Modélisation macroscopique des inondations fluviales et urbaines

Prise en compte des écoulements directionnels et des échanges lit mineur - lit majeur

Pascal Finaud-Guyot

Ginger Environnement & Infrastructures, Laboratoire HydroSciences Montpellier

26 Novembre 2009

Financement CIFRE

Problématique

La modélisation est utilisée pour des zones d'étude présentant des axes d'écoulements préférentiels :

- lit mineur de rivière

Problématique

La modélisation est utilisée pour des zones d'étude présentant des axes d'écoulements préférentiels :

- lit mineur de rivière

Problématique

La modélisation est utilisée pour des zones d'étude présentant des axes d'écoulements préférentiels :

- lit mineur de rivière
- canaux d'irrigation et/ou de drainage

Problématique

La modélisation est utilisée pour des zones d'étude présentant des axes d'écoulements préférentiels :

- lit mineur de rivière
- canaux d'irrigation et/ou de drainage

Problématique

La modélisation est utilisée pour des zones d'étude présentant des axes d'écoulements préférentiels :

- lit mineur de rivière
- canaux d'irrigation et/ou de drainage
- axes routiers dans une zone bâtie

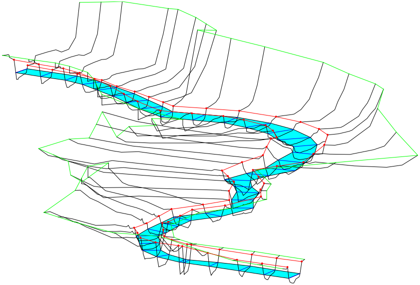
Problématique

La modélisation est utilisée pour des zones d'étude présentant des axes d'écoulements préférentiels :

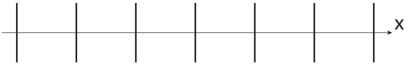
- lit mineur de rivière
- canaux d'irrigation et/ou de drainage
- axes routiers dans une zone bâtie

Modélisation 1D

- Changements de direction non pris en compte pour les calculs



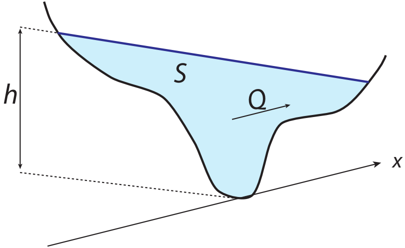
Géométrie réelle



Modèle 1D

Modélisation 1D

- Changements de direction non pris en compte pour les calculs
- Deux variables (uniformes sur la section) descriptives de l'écoulement : S et Q



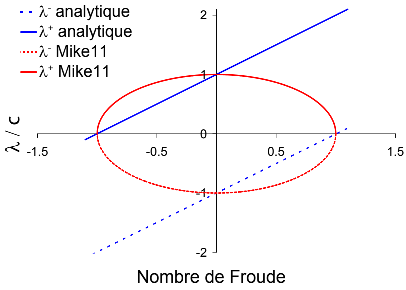
$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} S \\ Q \end{bmatrix} \qquad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} Q \\ \dfrac{Q^2}{S} + \dfrac{P}{\rho} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gS\left(S_0 - S_f\right) + I_p \end{bmatrix}$$

Modélisation 1D

- Changements de direction non pris en compte pour les calculs
- Deux variables (uniformes sur la section) descriptives de l'écoulement : S et Q
- Mauvaise représentation des célérités de propagation d'onde par la majorité des codes commerciaux



Célérités d'onde calculées par Mike 11

Modélisation 2D

- Trois variables descriptives de l'écoulement : h, q et r

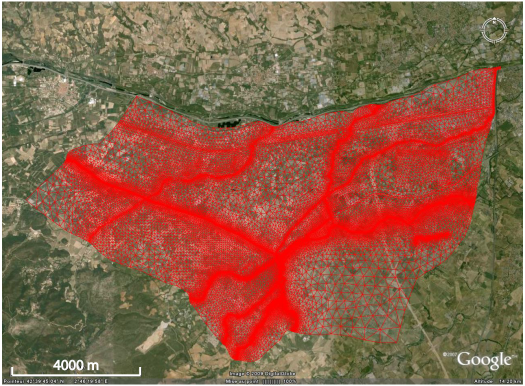
$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ q \\ r \end{bmatrix} \qquad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} q \\ \dfrac{q^2}{h} + \dfrac{1}{2}gh^2 \\ \dfrac{qr}{h} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} r \\ \dfrac{qr}{h} \\ \dfrac{r^2}{h} + \dfrac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh\left(S_{0,x} - S_{f,x}\right) \\ gh\left(S_{0,y} - S_{f,y}\right) \end{bmatrix}$$

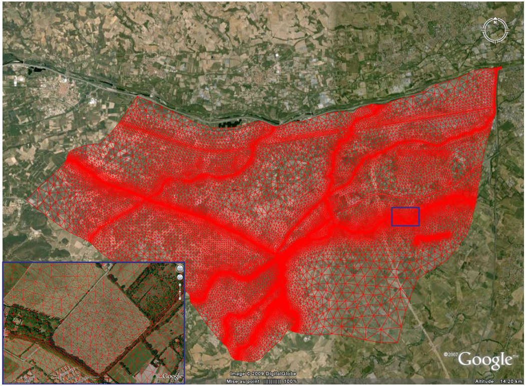
Modélisation 2D

- Trois variables descriptives de l'écoulement : h, q et r
- Description fine de la topographie



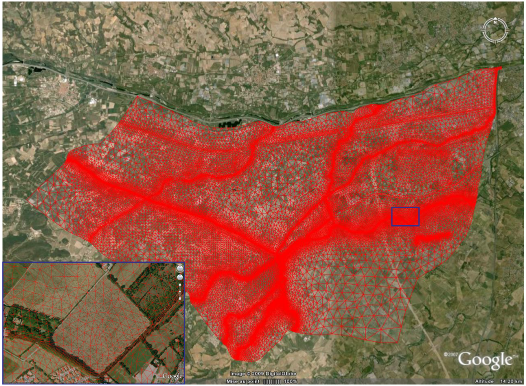
Modélisation 2D

- Trois variables descriptives de l'écoulement : h, q et r
- Description fine de la topographie
  - Besoin important en données topographiques



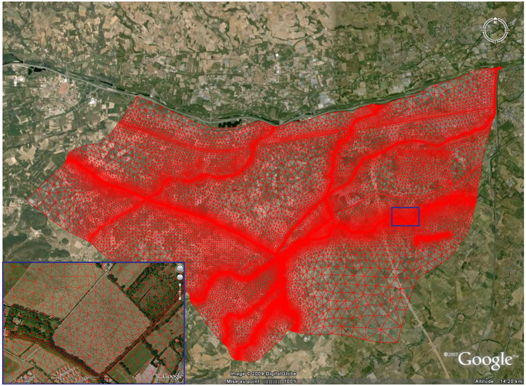
Modélisation 2D

- Trois variables descriptives de l'écoulement : h, q et r
- Description fine de la topographie
  - Besoin important en données topographiques
  - Besoin important en main d'oeuvre



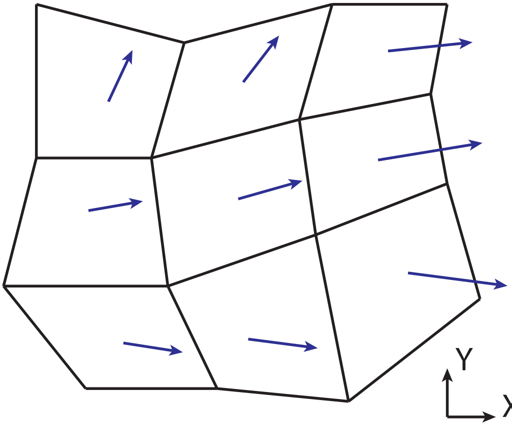
Modélisation 2D

- Trois variables descriptives de l'écoulement : h, q et r
- Description fine de la topographie
  - Besoin important en données topographiques
  - Besoin important en main d'oeuvre
  - Durée de simulation importante



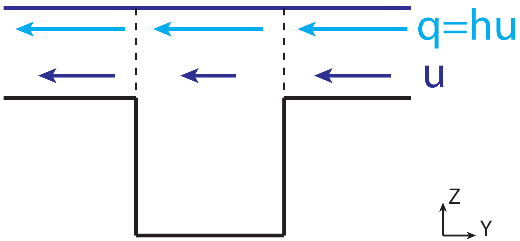
Modélisation 2D

- Trois variables descriptives de l'écoulement : h, q et r
- Description fine de la topographie
- Variables uniformes sur la verticale



Modélisation 2D

- Trois variables descriptives de l'écoulement : h, q et r
- Description fine de la topographie
- Variables uniformes sur la verticale
  - Impossibilité de représenter correctement les courts-circuits de méandres



Coupe transversale

Objectifs

- Développer un modèle de représentation des inondations :

Objectifs

- Développer un modèle de représentation des inondations :
  - ne nécessitant pas un maillage fin du lit mineur

Objectifs

- Développer un modèle de représentation des inondations :
  - ne nécessitant pas un maillage fin du lit mineur
  - permettant la représentation correcte des phénomènes tels que les courts-circuits de méandres

Objectifs

- Développer un modèle de représentation des inondations :
  - ne nécessitant pas un maillage fin du lit mineur
  - permettant la représentation correcte des phénomènes tels que les courts-circuits de méandres
- Concevoir les méthodes numériques permettant la résolution des équations proposées

Objectifs

- Développer un modèle de représentation des inondations :
  - ne nécessitant pas un maillage fin du lit mineur
  - permettant la représentation correcte des phénomènes tels que les courts-circuits de méandres
- Concevoir les méthodes numériques permettant la résolution des équations proposées
- Valider le modèle et le comparer à un modèle bidimensionnel classique

Objectifs

- Développer un modèle de représentation des inondations :
  - ne nécessitant pas un maillage fin du lit mineur
  - permettant la représentation correcte des phénomènes tels que les courts-circuits de méandres
- Concevoir les méthodes numériques permettant la résolution des équations proposées
- Valider le modèle et le comparer à un modèle bidimensionnel classique
- Développer un code de calcul opérationnel sur la base de ce modèle

Objectifs

- Développer un modèle de représentation des inondations :
  - ne nécessitant pas un maillage fin du lit mineur
  - permettant la représentation correcte des phénomènes tels que les courts-circuits de méandres
- Concevoir les méthodes numériques permettant la résolution des équations proposées
- Valider le modèle et le comparer à un modèle bidimensionnel classique
- Développer un code de calcul opérationnel sur la base de ce modèle
  - Permettre une réduction de la durée de simulation

Objectifs

- Développer un modèle de représentation des inondations :
  - ne nécessitant pas un maillage fin du lit mineur
  - permettant la représentation correcte des phénomènes tels que les courts-circuits de méandres
- Concevoir les méthodes numériques permettant la résolution des équations proposées
- Valider le modèle et le comparer à un modèle bidimensionnel classique
- Développer un code de calcul opérationnel sur la base de ce modèle
  - Permettre une réduction de la durée de simulation
  - Obtenir une précision au moins égale à celle du modèle SW2D

Plan

Modèle
- Méthodologies de couplage employées par les codes de calcul
- Contraintes
- Description du modèle proposé

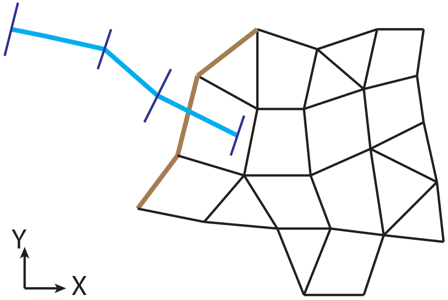
Résolution numérique
- Méthodes numériques
- Implantation dans le code de calcul
- Vérification du solveur PorAS

Présentation des résultats
- Configuration rectiligne
- Configuration sinueuse
- Configuration réelle

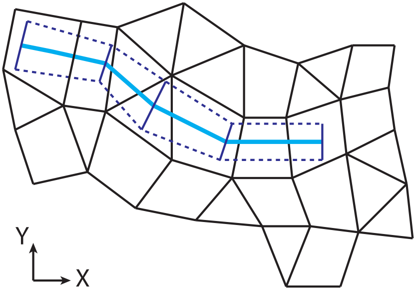
Conclusion et perspectives

Couplage par les extrémités du modèle 1D (Wolf Package, Mike Flood)

- Échange explicite de conditions aux limites

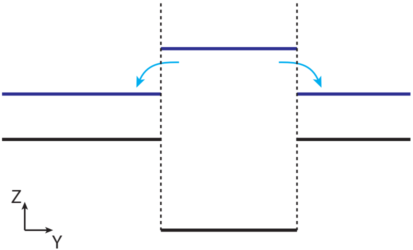


Couplage latéral (CCHE-Flood, Mike Flood)



Couplage latéral (CCHE-Flood, Mike Flood)

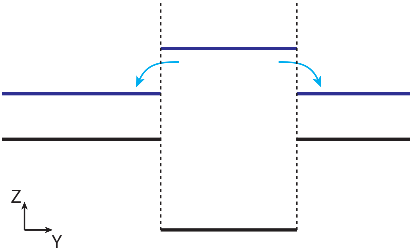
- Calcul du débit par une équation de déversoir : $Q = f(\Delta z)$



Coupe transversale

Couplage latéral (CCHE-Flood, Mike Flood)

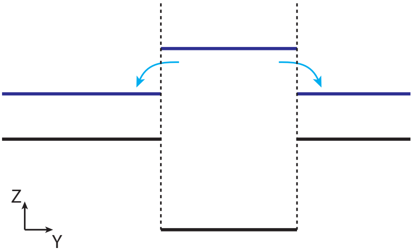
- Calcul du débit par une équation de déversoir : $Q = f(\Delta z)$
- Transfert de masse uniquement entre les modèles



Coupe transversale

Couplage latéral (CCHE-Flood, Mike Flood)

- Calcul du débit par une équation de déversoir : $Q = f(\Delta z)$
- Transfert de masse uniquement entre les modèles
  - Ralentissement de l'écoulement dans le modèle aval
  - Accélération de l'écoulement dans le modèle amont



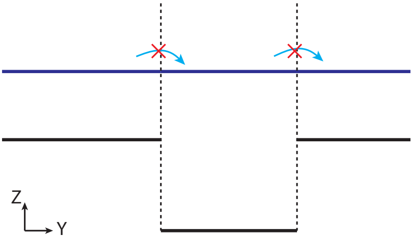
Coupe transversale

Couplage latéral (CCHE-Flood, Mike Flood)

- Calcul du débit par une équation de déversoir : $Q = f(\Delta z)$
- Transfert de masse uniquement entre les modèles
- Prise en compte impossible des cours-circuits de méandres

Couplage latéral (CCHE-Flood, Mike Flood)

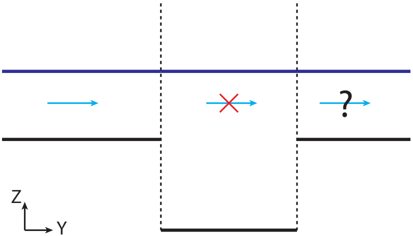
- Calcul du débit par une équation de déversoir : $Q = f(\Delta z)$
- Transfert de masse uniquement entre les modèles
- Prise en compte impossible des cours-circuits de méandres
  - Annulation du débit de transfert en situation de court-circuit



Coupe transversale

Couplage latéral (CCHE-Flood, Mike Flood)

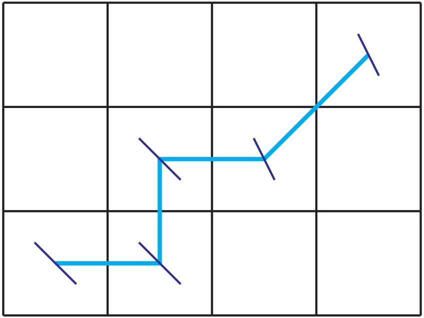
- Calcul du débit par une équation de déversoir : $Q = f(\Delta z)$
- Transfert de masse uniquement entre les modèles
- Prise en compte impossible des cours-circuits de méandres
  - Composante transversale de la vitesse nulle dans les équations 1D



Coupe transversale

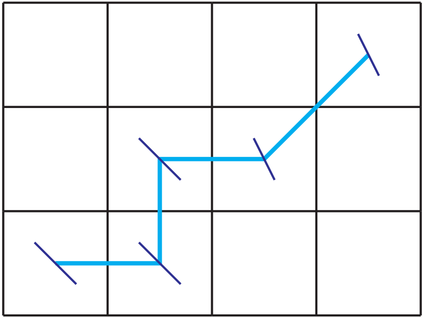
Couplage 1D-2D complet (Sobek 1D-2D)

- 1 équation de conservation de la masse



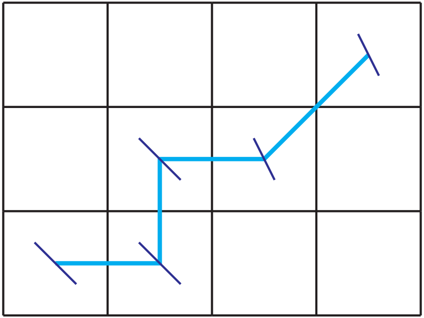
Couplage 1D-2D complet (Sobek 1D-2D)

- 1 équation de conservation de la masse
- cotes de la surface libre identiques : $z_{1D} = z_{2D}$



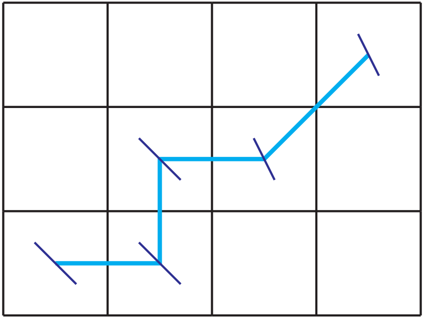
Couplage 1D-2D complet (Sobek 1D-2D)

- 1 équation de conservation de la masse
- cotes de la surface libre identiques : $z_{1D} = z_{2D}$
- 1 équation de conservation de la quantité de mouvement (QdM) pour chaque modèle



Couplage 1D-2D complet (Sobek 1D-2D)

- 1 équation de conservation de la masse
- cotes de la surface libre identiques : $z_{1D} = z_{2D}$
- 1 équation de conservation de la quantité de mouvement (QdM) pour chaque modèle
- Pas de référence bibliographique disponible sur les interactions 1D-2D



Réduction de la durée de simulation

- Contrainte de stabilité et/ou de précision : $\mathrm{Cr} \approx 1$

Réduction de la durée de simulation

- Contrainte de stabilité et/ou de précision : $\mathrm{Cr} \approx 1$
- Détermination du pas de temps de calcul maximal admissible à partir de cette contrainte :

$$\Delta t \leq \frac{A_i}{|\lambda| \sum_j L_{i,j}}$$

Réduction de la durée de simulation

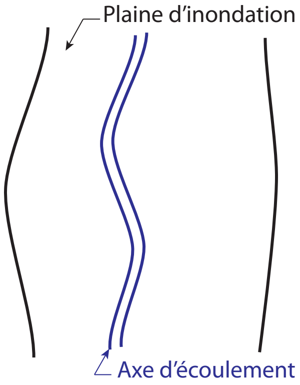
- Contrainte de stabilité et/ou de précision : $\mathrm{Cr} \approx 1$
- Détermination du pas de temps de calcul maximal admissible à partir de cette contrainte :

$$\Delta t \leq \frac{A_i}{|\lambda| \sum_j L_{i,j}}$$

Limiter la présence de mailles de dimensions réduites qui impliquent un pas de temps faible

Prise en compte des axes d'écoulements

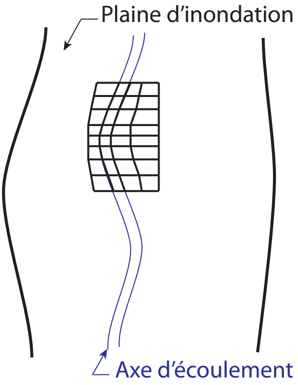
Modélisation 2D classique :



Prise en compte des axes d'écoulements

Modélisation 2D classique :

- Maillage fin imposé par la prise en compte de l'axe d'écoulement



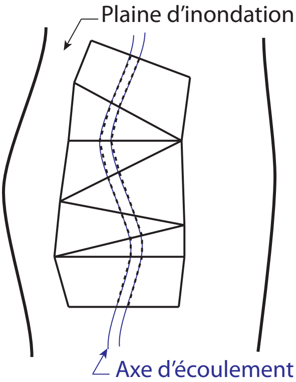
Prise en compte des axes d'écoulements

Modélisation 2D classique :

- Maillage fin imposé par la prise en compte de l'axe d'écoulement

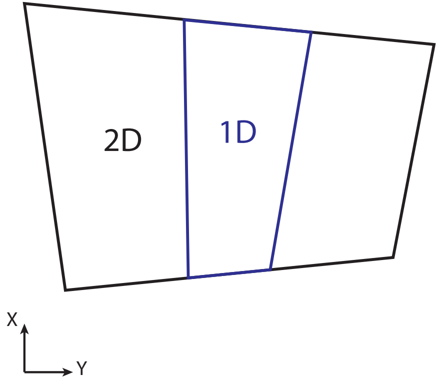
Objectif :

- Prise en compte de l'axe d'écoulement sans influencer le maillage du champ majeur



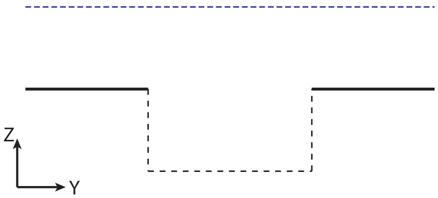
Hypothèses sur la géométrie

- Chaque maille 1D est incluse dans une maille 2D



Hypothèses sur la géométrie

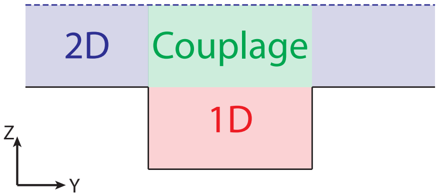
- Chaque maille 1D est incluse dans une maille 2D
- La cote du fond de la maille 2D est constante



Coupe transversale

Hypothèses sur la géométrie

- Chaque maille 1D est incluse dans une maille 2D
- La cote du fond de la maille 2D est constante



Coupe transversale

Hypothèses sur l'écoulement

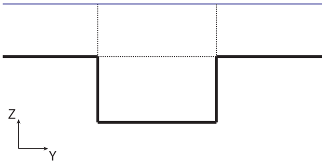
- Hypothèses intrinsèques aux équations de Saint-Venant :
  - Profil de pression hydrostatique

Hypothèses sur l'écoulement

- Hypothèses intrinsèques aux équations de Saint-Venant :
  - Profil de pression hydrostatique
  - L'eau est un fluide incompressible

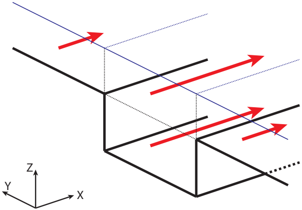
Hypothèses sur l'écoulement

- Hypothèses intrinsèques aux équations de Saint-Venant :
  - Profil de pression hydrostatique
  - L'eau est un fluide incompressible
- Hypothèses spécifiques au modèle :
  - Cote de la surface libre identique sur les mailles 1D et 2D



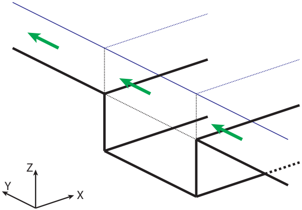
Hypothèses sur l'écoulement

- Hypothèses intrinsèques aux équations de Saint-Venant :
  - Profil de pression hydrostatique
  - L'eau est un fluide incompressible
- Hypothèses spécifiques au modèle :
  - Cote de la surface libre identique sur les mailles 1D et 2D
  - Composante longitudinale u de la vitesse : uniforme sur la verticale



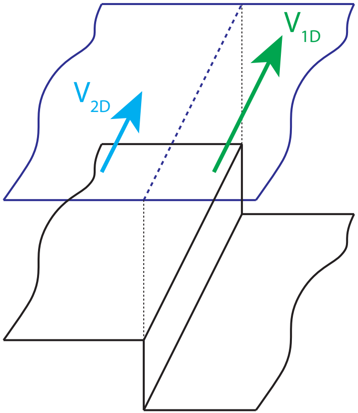
Hypothèses sur l'écoulement

- Hypothèses intrinsèques aux équations de Saint-Venant :
  - Profil de pression hydrostatique
  - L'eau est un fluide incompressible
- Hypothèses spécifiques au modèle :
  - Cote de la surface libre identique sur les mailles 1D et 2D
  - Composante longitudinale u de la vitesse : uniforme sur la verticale
  - Composantes transversales v de la vitesse : identiques en surface



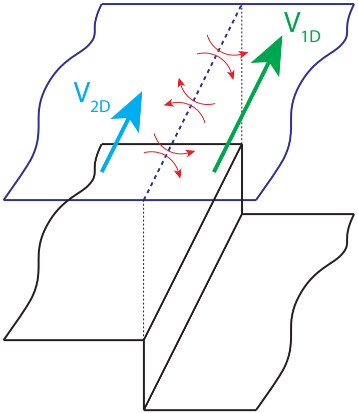
Hypothèse sur l'écoulement longitudinal

- Cisaillement de vitesse au niveau de l'interface intérieure



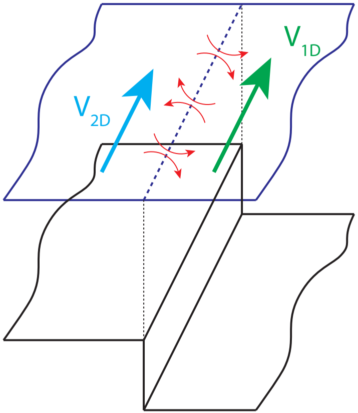
Hypothèse sur l'écoulement longitudinal

- Cisaillement de vitesse au niveau de l'interface intérieure
- Formation de tourbillons



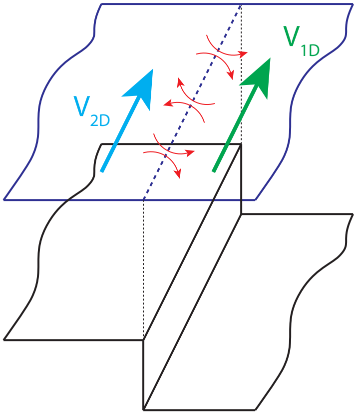
Hypothèse sur l'écoulement longitudinal

- Cisaillement de vitesse au niveau de l'interface intérieure
- Formation de tourbillons
- Échange de QdM entre l'écoulement 1D et 2D



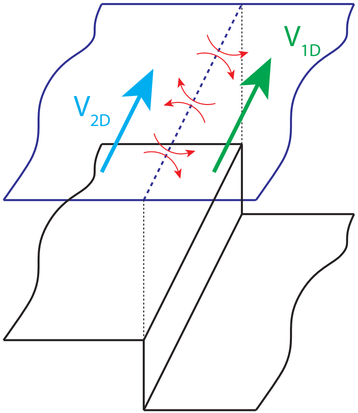
Hypothèse sur l'écoulement longitudinal

- Cisaillement de vitesse au niveau de l'interface intérieure
- Formation de tourbillons
- Échange de QdM entre l'écoulement 1D et 2D
- Estimation du flux de QdM : $q = \psi' \left| V_{1D} - V_{2D} \right|$ (Bousmar, 2002 [2] et Bertrand, 1994 [1])



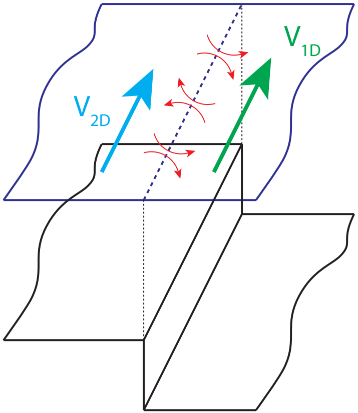
Hypothèse sur l'écoulement longitudinal

- Cisaillement de vitesse au niveau de l'interface intérieure
- Formation de tourbillons
- Échange de QdM entre l'écoulement 1D et 2D
- Estimation du flux de QdM : $q = \psi' \left| V_{1D} - V_{2D} \right|$ (Bousmar, 2002 [2] et Bertrand, 1994 [1])
- Détermination du volume échangé



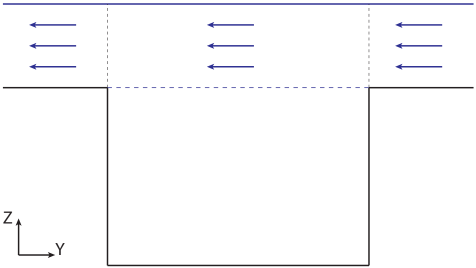
Hypothèse sur l'écoulement longitudinal

- Cisaillement de vitesse au niveau de l'interface intérieure
- Formation de tourbillons
- Échange de QdM entre l'écoulement 1D et 2D
- Estimation du flux de QdM : $q = \psi' \left| V_{1D} - V_{2D} \right|$ (Bousmar, 2002 [2] et Bertrand, 1994 [1])
- Détermination du volume échangé
- Transport de QdM longitudinale et transversale



Hypothèse sur l'écoulement transversal

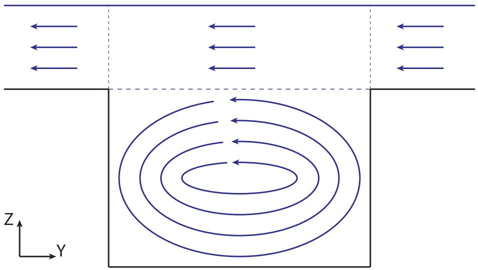
- La composante transversale de la vitesse est la même pour les deux mailles



Coupe transversale

Hypothèse sur l'écoulement transversal

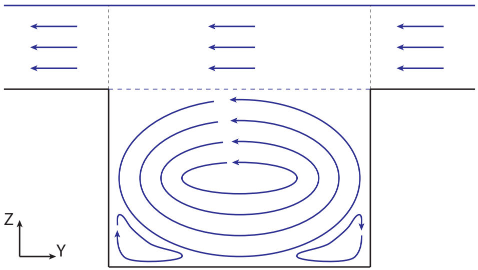
- La composante transversale de la vitesse est la même pour les deux mailles
- Création d'un tourbillon vertical



Coupe transversale

Hypothèse sur l'écoulement transversal

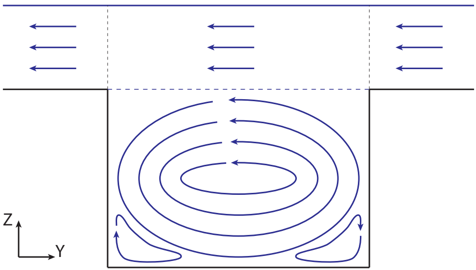
- La composante transversale de la vitesse est la même pour les deux mailles
- Création d'un tourbillon vertical
- Création de zones d'eau morte



Coupe transversale

Hypothèse sur l'écoulement transversal

- La composante transversale de la vitesse est la même pour les deux mailles
- Création d'un tourbillon vertical
- Création de zones d'eau morte
- Pertes de charge (non implantées dans SW12D)

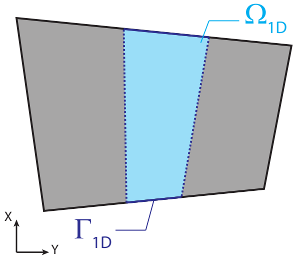


Coupe transversale

Formalisation mathématique

- Écriture sous forme différentielle

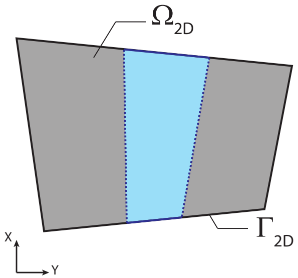
$$\frac{\partial \mathbf{U}_{1D}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_{1D}}{\partial x_{1D}} = \mathbf{S}_{1D} + \mathbf{T}_e$$



Formalisation mathématique

- Écriture sous forme différentielle

$$\frac{\partial \mathbf{U}_{2D}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_{2D}}{\partial x_{2D}} + \frac{\partial \mathbf{G}_{2D}}{\partial y_{2D}} = \mathbf{S}_{2D} - \mathbf{T}_e$$



Formalisation mathématique

- Écriture sous forme différentielle

$$\frac{\partial \mathbf{U}_{1D}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_{1D}}{\partial x_{1D}} = \mathbf{S}_{1D} + \mathbf{T}_e \qquad \frac{\partial \mathbf{U}_{2D}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_{2D}}{\partial x_{2D}} + \frac{\partial \mathbf{G}_{2D}}{\partial y_{2D}} = \mathbf{S}_{2D} - \mathbf{T}_e$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \phi h \\ \phi q \\ \phi r \end{bmatrix} \qquad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ g\phi h\left(S_{0,x_k} - S_{f,x_k}\right) + \frac{1}{2} g h^2 \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \\ g\phi h\left(S_{0,y_k} - S_{f,y_k}\right) + \frac{1}{2} g h^2 \frac{\partial \phi}{\partial y_k} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \phi q \\ \phi\left(\frac{q^2}{h} + \frac{1}{2} g\phi h^2\right) \\ \phi \frac{qr}{h} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \phi r \\ \phi \frac{qr}{h} \\ \phi \frac{r^2}{h} + \frac{1}{2} g\phi h^2 \end{bmatrix}$$

Plan

Méthode des pas fractionnaires (*time splitting*)

Méthode numérique fréquemment utilisée :

- pour la prise en compte des termes source
- pour la résolution de problèmes multidimensionnels

Méthode des pas fractionnaires (*time splitting*)

Méthode numérique fréquemment utilisée :

- pour la prise en compte des termes source
- pour la résolution de problèmes multidimensionnels

Résolution de l'équation représentant un problème global sous forme de plusieurs problèmes plus simples à résoudre :

$$U^n \xrightarrow{\dfrac{\partial U}{\partial t} + \dfrac{\partial F}{\partial x} = S + T} U^{n+1}$$

Méthode des pas fractionnaires (*time splitting*)

Méthode numérique fréquemment utilisée :

- pour la prise en compte des termes source
- pour la résolution de problèmes multidimensionnels

Résolution de l'équation représentant un problème global sous forme de plusieurs problèmes plus simples à résoudre :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S + T$$

$$U^n \xrightarrow{\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0} U^{n,h} \xrightarrow{\frac{\partial U}{\partial t} = S} U^{n,s} \xrightarrow{\frac{\partial U}{\partial t} = T} U^{n+1}$$

Algorithme de résolution

$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k} = \mathbf{S}_k \pm \mathbf{T}_e \text{ avec } k = 1D,\, 2D$$

Algorithme de résolution

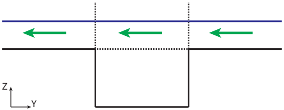
$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k} = \left[\mathbf{S}_{0,k} + \mathbf{S}_{p,k} + \mathbf{S}_{f,k}\right] \pm \left[\mathbf{T}_l + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_t\right]$$

Algorithme de résolution

$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k} = \left[\mathbf{S}_{0,k} + \mathbf{S}_{p,k} + \mathbf{S}_{f,k}\right] \pm \left[\mathbf{T}_l + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_t\right]$$

Étapes de calcul :

- Conditions initiales



U^n

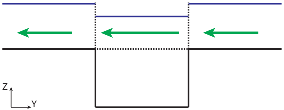
U^{n+1}

Algorithme de résolution

$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k} = \left[\mathbf{S}_{0,k} + \mathbf{S}_{p,k} + \mathbf{S}_{f,k}\right] \pm \left[\mathbf{T}_l + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_t\right]$$

Étapes de calcul :

- Partie conservative des équations et prise en compte des termes source géométriques



$$\begin{tikzcd}
U^n \arrow[rr, "\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k}+\frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k}=\mathbf{S}_{0,k}+\mathbf{S}_{p,k}"] \arrow[d, dashed] & & U^{n,c} \\
U^{n+1} & &
\end{tikzcd}$$

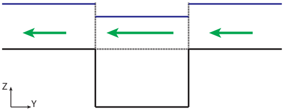
Algorithme de résolution

$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k} = \left[\mathbf{S}_{0,k} + \mathbf{S}_{p,k} + \mathbf{S}_{f,k}\right] \pm \left[\mathbf{T}_l + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_t\right]$$

Étapes de calcul :

- Prise en compte des frottements

$$\begin{tikzcd}
\mathrm{U}^{n} \arrow[rr, "\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k}+\frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k}=\mathbf{S}_{0,k}+\mathbf{S}_{p,k}"] \arrow[d, dashed] & & \mathrm{U}^{n,c} \arrow[d, "\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} = \mathbf{S}_{f,k}"] \\
\mathrm{U}^{n+1} & & \mathrm{U}^{n,f}
\end{tikzcd}$$

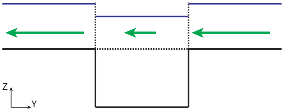


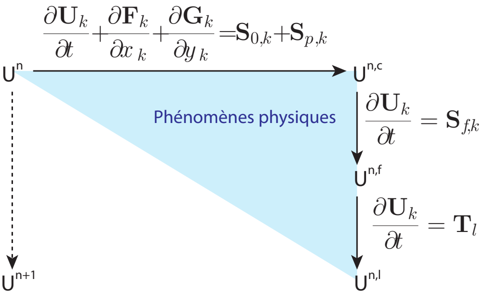
Algorithme de résolution

$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k} = \left[\mathbf{S}_{0,k} + \mathbf{S}_{p,k} + \mathbf{S}_{f,k}\right] \pm \left[\mathbf{T}_l + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_t\right]$$

Étapes de calcul :

- Transfert de QdM longitudinale



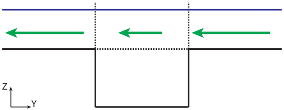


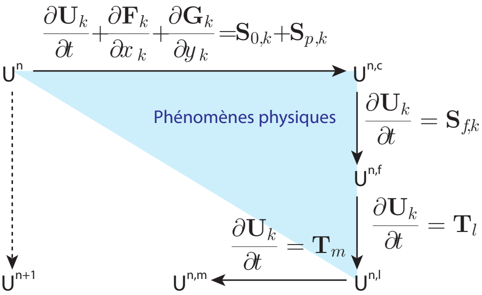
Algorithme de résolution

$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k} = \left[\mathbf{S}_{0,k} + \mathbf{S}_{p,k} + \mathbf{S}_{f,k}\right] \pm \left[\mathbf{T}_l + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_t\right]$$

Étapes de calcul :

- Équilibrage de la masse



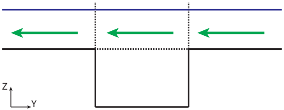


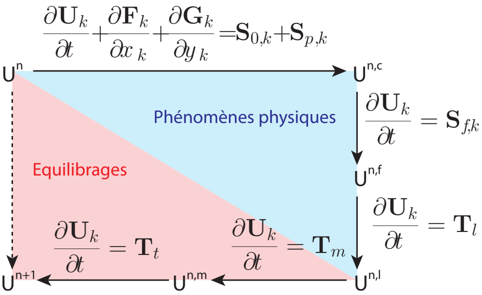
Algorithme de résolution

$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \mathbf{G}_k}{\partial y_k} = \left[\mathbf{S}_{0,k} + \mathbf{S}_{p,k} + \mathbf{S}_{f,k}\right] \pm \left[\mathbf{T}_l + \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_t\right]$$

Étapes de calcul :

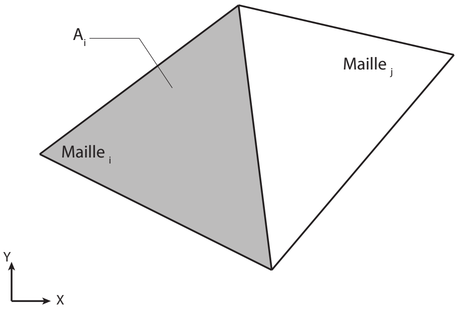
- Équilibrage de la QdM transversale





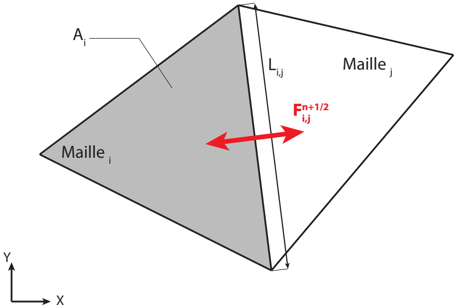
Méthodes aux volumes finis

- Discrétisation de la zone d'étude



Méthodes aux volumes finis

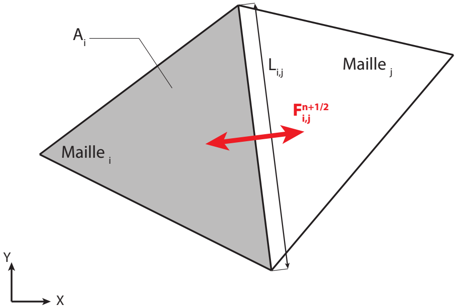
- Discrétisation de la zone d'étude
- Calcul des flux à travers l'interface entre deux éléments de calcul



$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_j \left[\mathbf{P}_{i,j} \mathbf{F}_{i,j}^{n+1/2} L_{i,j} \right] + \Delta t \left(\mathbf{S}_{i,j}^{n+1/2} \right)_i$$

Méthodes aux volumes finis

- Discrétisation de la zone d'étude
- Calcul des flux à travers l'interface entre deux éléments de calcul
- Schéma de Godunov : calcul des flux par résolution d'un problème de Riemann à l'interface



$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_j \left[\mathbf{P}_{i,j} \mathbf{F}_{i,j}^{n+1/2} L_{i,j} \right] + \Delta t \left(\mathbf{S}_{i,j}^{n+1/2} \right)_i$$

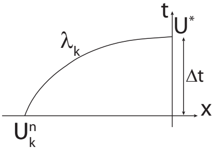
Solveur d'état approché PorAS

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S}$$

Objectif : Estimation du flux à l'interface $\mathbf{F}^*$ en tenant compte du terme source

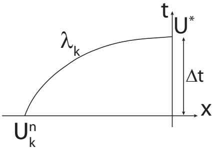
Solveur d'état approché PorAS

Utilisation de la méthode des caractéristiques :



Solveur d'état approché PorAS

Utilisation de la méthode des caractéristiques :

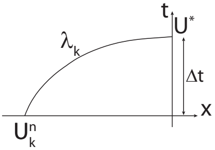


- Écriture de l'équation sous forme non conservative :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{S}$$

Solveur d'état approché PorAS

Utilisation de la méthode des caractéristiques :



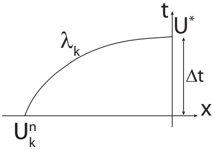
- Écriture de l'équation sous forme non conservative :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{S}$$

- Diagonalisation du système :

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{W}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{S}' \text{ avec } \begin{cases} \mathrm{d}\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}\mathrm{d}\mathbf{U} \\ \mathbf{S}' = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} \end{cases}$$

Solveur d'état approché PorAS



Utilisation de la méthode des caractéristiques :

- Écriture de l'équation sous forme non conservative :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{S}$$

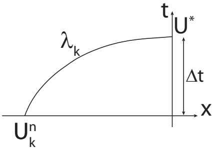
- Diagonalisation du système :

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{W}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{S}' \text{ avec } \begin{cases} \mathrm{d}\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}\mathrm{d}\mathbf{U} \\ \mathbf{S}' = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} \end{cases}$$

- Détermination des invariants de Riemann **W** en fonction de **U**

Solveur d'état approché PorAS

Utilisation de la méthode des caractéristiques :



- Écriture de l'équation sous forme non conservative :

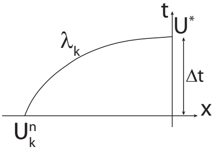
$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{S}$$

- Diagonalisation du système :

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{W}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{S}' \text{ avec } \begin{cases} \mathrm{d}\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}\mathrm{d}\mathbf{U} \\ \mathbf{S}' = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} \end{cases}$$

- Détermination des invariants de Riemann **W** en fonction de **U**
- Calcul de $\mathbf{U}^*$ à l'interface

Solveur d'état approché PorAS



Utilisation de la méthode des caractéristiques :

- Écriture de l'équation sous forme non conservative :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{S}$$

- Diagonalisation du système :

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{W}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{S}' \text{ avec } \begin{cases} \mathrm{d}\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}\mathrm{d}\mathbf{U} \\ \mathbf{S}' = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} \end{cases}$$

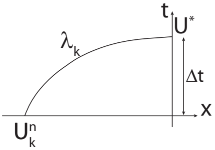
- Détermination des invariants de Riemann **W** en fonction de **U**
- Calcul de $\mathbf{U}^*$ à l'interface
- Calcul du flux $\mathbf{F}(\mathbf{U}^*)$ à travers l'interface et de $\mathbf{S}(\mathbf{U}^*)$ à partir de $\mathbf{U}^*$

Solveur d'état approché PorAS

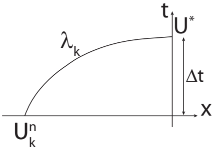
Utilisation de la méthode des caractéristiques :

- Écriture de l'équation sur les flux sous forme non conservative (Lhomme et Guinot, 2007 [4]) :

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{AS}$$



Solveur d'état approché PorAS



Utilisation de la méthode des caractéristiques :

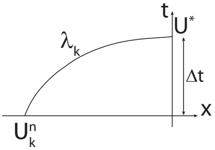
- Écriture de l'équation sur les flux sous forme non conservative (Lhomme et Guinot, 2007 [4]) :

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{AS}$$

- Diagonalisation du système :

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{W}}{\mathrm{d}t} = \Lambda \mathbf{S}' \text{ avec } \begin{cases} \mathrm{d}\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}\mathrm{d}\mathbf{F} \\ \mathbf{S}' = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} \end{cases}$$

Solveur d'état approché PorAS



Utilisation de la méthode des caractéristiques :

- Écriture de l'équation sur les flux sous forme non conservative (Lhomme et Guinot, 2007 [4]) :

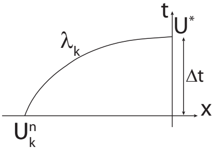
$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{AS}$$

- Diagonalisation du système :

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{W}}{\mathrm{d}t} = \Lambda \mathbf{S}' \text{ avec } \begin{cases} \mathrm{d}\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}\mathrm{d}\mathbf{F} \\ \mathbf{S}' = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} \end{cases}$$

- Détermination des invariants de Riemann $\mathbf{W}$ en fonction de $\mathbf{F}$

Solveur d'état approché PorAS



Utilisation de la méthode des caractéristiques :

- Écriture de l'équation sur les flux sous forme non conservative (Lhomme et Guinot, 2007 [4]) :

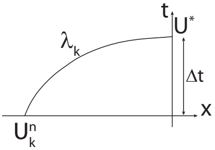
$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{AS}$$

- Diagonalisation du système :

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{W}}{\mathrm{d}t} = \Lambda \mathbf{S}' \text{ avec } \begin{cases} \mathrm{d}\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}\mathrm{d}\mathbf{F} \\ \mathbf{S}' = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} \end{cases}$$

- Détermination des invariants de Riemann **W** en fonction de **F**
- Calcul de $\mathbf{F}^*$ à l'interface

Solveur d'état approché PorAS



Utilisation de la méthode des caractéristiques :

- Écriture de l'équation sur les flux sous forme non conservative (Lhomme et Guinot, 2007 [4]) :

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \mathbf{A}\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{AS}$$

- Diagonalisation du système :

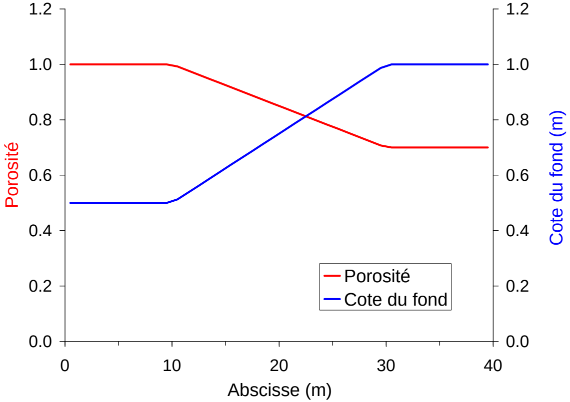
$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{W}}{\mathrm{d}t} = \Lambda \mathbf{S}' \text{ avec } \begin{cases} \mathrm{d}\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1}\mathrm{d}\mathbf{F} \\ \mathbf{S}' = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} \end{cases}$$

- Détermination des invariants de Riemann $\mathbf{W}$ en fonction de $\mathbf{F}$
- Calcul de $\mathbf{F}^*$ à l'interface

Approche implantée dans le solveur de Riemann PorAS (Finaud-Guyot et al., 2009 [3])

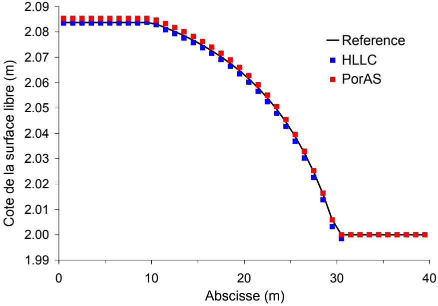
Écoulement en régime permanent

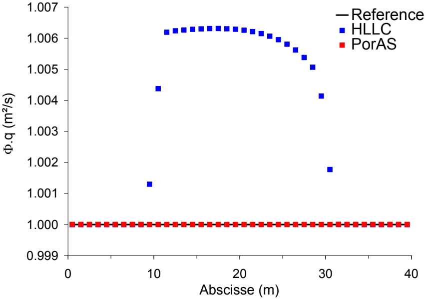
Canal avec un rétrécissement et une rehausse du fond



Écoulement en régime permanent

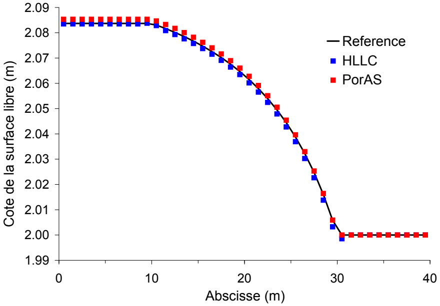
Canal avec un rétrécissement et une rehausse du fond

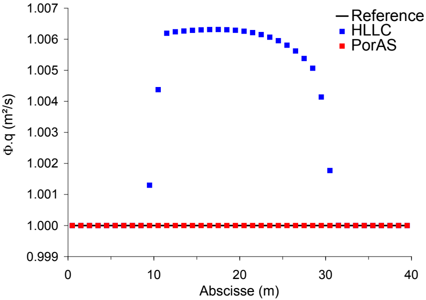




Écoulement en régime permanent

Canal avec un rétrécissement et une rehausse du fond

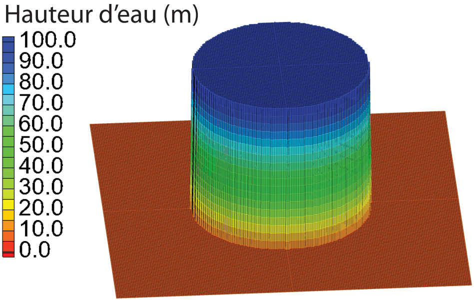




L'erreur de calcul pour le solveur HLLC est expliquée par le fait que les termes source ne sont pas pris en compte dans le calcul des flux

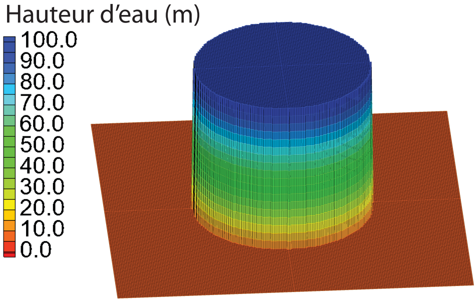
Rupture de barrage

- Rupture de barrage circulaire



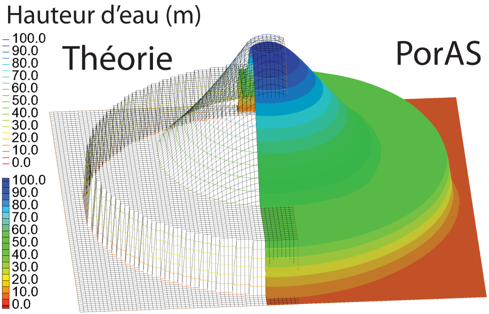
Rupture de barrage

- Rupture de barrage circulaire
- Porosité variable : $\phi(r) = {}^{1}/_{r}$



Rupture de barrage

- Rupture de barrage circulaire
- Porosité variable : $\phi(r) = {}^{1}/_{r}$
- Reproduction correcte des hauteurs d'eau et des débits



Plan

Collecte des données expérimentales

- Expériences réalisées à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier

Collecte des données expérimentales

- Expériences réalisées à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier
- Construction de différentes configurations à l'aide de briques et parpaings

Collecte des données expérimentales

- Expériences réalisées à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier
- Construction de différentes configurations à l'aide de briques et parpaings
- Mesures de hauteur d'eau et de vitesse d'écoulement

Collecte des données expérimentales

- Expériences réalisées à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier
- Construction de différentes configurations à l'aide de briques et parpaings
- Mesures de hauteur d'eau et de vitesse d'écoulement
- Comparaison des mesures expérimentales aux résultats produits par SW12D et SW2D

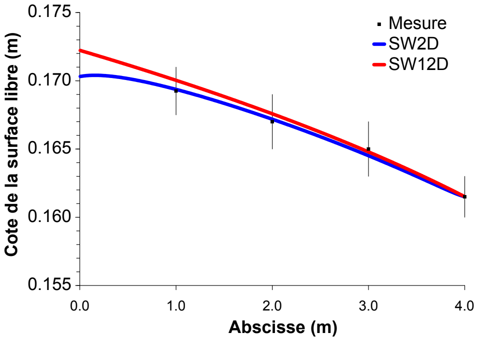
Validation de la structure transversale de l'écoulement

Écoulement rectiligne

- Dispositif expérimental

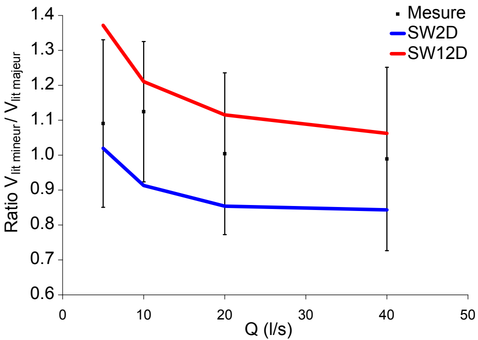
Écoulement rectiligne

- Dispositif expérimental
- Reproduction correcte des hauteurs d'eau mesurées



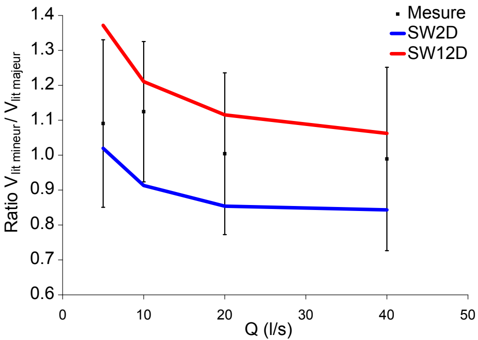
Écoulement rectiligne

- Dispositif expérimental
- Reproduction correcte des hauteurs d'eau mesurées
- Estimation des vitesses en adéquation avec les mesures



Écoulement rectiligne

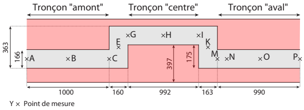
- Dispositif expérimental
- Reproduction correcte des hauteurs d'eau mesurées
- Estimation des vitesses en adéquation avec les mesures



Réduction de la durée de simulation par rapport à SW2D : un facteur 1.5 à 10

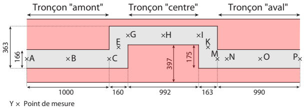
Écoulement sinueux

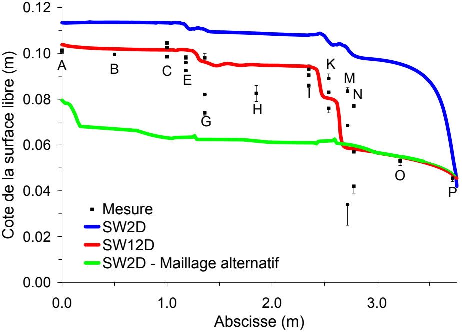
- Succession de coudes



Écoulement sinueux

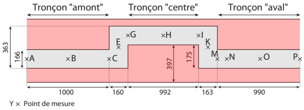
- Succession de coudes
- SW12D reproduit correctement les hauteurs d'eau mesurées et les pertes de charge

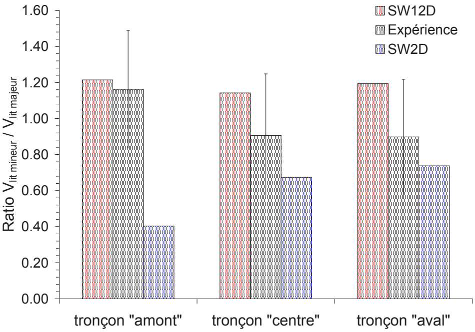




Écoulement sinueux

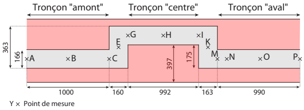
- Succession de coudes
- SW12D reproduit correctement les hauteurs d'eau mesurées et les pertes de charge
- Estimation correcte du ratio des vitesses

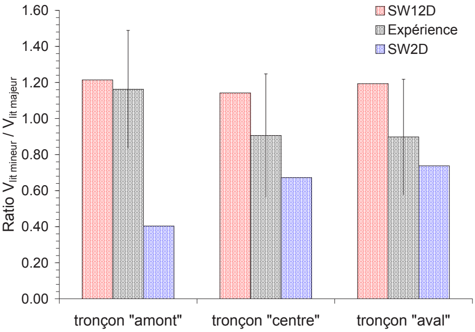




Écoulement sinueux

- Succession de coudes
- SW12D reproduit correctement les hauteurs d'eau mesurées et les pertes de charge
- Estimation correcte du ratio des vitesses

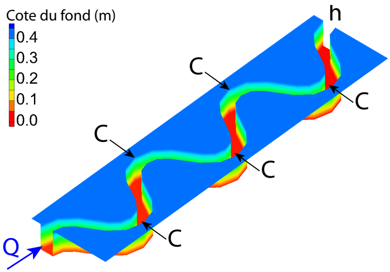




Réduction de la durée de simulation par rapport à SW2D : facteur 50 à 80

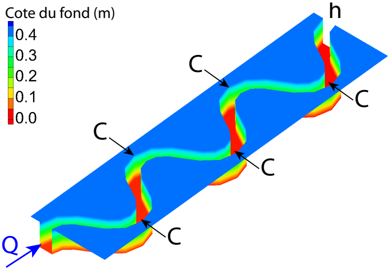
Méandres sans débordement

- Comparaison de SW12D et HEC-RAS



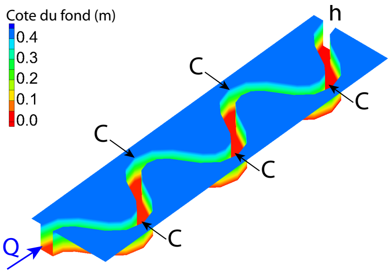
Méandres sans débordement

- Comparaison de SW12D et HEC-RAS
  - Configuration 1D
  - Écoulement en régime permanent



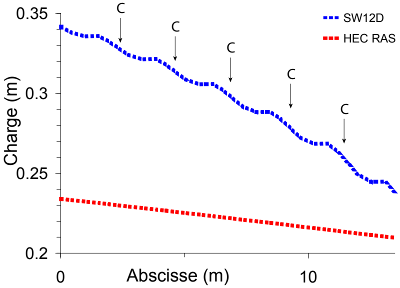
Méandres sans débordement

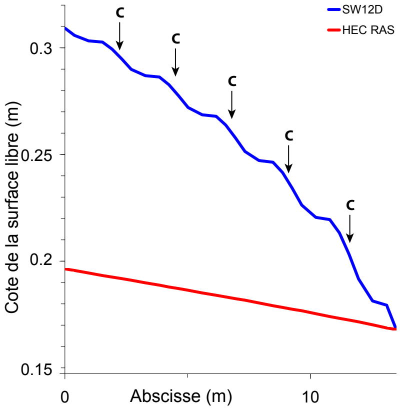
- Comparaison de SW12D et HEC-RAS
  - Configuration 1D
  - Écoulement en régime permanent
  - Coefficient de Strickler identique



Méandres sans débordement

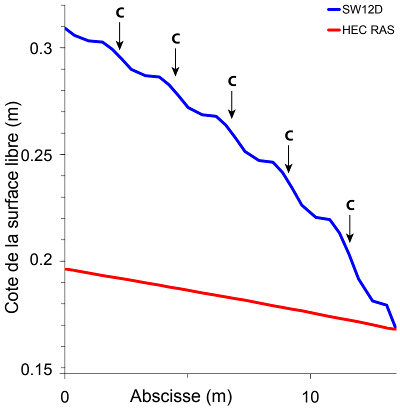
- Comparaison de SW12D et HEC-RAS
- Modélisation des pertes de charge par SW12D





Méandres sans débordement

- Comparaison de SW12D et HEC-RAS
- Modélisation des pertes de charge par SW12D
- Même durée de simulation

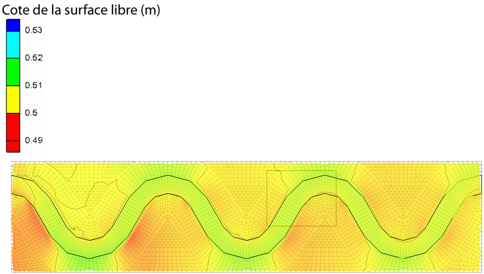


Méandres avec débordement

- Écoulement en régime permanent

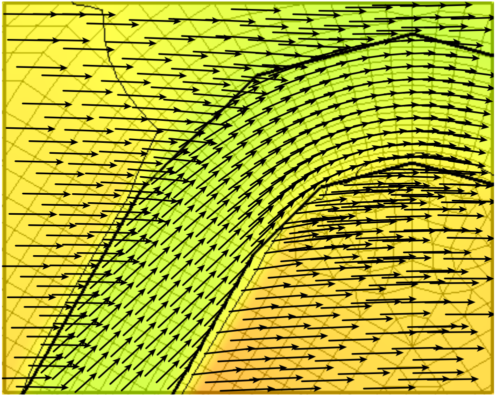
Méandres avec débordement

- Écoulement en régime permanent
- Modélisation 2D classique



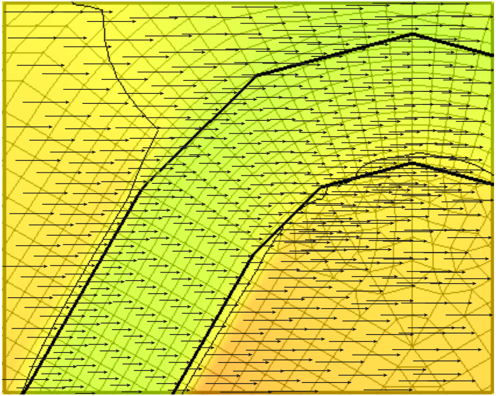
Méandres avec débordement

- Écoulement en régime permanent
- Modélisation 2D classique
  - Forte influence du lit mineur sur les vitesses



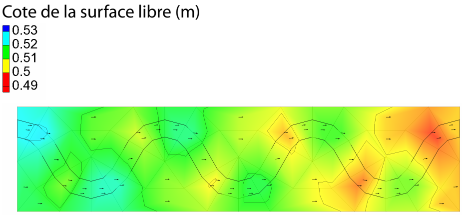
Méandres avec débordement

- Écoulement en régime permanent
- Modélisation 2D classique
  - Forte influence du lit mineur sur les vitesses
  - Ralentissement au niveau du lit mineur



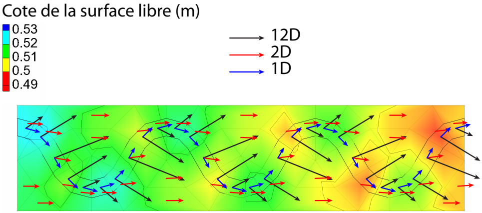
Méandres avec débordement

- Écoulement en régime permanent
- Modélisation 2D classique
  - Forte influence du lit mineur sur les vitesses
  - Ralentissement au niveau du lit mineur
- Modélisation couplée 1D-2D



Méandres avec débordement

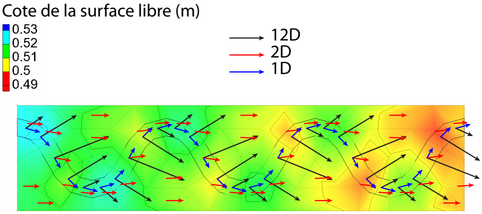
- Écoulement en régime permanent
- Modélisation 2D classique
  - Forte influence du lit mineur sur les vitesses
  - Ralentissement au niveau du lit mineur



- Modélisation couplée 1D-2D
  - Influence moins importante du lit mineur sur les vitesses
  - Représentation des courts-circuits de méandres

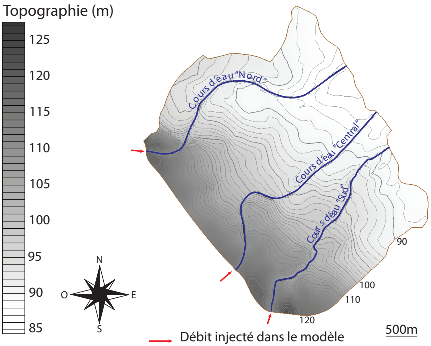
Méandres avec débordement

- Écoulement en régime permanent
- Modélisation 2D classique
- Modélisation couplée 1D-2D

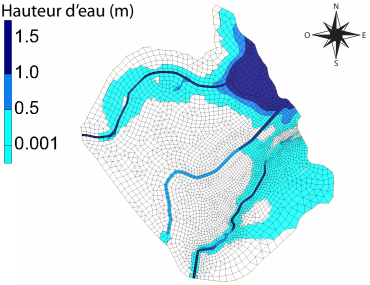


Réduction du temps de simulation par rapport à SW2D par un facteur 2000

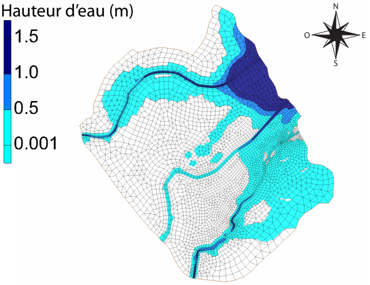
Configuration réelle



Configuration réelle

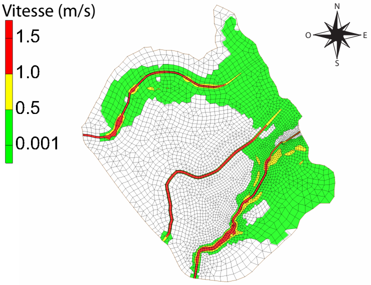


Hauteur d'eau maximale modélisée avec SW12D

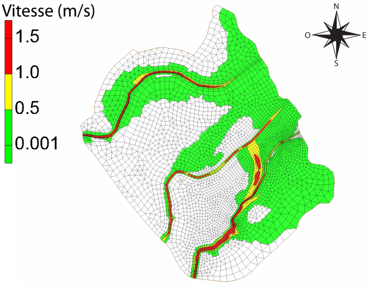


Hauteur d'eau maximale modélisée avec SW2D

Configuration réelle

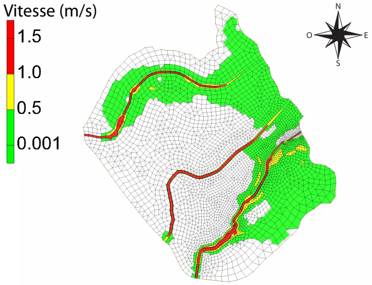


Vitesse maximale modélisée avec SW12D

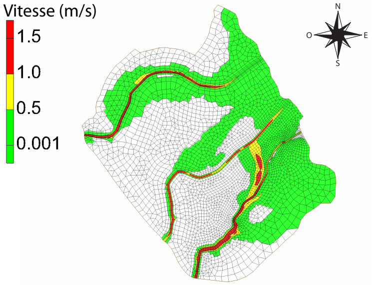


Vitesse maximale modélisée avec SW2D

Configuration réelle



Vitesse maximale modélisée avec SW12D



Vitesse maximale modélisée avec SW2D

Réduction de la durée de simulation par rapport à SW2D par 16

Conclusion

- Le modèle de couplage 1D-2D proposé permet :

Conclusion

- Le modèle de couplage 1D-2D proposé permet :
  - une prise en compte des axes d'écoulement (lit mineur / axe urbain) sans avoir à les mailler finement

Conclusion

- Le modèle de couplage 1D-2D proposé permet :
  - une prise en compte des axes d'écoulement (lit mineur / axe urbain) sans avoir à les mailler finement
  - une représentation des phénomènes de court-circuit de méandres

Conclusion

- Le modèle de couplage 1D-2D proposé permet :
  - une prise en compte des axes d'écoulement (lit mineur / axe urbain) sans avoir à les mailler finement
  - une représentation des phénomènes de court-circuit de méandres
- Les méthodes numériques proposées permettent la résolution des équations mises en jeu

Conclusion

- Le modèle de couplage 1D-2D proposé permet :
  - une prise en compte des axes d'écoulement (lit mineur / axe urbain) sans avoir à les mailler finement
  - une représentation des phénomènes de court-circuit de méandres
- Les méthodes numériques proposées permettent la résolution des équations mises en jeu
- Ces méthodes ont permis le développement d'un code de calcul SW12D :

Conclusion

- Le modèle de couplage 1D-2D proposé permet :
  - une prise en compte des axes d'écoulement (lit mineur / axe urbain) sans avoir à les mailler finement
  - une représentation des phénomènes de court-circuit de méandres
- Les méthodes numériques proposées permettent la résolution des équations mises en jeu
- Ces méthodes ont permis le développement d'un code de calcul SW12D :
  - $1,5$ à 2000 fois plus rapide que SW2D

Conclusion

- Le modèle de couplage 1D-2D proposé permet :
  - une prise en compte des axes d'écoulement (lit mineur / axe urbain) sans avoir à les mailler finement
  - une représentation des phénomènes de court-circuit de méandres
- Les méthodes numériques proposées permettent la résolution des équations mises en jeu
- Ces méthodes ont permis le développement d'un code de calcul SW12D :
  - $1,5$ à 2000 fois plus rapide que SW2D
  - Meilleure représentation des phénomènes (Pertes de charge dans les coudes, courts-circuits de méandres)

Perspectives de recherche

- Définition d'un modèle sous maille plus précis :

Perspectives de recherche

- Définition d'un modèle sous maille plus précis :
  - Cote du fond différente en rive droite et gauche

Perspectives de recherche

- Définition d'un modèle sous maille plus précis :
  - Cote du fond différente en rive droite et gauche
  - Cote de la surface libre différente en rive droite et gauche

Perspectives de recherche

- Définition d'un modèle sous maille plus précis :
  - Cote du fond différente en rive droite et gauche
  - Cote de la surface libre différente en rive droite et gauche
- Section d'écoulement 1D non rectangulaire

Perspectives de recherche

- Définition d'un modèle sous maille plus précis :
  - Cote du fond différente en rive droite et gauche
  - Cote de la surface libre différente en rive droite et gauche
- Section d'écoulement 1D non rectangulaire
- Gestion des confluences

Perspectives de recherche

- Définition d'un modèle sous maille plus précis :
  - Cote du fond différente en rive droite et gauche
  - Cote de la surface libre différente en rive droite et gauche
- Section d'écoulement 1D non rectangulaire
- Gestion des confluences
- Validation en grandeur réelle

Remerciements

- Ginger Environnement & Infrastructures pour avoir financé cette thèse dans le cadre d'une bourse Cifre, pour m'avoir fourni les données utilisées pour la modélisation d'une configuration réelle.
- L'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier pour le prêt de ses installations expérimentales.

Merci

G. Bertrand.
Le calcul d'axes hydrauliques dans les rivières à plaines inondables.
Technical report, Ministère Wallon de l'Equipement et des Transports, D. 213, Chatelet, Belgium (in French), 1994.

D. Bousmar.
Flow modelling in compound channels.
PhD thesis, Université Catholique de Louvain, 2002.

P. Finaud-Guyot, C. Delenne, J. Lhomme, V. Guinot, and C. Llovel.
An approximate-state Riemann solver for the two-dimensional shallow water equations with porosity.
International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009.
A paraître.

J. Lhomme and V. Guinot.

A general approximate-state Riemann solver for hyperbolic systems of conservation laws with source terms.
International Journal for Numerical Methods in Fluids,
53 :1509–1540, 2007.