



HAL
open science

Évaluation par modélisation inverse des apports latéraux en crues et des concentrations en solutés : application sur une plateforme expérimentale et sur des bassins naturels

Roger Moussa, Samer Majdalani, Jean-Baptiste Charlier, Martin Le Mesnil,
Olivier Delestre

► To cite this version:

Roger Moussa, Samer Majdalani, Jean-Baptiste Charlier, Martin Le Mesnil, Olivier Delestre. Évaluation par modélisation inverse des apports latéraux en crues et des concentrations en solutés : application sur une plateforme expérimentale et sur des bassins naturels. Colloque Prévion des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives, Société Hydrotechnique de France (SHF), Nov 2023, Toulouse (FR), France. hal-04564523

HAL Id: hal-04564523

<https://brgm.hal.science/hal-04564523v1>

Submitted on 30 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉVALUATION PAR MODÉLISATION INVERSE DES APPORTS LATÉRAUX EN CRUES ET DES CONCENTRATIONS EN SOLUTÉS : APPLICATION SUR UNE PLATEFORME EXPÉRIMENTALE ET SUR DES BASSINS NATURELS

Auteurs : MOUSSA Roger^{1*}, MAJDALANI Samer², CHARLIER Jean-Baptiste^{3,4}, LE MESNIL Martin^{1,3,4}, DELESTRE Olivier^{5,6}

* *auteur correspondant*

¹LISAH, Univ Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France.

²Univ Montpellier, Polytech Montpellier/HSM, France.

³BRGM, Univ Montpellier, Montpellier, France.

⁴G-eau, INRAE, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Institut Agro, BRGM, Montpellier, France

⁵Laboratoire J.A. Dieudonné, UMR CNRS 7351, Université Côte d'Azur, Nice, France.

⁶Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, Ecole des Ponts ParisTech - EDF R&D, Chatou, France.

Choix du thème/session : 2/ Progrès réalisés et perspectives d'amélioration pour la prévision des crues et des inondations - Les méthodes novatrices de prévision des crues et des inondations

Mots clefs : crue, modélisation inverse, apports latéraux, concentrations, modèles réduits

Résumé : Cet article discute les domaines et limites d'application du modèle inverse de l'onde diffusante proposé par Moussa [1996] pour calculer l'hydrogramme de l'écoulement latéral et les concentrations en solutés (considérés comme conservatifs sur la durée du suivi), et discute l'intérêt de la plateforme expérimentale pour la validation du modèle et son transfert pour des applications sur des bassins naturels. Ce travail a permis en premier la réalisation d'une plateforme expérimentale caractérisée par une faible occupation de l'espace, une courte durée expérimentale, une grande précision de mesure, des courbes expérimentales de haute qualité et reproductibles, une faible consommation d'eau et d'énergie, et la possibilité de tester une grande variété de scénarios d'hydrogrammes. Pour illustrer la démarche, les applications sont menées sur un canal rectangulaire et sur un modèle réduit de la partie aval du Var. La plateforme permet de disposer d'un grand nombre d'événements de crue en milieu contrôlé, indispensables pour vérifier et valider les modèles hydrauliques : onde diffusante, modèle inverse et hystérésis Hauteur-Débit-Concentration. Ce travail a aussi permis le développement et l'application du modèle inverse afin de calculer les hydrogrammes de gains et de pertes latéraux ainsi que les concentrations. Les applications sur le canal expérimental ont permis de valider les équations du modèle, et les applications sur des bassins naturels ont permis d'évaluer les flux d'échanges latéraux et de proposer un schéma de fonctionnement hydrologique en crue du bassin.

Mots-clefs : crue, modélisation inverse, apports latéraux, concentrations, modèles réduits

Abstract : This article discusses the areas and limits of application of the inverse model of the diffusing wave equation proposed by Moussa [1996] to calculate the hydrograph of the lateral flow and the solute concentrations (considered conservative over the duration of monitoring), and discusses the interest of the experimental platform for the validation of the model and its transfer for applications on natural basins. This work first allowed the creation of an experimental platform characterized by low

space occupation, short experimental duration, high measurement precision, high quality and reproducible experimental curves, low water consumption and energy, and the possibility of testing a wide variety of hydrograph scenarios. To illustrate the approach, the applications are carried out on a rectangular canal and on a physical model of the downstream part of the Var. The platform provides a large number of flood events in a controlled environment, essential for verifying and validating the hydraulic models: diffusing wave, inverse model and Depth-Discharge-Concentration hysteresis. This work also allowed the development and application of the inverse model to calculate hydrographs of lateral gains and losses as well as concentrations. The applications on the experimental canal made it possible to validate the model equations, and the applications on natural basins made it possible to evaluate the lateral exchange flows and to propose a hydrological functioning diagram in flood of the basin.

Keywords: flood, inverse modeling, lateral flow, solute transfer, physical models

1. Contexte et objectifs

L'écoulement latéral le long d'un tronçon de cours d'eau (Figure 1) est un processus majeur en crue, qui peut représenter soit un gain tel que le ruissellement de surface sur les versants ou une contribution de nappe, soit une perte telle que le débordement lors des crues extrêmes ou l'infiltration vers la nappe. L'écoulement latéral peut également être dû à la gestion de l'eau, comme le pompage ou les rejets d'eau. Malgré les progrès récents dans les mesures, l'écoulement latéral ne peut pas être mesuré et les expérimentations ne peuvent pas être menées in situ en raison de la difficulté de contrôler tous les échanges le long d'un tronçon de rivière (interactions rivière-versant, rivière-nappe, rivière-zone d'inondation).

Le modèle de l'onde diffusante à deux paramètres (la célérité et la diffusivité), qui est une simplification du système de Saint-Venant, est largement utilisé pour la propagation des crues. Fan et Li [2006] ont étendu la solution numérique de l'onde diffusante aux écoulements avec un apport latéral uniforme et concentré. Plus récemment, Cimorelli et al. [2014] ont proposé des solutions de l'équation de l'onde diffusante prenant compte des conditions aux limites aval et des écoulements latéraux uniformes. Cependant, lors de l'utilisation de méthodes de résolution numérique, des instabilités numériques et des problèmes de divergence sont rencontrés. Pour pallier ces difficultés, la solution analytique d'Hayami est utilisée sous l'hypothèse de célérité et diffusivité constantes. La solution d'Hayami a été étendue au cas de propagation d'onde avec apports ou pertes latéraux uniformément répartis le long de la rivière [Moussa, 1996]. Moussa [1996] propose une résolution du problème inverse qui consiste à calculer l'hydrogramme des écoulements latéraux sous l'hypothèse d'un débit latéral uniformément réparti le long du tronçon, en utilisant à la fois le débit entrant et le débit sortant comme entrées du modèle, et en connaissant les deux paramètres célérité et diffusivité. Cette approche a été étendue pour estimer les concentrations en solutés des apports latéraux connaissant les concentrations en solutés des entrées et des sorties [Cholet et al., 2017].

Dans la littérature, des expérimentations hydrauliques ont été réalisées sur des petits canaux expérimentaux au laboratoire [Vinatier et al., 2017], sur des canaux à échelle réelle [Errico et al., 2018; Rudi et al., 2018] et sur des modèles réduits. Ces expérimentations avaient des finalités diverses : impact de la végétation sur la résistance hydraulique [Vinatier et al., 2017 ; Errico et al., 2018], impact des digues sur l'inondation [Ettema et Muste, 2004], impact du changement d'affectation des terres et de la gestion des rivières sur les inondations [Jung et al., 2012], ou sur la gestion des écosystèmes fluviaux [Newson, 2002]. Les dimensions du modèle réduit doivent vérifier les lois hydrauliques de similitude. Les équations de Saint-Venant sont généralement utilisées pour la modélisation hydraulique [Chanson, 1999 ; Heller, 2011]. Cependant ces études ont généralement été menées sans flux latéraux

(gains et pertes). À notre connaissance, aucune expérience n'a été réalisée sous les hypothèses de l'onde diffusante avec des flux latéraux uniformes (gains et pertes) sous des flux entrants et latéraux hautement contrôlés et variables dans le temps.

Récemment, [Majdalani et al. \[2020\]](#) ont développé une nouvelle plateforme expérimentale au laboratoire pour étudier la propagation d'onde de crues et de solutés dans un canal dans des conditions d'écoulement transitoire. Cette plateforme présente l'intérêt de mesurer les hydrogrammes et les concentrations en solutés aussi bien à l'entrée du canal, à la sortie ainsi que les apports et pertes latéraux. L'utilisation de l'impression 3D a permis dernièrement de développer des modèles réduits, tel celui inspiré du fleuve Var [[Majdalani et al., 2023](#)]. Ces récents développements d'une plateforme expérimentale mettent à disposition les données nécessaires pour vérifier le modèle inverse d'Hayami pour le calcul des apports et pertes latéraux. Les applications du modèle sur des bassins karstiques où les échanges nappe-rivière jouent un rôle majeur lors des crues ont permis d'évaluer le modèle sur des cas pratiques et de proposer un schéma de fonctionnement des bassins étudiés.

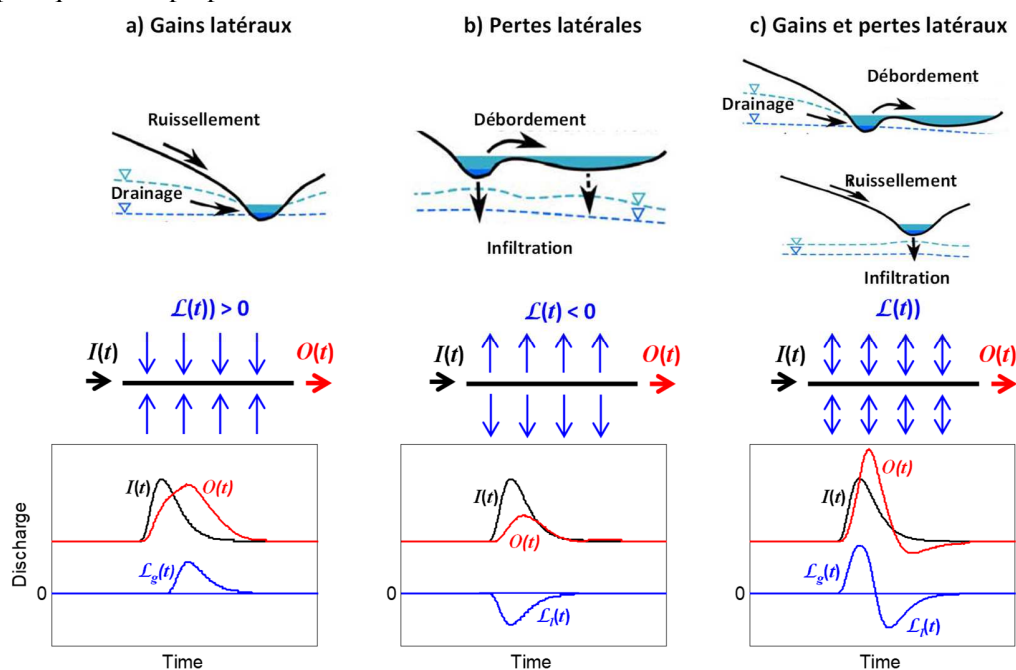


Figure 1 : Processus hydrologiques générant des écoulements latéraux sur un versant (Haut), représentation des flux le long du cours d'eau (Centre), et représentation des hydrogrammes (Bas) d'entrée $I(t)$ (en noir), de sortie $O(t)$ (en rouge) et de l'écoulement latéral uniformément distribué le long du canal $\mathcal{L}(t)$ (en bleu) pour trois cas : a) gains latéraux correspondant à $\mathcal{L}(t) > 0$; b) pertes latérales correspondant à $\mathcal{L}(t) < 0$; c) gains et pertes latéraux.

Sur la base d'une synthèse de nos travaux récents [[Charlier et al., 2019](#) ; [Cholet et al., 2017](#) ; [Le Mesnil 2021](#) ; [Le Mesnil et al., 2021, 2022](#) ; [Majdalani et al., 2020, 2023](#) ; [Moussa et Majdalani, 2019](#)], cet article discute les domaines et limites d'application du modèle inverse de l'onde diffusante proposé par [Moussa \[1996\]](#) pour calculer l'hydrogramme de l'écoulement latéral et les concentrations en solutés (considérés comme conservatifs sur la durée du suivi), et discute l'intérêt de la plateforme expérimentale pour la validation du modèle et son transfert pour des applications sur des bassins naturels. Nous utilisons une démarche mixte de modélisation et d'expérimentations :

- i) sur une plateforme expérimentale ou un modèle réduit du cours d'eau, où les hydrogrammes et la conductivité électrique de l'eau (correspondant à sa minéralisation) des entrées, sorties et gains/pertes latéraux sont mesurés : l'objectif de ces expérimentations est de disposer d'un grand nombre d'événements de crues en milieu contrôlé. Ces données sont utilisées : i) pour valider

l’approche de modélisation hydraulique inverse, eau et solutés; ii) pour vérifier et modéliser des relations hydrauliques complexes, difficiles à mesurer et observer in situ tels les hystérésis hauteur-débit et concentration-débit.

- ii) sur des bassins naturels où les hydrogrammes et les concentrations des entrées et sorties seulement sont disponibles : l’objectif est d’appliquer la méthodologie sur des sites où les données sur les échanges latéraux manquent, afin d’établir un schéma de fonctionnement hydrologique des échanges nappe-rivière lors des crues.

2. Évaluation par modélisation inverse des apports latéraux et des concentrations

Une approche de modélisation inverse est adoptée pour simuler l’écoulement latéral entre deux stations de jaugeage. Cette approche simule l’écoulement latéral $\mathcal{L}(t)$, connaissant les hydrogrammes d’entrée $I(t)$ et de sortie $O(t)$. L’équation de l’onde diffusive tenant compte de l’écoulement latéral, est une approximation du système d’équations de Saint-Venant :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C(Q) \left[\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right] - D(Q) \left[\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \frac{\partial q}{\partial x} \right] = 0 \quad (1)$$

où x [L] est l’abscisse le long du canal et t [T] est le temps. La célérité $C(Q)$ [LT^{-1}] et la diffusivité $D(Q)$ [L^2T^{-1}] sont des fonctions du débit Q [L^3T^{-1}]. Le terme $q(x, t)$ [L^2T^{-1}] représente l’écoulement latéral. L’hydrogramme des apports latéraux $\mathcal{L}(t)$ est donné par :

$$\mathcal{L}(t) = \int_0^l q(x, t) dx \quad (2)$$

où l [L] est la longueur du tronçon. Une solution analytique de l’Equation (1) est proposée par Moussa [1996] sous les hypothèses : i) d’un tronçon semi-infini sans condition aval, ii) de valeurs constantes de C et D , et iii) $q(x, t)$ est uniformément réparti le long du cours d’eau. On obtient :

$$O(t) = \varphi(t) + [I(t) - \varphi(t)] * K(t) \quad (3)$$

où $K(t)$ est le noyau d’Hayami et le symbole « * » est le produit de convolution :

$$K(t) = \frac{l}{2(\pi D)^{1/2}} \frac{e^{\left[\frac{Cl}{4D} \left(2 - \frac{l}{Ct} - \frac{Ct}{l} \right) \right]}}{t^{3/2}} \quad (4)$$

et

$$\varphi(t) = \frac{c}{l} \int_0^t [Q_L(\theta) - Q_L(0)] d\theta \quad (5)$$

Le problème inverse consiste à calculer $\mathcal{L}(t)$ connaissant $I(t)$ et $O(t)$. Sous les hypothèses que les apports latéraux sont uniformément répartis le long du tronçon, et que C et D sont constants, Moussa [1996] propose une solution analytique :

$$\mathcal{L}(t) = Q_L(0) + \frac{l}{c} \frac{d\varphi}{dt} \quad (6)$$

avec

$$\varphi(t) = \mathcal{L}(t) + \mathcal{L}(t) \sum_{i=1}^{\infty} K^i(t) \quad (7)$$

$$L(t) = O(t) - I(t) * K(t) \quad (8)$$

$$K^i(t) = K * K * \dots * K(\text{ifois}) \quad (9)$$

L’analyse de sensibilité de l’Equation (1) et les méthodes d’estimation des deux paramètres (C , D) ont été largement discutées dans la littérature [Charlier et al., 2019 ; Cholet et al., 2017 ; Moussa et Majdalani, 2019]. Dans les applications, C et D ont été estimés par calage sur des événements où les apports latéraux $\mathcal{L}(t)$ sont négligeables.

La même méthode a été étendue pour des applications pour le transfert de solutés conservatifs en remplaçant dans l'Equation 1 : i) le débit Q par la masse de soluté M (avec $M = \text{Concentration} \times Q$) et ii) les deux paramètres célérité et diffusivité (C, D) par les deux paramètres équivalents de l'équation d'advection-diffusion, soit la vitesse d'advection et diffusion (C_s, D_s) pour les solutés.

La démarche de modélisation comporte deux étapes :

- Calage des deux paramètres, sur des événements où il n'y a pas d'apports et pertes latéraux. Il s'agit de caler un couple (C, D) pour l'eau et un autre (C_s, D_s) pour les solutés.
- Application du modèle inverse [9] pour calculer les hydrogrammes des apports et pertes latéraux et les concentrations correspondantes. Les performances du modèle sont évaluées en calculant les critères de Nash-Sutcliffe, ainsi que les erreurs sur la valeur et le temps d'occurrence des pics des hydrogrammes des écoulements latéraux et des concentrations.

3. Plateforme expérimentale et sites d'étude

3.1. Plateforme expérimentale

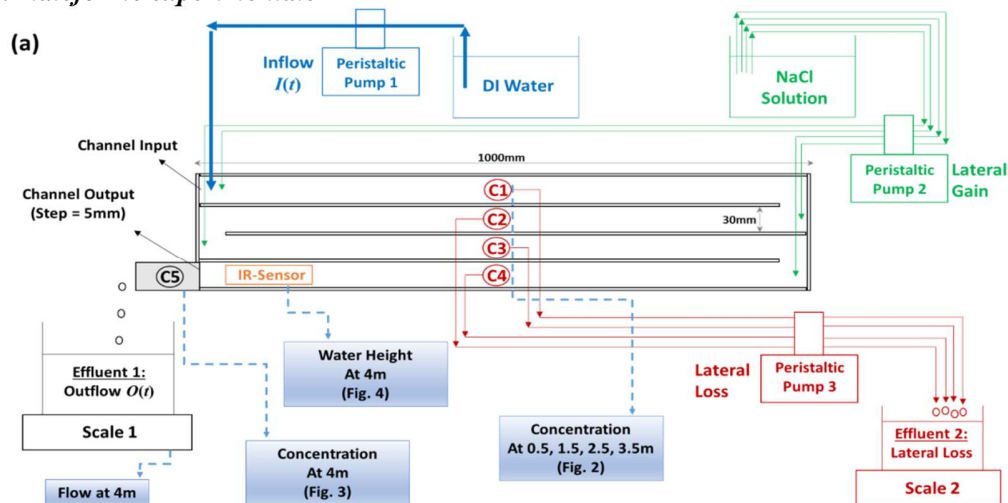


Figure 2 : Plateforme expérimentale. Bleu : Entrée d'eau désionisée $I(t)$ à 0 m. En vert : Apport latéral de NaCl qui peut être introduit soit en un point soit réparti à quatre abscisses d'espace différentes. Rouge : Pertes latérales qui sont uniformément réparti à 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5 m. Les conductimètres C1, C2, C3 et C4 mesurent la concentration des pertes latérales. La balance 2 mesure le débit de pertes latérales. Noir : Le conductimètre C5 mesure la concentration du débit à la sortie (à 4m). La balance 1 mesure le débit sortant (à 4m). Gris : Toutes les mesures sont enregistrées au pas de temps de 1s.

Le canal expérimental est un serpentín de 4 m de long avec quatre fois 1 m, 3 cm de largeur et 5 cm de hauteur (Figure 2). Trois pompes sont utilisées pour simuler respectivement le débit entrant $I(t)$, les gains latéraux $\mathcal{L}_g(t)$ et les pertes latérales $\mathcal{L}_l(t)$ uniformément répartis le long du canal. Le débit de sortie $O(t)$ est mesuré par une balance. Le pas de temps de mesure est la seconde. Nous avons réalisé deux catégories d'applications :

- Sur le canal rectangulaire [Majdalani et al., 2020 ; Moussa et al., 2019] : 62 scénarios expérimentaux correspondant à différentes formes de $I(t)$ et $\mathcal{L}_l(t)$ et différentes concentrations de NaCl. Les variables mesurées sont les débits (Q) et la concentration (C) en solutés de $I(t)$, $O(t)$ et $\mathcal{L}_l(t)$.
- En remplaçant le canal rectangulaire par un modèle réduit de la partie aval du Var en utilisant une imprimante 3-D (1,80 m de long, 3 cm de large et 4 cm de haut ; [Majdalani et al., 2023] ; Figure 3). Nous générons des hydrogrammes de crue inspirés de l'événement de la crue de 1994. Des simulations ont été menées pour différentes conditions aval et différentes pentes. Les variables mesurées sont les débits de $I(t)$, $O(t)$ et $\mathcal{L}_l(t)$, ainsi que les hauteurs (H) d'eau à l'exutoire.

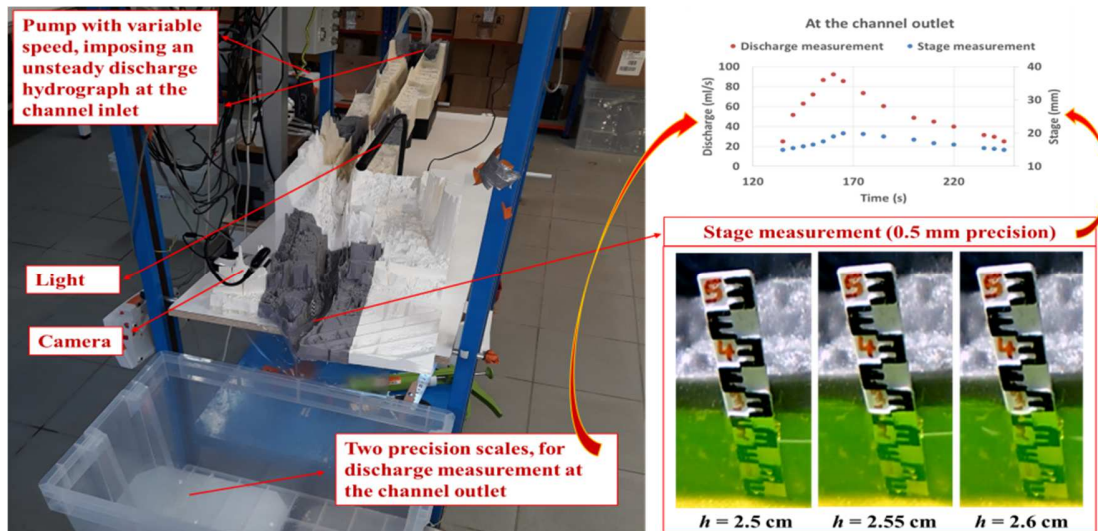


Figure 3. A gauche : Modèle imprimé en 3D du fleuve Var à son embouchure (180 cm de long, 3 cm de large et 4 cm de hauteur moyenne) ; [8]. A droite en bas : Règle avec une précision de 0,5 mm pour la mesure du niveau d'eau à la sortie du canal. En haut à droite : exemple de mesures des débits et des niveaux d'eau à la sortie du canal.

3.2. Bassins karstiques

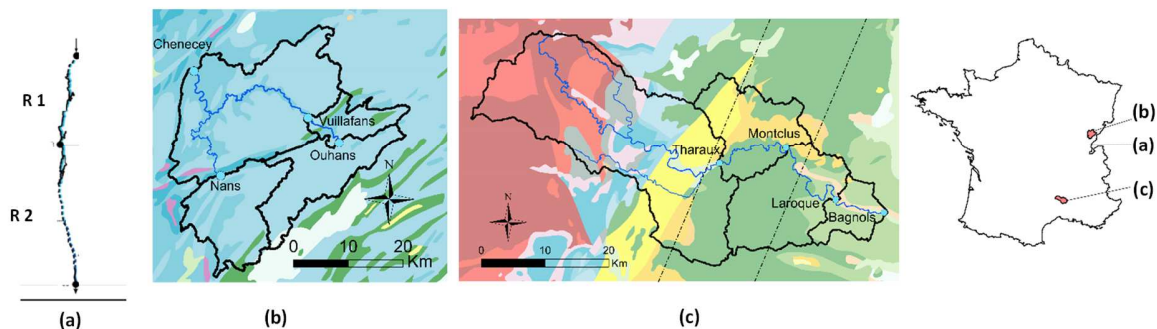


Figure 4 : Localisation des zones karstiques, des stations de jaugeage et du réseau fluvial sur les bassins versants étudiés : (a) Fourbanne, (b) la Loue, et (c) la Cèze.

Nous avons étudié des bassins karstiques où les échanges surface-souterrain sont un processus majeur des crues (Figure 4) : deux tronçons sur la rivière souterraine de Fourbanne dans le Doubs [Cholet et al., 2017], deux tronçons de rivière dans le bassin de la Loue dans le Doubs, et trois tronçons dans le bassin de la Cèze dans les Cévennes [Le Mesnil, 2021 ; Le Mensil et al., 2021, 2022]. Les données de pluie, débit et conductivité électrique sont acquises au pas de temps horaires. Le nombre d'événements de crues Débit-Débit est de 7 pour Fourbanne, 58 sur la Loue, et 8 sur la Cèze.

4. Résultats

4.1. Plateforme expérimentale

La Figure 5 montre des exemples d'hydrogrammes des écoulements latéraux reconstitués sur le canal rectangulaire. Pour l'ensemble des 62 scénarios expérimentaux, on obtient pour les hydrogrammes reconstitués des écoulements latéraux des critères de Nash-Sutcliffe supérieurs à 0.85 et des erreurs sur les débits de pointe inférieurs à 15 % pour 70 % des événements. On obtient des résultats comparables

pour les concentrations. Ces premiers résultats ont permis : i) de vérifier l’applicabilité du modèle de l’onde diffusante sur des micro-chenaux ; ii) de vérifier l’applicabilité du modèle de l’onde diffusante pour la conductivité électrique et iii) de vérifier la solution analytique du modèle inverse (Equations 6 à 9) aussi bien pour l’eau que pour la conductivité électrique.

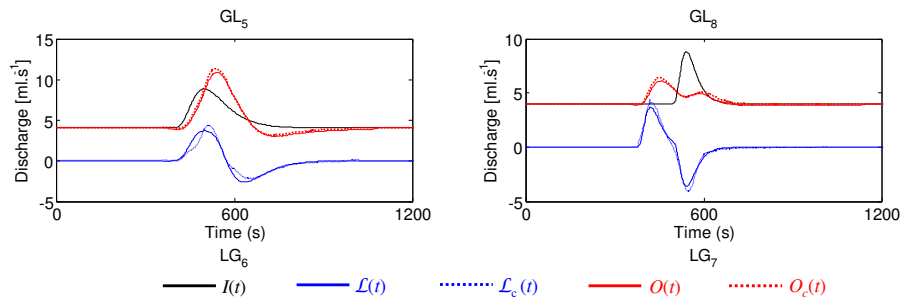


Figure 5 : Exemples de validation du modèle sur le canal expérimental sur 2 scénarios. Hydrogramme d’entrée $I(t)$ en noir continu, écoulement latéral mesuré $L(t)$ en bleu continu, hydrogramme de sortie mesuré $O(t)$ en rouge continu, écoulement latéral calculé $L_c(t)$ en bleu pointillé, et hydrogramme de sortie calculé $O_c(t)$ en rouge pointillé.

Les applications sur le modèle réduit du Var [Majdalani et al., 2023] ont permis de simuler la propagation de la crue de 1994 et d’établir les relations d’hystérésis hauteur-débit (Figure 6).

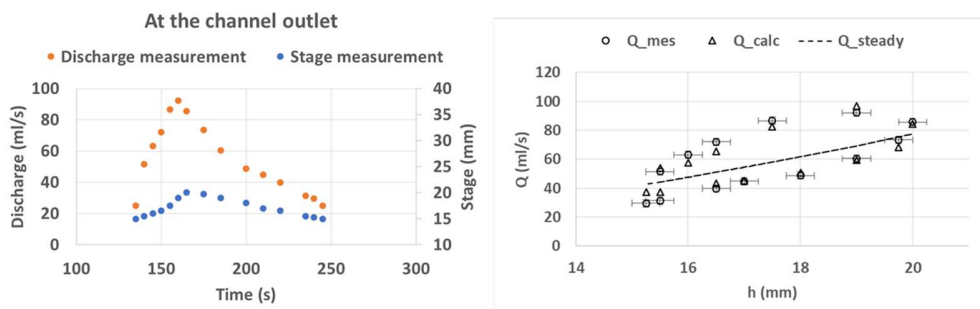


Figure 6 : Exemple de mesures de hauteur et débit (à gauche) et de la courbe d’hystérésis hauteur-débit (à droite) : points mesurés (Q_{mes}), simulation par la formule de Jones [3] (Q_{calc}), courbe de tarage en régime stationnaire (Q_{steady}) et les barres d’erreurs sur les mesures.

Nous avons testé 11 scénarios [Majdalani et al., 2023] correspondant à différentes conditions d’écoulement où nous avons fait varier les paramètres suivants : condition aux limites aval (chute libre ou déversoir), pente du canal (plat = 0,1 % ou pointu = 10 %), longueur d’onde de l’hydrogramme (court ou long). Les résultats expérimentaux à petite échelle sont conformes aux observations expérimentales à grande échelle, et les courbes de tarage expérimentales sont très bien simulées par la formule de Jones [1916] qui est utilisée sur les canaux ou rivières à grande échelle. Ces résultats montrent la capacité de la plateforme de mesurer des relations hydrauliques complexes tels les hystérésis Hauteur-Débit et Débit-Concentration, à des échelles spatio-temporelles fines, ainsi que de disposer d’une de nombreuses données mesurées pour différentes conditions d’expérimentation.

4.2 Bassins karstiques

Les applications du modèle inverse de l’onde diffusante sur les deux tronçons de la rivière souterraine à Fourbanne ont montré des contributions latérales différentes des deux tronçons (Figure 7) : avec d’importants apports latéraux sur le tronçon amont R1 situé dans la zone non saturée de l’aquifère et d’importantes pertes latérales sur le tronçon aval R2 situé dans la zone non saturée et saturée. En combinant ces résultats avec les échanges de flux de masse, nous avons montré que les apports latéraux

sur R1 sont l'addition de l'infiltration diffuse et de l'infiltration localisée dans le réseau de conduits secondaires. Sur R2, malgré des apports sur le débit de base, des pertes latérales sont observées lors des crues.

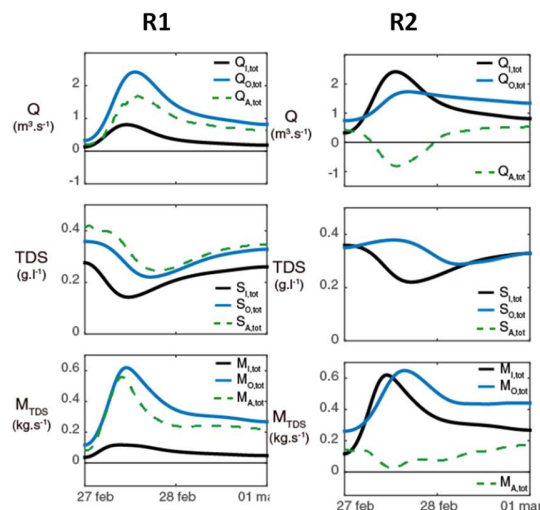


Figure 7 : Application du modèle inverse de l'onde diffusante sur les tronçons amont R1 et aval R2 sur le site de Fourbanne sur le Doubs. En trait continu les variables mesurées et en pointillé les variables calculées par le modèle : Q est le débit, TDS est la matière dissoute totale (Total Dissolved Solids) et M_{TDS} la masse correspondante.

Les applications sur les bassins versants de la Loue et de la Cèze ont permis d'étudier le processus d'échange surface-souterrain sur différents types de tronçon : gain, perte, alternance de pertes et gains [Cholet et al., 2017]. Les résultats ont permis d'évaluer les hydrogrammes d'écoulements latéraux et les concentrations correspondantes (et les hystérésis Concentration-Débit, [Le Mesnil et al., 2022]), et par conséquent proposer un schéma du fonctionnement hydrologique de l'ensemble des sous-bassins versants (Figure 8). Ces résultats illustrent l'utilisation du modèle inverse i) pour évaluer les flux d'eau latéraux qui renseignent sur les quantités d'eau acheminées entre les différents compartiments du bassin versant ainsi que le sens des échanges ; ii) pour identifier l'origine des eaux lors des crues (pré-événementielle ou événementielle) par comparaison des concentrations calculées pour les apports/pertes latéraux et celles des eaux des différents compartiments du bassin versant.

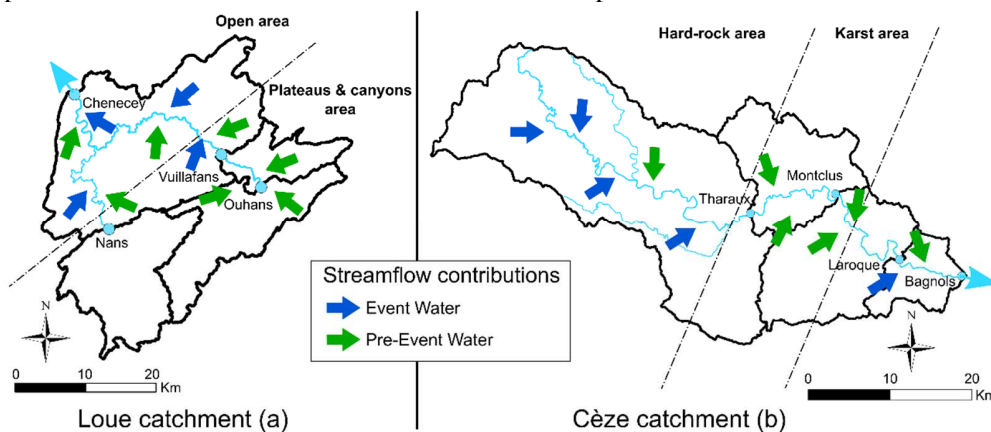


Figure 8 : Schémas de fonctionnement des bassins de la Loue (a) et de la Cèze (b) (Event Water : Eau événementielle ; Pre-Event Water : eau pré-événementielle)

5. Discussion

5.1. *Le modèle inverse de l'onde diffusante*

Le modèle inverse permet de calculer l'hydrogramme des écoulements latéraux $\mathcal{L}(t)$ (gains et/ou pertes) connaissant les hydrogrammes d'entrée $I(t)$ et de sortie $O(t)$ en faisant l'hypothèse que les écoulements latéraux sont uniformément répartis le long du tronçon. Le modèle inverse de l'onde diffusante est une solution analytique parcimonieuse à deux paramètres (C, D), à base physique et facile à utiliser. Une difficulté réside dans la pré-estimation de paramètres (C, D) qui peut se faire à partir des analyses des couples $[I(t), O(t)]$ d'événements avec peu d'apports. L'évaluation de la robustesse du modèle inverse sur des bassins naturels est un exercice difficile en raison du manque de mesures des gains/pertes latéraux aussi bien pour l'eau que des solutés. Toutefois, la compréhension des processus d'échange latéraux est d'un grand intérêt pour établir un schéma de fonctionnement du bassin versant, et par conséquent pour améliorer les modèles de prévision des crues et des inondations. La plateforme expérimentale offre les données nécessaires permettant de valider le modèle inverse. Les résultats des différentes applications sur la plateforme ont montré l'applicabilité du modèle de l'onde diffusante : i) sur des micro-chenaux de quelques mètres de long et quelques centimètres de largeur, ii) l'applicabilité du modèle de l'onde diffusante pour des variables conservatives telle la conductivité électrique et iii) la vérification de la solution analytique du modèle inverse aussi bien pour le débit que pour la conductivité électrique de l'eau.

Les applications du modèle inverse sur des bassins karstiques ont permis de quantifier les flux latéraux échangés, la direction des flux échangés (apports/pertes) ainsi que l'origine des eaux lors des crues par comparaison des conductivités électriques calculées pour les apports/pertes latéraux et celles des eaux des différents compartiments du bassin versant.

5.2. *La plateforme expérimentale*

Nous avons développé une nouvelle plateforme afin d'étudier la propagation des ondes des crues ainsi que les concentrations en solutés dans un canal expérimental. L'objectif était d'avoir la plus petite taille de plateforme expérimentale qui soit utile pour la recherche, les études de projet, les activités d'enseignement, et qui permette de faire des expériences caractérisées par une faible occupation de l'espace, une courte durée expérimentale, une grande précision de mesure, une reproductibilité des expériences, une faible consommation d'eau et d'énergie, et la possibilité de tester une grande variété de scénarios d'hydrogrammes. Les applications menées récemment visaient à aller plus loin dans le développement de la plateforme, et avait un double objectif. Le premier est technique et vise à utiliser une imprimante 3D pour représenter un cours d'eau naturel, et le second scientifique car on s'est interrogé sur la possibilité d'observer un processus hydraulique difficile à mesurer in-situ tel l'hystérésis hauteur-débit. Pour cela, nous avons utilisé une imprimante 3D pour construire un modèle déformé grâce au MNT du fleuve Var comme exemple de faisabilité.

Des modèles physiques imprimés en 3D peuvent être utilisés pour simuler des flux d'eau réels représentant des canaux naturels à l'échelle 1:1 en laboratoire. L'objectif est d'étudier des phénomènes hydrauliques complexes tels que la genèse du ruissellement, le transfert de solutés, l'érosion, le transfert de grains, etc. Les modèles réduits imprimés en 3D peuvent également être utilisés pour former des techniciens et des ingénieurs aux principes de l'hydraulique, ou comme modèle de démonstration pour discuter avec les élus, les parties prenantes et la population. Ils permettent une compréhension pratique des concepts théoriques. La plateforme expérimentale et l'exemple du modèle réduit du Var ont été utilisés à des fins pédagogiques comme des travaux pratiques et des formations en cursus à la fois à Polytech Montpellier à l'Université de Montpellier et à Polytech Nice à l'Université Nice Côte d'Azur.

5.3. *Les applications sur des bassins karstiques*

Les applications sur bassins naturels permettent de mieux appréhender le domaine de validité du modèle à l'échelle où la prévision des crues est réalisée. Le cas des bassins karstiques a été sélectionné

car ce sont des bassins au fonctionnement hydrologique complexe [Charlier et al., 2019 ; Cholet et al., 2017 ; Le Mesnil, 2021] où la prévision des crues reste un défi important. Ils se caractérisent notamment par d’importantes interactions surface-souterrain qui se produisent au cours de la crue. Les résultats de l’application de la modélisation inverse sur les différents bassins versants karstiques a permis de mettre en évidence qu’une part importante de l’écoulement de crue provenait du souterrain [Cholet et al., 2017 ; Le Mesnil et al., 2021]. Cela est dû aux transferts rapides de l’eau à travers les réseaux de conduits de grande dimension. En parallèle, ces bassins sont également sujets à des pertes importantes qui peuvent contribuer au laminage des crues [Le Mesnil et al., 2021]. La forte perméabilité des terrains géologiques et la faible épaisseur de sols sur bassins karstiques limitent fortement le ruissellement de surface, provoquant une diminution des débits jusqu’à rendre certains tronçons intermittents [Charlier et al., 2019].

La modélisation hydrologique des bassins karstiques nécessite de tenir compte de ces différents processus de gains et de pertes, fortement variables i) dans l’espace sur un même bassin, et ii) dans le temps selon le niveau de saturation de l’aquifère karstique [Cholet et al., 2017]. On voit que l’application de l’approche inverse du modèle de l’onde diffusante est une étape de diagnostic indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique afin d’aider à dimensionner le type de modèle, sa structure et sa paramétrisation, dans un but de simuler les crues.

6. Conclusion

Les échanges latéraux sur un tronçon de rivière constituent l’un des principaux processus hydrologiques en crue. La difficulté majeure réside dans l’impossibilité de calculer le débit latéral. Cette étude utilise des approches complémentaires d’expérimentation et de modélisation pour évaluer l’évolution temporelle des échanges latéraux. Ce travail a permis en premier la réalisation d’une plateforme expérimentale caractérisée par une faible occupation de l’espace, une courte durée expérimentale, une grande précision de mesure, des courbes expérimentales de haute qualité et reproductibles, une faible consommation d’eau et d’énergie, et la possibilité de tester une grande variété de scénarios d’hydrogrammes. Pour illustrer la démarche, les applications sont menées sur un canal rectangulaire et sur un modèle réduit de la partie aval du Var. La plateforme permet de disposer d’un grand nombre d’événements de crue en milieu contrôlé, indispensables pour vérifier et valider les modèles hydrauliques : onde diffusante, modèle inverse et hystérésis $H-Q$ et $C-Q$. Ce travail a aussi permis le développement et l’application du modèle inverse afin de calculer les hydrogrammes de gains et de pertes latéraux ainsi que les concentrations. Les applications sur le canal expérimental ont permis de valider les équations du modèle, et les applications sur des bassins naturels ont permis d’évaluer les flux d’échanges latéraux et de proposer un schéma de fonctionnement hydrologique en crue du bassin. Cette démarche mixte d’expérimentation et de modélisation est d’un grand intérêt pour la modélisation hydrologique de crue, pour l’hydrologie opérationnelle et pour l’enseignement.

7. REMERCIEMENTS

Nous remercions Jean-Philippe Chazarin à HSM pour son aide dans le développement de la plateforme expérimentale, les étudiants Axelle Gaffet, Lily Julliard, Steven Lhomoy, et Louise Paquet, ainsi que TelecomValley et le SoFAB de Polytech à l’Université de Nice Côte d’Azur pour leur participation à la construction du modèle 3D de la partie aval du fleuve Var. Les Modèles Numériques de Terrain utilisés pour cette étude ont été gracieusement fournis par Métropole Nice Côte d’Azur. Les travaux sur bassins naturels ont été financés par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de la Transition écologique et solidaire, par l’intermédiaire du Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), et le BRGM.

8. RÉFÉRENCES

- [1] Chanson, H., 1999. The Hydraulics of Open Channel Flow, Chapter 14 : “Physical modelling of Hydraulics”, published by Arnold, London, UK.
- [2] Charlier, J.-B., Moussa, R., David, P.-Y., Desprats, J.-F., 2019. Quantifying peakflow attenuation/amplification in a karst river using the diffusive wave model with lateral flow, *Hydrological Processes*, 33, 2337–2354. <https://doi.org/10.1002/hyp.13472>.
- [3] Cimorelli, L., Cozzolino, L., Della Morte, R., Pianese, D., 2014. Analytical solutions of the linearized parabolic wave accounting for downstream boundary condition and uniform lateral inflows, *Adv. Water Resour.* 63, 57–76.
- [4] Cholet, C., Charlier, J.-B., Moussa, R., Steinmann, M., Denimal, S., 2017. Assessing lateral flows and solute transport during floods in a conduit-flow-dominated karst system using the inverse problem for the advection–diffusion equation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3635–3653.
- [5] Errico, A., Pasquino, V., Maxwald, M., Chiricod, G.B., Solarie, L., Pretia, F., 2018. The effect of flexible vegetation on flow in drainage channels: Estimation of roughness coefficients at the real scale. *Ecological Engineering* 120, 411–421.
- [6] Ettema, R., Muste, M., 2004. Scale Effects in Flume Experiments on Flow around a Spur Dike in Flatbed Channel. *Journal of Hydraulic Engineering* 130, 635–646.
- [7] Fan, P., Li, J., 2006. Diffusive wave solutions for open channel flows with uniform and concentrated lateral inflow. *Adv. Water Resour.* 29, 1000–1019.
- [8] Heller, V., 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *J. Hydraul. Res.* 49(3), 293 – 306.
- [9] Jones, B. E. (1916) A method of correcting river discharge for a changing stage. US Geol. Survey Water Supply Paper 375-E. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp375E>
- [10] Jung, S., Kang, J., Hong, I., Yeo, H., 2012. Case Study: Hydraulic Model Experiment to Analyze the Hydraulic Features for Installing Floating Islands. *Engineering*, 4(2), 10 pp
- [11] Le Mesnil, M., 2021. Signatures Hydrologiques des Bassins Karstiques. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro.
- [12] Le Mesnil, M., Charlier, J. B., Moussa, R., & Caballero, Y., 2022. Investigating flood processes in karst catchments by combining concentration-discharge relationship analysis and lateral flow simulation. *Journal of Hydrology*, 605, 127358
- [13] Le Mesnil M., R. Moussa, J.-B. Charlier, Y. Caballero, 2021. Impact of karst areas on runoff generation, lateral flow and interbasin groundwater flow at the storm-event timescale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25: 1259–1282. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1259-2021>.
- [14] Majdalani, S., Moussa, R., Chazarin, J.-P., 2020. A novel platform to evaluate the dampening of water and solute transport in an experimental channel under unsteady flow conditions. *Hydrological Processes*, 34, 956–971. Article ID: hyp13624. DOI: 10.1002/hyp.13624
- [15] Majdalani, S., Delestre, O., Moussa, R., 2023. Experimental investigation of loop rating curve on a small 3D printed laboratory channel. *Journal of Hydrology*, 623, 129741, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129741>
- [16] Moussa, R., 1996. Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. *Hydrological Processes* 10(9) : 1209–1227.
- [17] Moussa, R., Majdalani, S., 2019. Evaluating lateral flow in an experimental channel using the diffusive wave inverse problem. *Advances in Water Resources*, vol 127, 120–133. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.009>
- [18] Rudi, G., Bailly J.S., Belaud G., Vinatier, F., 2018. Characterization of the long-distance dispersal of Johnsongrass (*Sorghum halepense*) in a vegetated irrigation channel. *River Res. Applic.*, 34, 10 pp., <https://doi.org/10.1002/rra.3356>.
- [19] Vinatier, F., Bailly, J.S., Belaud, G., 2017. From 3D grassy vegetation point cloud to hydraulic resistance: Application to close-range estimation of Manning coefficients for intermittent open channels. *Ecohydrology* 10(8), e1885.