

Une approche hydrologique–hydraulique apprenable pour l'assimilation variationnelle de données multi-sources à l'échelle du réseau fluvial

Congrès Eau & IA 2026

Ngoc Bao NGUYEN,
Ngo Nghi Truyen HUYNH,
Mouad ETTALBI,
Pierre-André GARAMBOIS
INRAE RECOVER

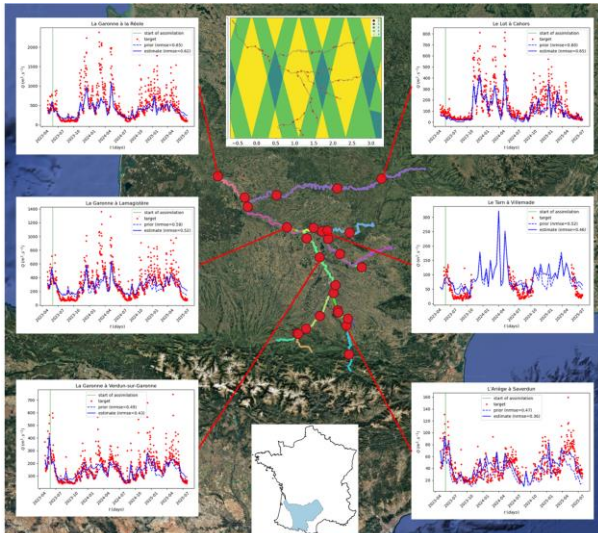
Contexte et Motivation

Mission SWOT : observations satellitaires (hauteur d'eau, largeur, pente) spatio-temporelles (“visibilité hydraulique”, e.g. Le Dauphin et al 2025) + debits in situ épars

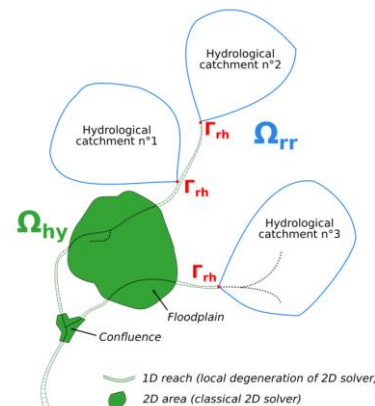
Problème mal posé : estimer le débit à partir de données altimétriques seules

Nécessité d'une **approche intégrée** hydrologie–hydraulique (H&H) (Pujol 2022, Larnier 2025) – « fermeture » du probleme, remontée d'information hydraulique

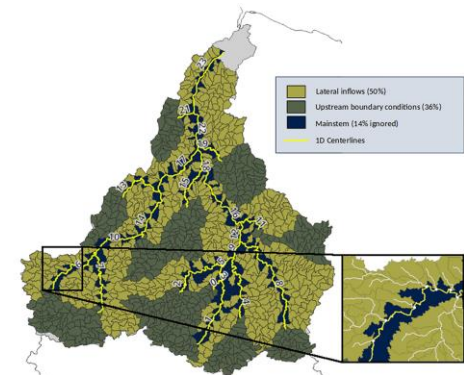
Opportunité : **programmation différentiable + IA** pour l'assimilation variationnelle en modélisation H&H intégrée, l'exploitation du concept “informed hydrology”



$$Q_{r,p} - K_r (A_{r,0} + \delta A_{r,p}^*)^{5/3} W_{r,p}^{*-2/3} \sqrt{S_{r,p}^*} = 0, r \in [1..R], p \in [1..P]$$



Pujol 2022



Larnier 2025

Défis Scientifiques

Incertitudes multiples

Bathymétrie et friction inconnus/incertains

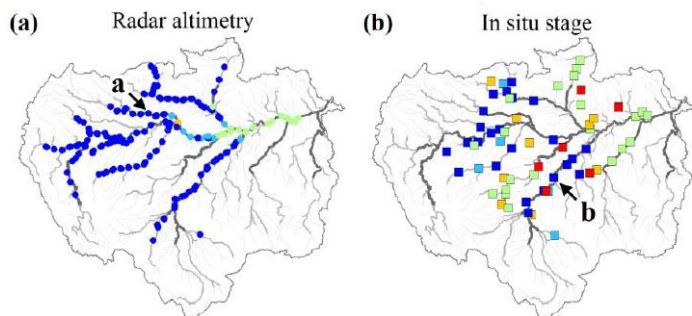
Apports latéraux incertains

Erreurs structurelles des modèles, données incertaines

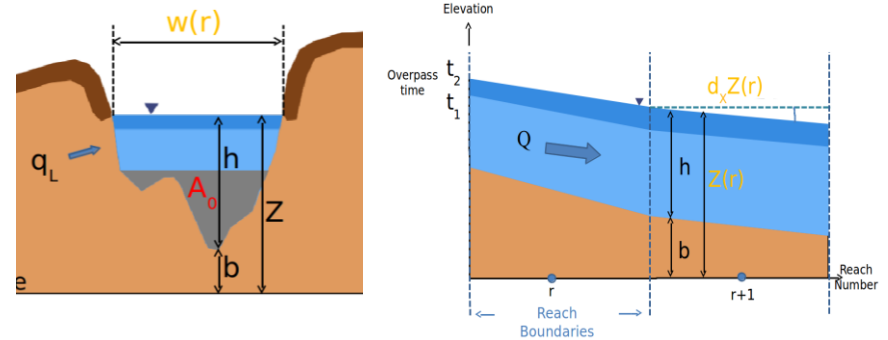
Optimisation H&H conjointe difficile

Approches actuelles : optimisation séquentielle

Manque de cohérence hydrologie $\leftrightarrow$ hydraulique



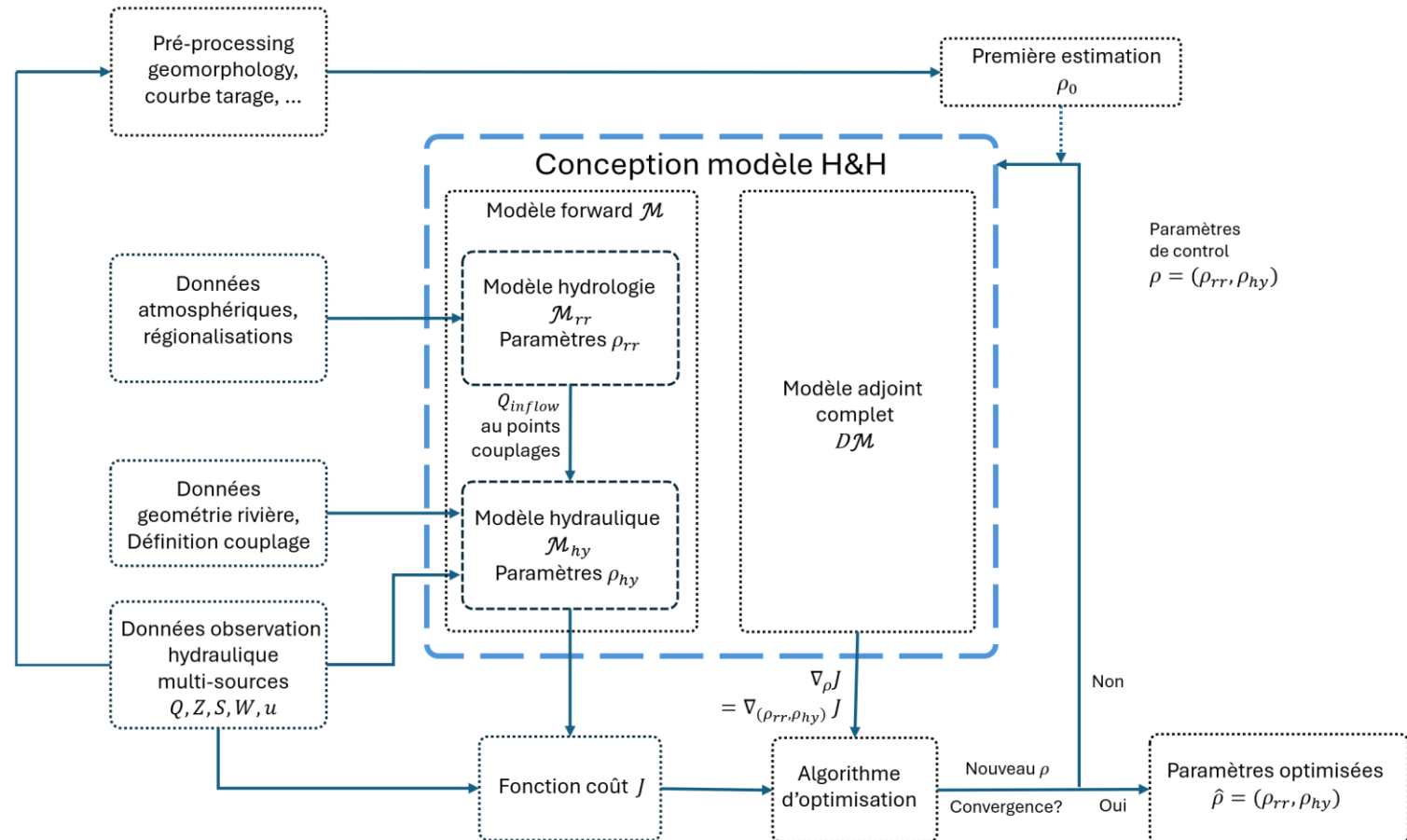
Données observées



Geométrie inconnue

Illustration: données éparses en hydrologie-hydraulique

Concept : Calage Variationnel Hydrologique–Hydraulique



Algorithme basé sur le gradient : propagation de l'information hydraulique → hydrologie

Conception unifiée permettant l'intégration future de l'IA dans la chaîne d'optimization basée sur le gradient du modèle direct

Travaux sur calage H&H: Pujol et al. 2022 GMD, Ettalbi et al. In prep

Méthode d'implémentation d'un Solvateur H&H Tensoriel Différentiable

Intégration dans un **graphe de calcul unique**

Modules hydrologiques + hydrauliques différentiables

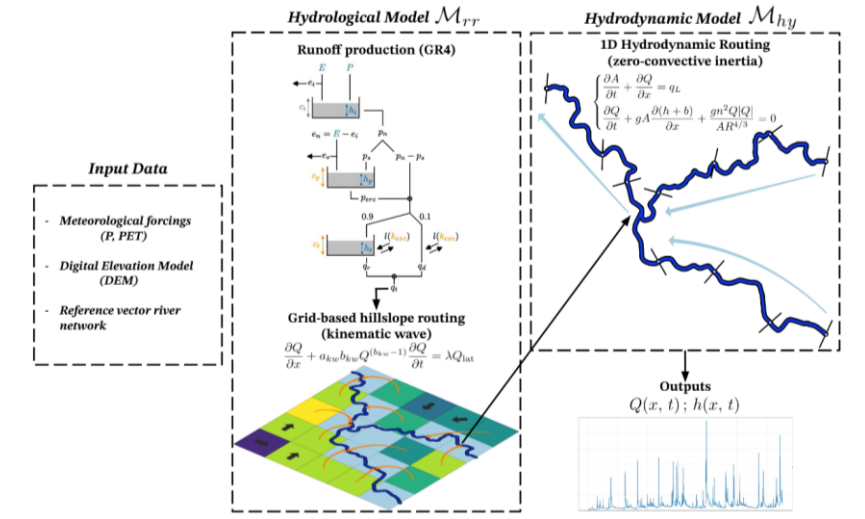
Rétropropagation de bout en bout (end-to-end)

Implémentation **PyTorch**

Base : SMASH-torch (Ettalbi et al. 2025)

Accélération GPU via formulation tensorielle

Mapping d'indices pour réseau hydrographique



Algo couplage H&H (Berkaoui et al. 2026)

Saint-Venant 1D (inertie convective négligée)

Schéma diff. finies explicite (Bates et al. (2010))

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial}{\partial x}(h + b) + g \frac{n^2 |Q| Q}{AR^{4/3}} = 0 \end{cases}$$

Onde cinématique conceptuelle

Schéma diff. finies explicites (Chow et al., 1988)

Routage sur grille et réseau vectoriel

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha_{kw} \beta_{kw} Q^{\beta_{kw}-1} \frac{\partial Q}{\partial t} &= q \\ A &= \alpha_{kw} Q^{\beta_{kw}} \end{aligned}$$

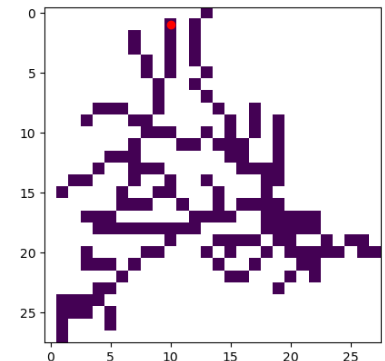


Illustration mapping indice hydraulique Pytorch

Résultats Préliminaires : Bassin de la Cance

Le test du forward:

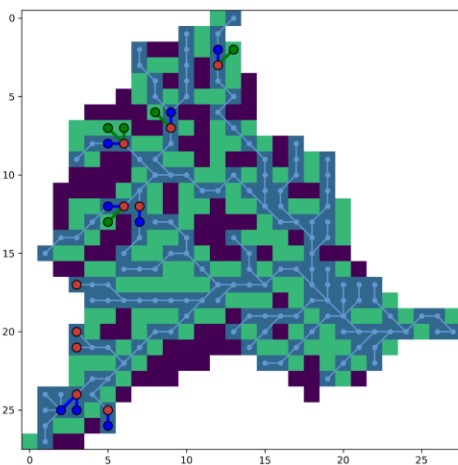
Test la propagation de débit sur bassin de la Cance

Comparaison PyTorch vs Fortran

Hydrogrammes très proches, différences mineures

Implémentation légèrement différente (réservoirs d'interception)

Cohérence de l'implémentation confirmée



Mapping d'indices d'un étape de routage

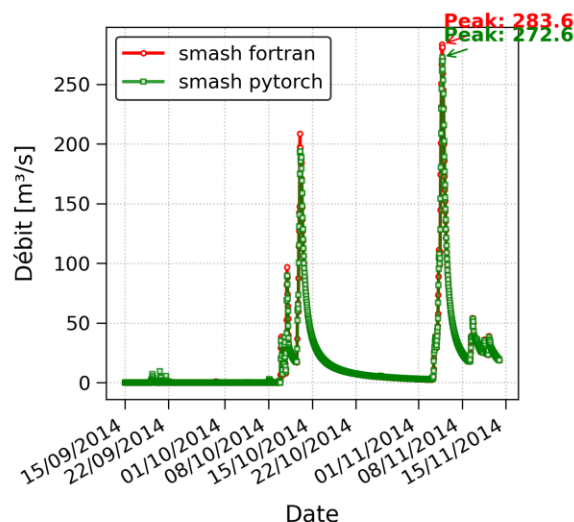
Test du modèle backward:

Calcul automatique du gradient (PyTorch)

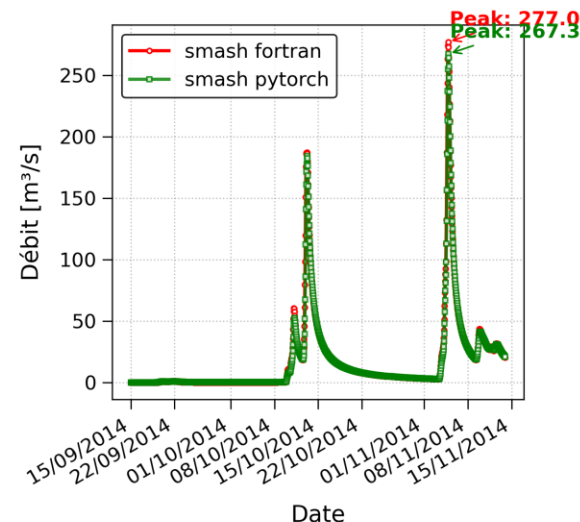
Différentiation automatique des solveurs hydrauliques

Tests préliminaires dans optimisation itérative : cohérents

Saint-Venant non inertial



Fortran kw grid vs Torch kw 1d



Validation : comparaison SMASH PyTorch vs Fortran (gauche: mapping d'indices, centre/droite: hydrogrammes)

Résultats Préliminaires : Bassin de la Cance

Avancés démontrés:

- ✓ Solveurs hydrauliques 1D différentiables en PyTorch
- ✓ Chaîne H&H intégrée avec calcul direct et inverse
- ✓ Validation sur cas réel (bassin de la Cance)
- ✓ Preuve de concept : "Informed hydrology"

Perspectives: travaux en cours

Améliorations techniques

Performances computationnelles (schémas matriciels)

Test rigoureux du gradient

Géométrie et paramétrisation

Sections transversales plus réalistes

Contraintes physiques sur paramètres

Paramétrisations apprenables

Exploitation données SWOT et multi-sources

Assimilation variationnelle à l'échelle du réseau

Calibration régionale multi-bassins

Hybridation physique-IA

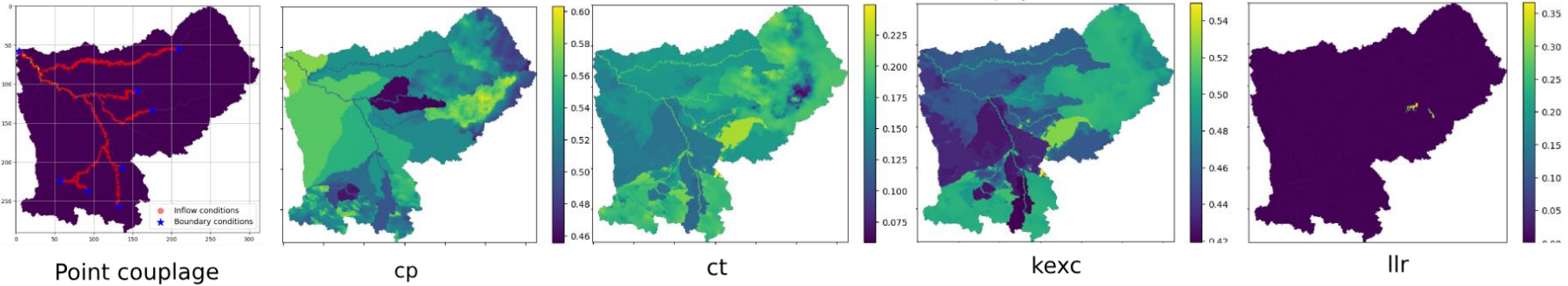
Modules d'IA intégrés au solveur (cf. Hydrologie physique-IA in Huynh et al. 2025, 2026)

Cadre interprétable et différentiable

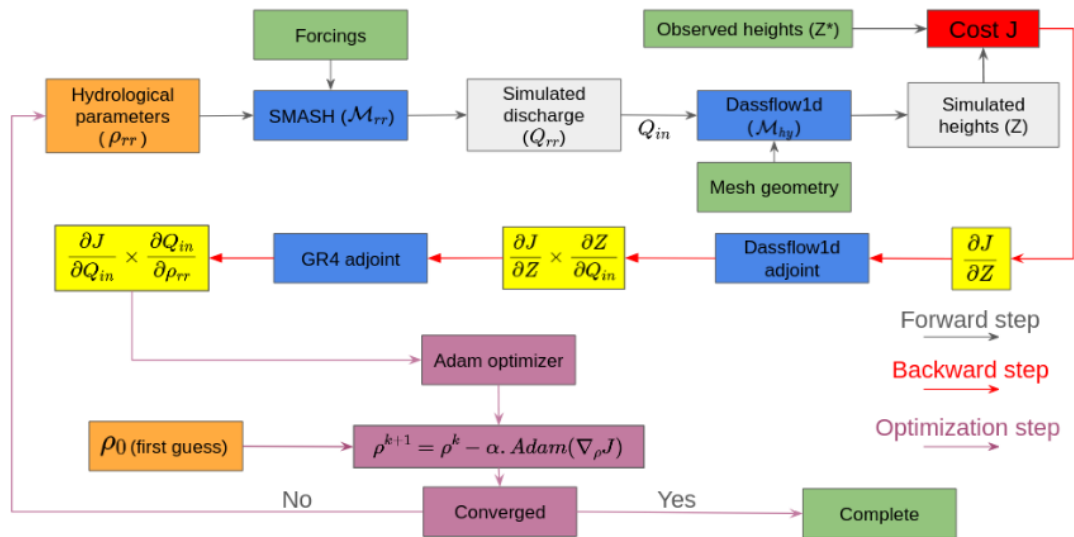
Découverte de nouvelles paramétrisations (bathymetrie-friction)

Perspective H&H

Chaînage SMASH–DassFlow 1D



Faisabilité démontrée : calibration variationnelle des paramètres hydrologiques (cp, ct, kexc, llr)



Ettalbi et al. in prep Smash-Dassflow (Full Saint Venant, adjoint)

Conclusions

Faisabilité démontrée

Solveurs hydrauliques 1D différentiables en PyTorch

Validation sur bassin réel

Avancée méthodologique

Estimation conjointe hydro–hydraulique

Cadre unifié pour assimilation variationnelle

Applications riches : physique-IA, SWOT, multi-capteurs

Merci pour votre attention !

ngoc-bao.nguyen@inrae.fr
INRAE RECOVER