Prix Paul Caseau 2018

Charles Demay[1,2]

Modélisation et simulation d'écoulements transitoires diphasiques eau-air dans les circuits hydrauliques

Encadrement : Christian Bourdarias[2], Benoît de Laage de Meux[1], Stéphane Gerbi[2], Jean-Marc Hérard[1]

[1]EDF R&D Chatou, dpt. MFEE
[2]Université Savoie Mont Blanc, LAMA

EDF | INSTITUT DE FRANCE | INSTITUT DE FRANCE Académie des sciences

SCIENCE & ENSEIGNEMENT

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

Plan

Contexte industriel

- Certains circuits hydrauliques assurent des fonctions de sûreté au sein des centrales nucléaires du parc EDF

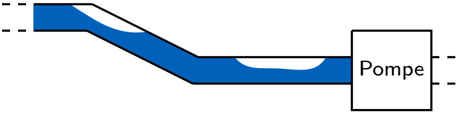
Écoulement en charge

Contexte industriel

- Certains circuits hydrauliques assurent des fonctions de sûreté au sein des centrales nucléaires du parc EDF

Écoulement en charge

- La présence d'air non désirée dans ces circuits soulève des problématiques fortes :
  - Risque de réduction du débit
  - Risque de non-opérabilité des systèmes de pompage

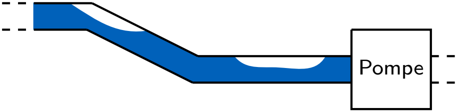


Contexte industriel

- Certains circuits hydrauliques assurent des fonctions de sûreté au sein des centrales nucléaires du parc EDF

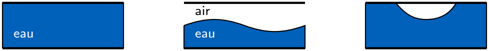
Écoulement en charge

- La présence d'air non désirée dans ces circuits soulève des problématiques fortes :
  - Risque de réduction du débit
  - Risque de non-opérabilité des systèmes de pompage

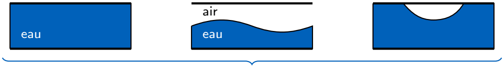


- Problématiques connexes
  - Centrales hydrauliques : pressurisation/dépressurisation violente dans les conduites
  - Réseaux d'assainissement : évacuation de poches d'air sous forme de geyser

Contexte scientifique

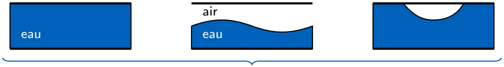


Contexte scientifique

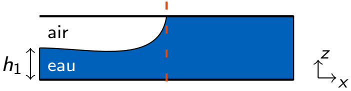


Modélisation 1D des écoulements mixtes

Contexte scientifique



Modélisation 1D des écoulements mixtes



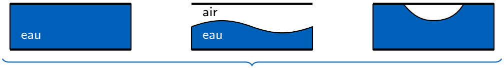
Régime stratifié

- ⋆ Écoulement diphasique eau-air
- ⋆ Ondes gravitaires lentes
  (célérité $\sim \sqrt{gh_1} \lesssim 10\, m.s^{-1}$)

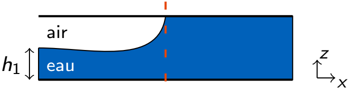
Régime en charge

- ⋆ Écoulement monophasique en eau
- ⋆ Ondes acoustiques rapides
  (célérité $\sim 1500 m.s^{-1} \gg \sqrt{gh_1}$)

Contexte scientifique



Modélisation 1D des écoulements mixtes



Régime stratifié

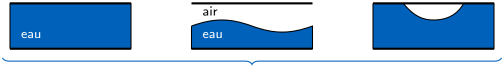
- ⋆ Écoulement diphasique eau-air
- ⋆ Ondes gravitaires lentes (célérité $\sim \sqrt{gh_1} \lesssim 10\ m.s^{-1}$)

Régime en charge

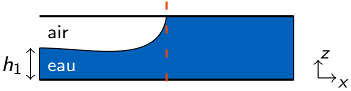
- ⋆ Écoulement monophasique en eau
- ⋆ Ondes acoustiques rapides (célérité $\sim 1500 m.s^{-1} \gg \sqrt{gh_1}$)

▶ **Besoin d'un modèle diphasique 1D d'écoulements mixtes exprimé dans la littérature** ◀

Contexte scientifique



Modélisation 1D des écoulements mixtes



Régime stratifié

- ⋆ Écoulement diphasique eau-air
- ⋆ Ondes gravitaires lentes (célérité $\sim \sqrt{gh_1} \lesssim 10\ m.s^{-1}$)

Régime en charge

- ⋆ Écoulement monophasique en eau
- ⋆ Ondes acoustiques rapides (célérité $\sim 1500 m.s^{-1} \gg \sqrt{gh_1}$)

▶ **Besoin d'un modèle diphasique 1D d'écoulements mixtes exprimé dans la littérature** ◀

Travaux de thèse

I. Modélisation : développement et analyse d'un modèle diphasique d'écoulements mixtes

II. Discrétisation : développement et analyse d'une méthode numérique pour simuler ce modèle

III. Validation de l'approche générale sur des cas tests représentatifs

Modèle bicouche compressible [Demay & Hérard, CMAT 2017]

- **Intégration sur la hauteur** des équations d'**Euler isentropiques** pour chaque phase

Système à 5 équations et 5 inconnues

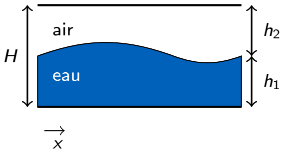
$$\begin{cases} \partial_t \mathbf{W} + \partial_x F(\mathbf{W}) + B(\mathbf{W})\partial_x \mathbf{W} = S(\mathbf{W}), \\ \mathbf{W} = (h_1, \rho_1, \rho_2, u_1, u_2). \end{cases}$$

⋆ Transport de l'interface (1 équation)

⋆ Conservation de la masse (2 équations)

⋆ Conservation de la quantité de mouvement (2 équations)

Densité : ρ_k, Pression : $P_k(\rho_k)$, Vitesse : u_k



Modèle bicouche compressible

[Demay & Hérard, CMAT 2017]

- **Intégration sur la hauteur** des équations d'**Euler isentropiques** pour chaque phase

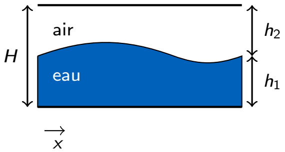
Système à 5 équations et 5 inconnues

$$\begin{cases} \partial_t \mathbf{W} + \partial_x F(\mathbf{W}) + B(\mathbf{W})\partial_x \mathbf{W} = S(\mathbf{W}), \\ \mathbf{W} = (h_1, \rho_1, \rho_2, u_1, u_2). \end{cases}$$

⋆ Transport de l'interface (1 équation)

⋆ Conservation de la masse (2 équations)

⋆ Conservation de la quantité de mouvement (2 équations)



Densité : ρ_k, Pression : $P_k(\rho_k)$, Vitesse : u_k

- **Contrainte hydrostatique** et **inégalité d'entropie** pour déterminer les lois de fermeture

Modèle bicouche compressible [Demay & Hérard, CMAT 2017]

- **Intégration sur la hauteur** des équations d'**Euler isentropiques** pour chaque phase

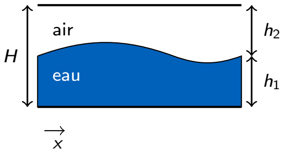
Système à 5 équations et 5 inconnues

$$\begin{cases} \partial_t \mathbf{W} + \partial_x F(\mathbf{W}) + B(\mathbf{W})\partial_x \mathbf{W} = S(\mathbf{W}), \\ \mathbf{W} = (h_1, \rho_1, \rho_2, u_1, u_2). \end{cases}$$

⋆ Transport de l'interface (1 équation)

⋆ Conservation de la masse (2 équations)

⋆ Conservation de la quantité de mouvement (2 équations)



Densité : ρ_k, Pression : $P_k(\rho_k)$, Vitesse : u_k

- **Contrainte hydrostatique** et **inégalité d'entropie** pour déterminer les lois de fermeture
- **Description diphasique unifiée d'un écoulement mixte**

✓ Régime stratifié : consistance avec les équations de Saint-Venant

✓ Régime en charge (ou sec) : consistance avec les équations d'Euler compressible

Modèle bicouche compressible [Demay & Hérard, CMAT 2017]

- **Intégration sur la hauteur** des équations d'**Euler isentropiques** pour chaque phase

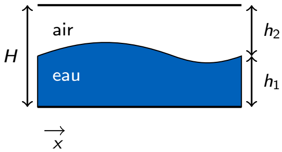
Système à 5 équations et 5 inconnues

$$\begin{cases} \partial_t \mathbf{W} + \partial_x F(\mathbf{W}) + B(\mathbf{W})\partial_x \mathbf{W} = S(\mathbf{W}), \\ \mathbf{W} = (h_1, \rho_1, \rho_2, u_1, u_2). \end{cases}$$

⋆ Transport de l'interface (1 équation)

⋆ Conservation de la masse (2 équations)

⋆ Conservation de la quantité de mouvement (2 équations)



Densité : ρ_k, Pression : $P_k(\rho_k)$, Vitesse : u_k

- **Contrainte hydrostatique** et **inégalité d'entropie** pour déterminer les lois de fermeture
- **Description diphasique unifiée d'un écoulement mixte**

✓ Régime stratifié : consistance avec les équations de Saint-Venant

✓ Régime en charge (ou sec) : consistance avec les équations d'Euler compressible

- **Propriétés mathématiques du modèle**

✓ Hyperbolicité

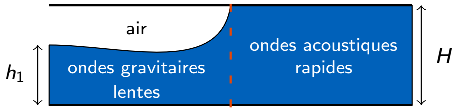
✓ Positivité des hauteurs et des densités

✓ Inégalité d'entropie

✓ Unicité des relations de saut

Simulation du modèle

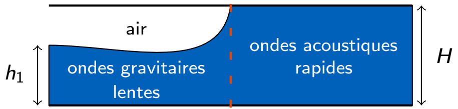
[Demay et al., ESAIM: M2AN 2019]



⚠ **Écoulement mixte**
Phases évanescentes $(h_k \to 0)$
Système complexe

Simulation du modèle

[Demay et al., ESAIM: M2AN 2019]



⚠ **Écoulement mixte**
Phases évanescentes ($h_k \to 0$)
Système complexe

- **Séparation du modèle** en 3 sous-systèmes

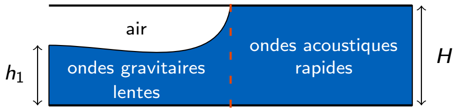
1. Dynamique lente 2. Dynamique rapide 3. Relaxation en vitesse

$$\partial_t \mathbf{W} + \partial_x F_{lent}(\mathbf{W}) + B_{lent}(\mathbf{W})\partial_x \mathbf{W} + \partial_x F_{rapide}(\mathbf{W}) + B_{rapide}(\mathbf{W})\partial_x \mathbf{W} = S_{lent}(\mathbf{W}) + S_{relax.}(\mathbf{W})$$

▶ **Traitement numérique adapté à chaque dynamique** ◀
(méthode de Volumes Finis implicite-explicite)

Simulation du modèle

[Demay et al., ESAIM: M2AN 2019]



Écoulement mixte
Phases évanescentes $(h_k \to 0)$
Système complexe

- **Séparation du modèle** en 3 sous-systèmes

1. Dynamique lente 2. Dynamique rapide 3. Relaxation en vitesse

$$\partial_t \mathbf{W} + \partial_x F_{lent}(\mathbf{W}) + B_{lent}(\mathbf{W})\partial_x \mathbf{W} + \partial_x F_{rapide}(\mathbf{W}) + B_{rapide}(\mathbf{W})\partial_x \mathbf{W} = S_{lent}(\mathbf{W}) + S_{relax.}(\mathbf{W})$$

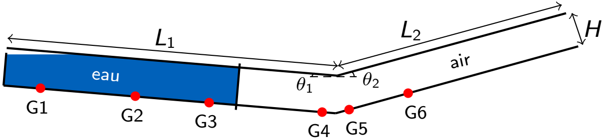
▶ **Traitement numérique adapté à chaque dynamique** ◀
(méthode de Volumes Finis implicite-explicite)

- **Propriétés du schéma numérique**

✓ Positivité des hauteurs et des densités
✓ Résolution stable et précise des ondes acoustiques et gravitaires
✓ Robustesse en présence de phases évanescentes $(h_k \to 0)$

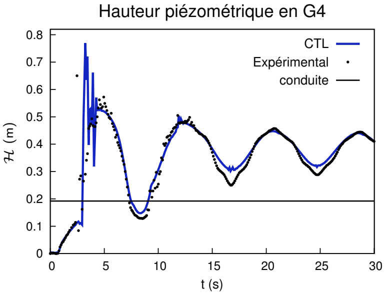
Cas test expérimental : Aureli et al. (2015)

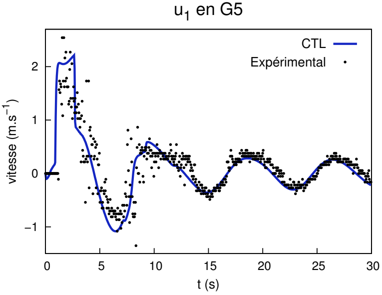
- Conditions initiales :



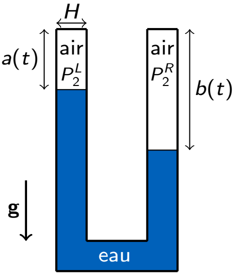
$L_1 = 7\ m$
$L_2 = 5.12\ m$
$H = 0.192\ m$
$\theta_1 = -4.8^o$
$\theta_2 = 15.48^o$
Gk: points de mesure

- Résultats de simulation avec le modèle CTL (300 cellules) :



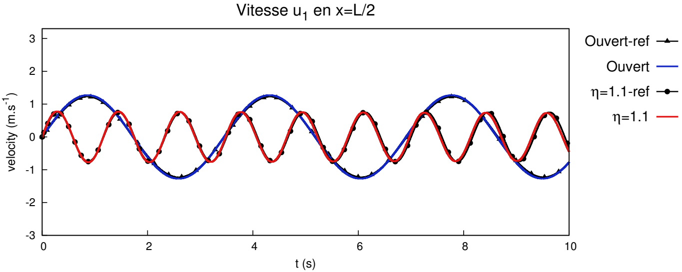


Cas test analytique : tube en U



- $H = 0.1\,m,\ L = 10\,m$
- Conditions initiales :
  - Vitesses nulles
  - $a_0 = \frac{b_0}{2} = 3\,m$
  - $P^L_{2,0} = \eta P^R_{2,0}$
- Construction d'une solution de référence

Influence du niveau de pressurisation des poches ? Conduite ouverte VS $\mathbf{P^L_{2,0}} = \eta \mathbf{P^R_{2,0}}$



Conclusion et perspectives

- **Développement d'un modèle 1D diphasique pour les écoulements mixtes en conduite**
  - Description diphasique unifiée des différents régimes
  - Propriétés mathématiques notables du modèle
  - Méthode numérique robuste et efficace dans les différents régimes

- **Validation de l'approche sur des solutions de référence et des données expérimentales**
  - Dynamique monophasique (état de l'art)
  - Dynamique diphasique (poches d'air piégées)

- **Perspectives**
  - Utilisation du modèle sur des configurations industrielles (nucléaire, hydraulique, industrie pétrolière)
  - Extensions du modèle (écoulements eau-vapeur, autres éléments du circuit)

Merci pour votre attention !

Références :

- A compressible two-layer model for transient gas-liquid flows in pipes. C. Demay, J.-M. Hérard, *Continuum Mech. Therm.*, **29**: 385–410, 2017.
- Numerical simulation of a compressible two-layer model: a first attempt with an implicit-explicit splitting scheme, C. Demay, C. Bourdarias, B. de Laage de Meux, S. Gerbi, J.-M. Hérard, *J. Comput. Appl. Math.*, **346**: 357–377, 2019.
- A splitting method adapted to the simulation of mixed flows in pipes with a compressible two-layer model, C. Demay, C. Bourdarias, B. de Laage de Meux, S. Gerbi, J.-M. Hérard, *ESAIM: M2AN*, *in press*, 2019.