison de ces mesures avec les calculs FlowMix a été faite avec les caractéristiques du modèle réduit, et a donné des résultats très satisfaisants.

Pour les faibles niveaux de retenue, les écoulements sont à surface libre sur toute la longueur de l'ouvrage (voir figure 9).

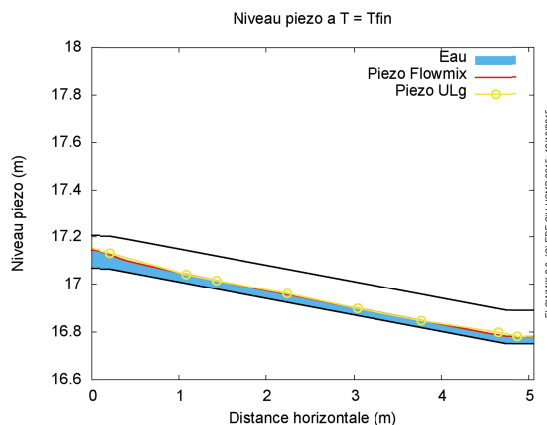


Figure 9 : Ecoulement à surface libre sur le modèle (65 m³/s) (à gauche) et niveau piézométrique en fonction de

la distance horizontale, avec comparaison entre FlowMix et les mesures relevées sur le modèle (à droite)

Lorsque le niveau de retenue augmente, les écoulements se mettent en charge en amont de la galerie, avec apparition d'un écoulement mixte eau-air, l'air étant fourni par les reniflards.

Lorsque la vanne est partiellement fermée, les écoulements sont en charge en aval de la galerie et un ressaut apparaît dans l'ouvrage (voir figure 10).

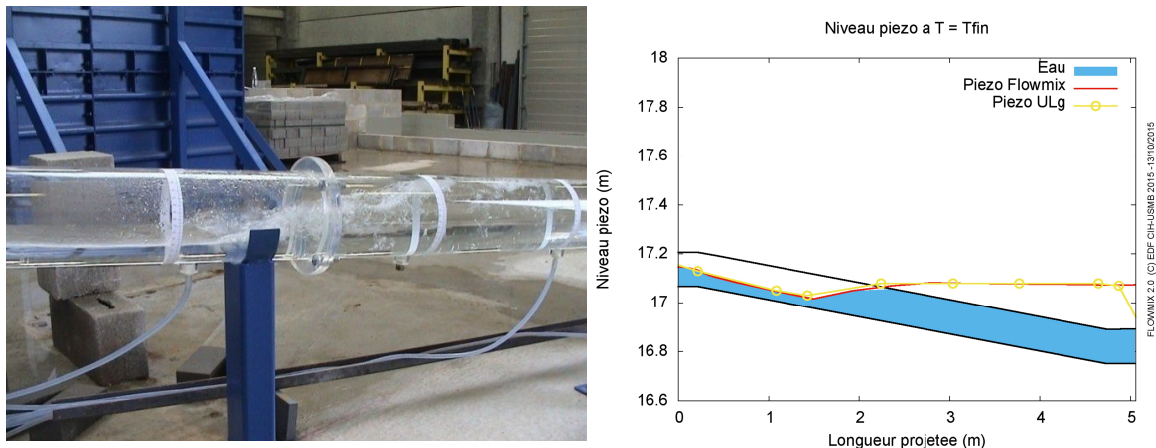


Figure 10 : Ecoulement mixte sur le modèle (25 m³/s, vanne fermée à 20%) (à gauche) et niveau piézométrique en fonction de la distance horizontale, avec comparaison entre FlowMix et les mesures sur modèle (à droite)

IV.3 Conduite de drainage de la Coche

La fonction de la conduite de drainage de la Coche est de drainer les eaux provenant des galeries de l'aménagement, en période d'arrêt de la centrale et de vidange complète du bassin supérieur. D'une capacité de 800 l/s, la conduite de drainage permet d'évacuer les apports provenant des fuites des galeries et des précipitations sur la cuvette et sur le bassin versant. Ses caractéristiques sont données à la figure 11.

Diamètre (mm)	Longueur (m)	Dénivelée (m)	Pentes maximales (%)	Débit (l/s)	Vitesse (m/s)
400	1400	530	70 à 120	800	de 10 à 19

Figure 11 : Caractéristiques de la conduite

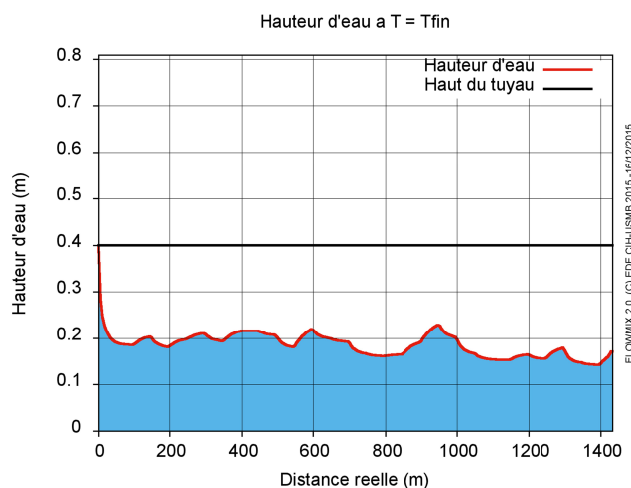
Une nouvelle conduite a été mise en place en 2014 - 2015 et le logiciel FlowMix a été utilisé pour dimensionner cette conduite, pour s'assurer que l'écoulement restait bien à surface libre tout le long de la conduite, qui est l'hypothèse choisie pour le fonctionnement de cette conduite. FlowMix a permis de faire les calculs souhaités car les équations de St Venant programmées dans le code n'utilisent pas l'approximation d'une faible pente (figure 12).



Figure 12 : Nouvelle conduite enterrée

Le critère retenu était d'avoir une hauteur d'eau « simulée » inférieure à 60% du diamètre de la conduite, ce qui a été vérifié par les calculs (figure 13).

Les essais réalisés en août 2015 ont été menés en augmentant progressivement le débit de 200 à 750 l/s. Pour ces débits toutes les ventouses aspiraient de l'air, sauf la ventouse V4, située sur une portion de conduite quasi-plane ($x=960$ m), où il a été observé des rejets d'eau intermittents, mais sans augmentation de pression. Ces observations ont montré que le fonctionnement de la conduite était tout-à-fait satisfaisant, même si Flowmix ne modélise pas l'écoulement diphasique se produisant dans la conduite.

**Figure 13** : Hauteur d'eau en fonction de la distance réelle – calcul FlowMix

V CONCLUSION

Il reste à EDF à qualifier le code, c'est-à-dire à l'utiliser au travers des études de dimensionnement, et à le comparer avec des mesures réalisées in situ, pour pouvoir à terme déterminer son domaine d'application effectif et les incertitudes à associer aux résultats de calcul.

L'utilisation de FlowMix pour des études en régimes transitoires est possible mais reste encore à tester.

La simulation de phénomènes physiques particuliers est en cours de développement : entraînement d'air sur une conduite à forte pente, énergie consommée par un ressaut.

VI RÉFÉRENCES

- Botchorishvili R., Perthame B., et Vasseur A. (2003). *Equilibrium schemes for scalar conservation laws with stiff sources*. Math. Comput., 72 (241) : 131–157.
- Bourdarias C., Ersoy M., et Gerbi S. (2014). *Unsteady mixed flows in non uniform closed water pipes : a full kinetic approach*. Numerische Mathematik, 128 (2) : 217–263.
- Ercicum S. (2008). *Rizzanèse - Projet de vanne de transit sédimentaire - Réalisation d'un modèle réduit* Etude réalisée pour Electricité de France – Centre d'Ingénierie Hydraulique (EDF-CIH)
- Gallouet T., Hérard J.M., et Seguin N. (2003). *Some approximate Godunov schemes to compute shallow-water equations with topography*. Comput. Fluids, 32 : 479–513.
- Greenberg J.M. et LeRoux A.Y. (1996). *A well balanced scheme for the numerical processing of source terms in hyperbolic equation*. SIAM J. Numer. Anal., pages 1–16.
- Perthame B. et Simeoni C. (2001). *A kinetic scheme for the Saint-Venant system with a source term*. Calcolo, 38(4) : 201–231.
- Song C.S.S., Cardle J.A., et K.S. Leung K.S. (1983). *Transient mixed-flow models for storm sewers*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, pages 1487–1503.