

Laboratoire des sciences de l'ingénieur,
de l'informatique et de l'imagerie

Utilisation de la Mécanique des Fluides Numérique pour la simulation du fonctionnement des décanteurs secondaires

Intégration du phénomène de compression

20 FEVRIER 2020 – Congrès du GRUTTEE

Maria Elena VALLE MEDINA, Pierre FRANCOIS, Julien LAURENT

Equipe Mécanique des Fluides – ENGES/Unistra



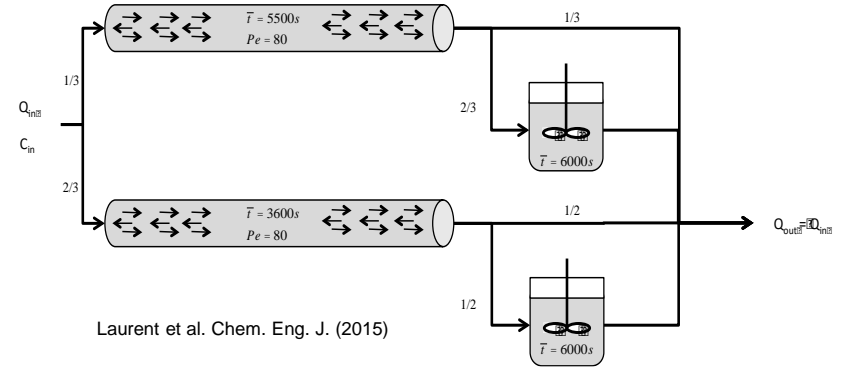
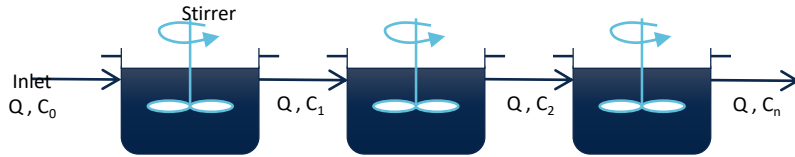
Introduction

Modèles hydrodynamiques, CFD,
clarificateurs secondaires

*“If we know what is happening **within** the vessel, then we are able to predict the behavior of the vessel as a reactor. Though fine in principle, the attendant complexities make it impractical to use this approach.”*

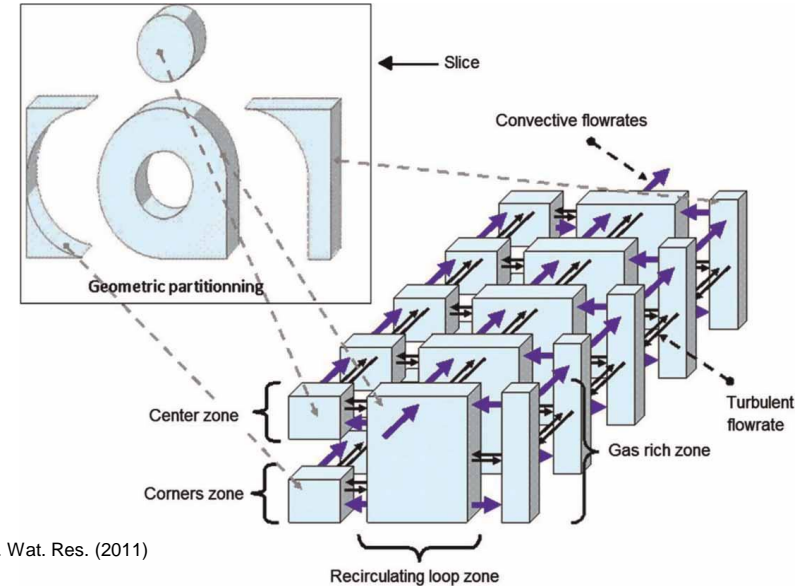
Octave Levenspiel (1972)

Introduction



Laurent et al. Chem. Eng. J. (2015)

Rehman et al. WST (2017)



Le Moullec et al. Wat. Res. (2011)

- **Mécanique des Fluides Numérique (“Computational fluid dynamics” CFD)**

- analyse numérique de problèmes impliquant des écoulements de fluides.

- **Objectif :**

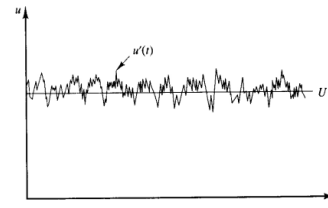
- simulation du mouvement du fluide en interaction avec des conditions définies aux limites (surfaces)

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0$$

Continuité

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \right) + S_{Mi}$$

Quantité de mouvement



Turbulence

Versteeg et Malalasekera (2007)

Transport solide

Approches
multiphasiques (Euler-
Euler, Lagrange...)

Couplage / cinétique

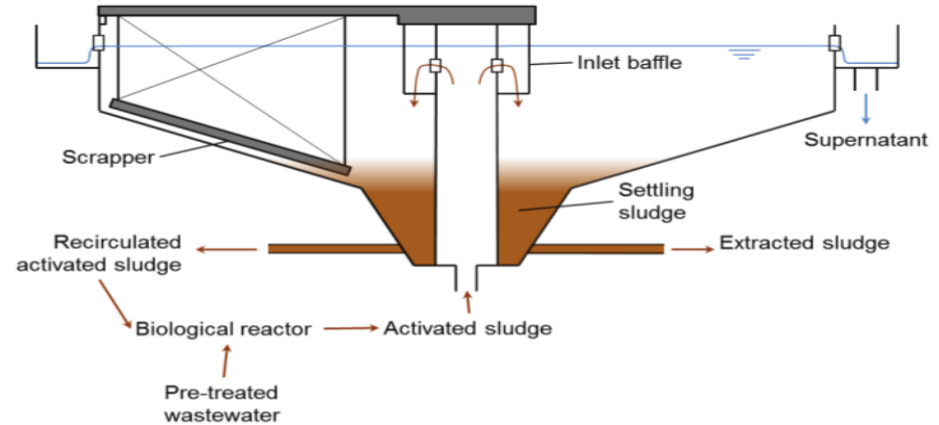
Transport scalaire,
modèle cinétique
(ASM...)

Clarificateurs secondaires

Fonctions :

- Séparation boues/eau traitée = clarification
- Epaississement
- Stockage

Impact de l'écoulement /
transport solide
Impact des boues sur
l'écoulement





Décantation discrète

- Distribution de vitesses
- Fonction des propriétés individuelles des particules



Décantation de zone

- Décantation en masse
- Vitesse unique
- Fonction de la concentration



Compression

- Réseau compressible de particules s'épaississant sous l'effet de leur propre poids
- Contrainte solide

Description du modèle

Transport solide, mélange, OpenFOAM

Modèle CFD de la décantation des boues activées

Boue activée : deux phases avec couplage fort (viscosité, densité...)
Approche choisie : mélange « **mixture approach** » d'après Brennan (2001):

OpenFOAM®

Continuité

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m)$$

Quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho_m \vec{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla P_m + \nabla \cdot (\mathcal{T} + \mathcal{T}^t + \mathcal{T}_{Dm}) + \rho_m \vec{g} + \vec{M}_m$$

Transport solide

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_d}{\partial t} = & -\nabla \cdot (\alpha_d \vec{v}_m) \\ & -\nabla \cdot \left(\frac{\alpha_d \rho_c}{\rho_m} \vec{v}_{dj} \right) \\ & + \nabla \cdot (d_{comp} \nabla \alpha_d) \\ & + \nabla \cdot (\Gamma \nabla \alpha_d) \end{aligned}$$

α_d = Fraction volumique de la boue

\vec{v}_m = Vitesse moyenne du mélange

\vec{v}_{dj} = Vitesse de glissement = Vitesse de sédimentation freinée

Valle and Laurent, (2020)

Expressions pour la vitesse de sédimentation

Code existant :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \vec{v}_{dj} = v_0 e^{-r_v X} & \text{Vesilind (1968)} \\ \vec{v}_{dj} = \max \left(0, \min \left(v_{0,\max}, v_0 \left(e^{(-r_h \cdot (X - X_{\min}))} - e^{(-r_p \cdot (X - X_{\min}))} \right) \right) \right) & \text{Takacs (1991)} \end{array} \right.$$

Ajout de termes et fonctions supplémentaires :

$$\vec{v}_{dj}(X) = \frac{v_0}{1 + (X/\bar{X})^q}$$

Diehl (2014) **Décantation freinée**

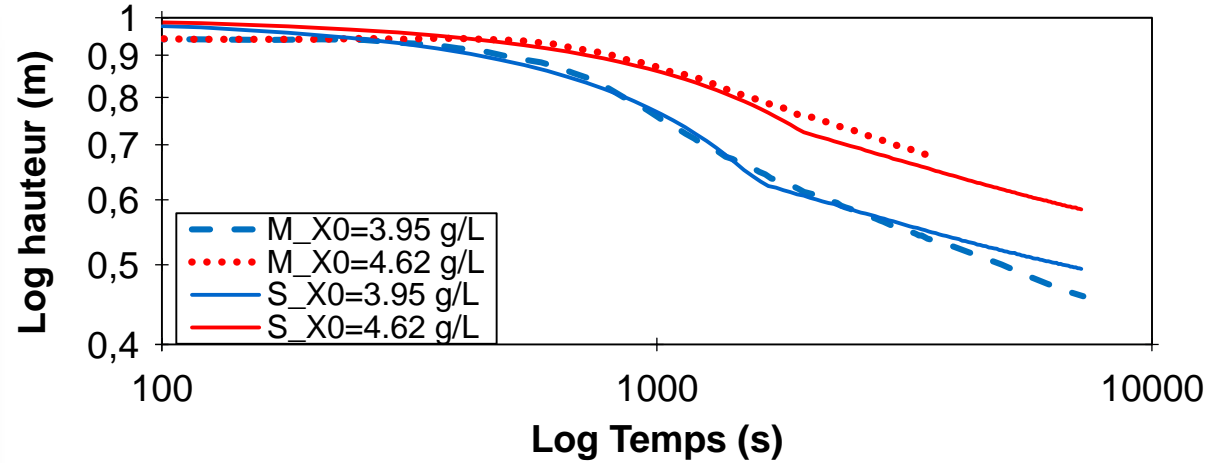
$$d_{comp} = \begin{cases} 0, & \text{for } 0 \leq X \leq X_{crit} \\ \frac{\rho_s}{g\Delta\rho} v_{hs}(X) \sigma'_e(X), & \text{for } X \geq X_{crit} \end{cases}$$

Bürger (2000) **Compression**

Contrainte solide (**De Clercq, 2008**) :

$$\sigma_e(\alpha_d) = \begin{cases} 0 & \text{for } 0 \leq \alpha_d < X_{crit}/\rho_d \\ \lambda(\alpha_d - \frac{X_{crit}}{\rho_d}) & \text{for } \alpha_d \geq X_{crit}/\rho_d \end{cases}$$

Calage / Validation du modèle en configuration 1D



Parameter	Estimated Value	Confidence intervals
$v_0(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.0046	$\pm 1.28 \cdot 10^{-4}$
$r_h(\text{m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1})$	0.7573	$\pm 5.19 \cdot 10^{-3}$
$\lambda(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	0.05	$\pm 8.76 \cdot 10^{-4}$
$X_{\text{crit}}(\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3})$	5.51	± 0.045

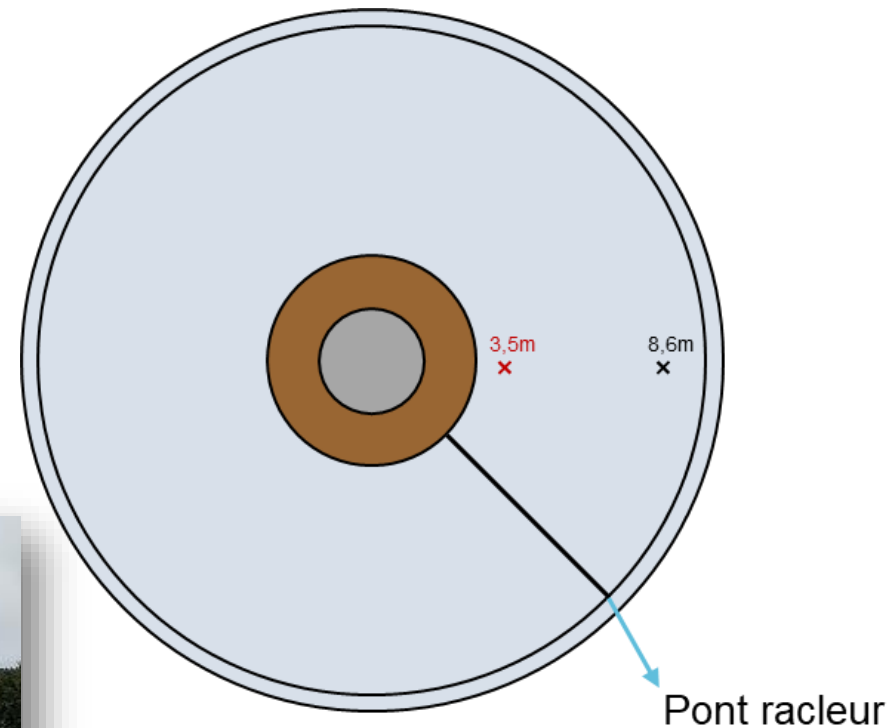
Etude sur site réel

STEU d'Achenheim (67)



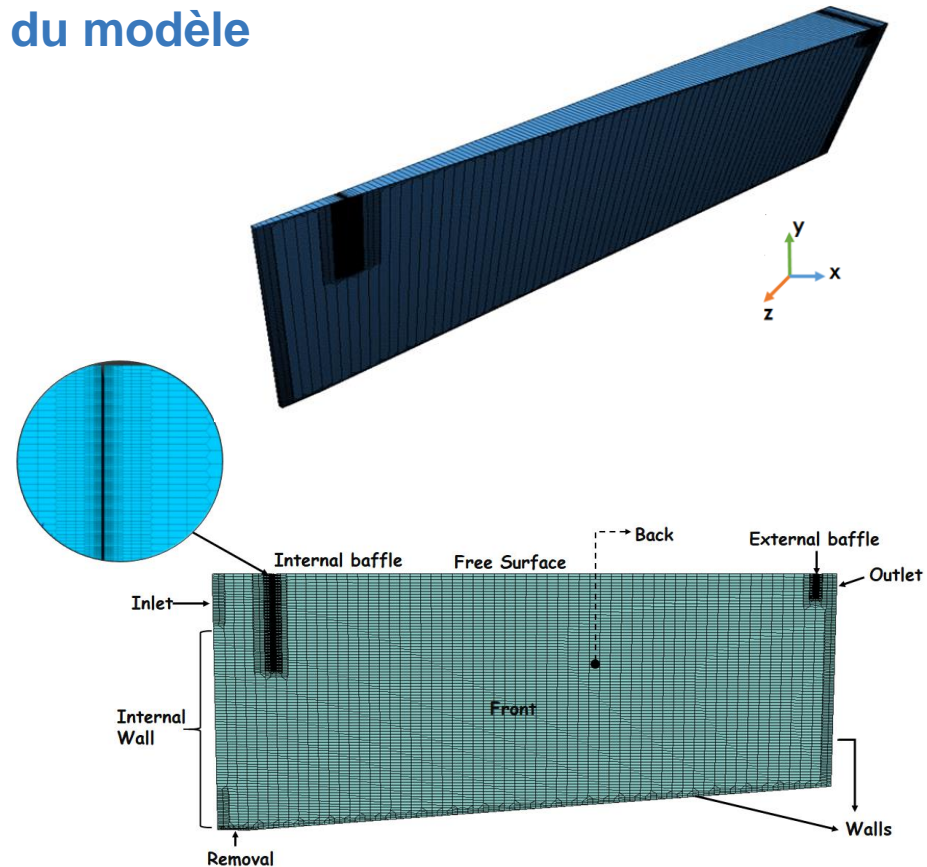
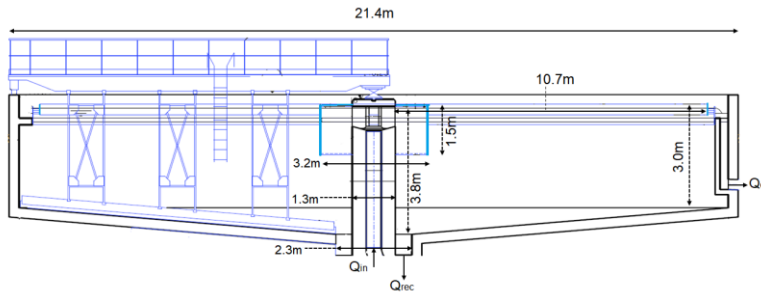
Validation sur clarificateur réel

- Mesures ponctuelles à différentes positions radiales
- 20 à 30 minutes d'enregistrement à chaque point
- 6 avril 2018 (température de l'eau = 10,8°C)
- Mesures par transducteur ultrasonore (François, 2015)

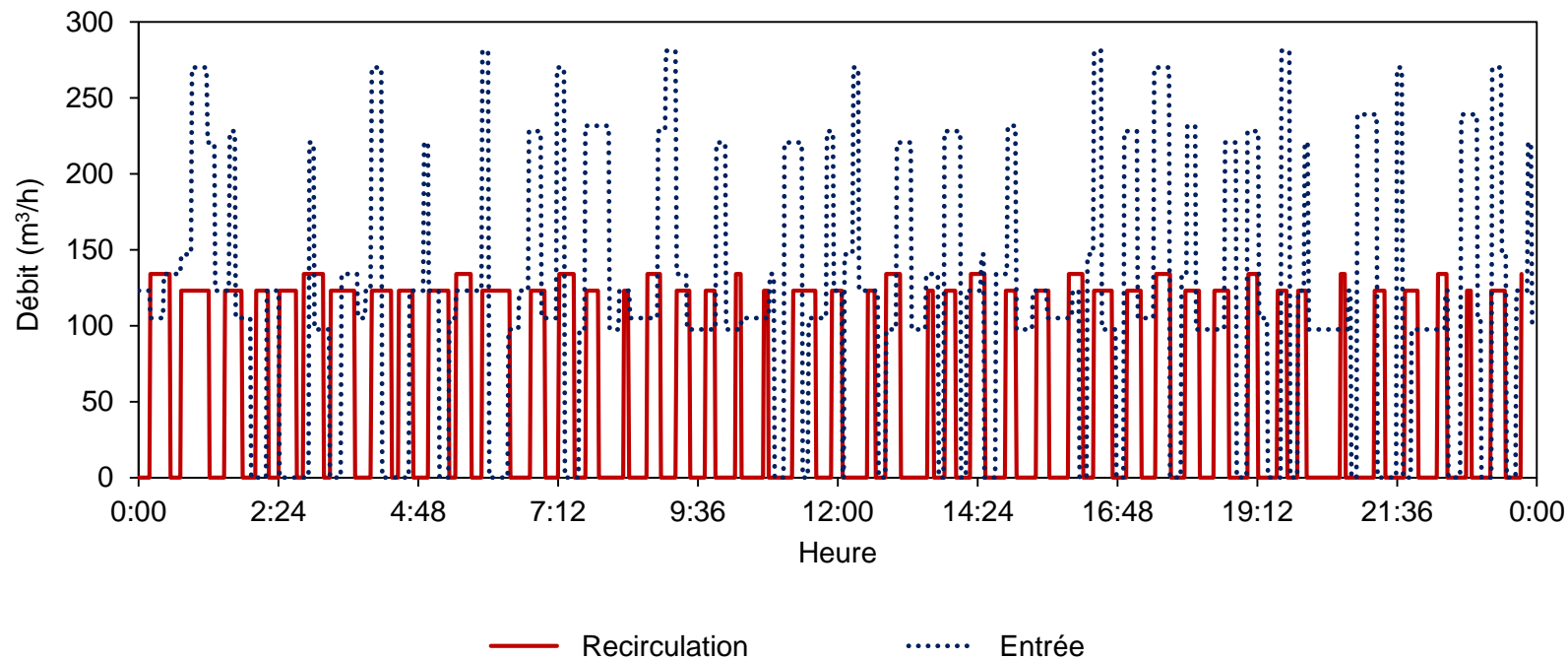


Géométrie / maillage / paramètres du modèle

- Modèle 2D axi-symétrique
- Modèle rhéologique : pas de contrainte seuil, viscosité plastique = $f(\text{MES})$
- Turbulence : $k-\varepsilon$ + flottabilité (Brennan, 2001)
- Sédimentation (Vesilind + Compression)
- Masse volumique de la boue = 1010 g/L
- Nombre de mailles : 7970

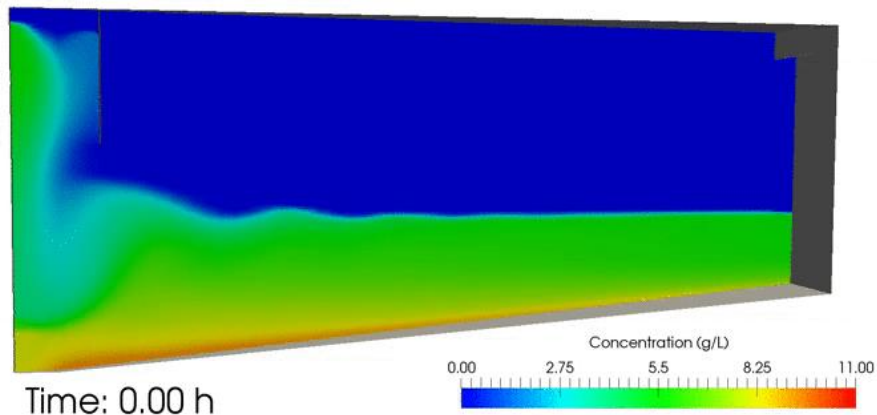


Débits d'entrée et recirculation

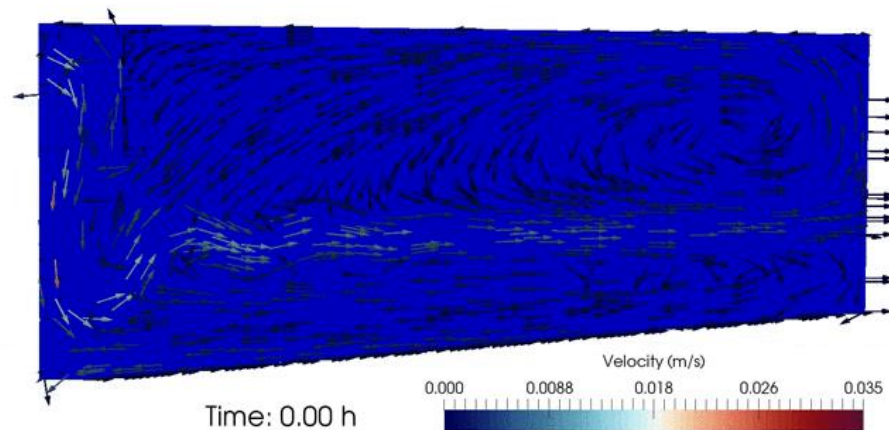


Résultats simulation dynamique

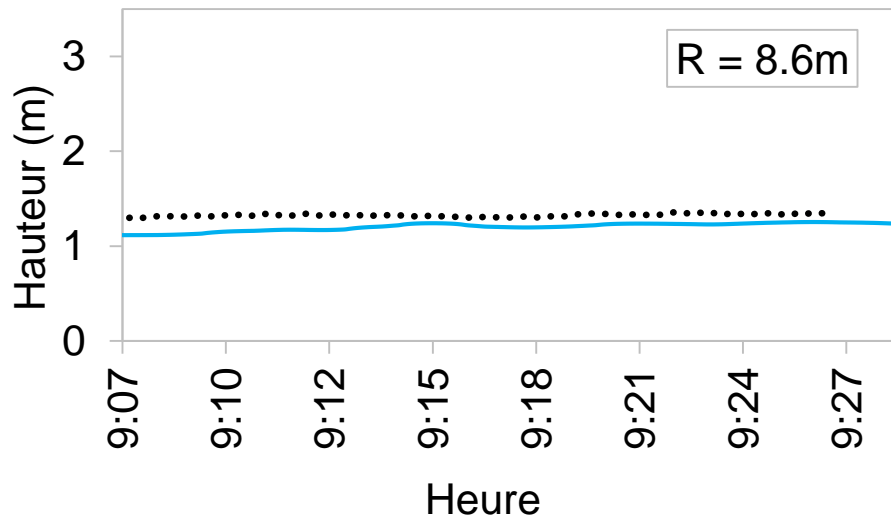
Contours de concentration



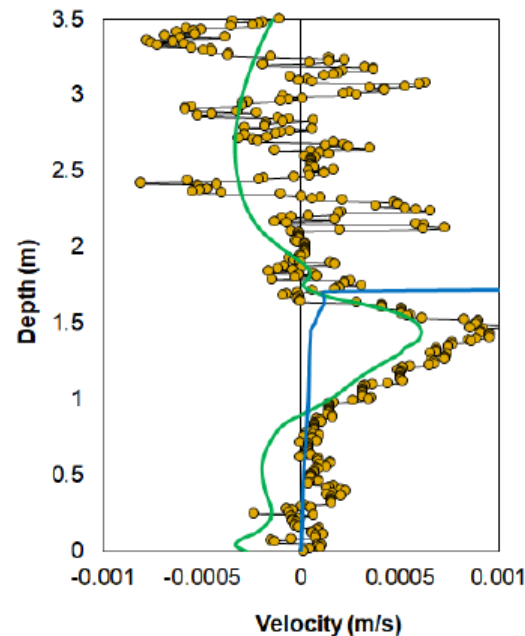
Champs de vitesse



Comparaison données expérimentales



Profils de vitesse à 9:07



— Measured — Simulated Mixture Velocity — Simulated Settling Velocity

Conclusions & Perspectives

Conclusions

- **Développement d'un solveur CFD pour la sédimentation**
 - Décantation freinée + compression
 - OpenFOAM (logiciel open-source)
 - Modulaire
 - Utilisable en 1D, 2D, 3D
- **Calage du modèle**
 - Problématiques d'identification (similaire aux modèles 1D) : concentration critique
- **Validation expérimentale sur site réel**
 - Mesures ponctuelles (20-30 min) : profils de vitesse, hauteur voile de boues
 - Mesures continues (48h) (non montré ici)

Développement du code / modèle :

- Intégration de plusieurs classes de particules
- Décantation discrète
- Flocculation
- Etudes rhéologiques / effet du racleur

Opérationnelles :

- Validation / optimisation du dimensionnement ($v_{asc} = 0,6 \text{ m/h ?}$)
- Modifications de géométrie ?
- Application à d'autres ouvrages :
décanteurs primaires, procédé A/B,
traitement EDCH
- Couplage cinétiques : décantation réactive

Merci de votre attention !!!



<http://icube.unistra.fr/>