

# Restitution ANR MUFFINS

MUlti-scale Flood Forecasting with INnovating Solutions

## Modélisation hydraulique-hydrologique multi-dimensionnelles des inondations avec assimilation de données multi-sources

09/06/2026

L. Pujol<sup>1</sup>, P-A. Garambois<sup>2</sup>, J. Monnier<sup>3</sup>

- (1) ICUBE-SERTIT, Université de Strasbourg, Strasbourg, France
- (2) Aix-Marseille University, INRAE, UR RECOVER, Aix-en-Provence, France
- (3) INSA Toulouse, Math. Institute of Toulouse (IMT), Toulouse, France



# Vers des jumeaux numériques : approches H&H multi-dimensionnelle et problème inverse

**Objectif : construire et calibrer des modèles de bassins versants complets**

**Mise en cohérence modèles-données :**

- Modéliser les phénomènes H&H clés
- Assimiler les observations disponibles, qui informent sur ces phénomènes clés

**Défis scientifiques :**

- Exploiter des observations multi-sources : hétérogènes en temps, en espace et en nature, au contenu informatif varié
- Résoudre des problèmes inverses mal-posés à l'échelle de bassins versants et produire des paramétrisations explicables et physiquement consistantes

DassFlow1D

DassFlow2D

**En pratique : approches hydrauliques classiques (1D, 2D) et nouvelles (1Dlike-2D)**

# Modélisation H&H multi-dimensionnelle

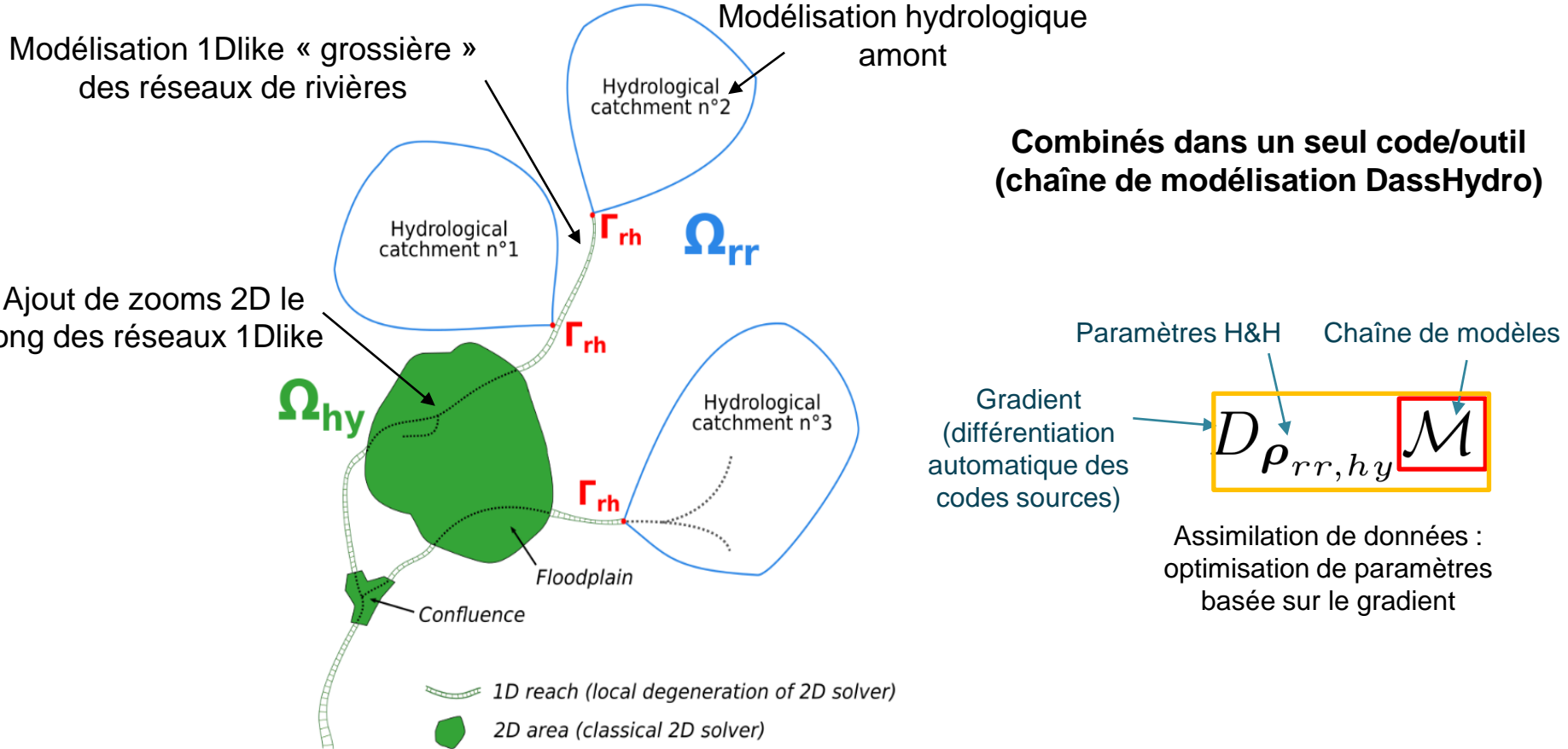


Figure de Pujol et al. (2020)

# Mise en cohérence modèles-données

## Assimilation de données basée sur la gradient $D_{\rho_{rr,hy}} \mathcal{M}$

Vecteur de contrôle (paramètres inconnus/incertains) :

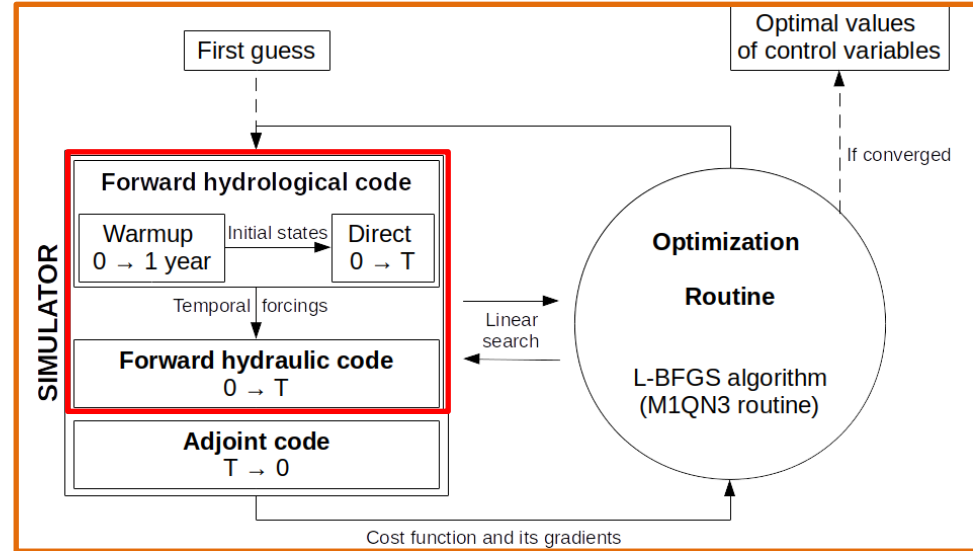
$$\theta = (\theta_{hy}, \theta_{rr})$$

Fonction coût (écart à la réalité observée + régularisation) :

$$j_{obs}(\theta) = \frac{1}{2} \|Y_{obs}(t) - Y(\theta, t)\|_{O_Y}^2$$

Recherche d'un vecteur de contrôle optimal tel que :

$$\begin{cases} \theta^* &= \operatorname{argmin} j(\theta) \\ j(\theta) &= j_{obs}(\theta) + \gamma j_{reg}(\theta) \end{cases}$$



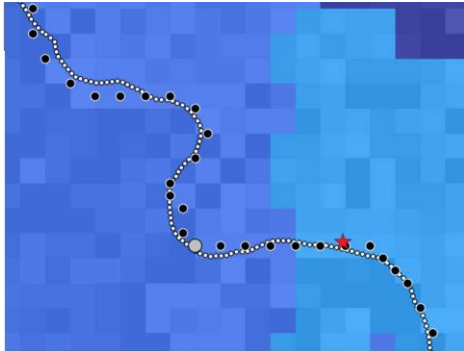
- Calibrage d'un **grand nombre de paramètres** pour des modèles grande échelle et à haute-résolution
- Contraintes du problème inverse mal posé : **régularisation** et **régionalisation**

# Modélisation direct H&H : réseaux 1D et hydrologie distribuée

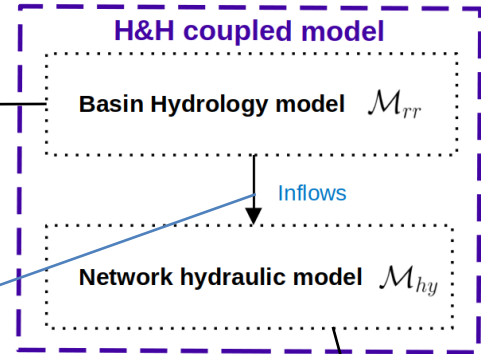
- **SMASH** (Colleoni et al. (2025))
  - Modèle hydrologique distribué type GR
  - Régionalisation de paramètres avancée (ANN, multi-linéaire, voir (Huynh et al. (2024)))

<https://smash.recover.inrae.fr/>  
<https://github.com/DassHydro/smash>

Algorithme de couplage des grilles H&H (Berkaoui et al.)



Grille hydraulique (blanc) vs grille hydrologique à l'interface (noir)



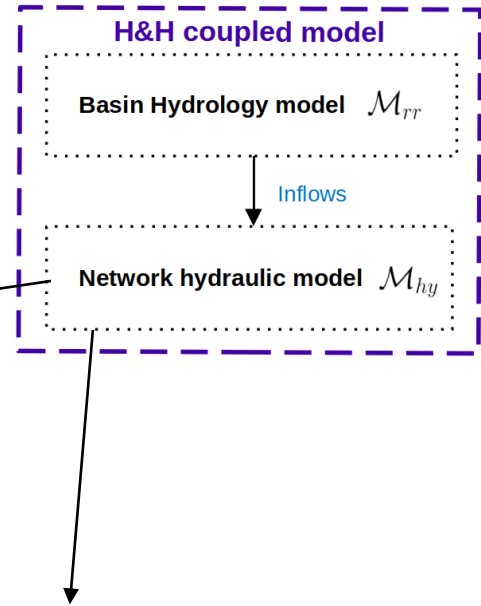
- **DassFlow1D**
  - Modèle hydraulique 1D Saint-Venant
  - Nombreuses applications sur réseaux de rivières : e.g. Rio Negro (Pujol et al. (2020)), Maroni (Larnier et al. (2025))

<https://github.com/DassHydro/dassflow1d>

# Modélisation hydraulique multi-dimensionnelle :

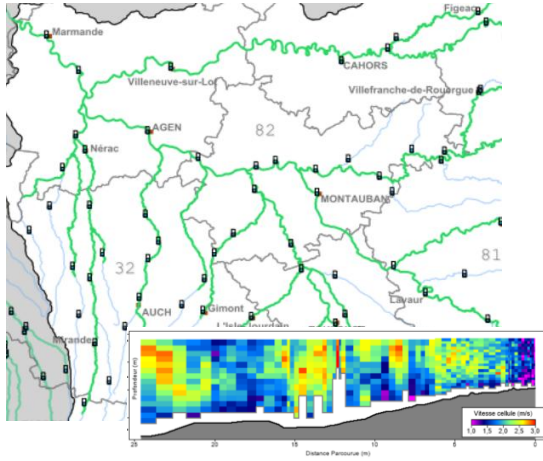
- **DassFlow2D**
  - Modèle hydraulique 2D Shallow Water, schéma Volumes Finis
  - **Approche 1Dlike** (Pujol et al. (2022)) permet la modélisation multi-dimensionnelle et les effets de sinuosité

<https://github.com/DassHydro/dassflow2d>

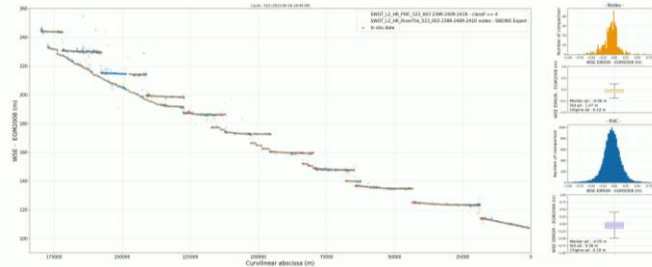


- **GuFo** 🐱 (F. Colleoni)
  - Même solveurs, mêmes capacité d'assimilation
  - Régionalisation avancée (voir Huynh et al. (2024))
  - Codé en JAX
  - Parallélisation CPU et GPU

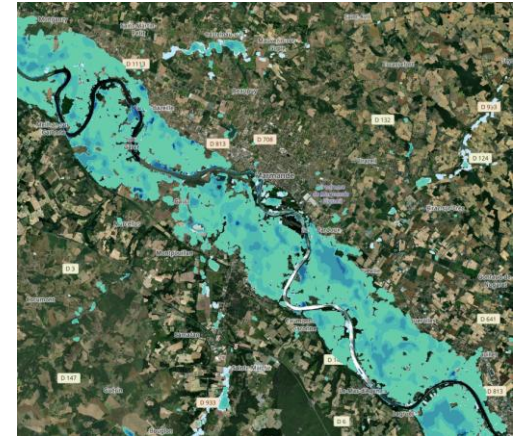
# Données multi-sources



Mesures in situ



Altimétrie satellite

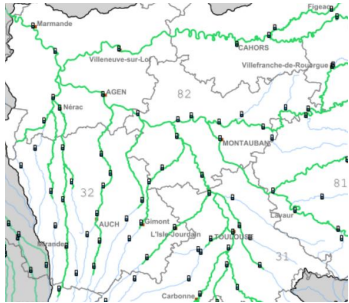


Analyse semi-automatique d'imagerie satellite

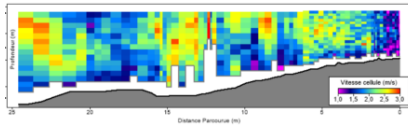
# Observations multi-sources des rivières et des inondations

## Données in situ

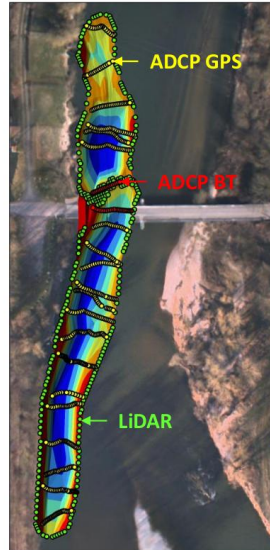
- Jauges/limnimètres/courbe de tarages issues de jaugeages
- MNT HR, bathymétrie partielle, BDD ouvrages
- RETEX, laisses de crues, marques de Plus Hautes Eaux



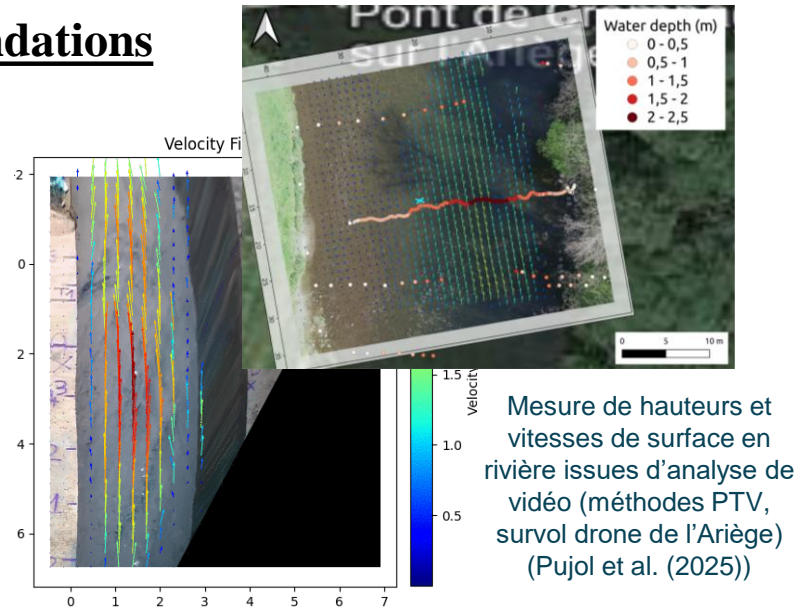
Limnimètres in situ, Garonne  
(source : VigiCrues)



Profil de vitesse – débit, Moselle sauvage, mesure ADCP (Piasny (2024))



Bathymétrie multi-sources, Moselle sauvage (ADCP, LiDAR pénétrant aéroporté) (Piasny (2024))



Vitesses (~5m/s) d'écoulements canalisés urbains (méthodes PTV, jauge caméra fixe à Abidjan)

Mesure de hauteurs et vitesses de surface en rivière issues d'analyse de vidéo (méthodes PTV, survol drone de l'Ariège) (Pujol et al. (2025))

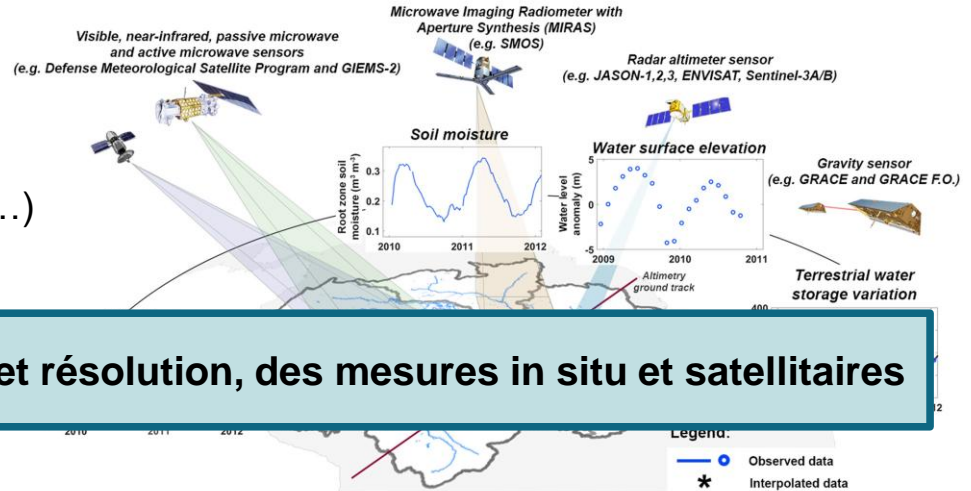
Données denses en temps OU en espace

Requièrent un déplacement sur le terrain ou le maintien de stations in situ

# Observations multi-sources des rivières et des inondations

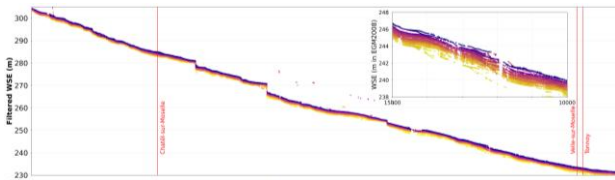
## Données satellite

- Altimétrie nadir (Sentinel-3, CryoSat, ...)
- Altimétrie SWOT Pixel Cloud
- Imagerie (Pléiades, Legion,...), SAR (Capella, ...)



Complémentarité informative, en nature et résolution, des mesures in situ et satellitaires

Ligne d'eau SWOT RiverSP du Rhin Franco-Allemand (180km) (Ledauphin et al. (2025))



Ligne d'eau filtrées issues du PIXC SWOT sur la Moselle (50km) (Ledauphin et al. (submitted))

Observations multi-satellites pour l'assimilation dans le modèle MGB sur le bassin de l'Amazone (Wongchuig et al. (2024))

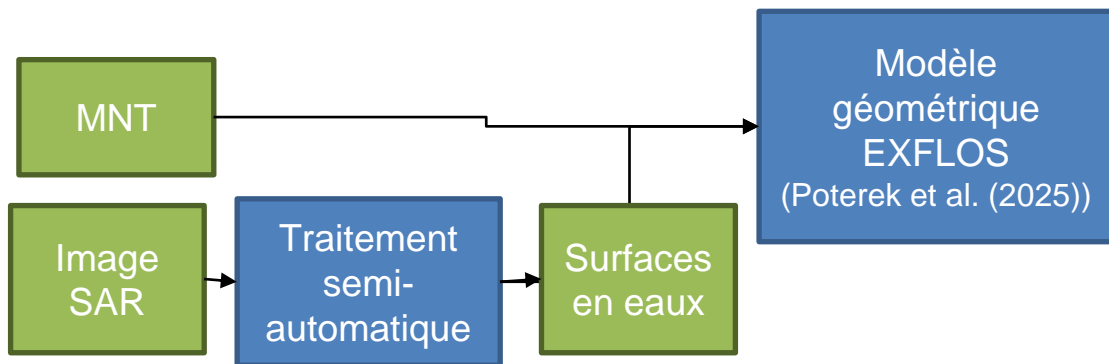
Données à couverture globale, mais résolutions spatiales et temporelles variables

=> Fort potentiel informatif, mais nécessité de savoir exploiter des données multi-satellite

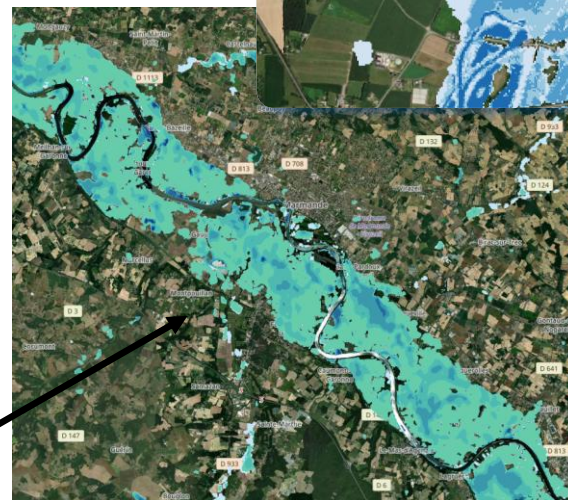
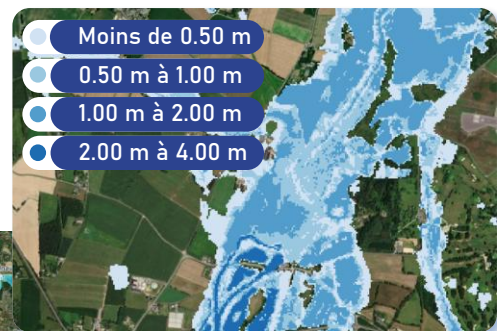
## Zoom sur les données satellite en 2D

Reconstruction géométrique de surfaces en eau à partir d'estimation semi-automatique de surface inondées

=> Transformation d'une information de surface en information hauteurs/volumes distribués



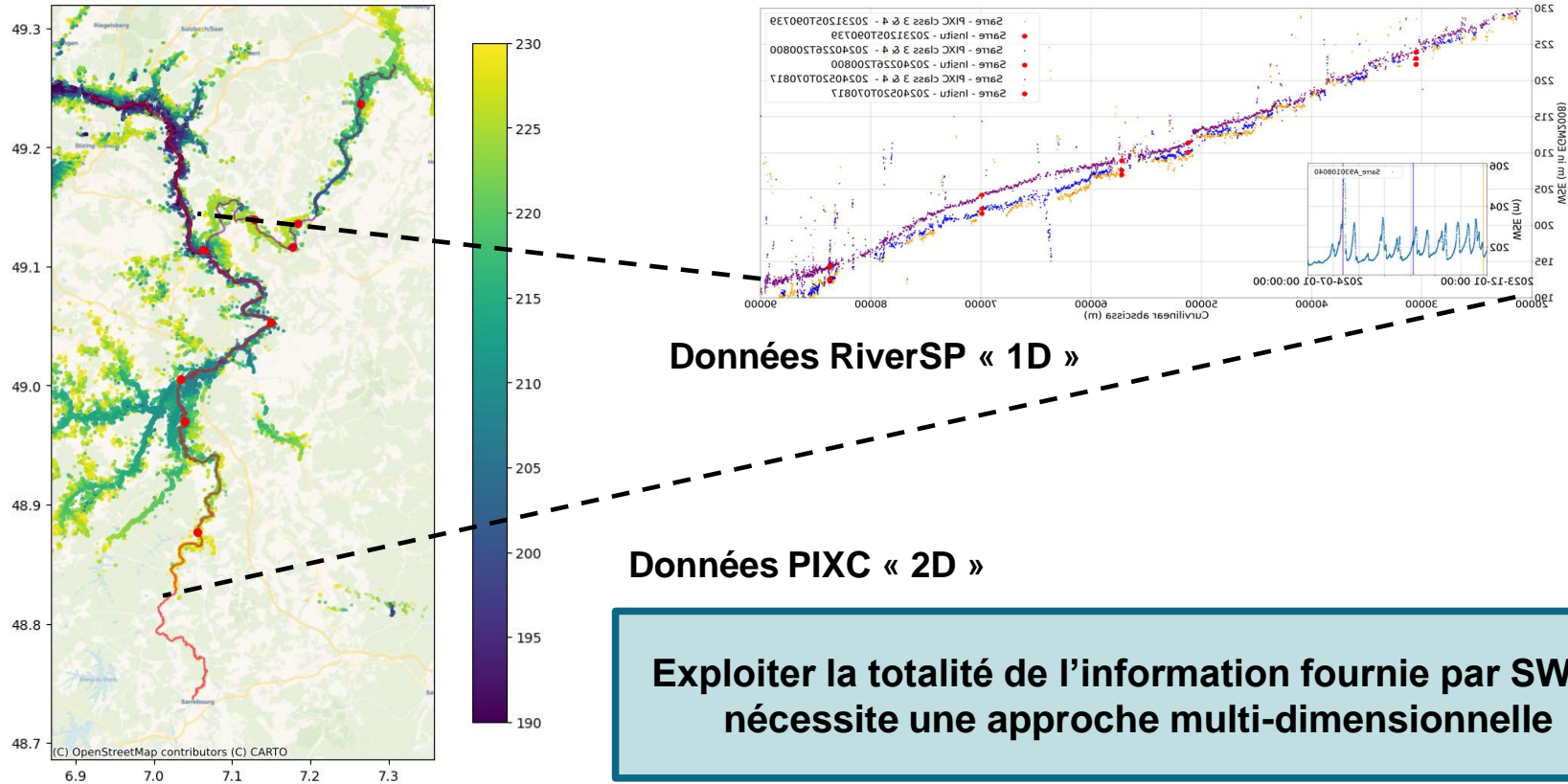
**De nombreuses sources de données porteuses d'information 2D restent à intégrer aux modèles**



Cartes de hauteurs d'eau au passage du satellite sur la Garonne à Marmande

14 produits sur la période du 11/02 au 19/02/2026 parfois séparés de seulement quelques heures !

# Zoom sur les données satellite en 2D : SWOT



Pixel Cloud SWOT sur la Sarre et la Blies à Saverne  
le 20/05/2024 (événement du 17 au 25/05/2024)

# Bilan des études menées depuis le début de MUFFINS

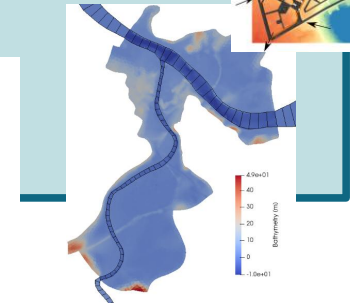
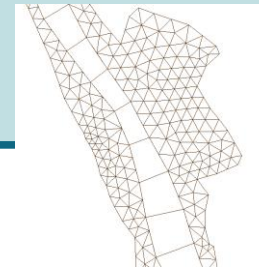
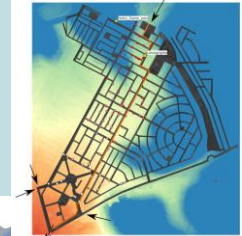
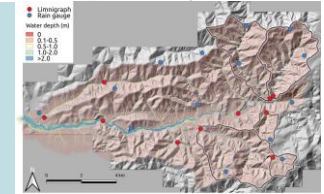
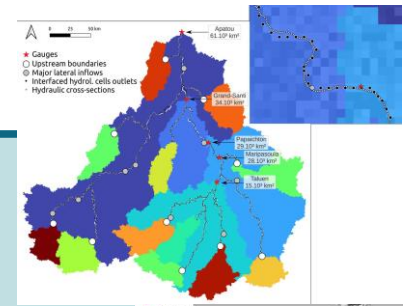
## Couplage Hydrologie-Hydraulique 1D et remontée d'information dans les modèles chaînés

## Assimilation de données dans des modèles hydraulique 2D

- Modélisation de pluie-infiltration et calibration de paramètres régionalisés
- Assimilation de vitesses de surfaces dans un modèle de rivière
- Assimilation de données multi-sources dans un modèle urbain de crues éclair

## Développement d'approches multi-dimensionnelles pour l'hydraulique

- Modélisation 1Dlike de la Garonne et de l'Adour
- Modélisation 1Dlike et 1D2D de la Moselle



# Couplage H&H 1D et remontée d'information dans les modèles chaînés

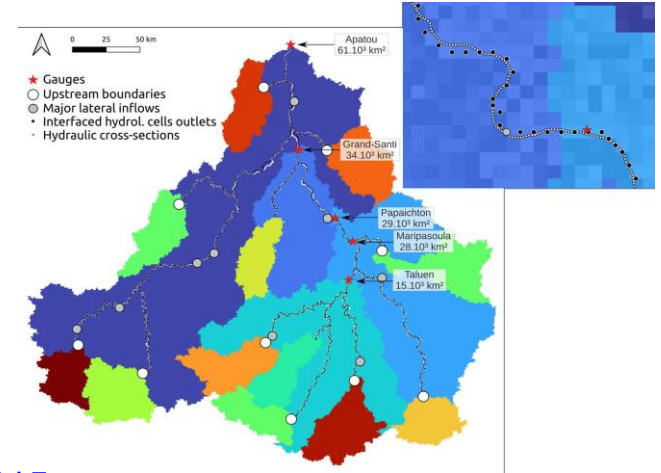
Voir preprint :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169420307915>

Estimation of Multiple Inflows and Effective Channel by Assimilation of Multi-satellite Hydraulic Signatures: The Ungauged Anabranching Negro River

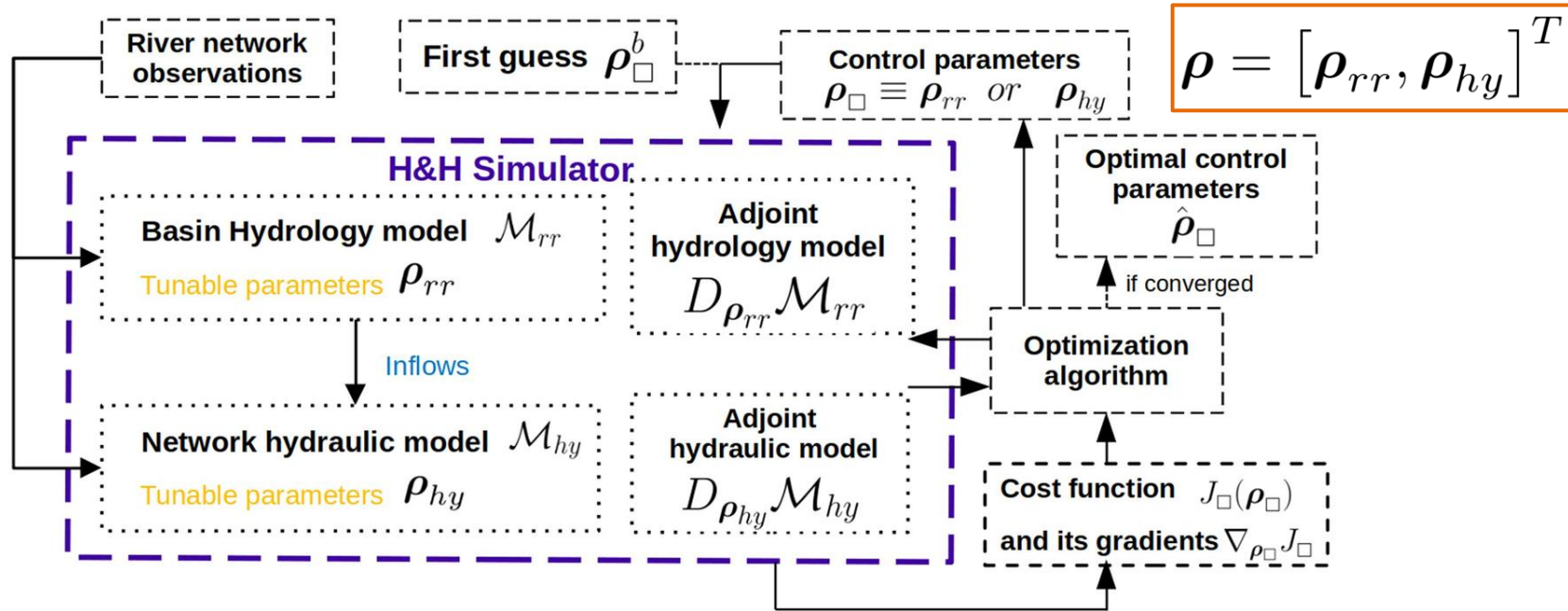
L. Pujol(1)\*, P-A. Garambois(2)(1)(3), P. Finaud-Guyot(1)(4)(5)(6), J. Monnier (7)(8), K. Larnier(9)(7)(8), R. Mosé (1)(6), S. Biancamaria(10)(11), H. Yesou(14)(1), D. Moreira (12), A. Paris (13), S. Calmant(10)(11)

Voir aussi Larnier et al. (2025)



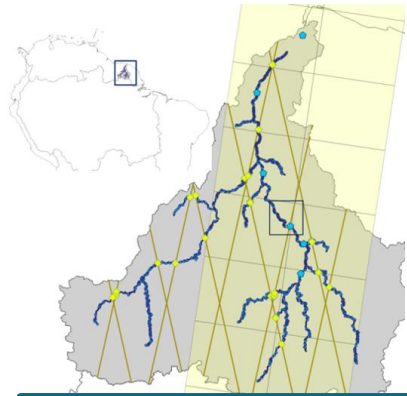
**Bassin versant du Maroni  
(Guyane Française)**

# Modèle H&H inverse : calibration simultanée des compartiments H&H

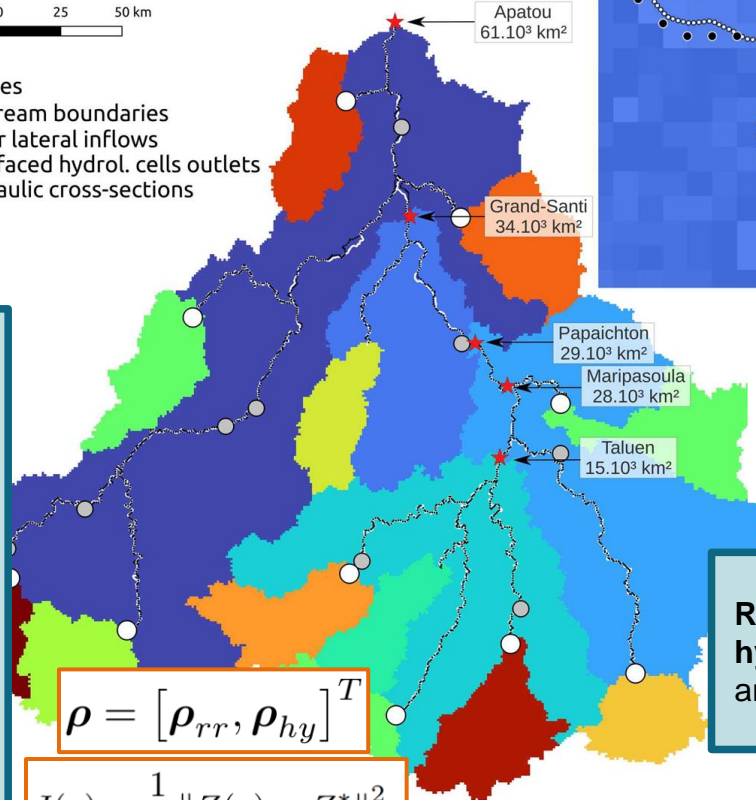


- **Etape 1** : précalibration du modèle hydrologique
- **Etape 2** : calibration du modèle hydraulique (débits entrants issus du modèle hydrologique précalibré)
- **Etape 3** : calibration du modèle hydrologique (observations = hydrogrammes inférés à l'Etape 2)

# Remontée d'information dans un modèle H&H : le bassin du Maroni (Guyane)



- ★ Gauges
- Upstream boundaries
- Major lateral inflows
  - Interfaced hydrol. cells outlets
  - Hydraulic cross-sections



hydrologie: dx = 1km  
hydraulique : dx ≈ 200m

## Couplage H&H :

- 12 CL amont
- 9 affluents majeurs
- 1600+ point d'injection mineurs

## Observations:

- 5 gauges
- SWOT CalVal daily passes (2023-05-15 - 2023-07-01)

Modèle 1D construit à partir de SWORD, masques d'eau, altimétrie (Larnier et al. (2025))

$$\rho = [\rho_{rr}, \rho_{hy}]^T$$

$$J(\rho) = \frac{1}{2} \|Z(\rho) - Z^*\|_O^2$$

$$\forall x' \in \Omega_{rr} \quad \rho_{rr} = (c_p, c_{ft}, k_{exc}, l_r, h_0)(x')$$

(GR parameters, routing, initial res. states)

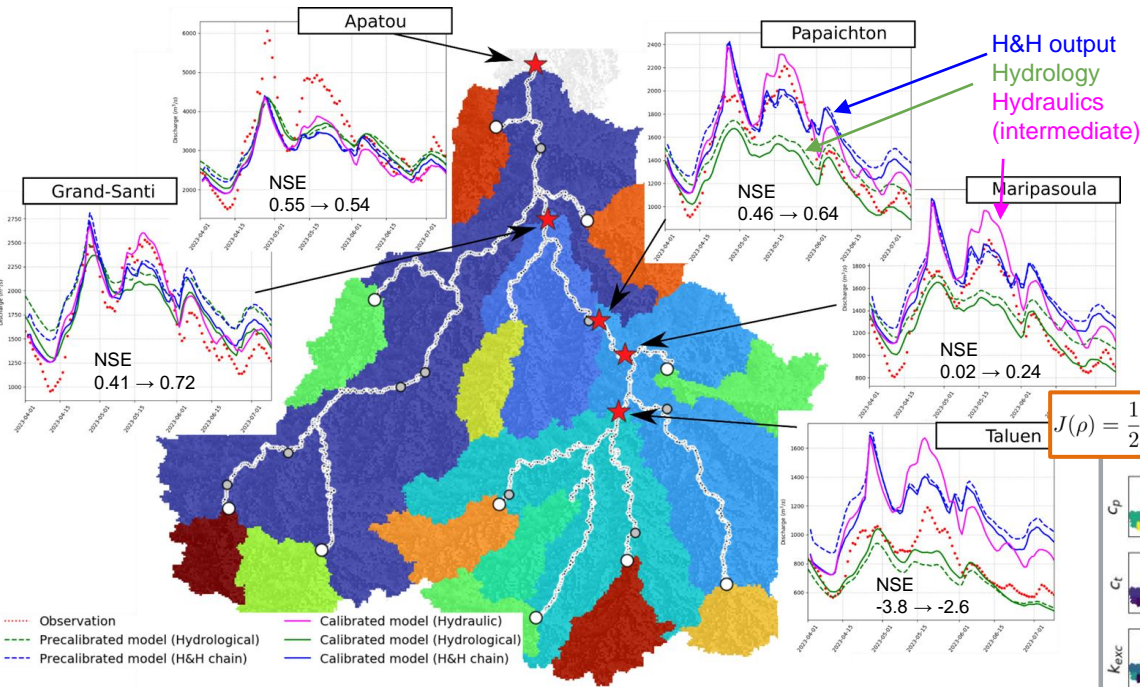
$$\forall (s; x) \in \Omega_{hy} \quad \rho_{hy} = ([\alpha, \beta, b](s; x); Q_{in}(t))$$

(friction, bathymetry, major inflows)

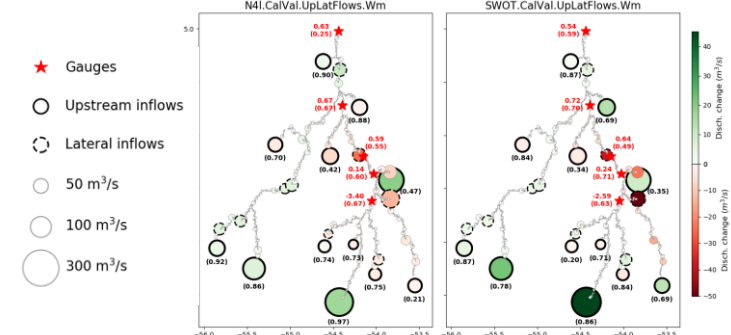
**Régionalisation des paramètres hydrologiques:** valeurs homogènes en amont de chaque CL et de chaque jauge

# Remontée d'information dans un modèle H&H : le bassin du Maroni (Guyane)

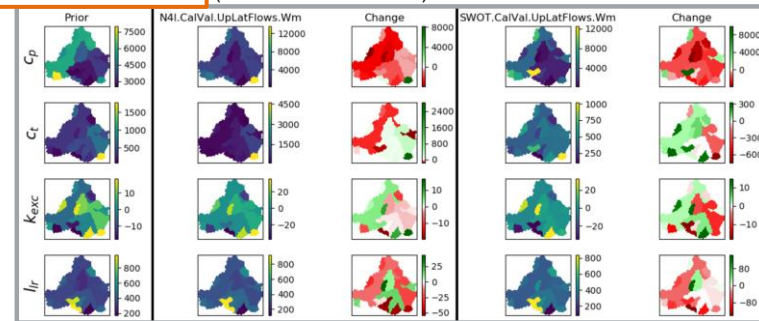
Correction des inflows distribués à l'interface H&H  
(~1600 inflows, 9 affluents majeurs, 12 BC amont)



$$J(\rho) = \frac{1}{2} \|Z(\rho) - Z^*\|_O^2$$



Nadir + gauges (IceSat-2 + Sentinel-3) | SWOT journalier



Paramètres hydrologiques régionalisés inférés

Assimilation of SWOT (1 day repeat) altimetry over 100 days: improved discharge simulation performance at gauges for hydrological and chained H&H model, over observed period and larger time scale.

**L'assimilation multi-source à l'échelle des bassins est un outil puissant de réanalyse/critique des données entre elles et par rapports aux phénomènes modélisés**

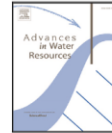
# Modélisation de pluie-infiltration dans un modèle hydraulique 2D et calibration de paramètres régionalisés



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Advances in Water Resources

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/advwatres](http://www.elsevier.com/locate/advwatres)



Gradient-based estimation of spatially distributed parameters of a shallow water 2D rainfall-runoff model

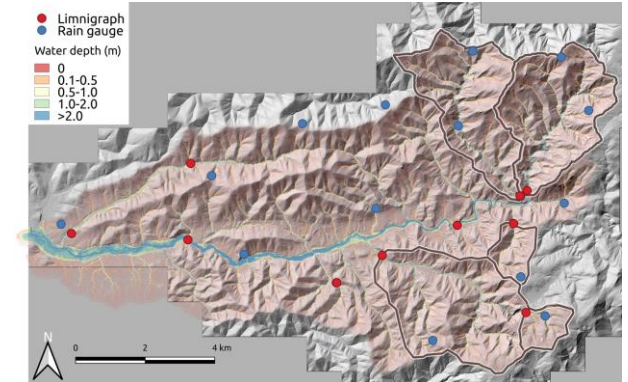
Léo Pujol <sup>a,b,\*</sup>, Shangzhi Chen <sup>c</sup>, Pierre-André Garambois <sup>a</sup>

<sup>a</sup> INRAE, Aix Marseille Université, RECOVER, 3275 Route Cézanne, Aix-en-Provence, 13182, France

<sup>b</sup> HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier, Montpellier, 34000, France

<sup>c</sup> School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, 232000, Huainan, China

[10.1016/j.advwatres.2025.104978](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2025.104978)



**Bassin versant du Réal-Collobrier (ArcMed)**

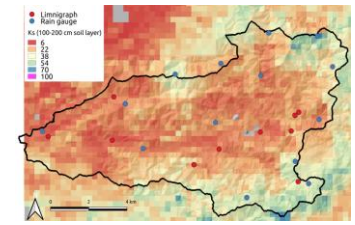
# Sites d'étude crues éclair : le Réal-Collobrier, bassin pilote INRAE

## Caractéristiques :

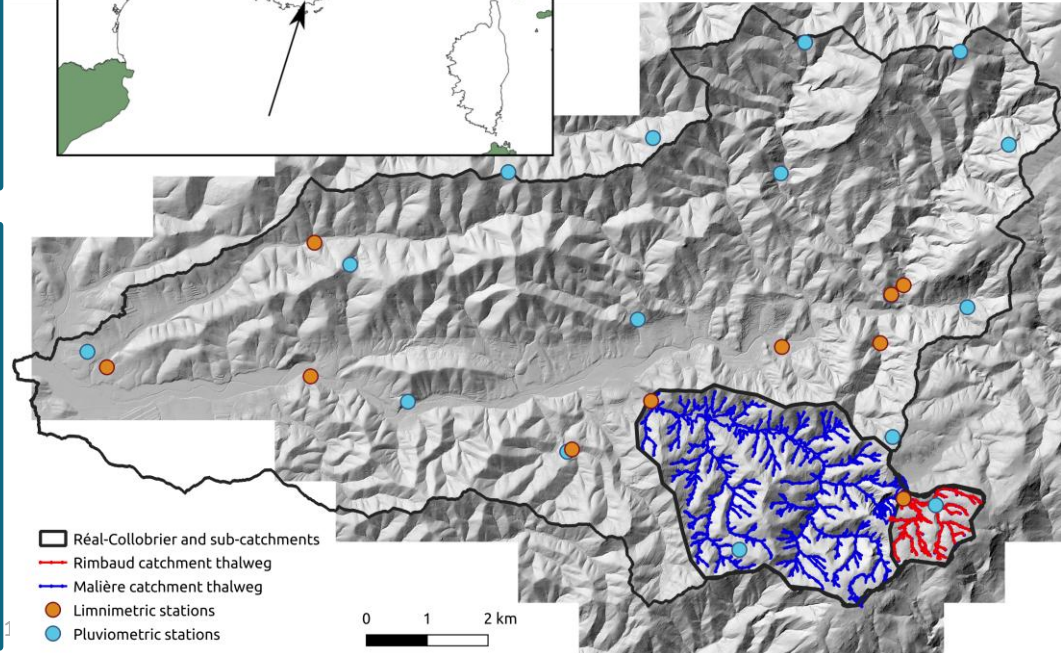
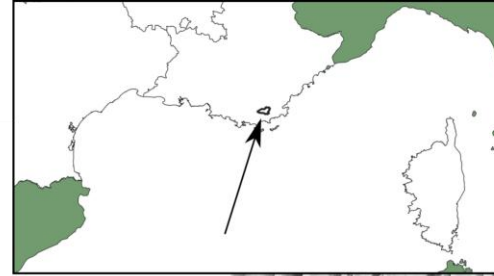
- Climat méditerranéen
- ~90 km<sup>2</sup>
- Fortes pentes naturelles en amont
- Vallée anthropisée en aval
- 34 évènements inondants enregistrés de 2008 à 2014

## Données :

- Produit de pluie ANTILOPE (2006-2019, 1km<sup>2</sup> tiles, 15min time step)
- MNT fin issu d'un LiDAR (1m<sup>2</sup>)
- Cartes physiographiques
- 14 pluviomètres in situ
- 10 limnigraphes in situ



Conductivité du sol estimée par fonctions de pédotransfert (100-200cm)



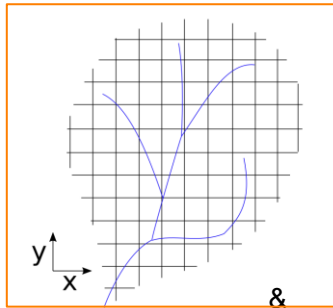
# Modélisation de la genèse des crues : pluie-infiltration pour l'hydraulique

Modèles d'infiltration : SCS-CN (pluie nette empirique)

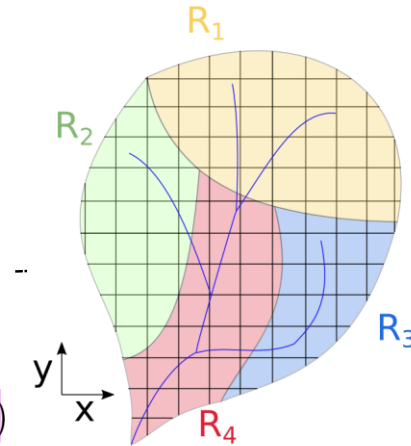
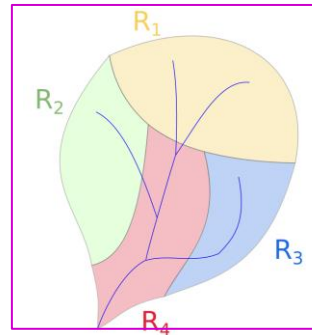
Green-Ampt (colonne de sol conceptuelle)

Régionalisation = contraintes multi-échelles implicite du problème inverse à travers :

- (i) Cartes de descripteurs physiographiques
- (ii) Régionalisation des coefficients de pédotransfert



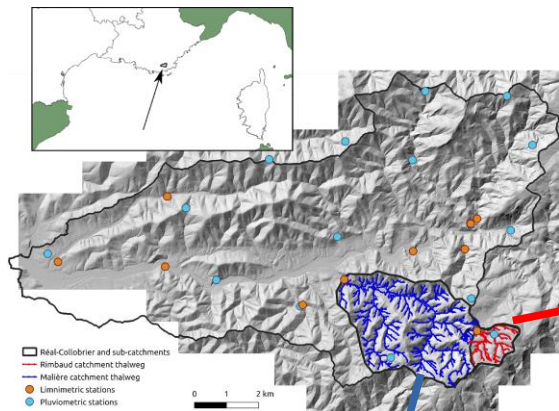
+



$$K_s (\%_{clay}(x, y), \%_{sand}(x, y), \kappa_1(R), \kappa_2(R), \kappa_3(R))$$

$$K_s = 10^{-\kappa_7 - \kappa_8 f_{clay} + \kappa_9 f_{sand}} * \frac{25.4}{3600}$$

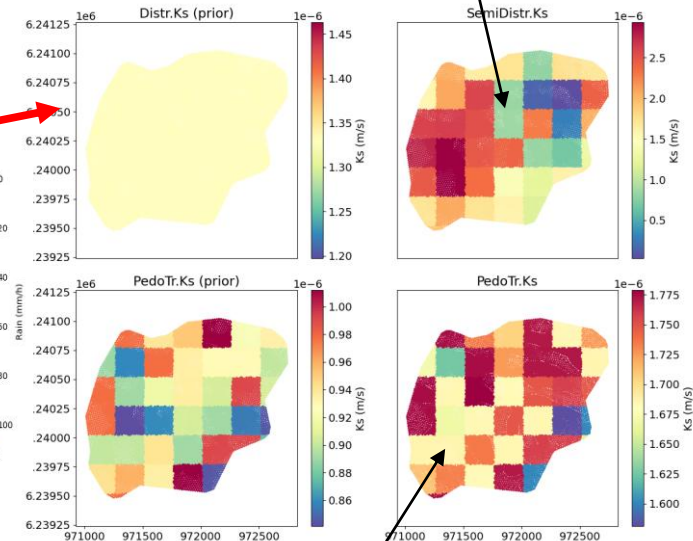
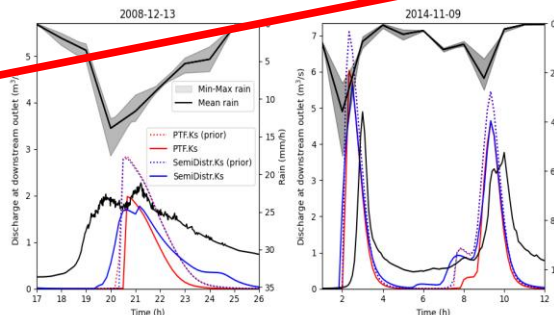
# Calibrage de paramètres d'infiltration régionalisés



$$J(\rho) = \frac{1}{2} \|Q(\rho) - Q^*\|_O^2$$

$$\rho = (K_s(p), p = (1..N_{zones}))$$

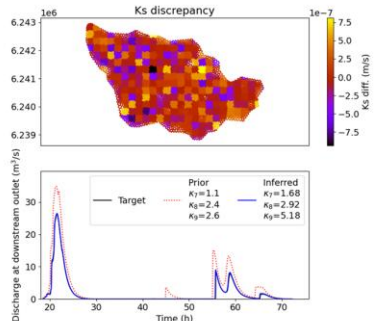
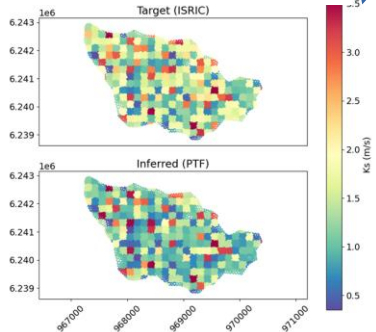
Paramètres d'infiltration inférés



$$c_3 = (\kappa_7, \kappa_8, \kappa_9)$$

Fit au débit aval mesuré

$$\rho = (\kappa_7, \kappa_8, \kappa_9)$$



Modélisation hydraulique HR de la genèse des crues à l'échelle de l'évènement, à informer par l'hydrologie  
Vers des applications plus grande échelle

# Assimilation de vitesses de surface dans un modèle hydraulique 2D

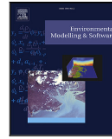


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Environmental Modelling and Software

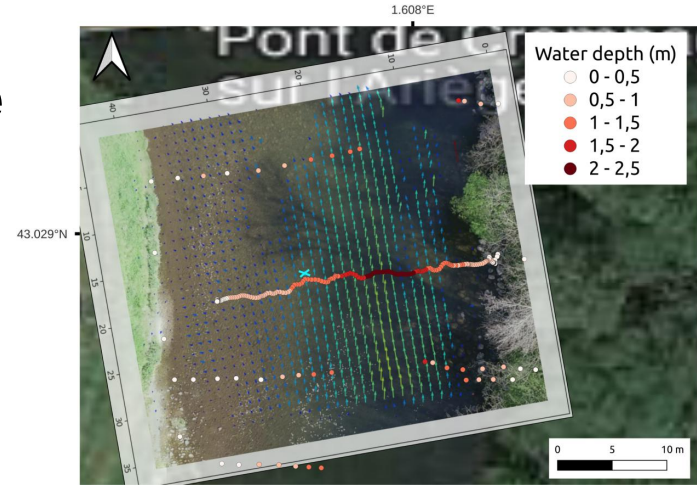
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/envsoft](https://www.elsevier.com/locate/envsoft)



River bathymetry and discharge estimation using video surface velocity data assimilation in the 2D differentiable numerical shallow water model dassflow

Léo Pujol <sup>a,b</sup>\*, Ludovic Cassan <sup>a,c,d</sup>, Pierre-André Garambois <sup>b</sup>, Hélène Roux <sup>a</sup>

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106589>



L'Ariège à Crampagna

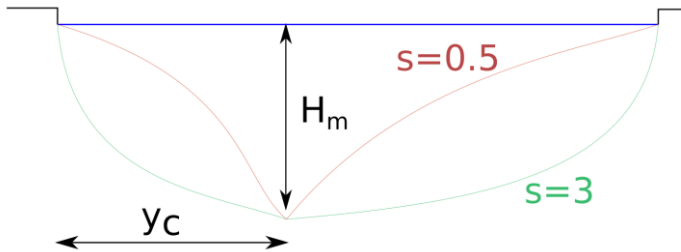
Voir aussi Honorat et al. (2009)

# Contrainte de la section en travers : modèle à 3 paramètres

## Réalité synthétique :

- Canal parabolique simple
- Modèle aux dimensions d'une prise de vue (100x60m)

Paramétrisation de la section en travers (3 paramètres)

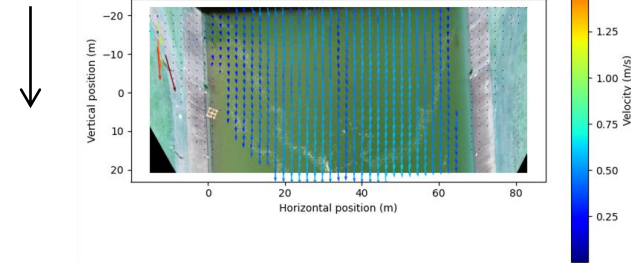


$$\rho = (s, H_m, y_c)$$

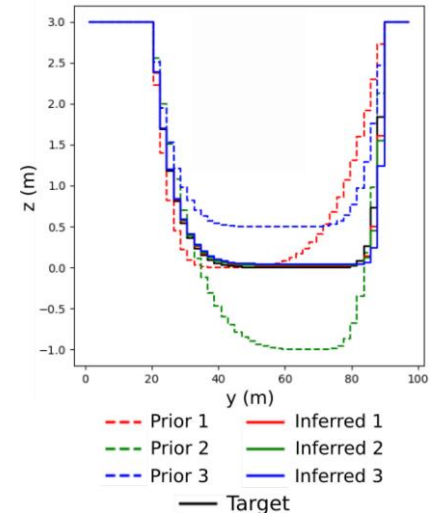
$$J(\rho) = \frac{1}{2} \|u(\rho) - u^*\|_O^2 + \frac{1}{2} \|v(\rho) - v^*\|_O^2$$



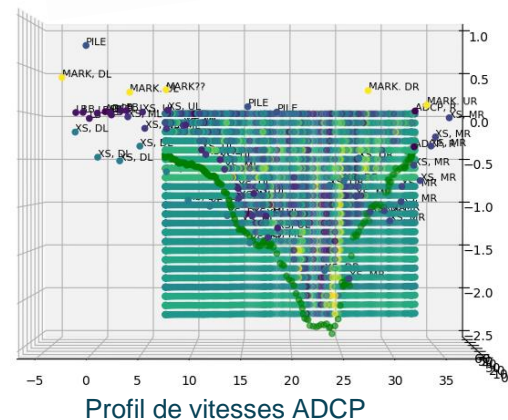
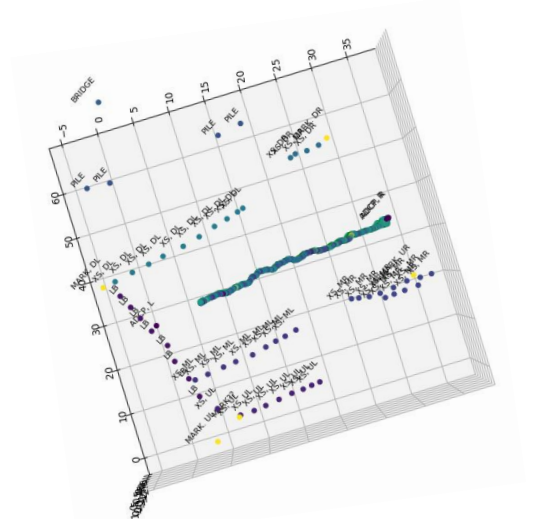
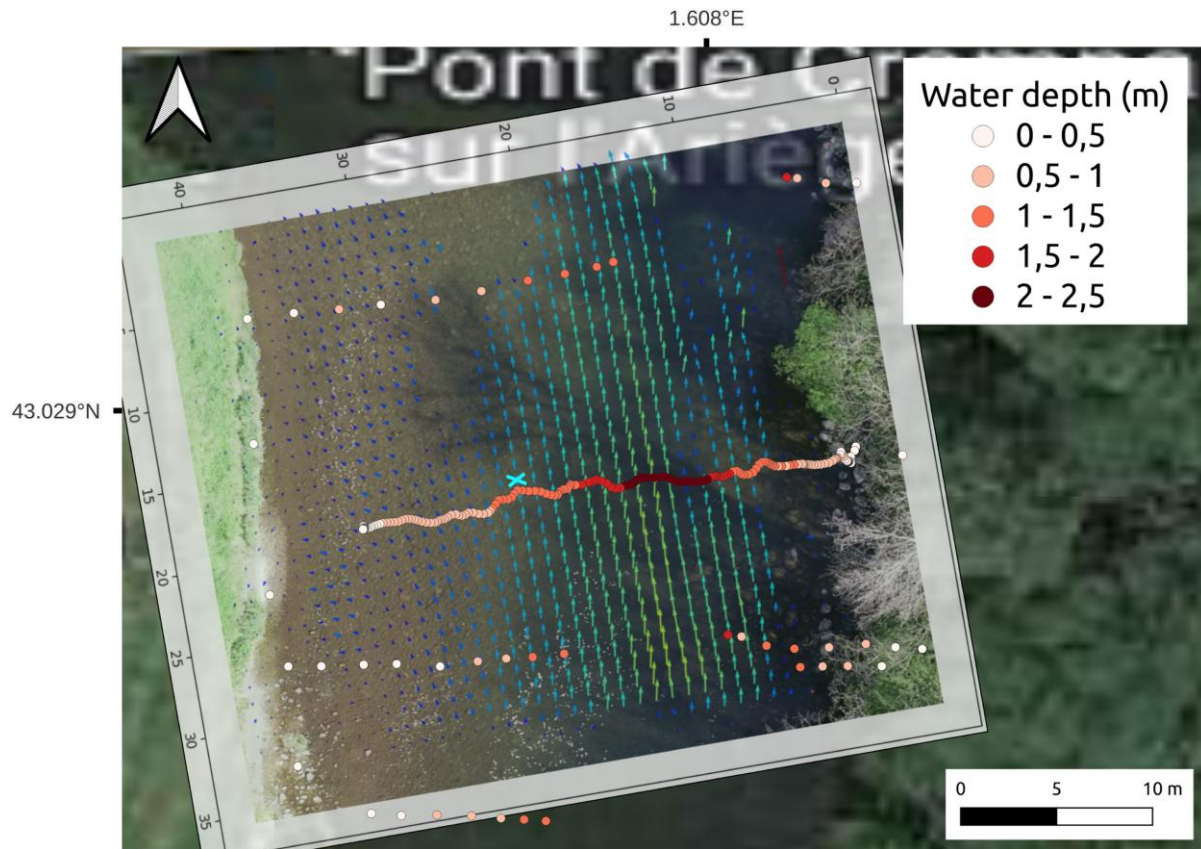
Champs de vitesse de surface mesuré sur un canal trapézoïdale (en aval d'un pont)



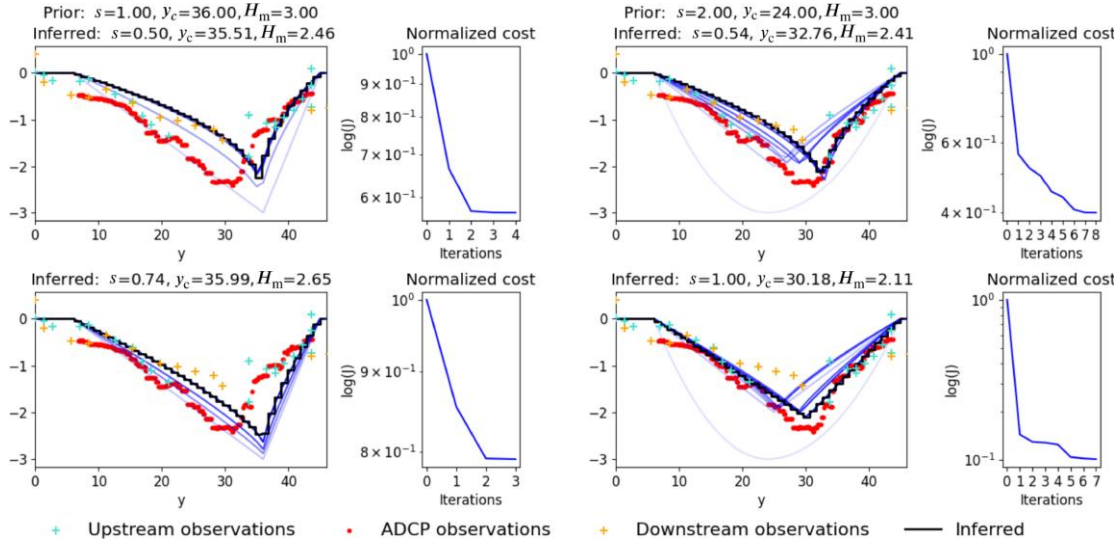
Profil de section en travers inférés dans un cas académique équivalent (valeurs d'ébauche, de référence et inférés)



# Assimilation de champs de vitesses (l'Ariège à Crampagna)

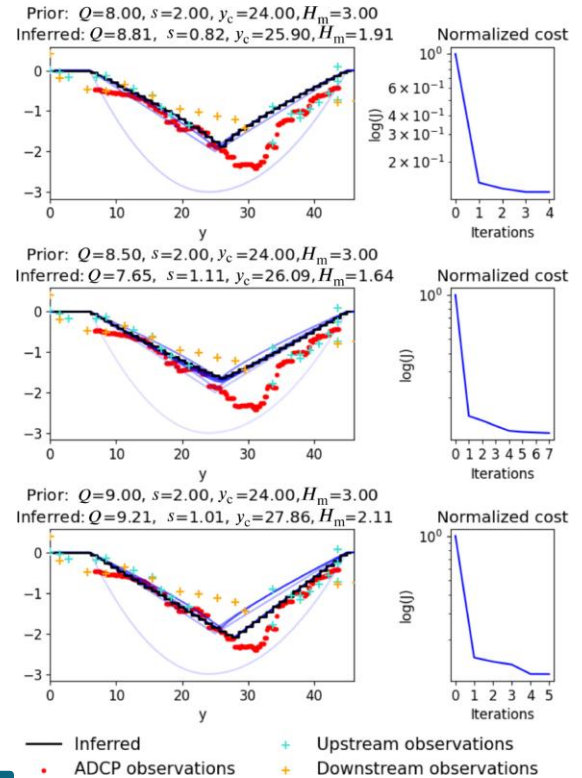


# Assimilation de champs de vitesses (l'Ariège à Crampagna)



$$J(\rho) = \frac{1}{2} \|u(\rho) - u^*\|_O^2 + \frac{1}{2} \|v(\rho) - v^*\|_O^2$$

$$\rho = (s, H_m, y_c)$$



$$\rho = (s, H_m, y_c, Q_{in})$$

- Estimation simultanée de la bathymétrie et du débit
- Accès à une donnée inaccessible avec l'altimétrie, difficile à obtenir sur le terrain

# Assimilation de données multi-sources (limnimètre, marques de Plus Hautes Eaux) dans un modèle hydraulique 2D urbain



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

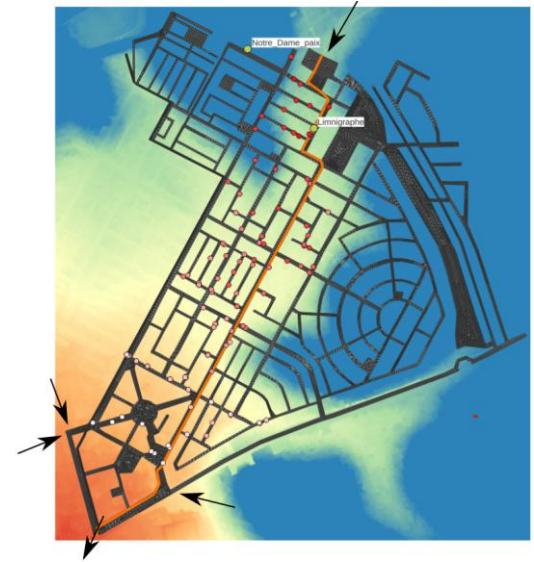


Research papers

Adjoint-based sensitivity analysis and assimilation of multi-source data for the inference of spatio-temporal parameters in a 2D urban flood hydraulic model

Léo Pujol <sup>a,\*</sup>, Pierre-André Garambois <sup>b</sup>, Carole Delenne <sup>a,c</sup>, Jean-Louis Perrin <sup>a</sup>

[10.1016/j.jhydrol.2024.131885](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131885)

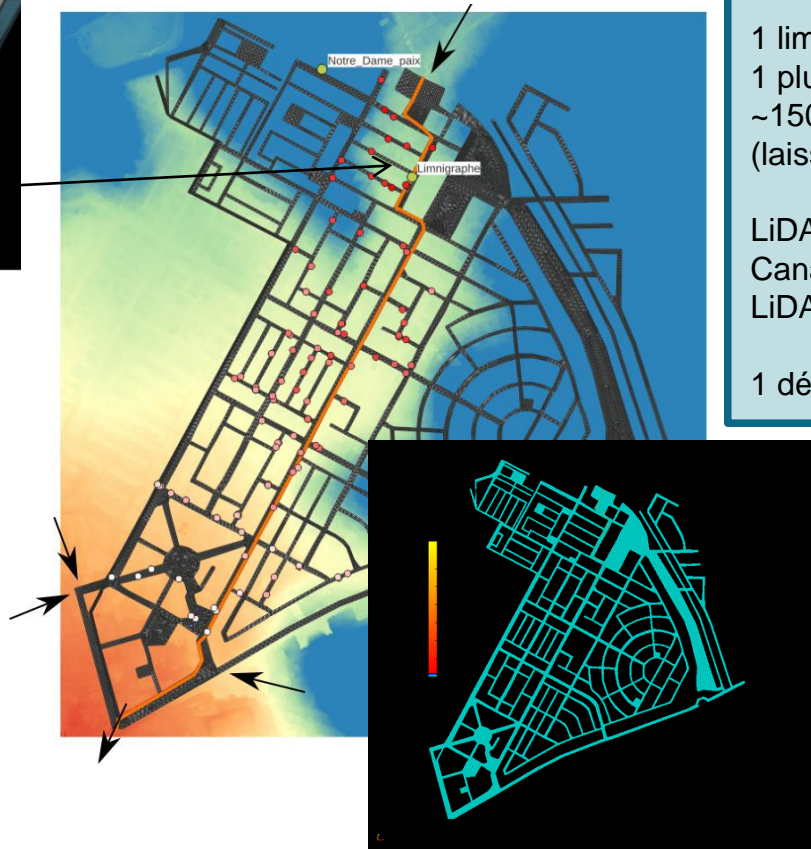
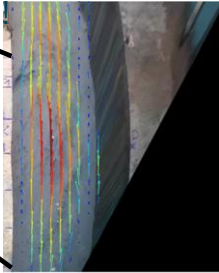


**Crues éclair urbaines  
Quartier Palmeraie à Abidjan**

# Crues éclair urbaine : Abidjan, 2x2km<sup>2</sup>



Vitesse = ~5m/s



## Données :

- 1 limnimètre amont
- 1 pluviographe proche
- ~150 mesures de hauteur max inondante (laisses de crue)

LiDAR fin 2.5m  
Canal « Ministre » creusé à partir du LiDAR et de relevés de terrain

- 1 débit entrant amont

## Simulation :

Durée de l'évènement : 4h30  
Durée de la simulation : 40min sur 1 CPU

## Cartes de gradient local

$$J(\rho) = \frac{1}{2} \|h(\rho) - h^*\|_O^2$$

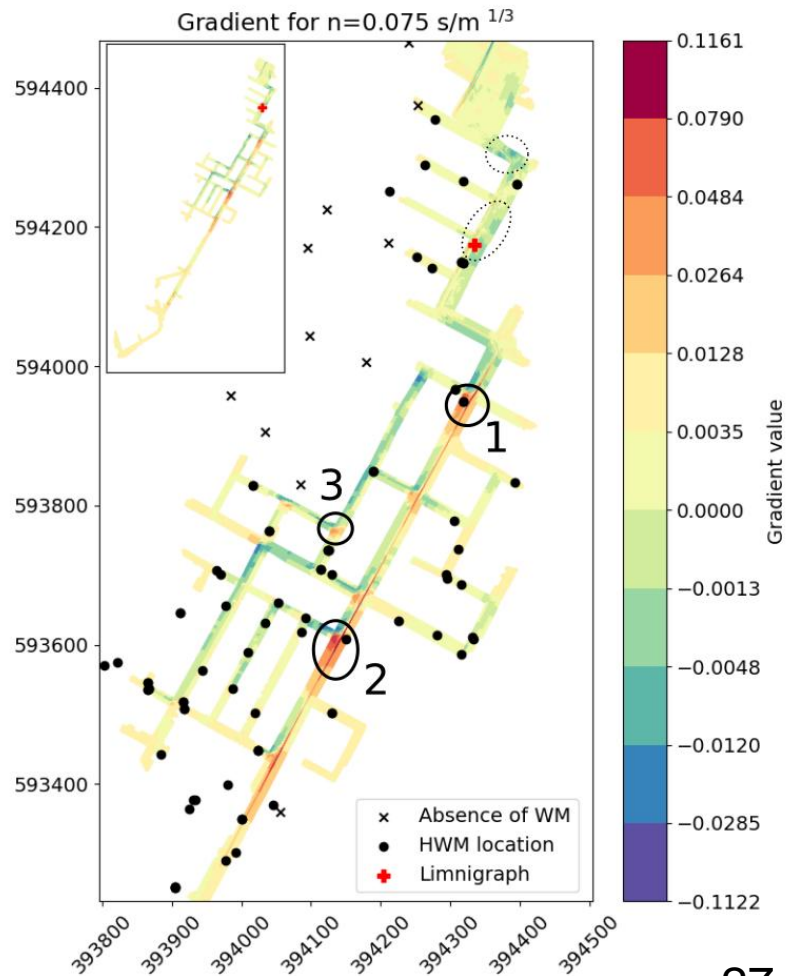
$$\nabla_{\rho} J(\rho) = \left( \frac{\partial J}{\partial n_1}, \dots, \frac{\partial J}{\partial n_N} \right)$$

Carte de gradient =

- Résultat intermédiaire du processus d'assimilation
- Indicateur de sensibilité en un point de l'espace de paramètres

=> Pour un coût de calcul faible, informe sur l'adéquation entre modèle et données et la trajectoire probable de l'assimilation

**Génération de cartes de sensibilité globales en échantillonnant le gradient dans l'espace des paramètres**  
(Derivative-Based Sensitivity Measures, Sobol et al. (2009))

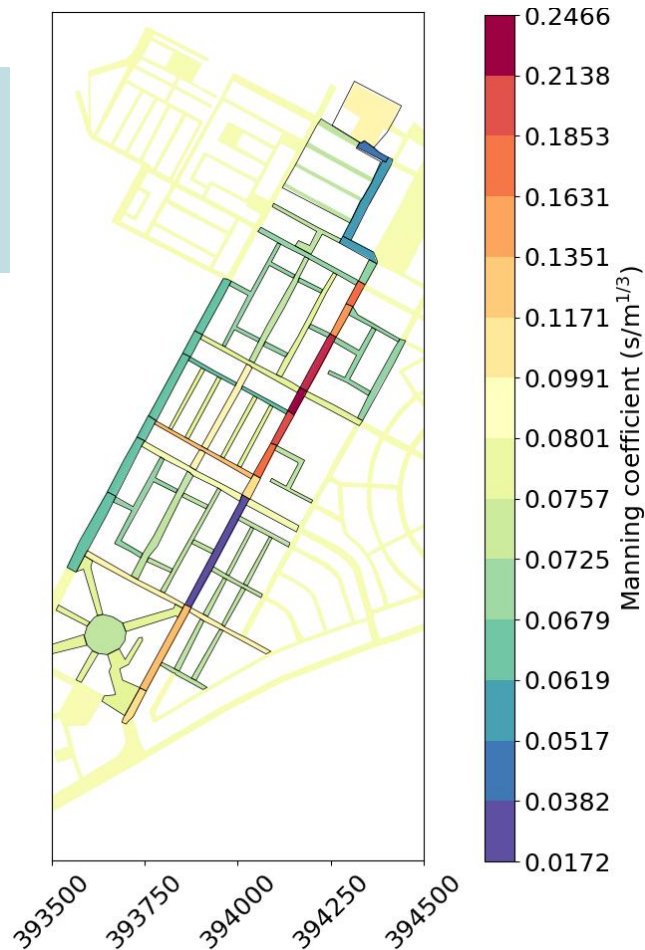
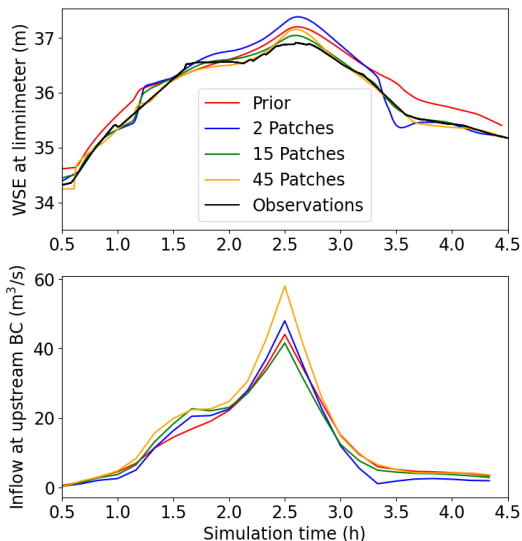
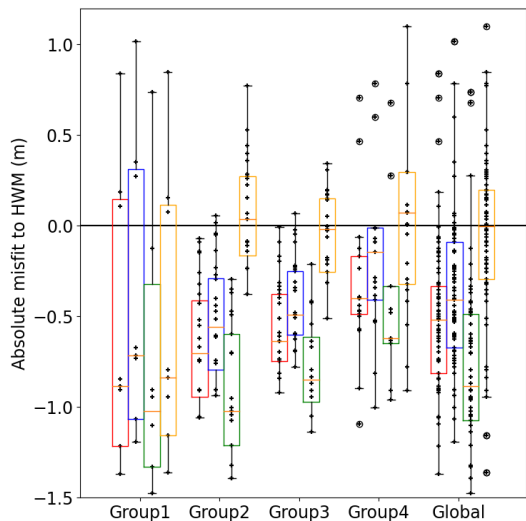


# Calibration de friction et débit amont

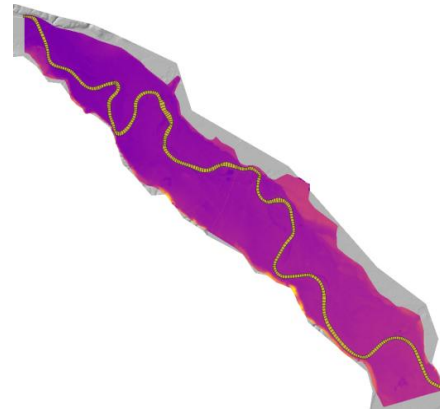
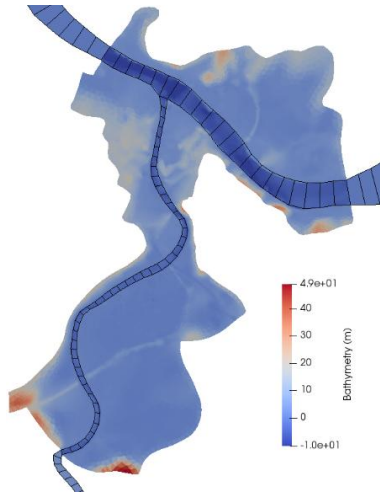
- Assimilation de données multi-source (PHE + limnimètre)
- Atteinte d'une bonne correspondance, sous réserve de bonne distribution des paramètres (informée par les cartes de gradient)

$$J(\rho) = \frac{1}{2} \|h(\rho) - h^*\|_O^2$$

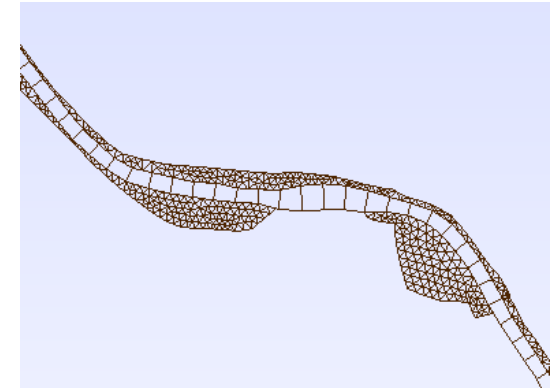
$$\rho = (Q_{in}(t), n_1, \dots, n_{45})$$



# Développement d'approches multi-dimensionnelles pour l'hydraulique



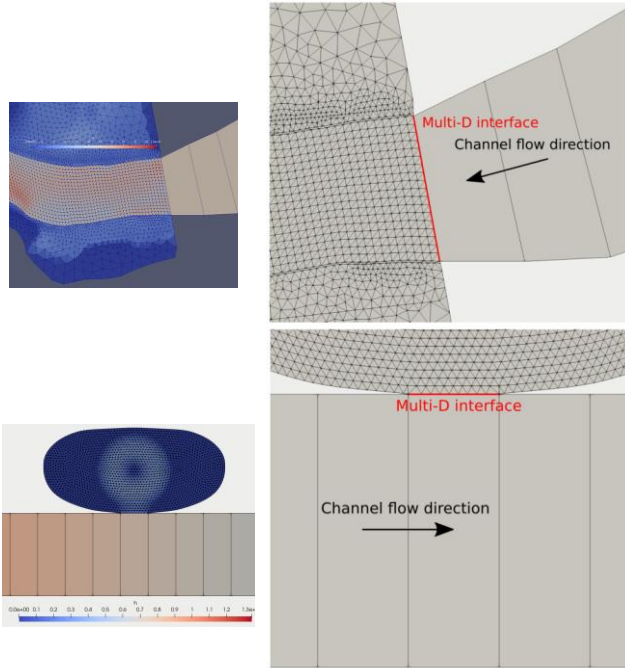
La Garonne à Marmande



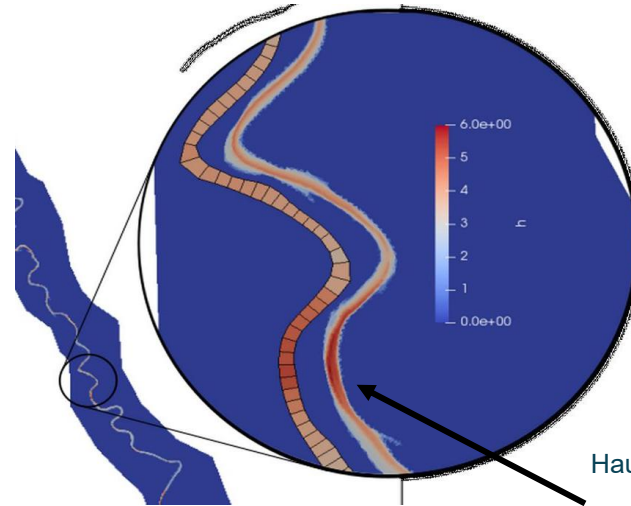
La Moselle amont

L'Adour en amont de Bayonne

# Approche de modélisation 1Dlike : construction du maillage



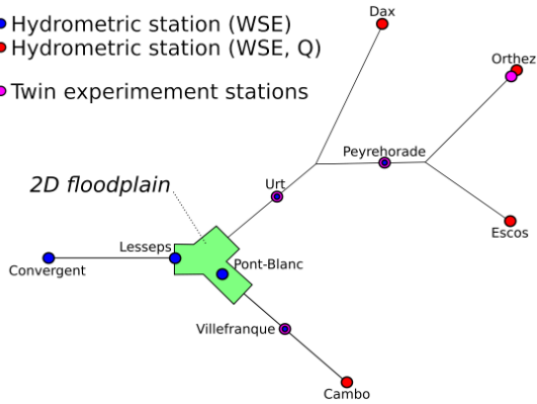
Deux « types » de couplage 1D2D  
Frontal et latéral



Hauteurs d'eau 2D (droite)  
et 1Dlike (gauche)  
pour des modélisations équivalentes

# Approche de modélisation 1Dlike : 1<sup>er</sup> modèle sur l'Adour

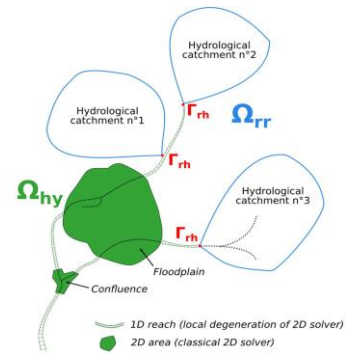
- Hydrometric station (WSE)
- Hydrometric station (WSE, Q)
- Twin experiment stations



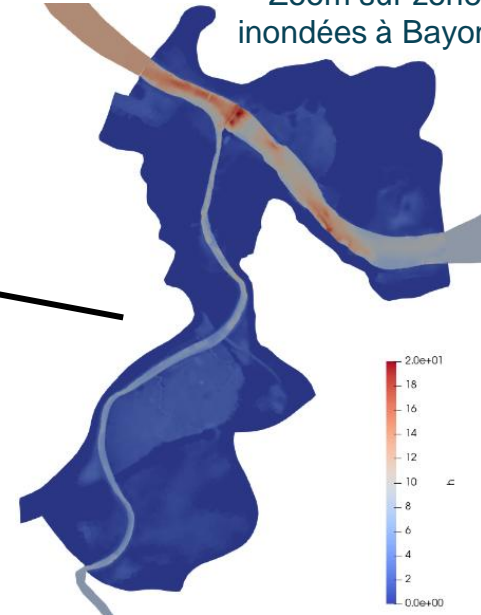
Adour, Nive, Gaves de Pau et Oloron en amont de Bayonne



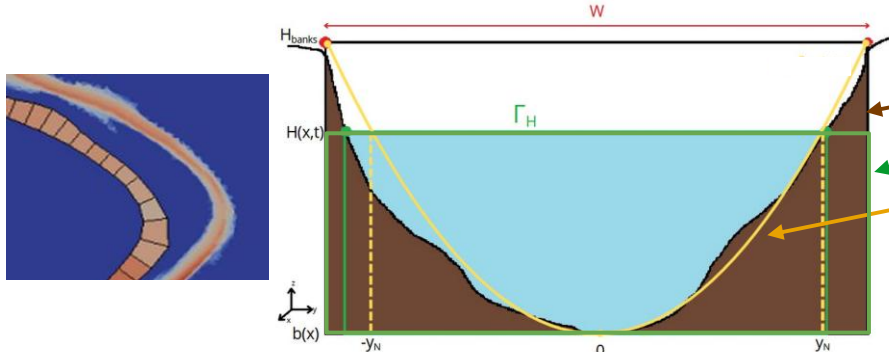
~200km de réseau 1Dlike



Zoom sur zones inondées à Bayonne



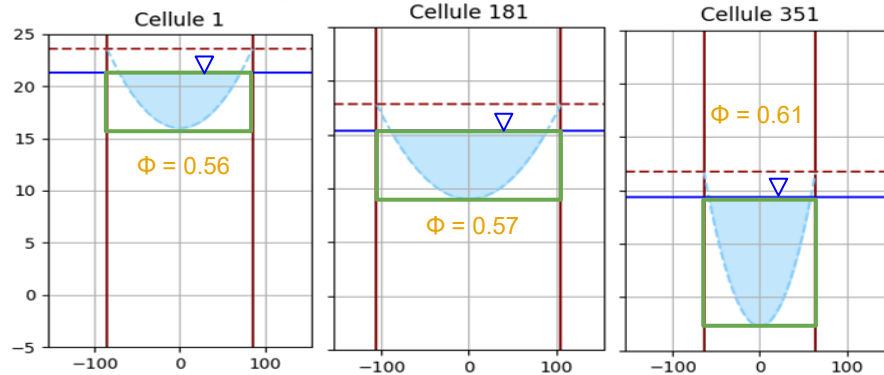
# Approche de modélisation 1Dlike : représentation de la section en travers sous-maille



Section en travers réelle (modélisée dans un modèle 1D)

Section en travers effective en 1Dlike

Section en travers parabolique  $\Phi(h)$ , modélisée par la porosité sous-maille en 1Dlike



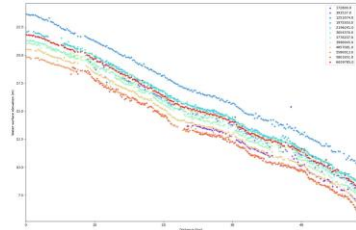
Porosités calculées pour une ligne d'eau unique, étant donné des paramètres de porosité homogènes (Garonne à Marmande)

- La porosité modélise la bathymétrie sous-maille (l'approche viens de l'hydraulique urbaine (Guinot et al. (2006, 2018))
- Ratio de Surface (ou de volume) pour corriger la section en travers effective (ou le stockage)

$$\phi_{\Gamma}(x, h) = \frac{S(x, h)}{Wh}$$

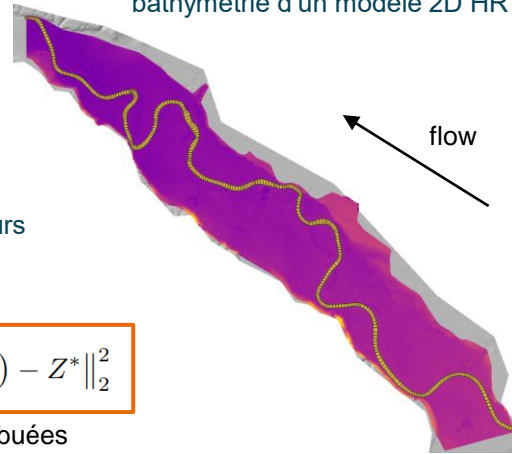
- Estimation à partir de MNT ou autre BDD, puis à calibrer par VDA

# Calibrage d'un modèle 1Dlike avec SWOT : la Garonne à Marmande



10 lignes d'eau SWOT sur ~70 jours

- Tronçon de 50km de la Garonne
- Modèle 1Dlike construction avec la bathymétrie d'un modèle 2D HR



Assimilation d'altimétrie SWOT

$$j_Z(\rho_{hy}) = \frac{1}{2} \|Z(\rho_{hy}) - Z^*\|_2^2$$

Inférence de friction et porosité distribuées

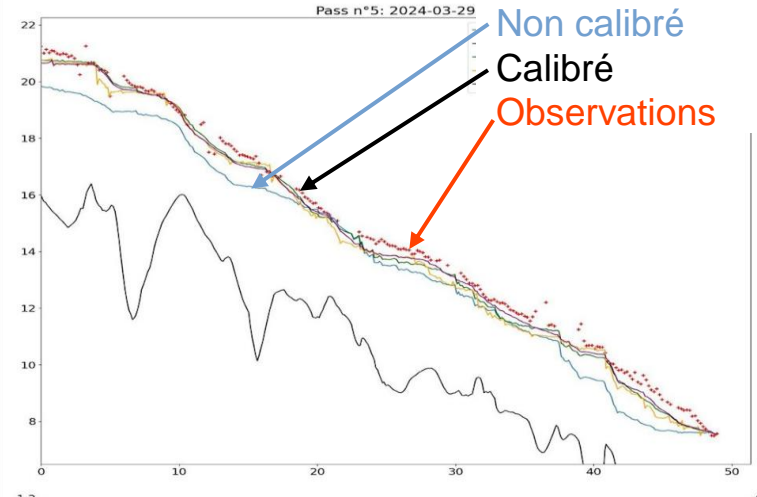
$$\rho_{hy} = ([n, \phi](x); Q_{in}(t))$$

(ici  $\phi$  ne dépend pas de la hauteur)

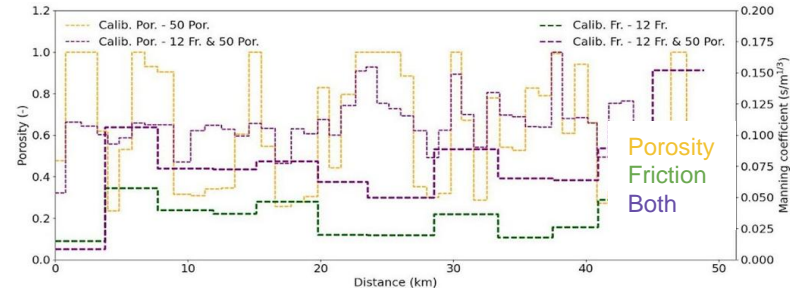
Bonne correspondance et valeur de paramètres plausibles

**Coût de calcul de l'assimilation très faible:** vers l'application de ces méthodes à grande échelle dans des modèles H&H

Lignes d'eau modélisées au 5<sup>ème</sup> passage de SWOT



Paramètres inférés (frottement + porosité distribués)



# Zone d'étude : la Moselle en amont d'Epinal

## Site :

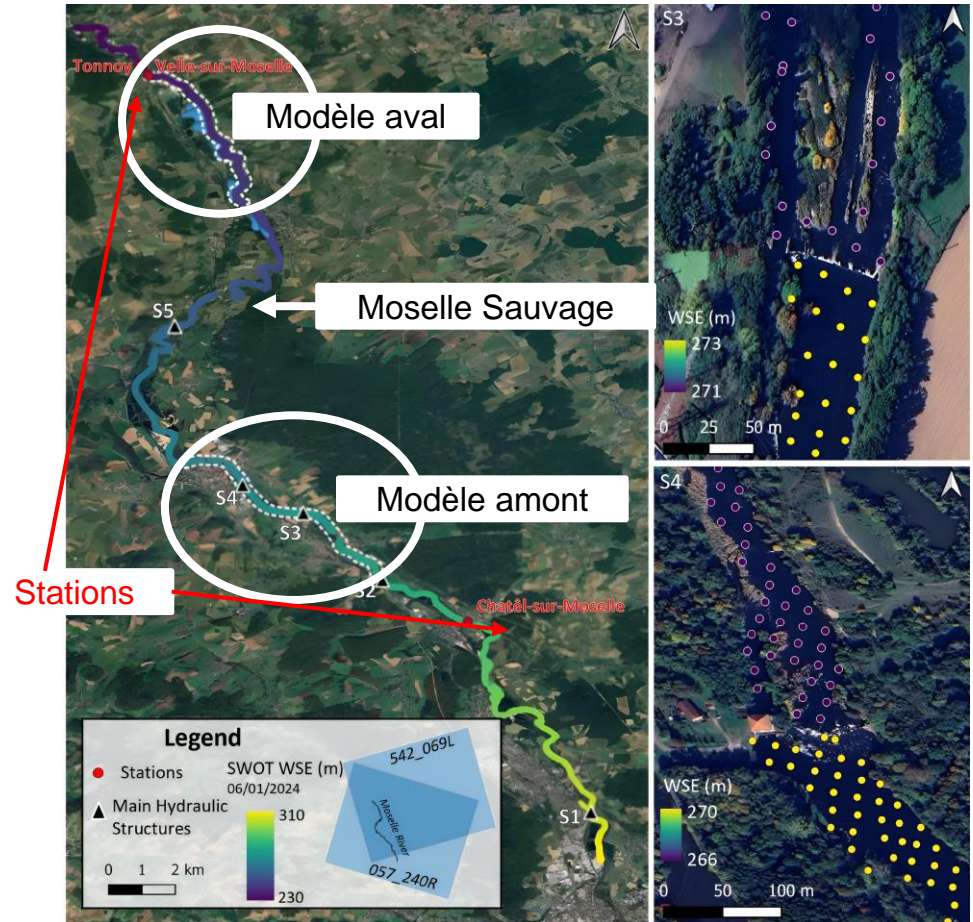
- Entre Tonnoy et Châtel-sur-Moselle (~50km)
- 3 jauges Vigicrues

## Caractéristiques :

- Aire drainée : 1500-2000 km<sup>2</sup>
- Débit moyen : 42m<sup>3</sup>/s
- Largeur : 20 – 60 m
- Morphologie complexe, anthropisée (seuils, ponts) et naturelle (sur ~12km)
- Crues morphogène récurrentes

## Données :

- 2 tuiles SWOT, couverture par l'orbite « Science » du 29/07/2023 to 15/05/2025 (~2 ans, 32 lignes d'eau retenues)
- 2 modèles HECRAS 1D calibrés [Piasny 2023]

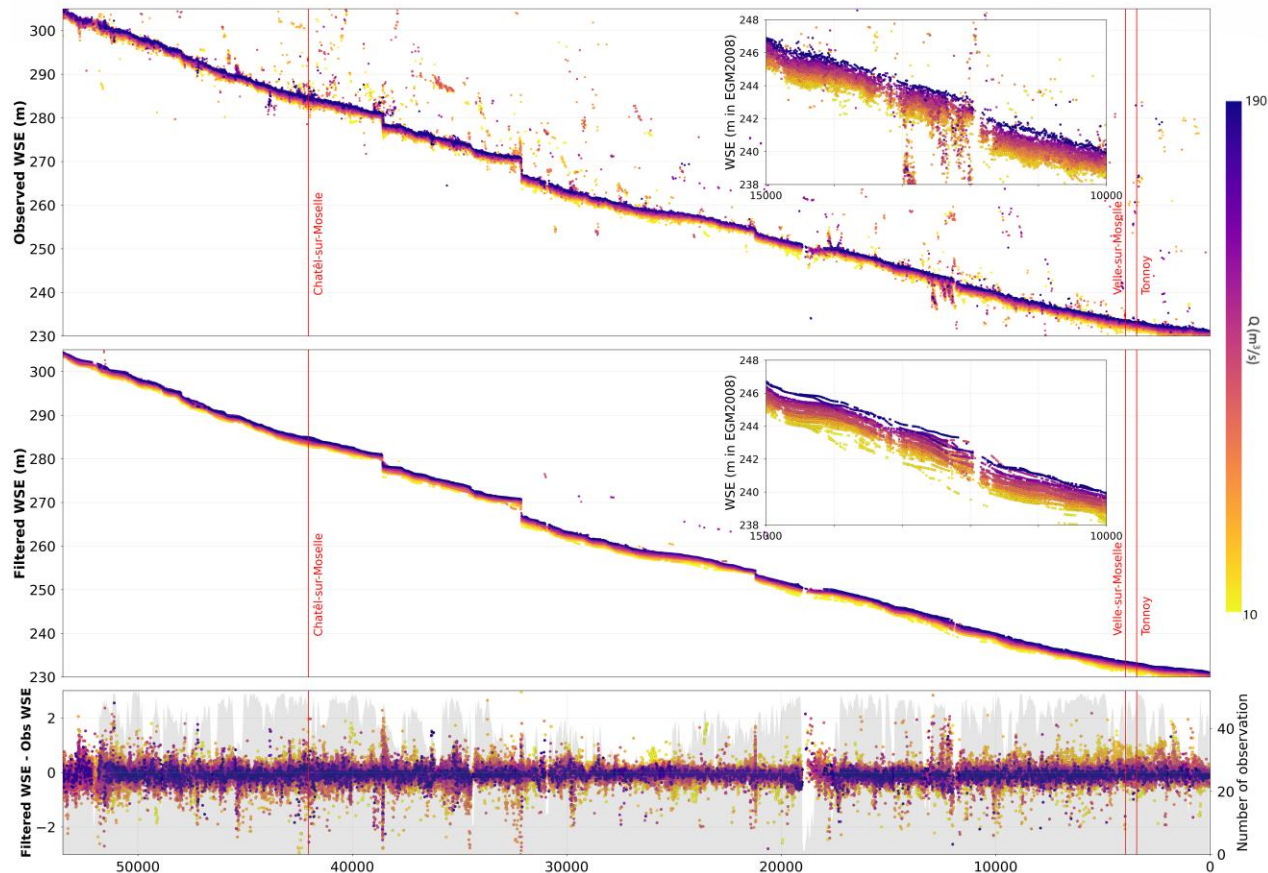


# Lignes d'eau SWOT filtrée sur la Moselle (Ledauphin et al. (submitted))

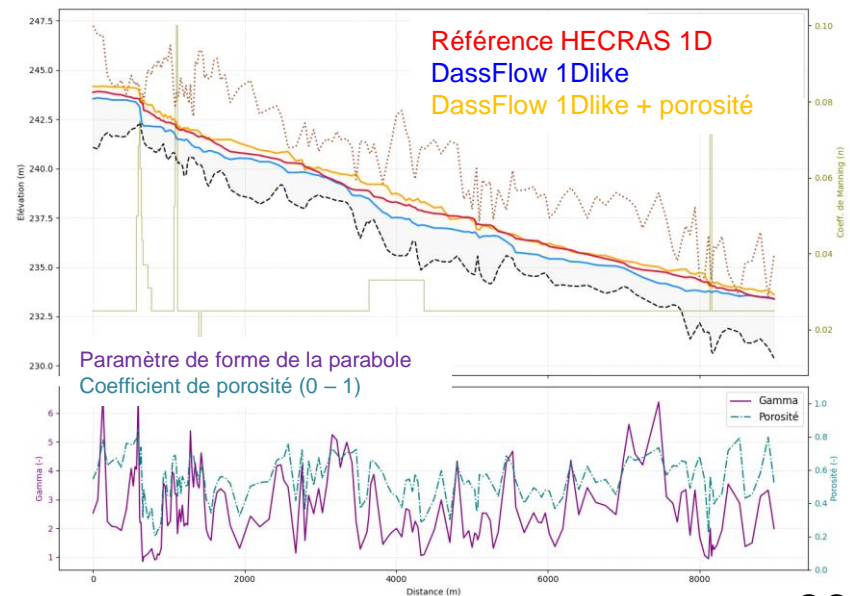
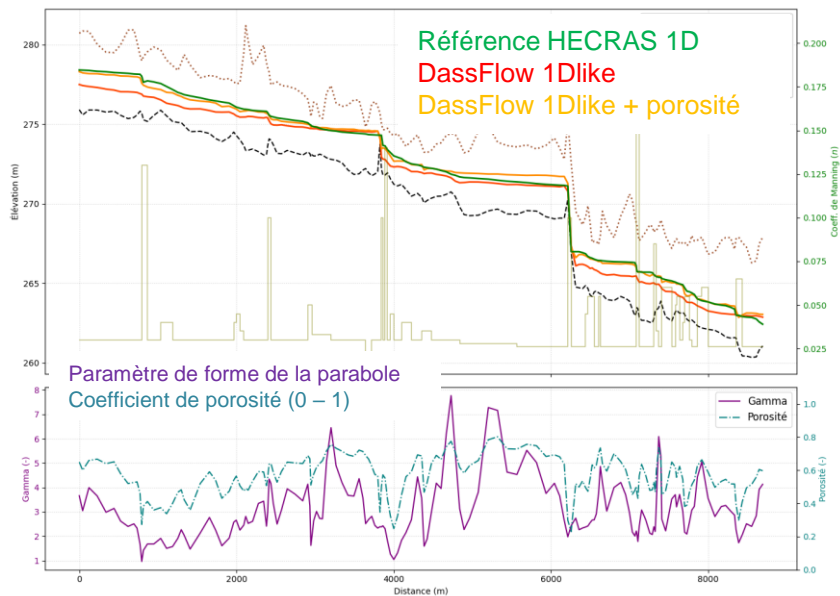
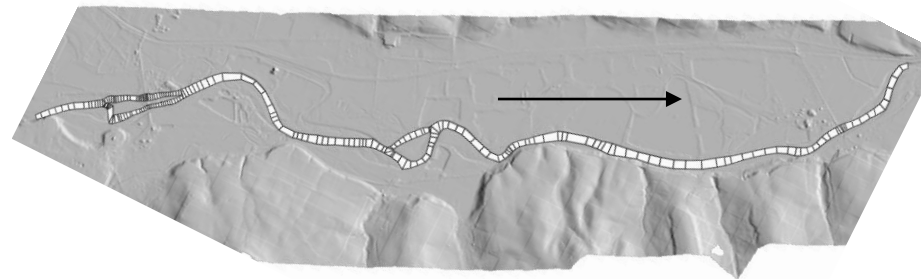
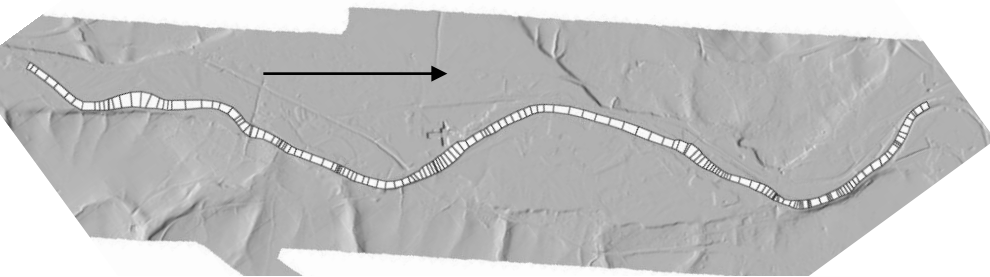
PIXC brut projeté sur la centerline

PIXC filtré

(filtrage en base ondelettes,  
préservation de la physique du signal  
[Montazem et al. (2025)])



# Validation de la modélisation 1Dlike avec porosité sur la Moselle

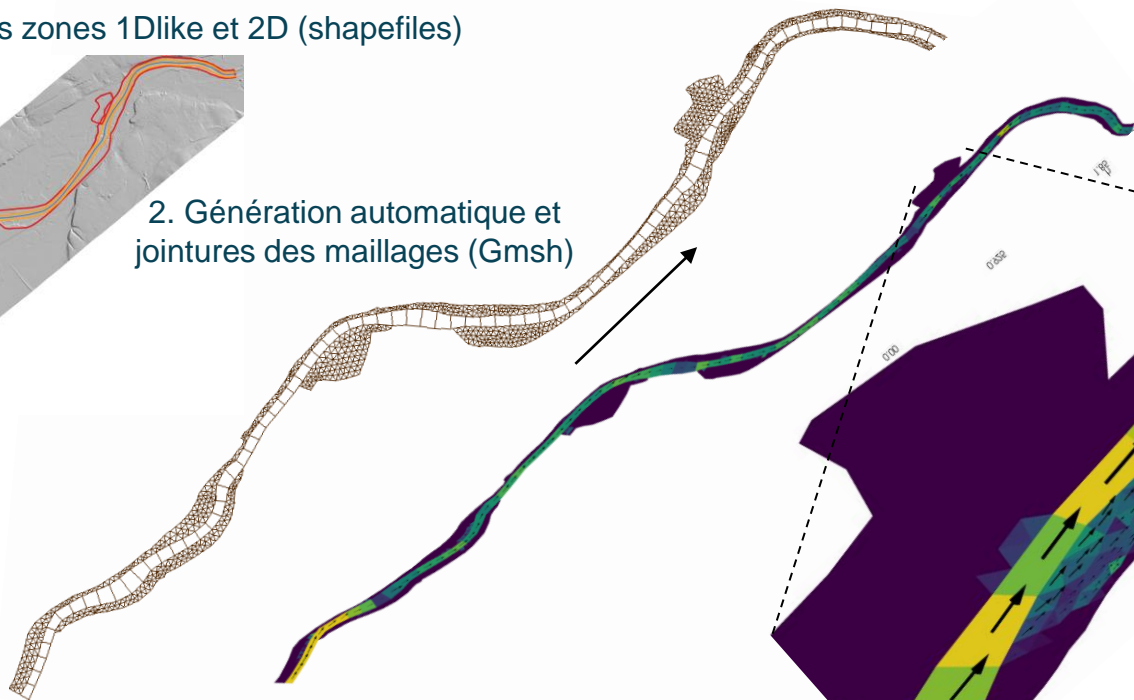


# Construction de modèles 1Dlike2D sur la Moselle amont

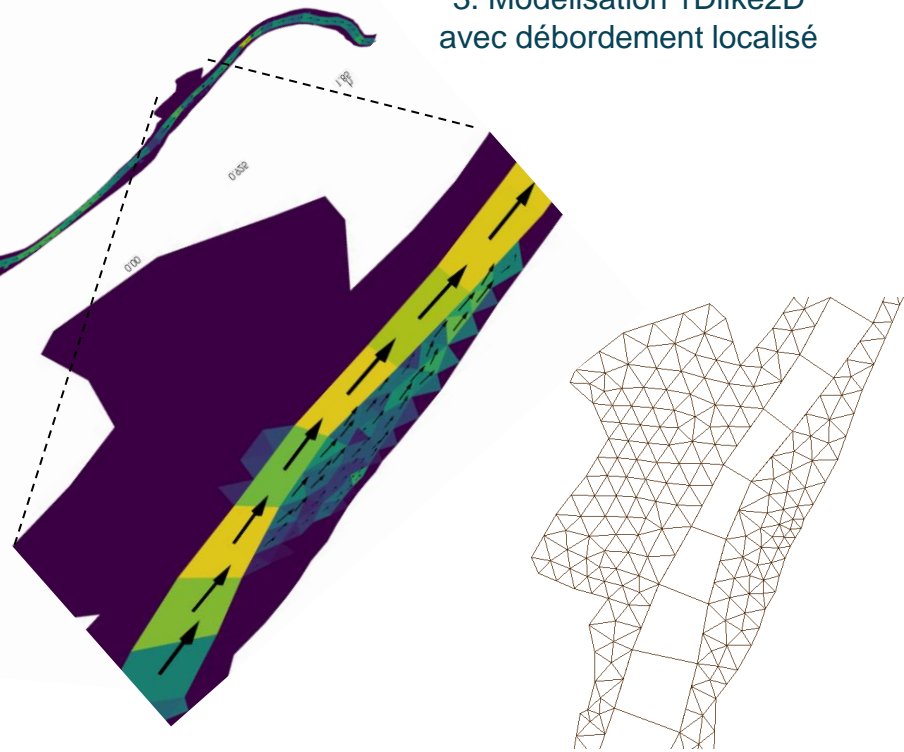
1. Définition des zones 1Dlike et 2D (shapefiles)



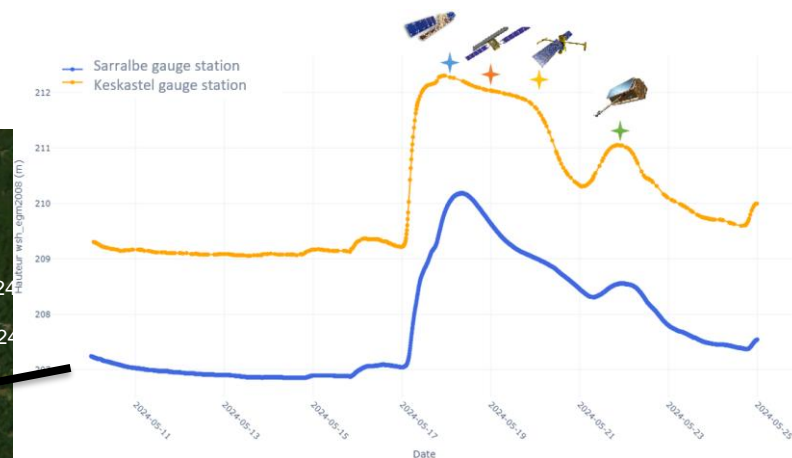
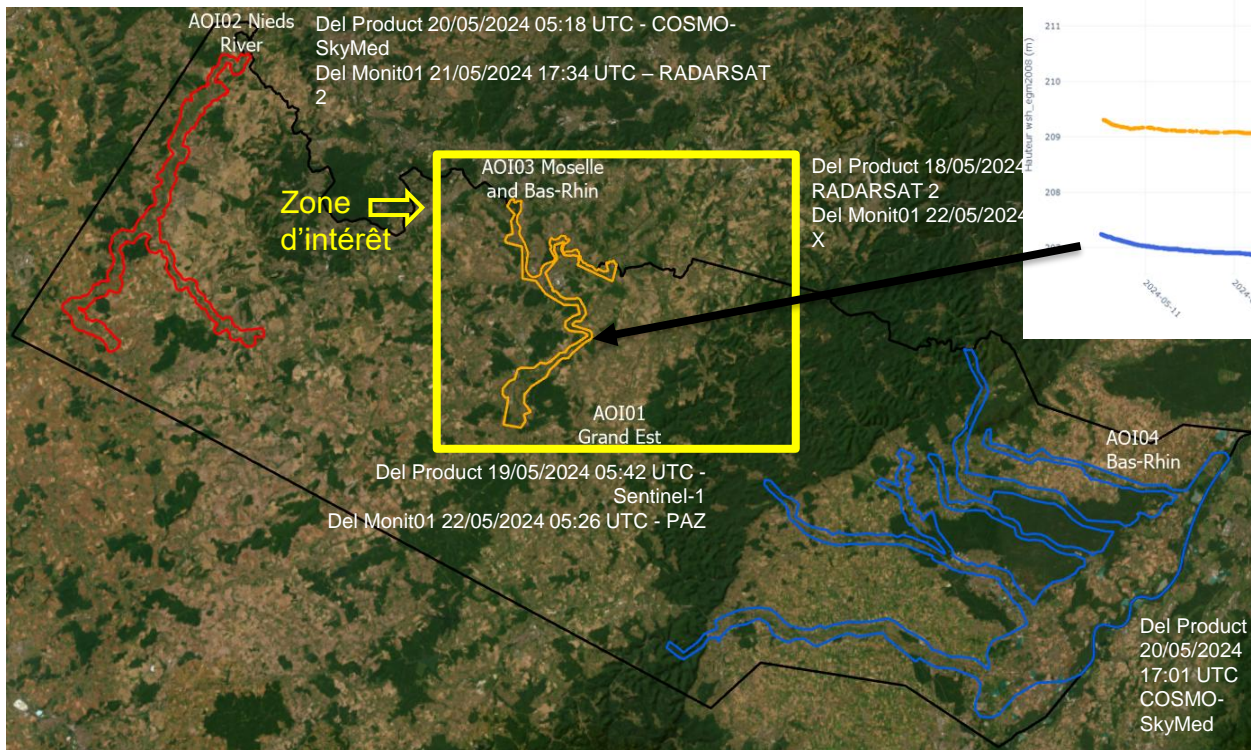
2. Génération automatique et jointures des maillages (Gmsh)



3. Modélisation 1Dlike2D avec débordement localisé

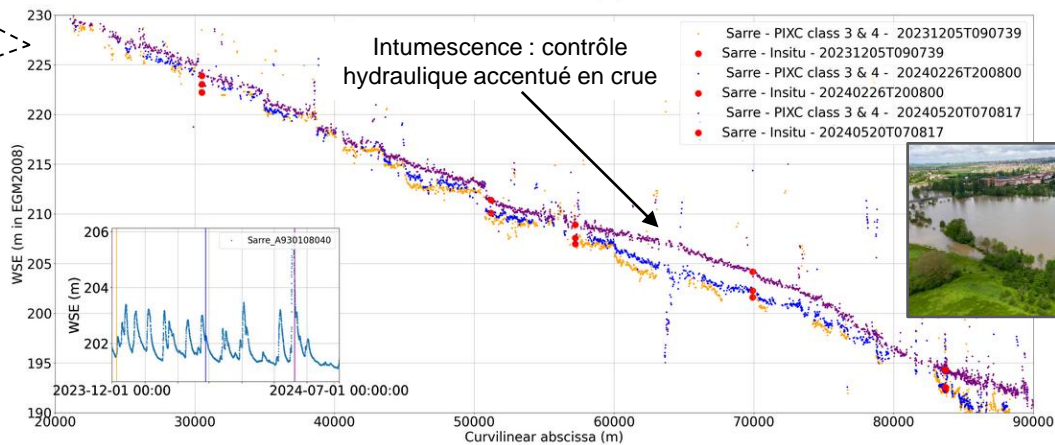
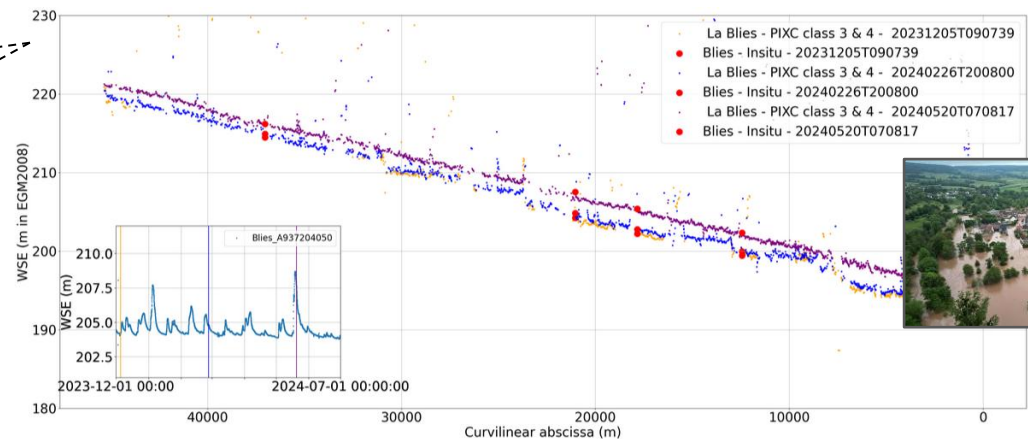
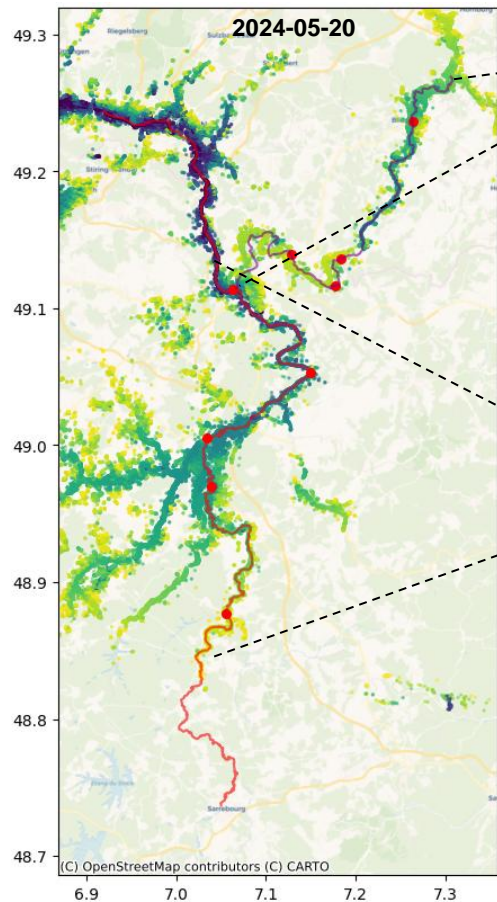


## Crue de la Sarre du 18 mai 2024 (EMSR723)



- ★ Radarsat-2 -- 18/05/2024 17:21 UTC
- ★ Sentinel-1 -- 19/05/2024 05:42 UTC
- ★ SWOT -- 20/05/2024 07:08 UTC
- ★ TerraSAR-X -- 22/05/2024 05:53 UTC

# Vers l'assimilation de cocktails de données satellite dans les modèles 1D2D



# Bilan et perspectives

## Actions menées :

- Développement de modèles hydrauliques pour la modélisation multiD
- Validation des modèles et des méthodes d'assimilation sur des cas et des données réelles

## Résultats scientifiques clés :

- Outils et méthode de calibrage consistants : **combinaison possible de l'ensemble des source de données et approches de modélisation/calibrage présentées**
- **1Dlike** : modèle de propagation d'ondes dans les réseaux de rivières grande échelle, optionnellement combinable à l'hydraulique 2D fine échelle
- Remontée d'information de l'hydraulique vers l'hydrologie : calibrage combiné des compartiments hydrologiques et hydrauliques des modèles => vers les **jumeaux numériques de bassins**

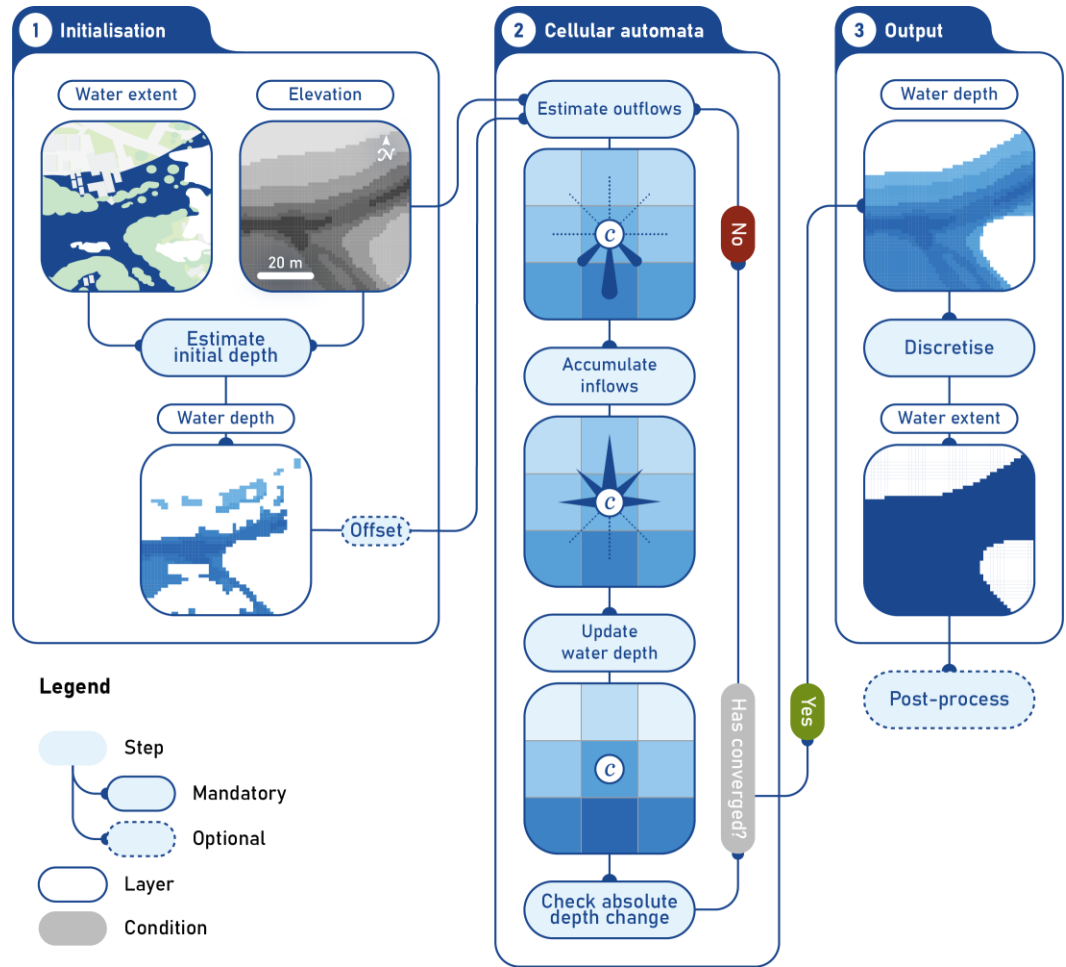
## Perspectives :

- Assimilation de données 2D (cartes d'inondations)
- Modélisation et calibrage de lois d'ouvrage
- Déploiement opérationnel : automatisation du déploiement des modèles et du recueil des observations, puis du calibrage

# References

- Ayoub, V., Delenne, C., Matgen, P., Finaud-Guyot, P., & Hostache, R. (2020, July). A 2D Shallow water model with depth-dependant porosity applied to the Severn River. In *River Flow 2020-10th Conference on Fluvial Hydraulics*.
- Berkaoui A. et al. in prep. A Hybrid Raster-Vector Framework for Multi-Scale Coupled Hydrological-Hydraulic Modeling
- Colleoni, F., Huynh, N. N. T., Garambois, P.-A., Jay-Allemand, M., Organde, D., Renard, B., ... Javelle, P. (2025). Smash v1.0: A differentiable and regionalizable high-resolution hydrological modeling and data assimilation framework. *EGUsphere*, 2025 , 1–36. doi: 10.5194/egusphere-2025-690
- Guinot, V., & Soares-Frazão, S. (2006). Flux and source term discretization in two-dimensional shallow water models with porosity on unstructured grids. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 50(3), 309-345.
- Guinot, V., Delenne, C., Rousseau, A., & Boutron, O. (2018). Flux closures and source term models for shallow water models with depth-dependent integral porosity. *Advances in Water Resources*, 122, 1-26.
- Hascoet, L., & Pascual, V. (2013). The tapenade automatic differentiation tool: principles, model, and specification. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 39 (3), 1–43.
- Honnorat, M., Monnier, J., & Le Dimet, F. X. (2009). Lagrangian data assimilation for river hydraulics simulations. *Computing and visualization in science*, 12(5), 235-246.
- Huynh, N. N. T., Garambois, P.-A., Colleoni, F., Renard, B., Roux, H., Demargne, J., . . . Javelle, P. (2024). Learning regionalization using accurate spatial cost gradients within a differentiable high-resolution hydrological model: Application to the french mediterranean region. *Water Resources Research*, 60 (11), e2024WR037544. doi: <https://doi.org/10.1029/2024WR037544>
- Larnier, K., Garambois, P. A., Emery, C., Pujol, L., Monnier, J., Gal, L., ... & Calmant, S. (2025). Estimating channel parameters and discharge at river network scale using hydrological-hydraulic models, SWOT and multi-satellite data. *Water Resources Research*, 61(7), e2024WR038455.
- Ledauphin, T., Garambois, P. A., Larnier, K., Azzoni, M., Emery, C., Picot, N., ... & Yésou, H. (2025). Assessing SWOT's hydraulic visibility on the Rhine: Precision flow lines and slope-based flood wave propagation signatures. *Earth and Space Science*, 12(7), e2025EA004309.
- Ledauphin T., Pujol L., Piasny G., Samine Montazem A., Suchet L., Larnier K., Azzoni M., Yesou H., Picot N., Emery C., Garambois P.-A. Assessing SWOT Hydraulic Visibility and Wavelet-Based Slope Estimation in Narrow Rivers Using High-Resolution Hydraulic Simulations (submitted).
- Piasny, G. (2023). Approche expérimentale et numérique en morphodynamique des cours d'eau: application à la gestion de la mobilité latérale de la Moselle sauvage (Doctoral dissertation, Université de Strasbourg).
- Pujol, L., Garambois, P. A., Finaud-Guyot, P., Monnier, J., Larnier, K., Mose, R., ... & Calmant, S. (2020). Estimation of multiple inflows and effective channel by assimilation of multi-satellite hydraulic signatures: The ungauged anabranching Negro river. *Journal of Hydrology*, 591, 125331.
- Pujol, L., Garambois, P. A., & Monnier, J. (2022). Multi-dimensional hydrological–hydraulic model with variational data assimilation for river networks and floodplains. *Geoscientific Model Development*, 15(15), 6085-6113.
- Wongchuig, S., Paiva, R., Siqueira, V., Papa, F., Fleischmann, A., Biancamaria, S., ... & Al Bitar, A. (2024). Multi-satellite data assimilation for large-scale hydrological-hydrodynamic prediction: Proof of concept in the Amazon basin. *Water Resources Research*, 60(8), e2024WR037155.

# EXFLOS : méthode



# EXFLOS : exemple de résultats

Inondations en Ile-et-Vilaine, janvier 2025.

