

Présentation du projet de recherche MUFFINS, modélisation-assimilation hydrologique-hydraulique

22 Juin 2023, CEREMA Aix-en-Provence, «CTT - Les inondations par
ruissellement : de la prévision à la cartographie de l'aléa »

Pierre-André Garambois, INRAE, Recover, Aix-Marseille Univ.
pierre-andre.garambois@inrae.fr

Travaux en collaboration



➤ Context - MUFFINS

- MUFFINS: “MULTIscale Flood Forecasting with INnovating Solutions”
- Consortium pluridisciplinaire : Cerema, CCR, IMFT, IMT, INRAE, INRIA Lemon, Univ. Eiffel, Meteo Fr./SPC MedEst, Min. Ecol./SCHAPI
- Partenariat :
 - Équipe USA développant des outils nationaux (NOA/NSSL, Univ. OK)
 - Groupe d'utilisateurs finaux MUFFINS
- Start : 1st march 2022, duration= 48 months,
- Funding from ANR : 597k€



INRAE

Réunion plénière 1 – projet ANR MUFFINS (MULTIscale Flood Forecasting with INnovating Solutions)

2022-10-17 MUFFINS

anr[®]
agence nationale
de la recherche

➤ Contexte - Crues et inondations, soudaines, dévastatrices



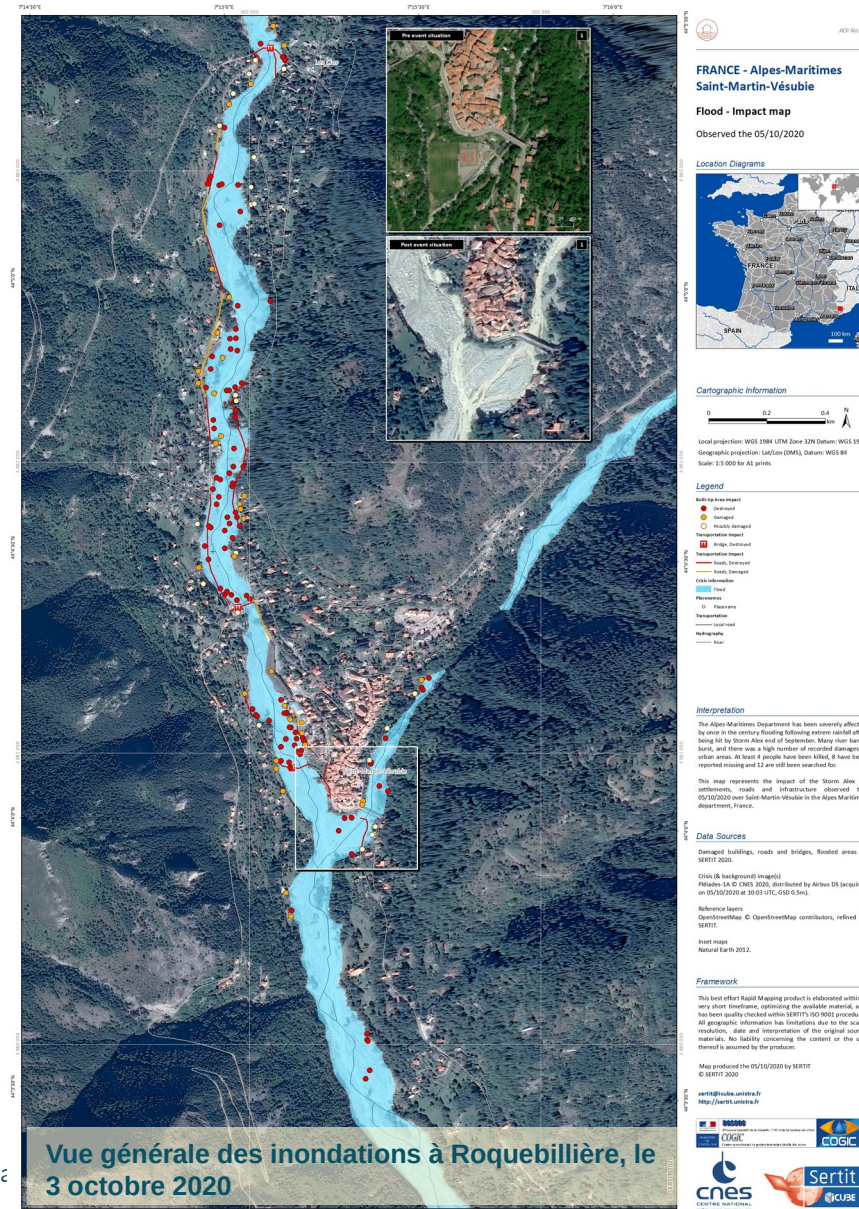
Gardon d'Alès (Gard) 8-9/09/2002



Nartuby en crue (Var), 14/06/2010



Zone inondée au Luc (Var), 24/11/2019 (sc : sécurité civile)



Flood Forec

Vue générale des inondations à Roquebillière, le 3 octobre 2020



Panaches sédimentaires, réponses hydro-géomorphologiques, tempête Alex, Octobre 2020

➤ Context - “Composantes principales”



- Meteo



- Hydrology



- Hydraulics



- Risks

➤ Context - outil nationaux de prévision en France

Vigilance météorologique
La carte est actualisée au moins 2 fois par jour, à 6h et 16h.

Diffusion : le mercredi 22 janvier 2020 à 15h15
Validité : jusqu'au jeudi 23 janvier 2020 à 06h00
Actualise la carte du mercredi 22 janvier 2020 à 12h17

Consultez le **bulletin national**

Sur les Pyrénées Orientales et l'Aude, épisode de fortes pluies durables jusqu'à jeudi. Risque d'avalanches sur le massif du Canigou. Fortes vagues en Méditerranée. Crues majeures de l'Agly et de l'Aude amont. Crue importante du

Cliquez sur la carte pour lire les **bulletins régionaux**

Conseils des pouvoirs publics : Précipitations/Orange – Soyez prudents face au risque d'inondations et prenez les précautions adaptées. – Renseignez-vous sur les conditions de circulation. – Ne vous engagez en aucun cas, à pied ou en voiture, sur une voie immergée ou à proximité d'un cours d'eau. Avalanches/Orange – Informez vous de l'état des secteurs routiers d'altitude. – Conformez vous aux instructions et consignes de sécurité en vigueur dans les stations de ski et communes de montagne. Crues/Orange – Dans les zones habituellement inondables, mettez en sécurité vos biens susceptibles d'être endommagés et surveillez la montée des eaux.

Copyright Météo France

2 départements en Rouge.

- Consulter les prévisions
- Écouter Futé

Accéder au bulletin d'information*

*Production de l'information : 22.01.2020 à 16h03 H/L

VIGICRUES FLASH
Jeudi 02 décembre 2021 à 13h45

Légende

- Risque de crue très forte
- Risque de crue forte
- Service indisponible
- Communes non surveillées

Rafraîchissement automatique

Jeudi 02 décembre

13h45

13h30

13h15

13h00

12h45

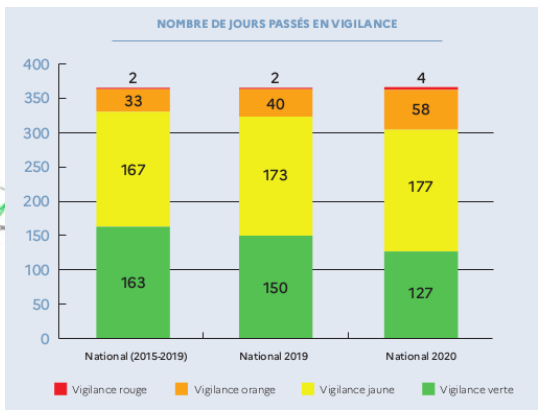
12h30

12h15

12h00

11h45

11h30



Prospective pour de nouveaux outils de prévision nationaux (réflexion SCHAPI-INRAE-UGE en cours), en lien avec le projet MUFFINS

➤ Context - Objectifs généraux du projet MUFFINS

- Contexte d'incertitude élevé et prévisibilité difficile : Variabilités et non-linéarités importantes, couplages de processus physiques multi-échelles, incertitudes, contexte de changement climatique
- Multi-disciplinarité : météorologie, hydrologie, hydraulique, socio/économie ; hydro-informatique, mathématiques appliquées

=> **Besoin de nouvelles approches pour :**

- Répondre aux besoins opérationnels en temps de crise

Haute résolution, Précision, robustesse, temps de prévision courts ~ 10min

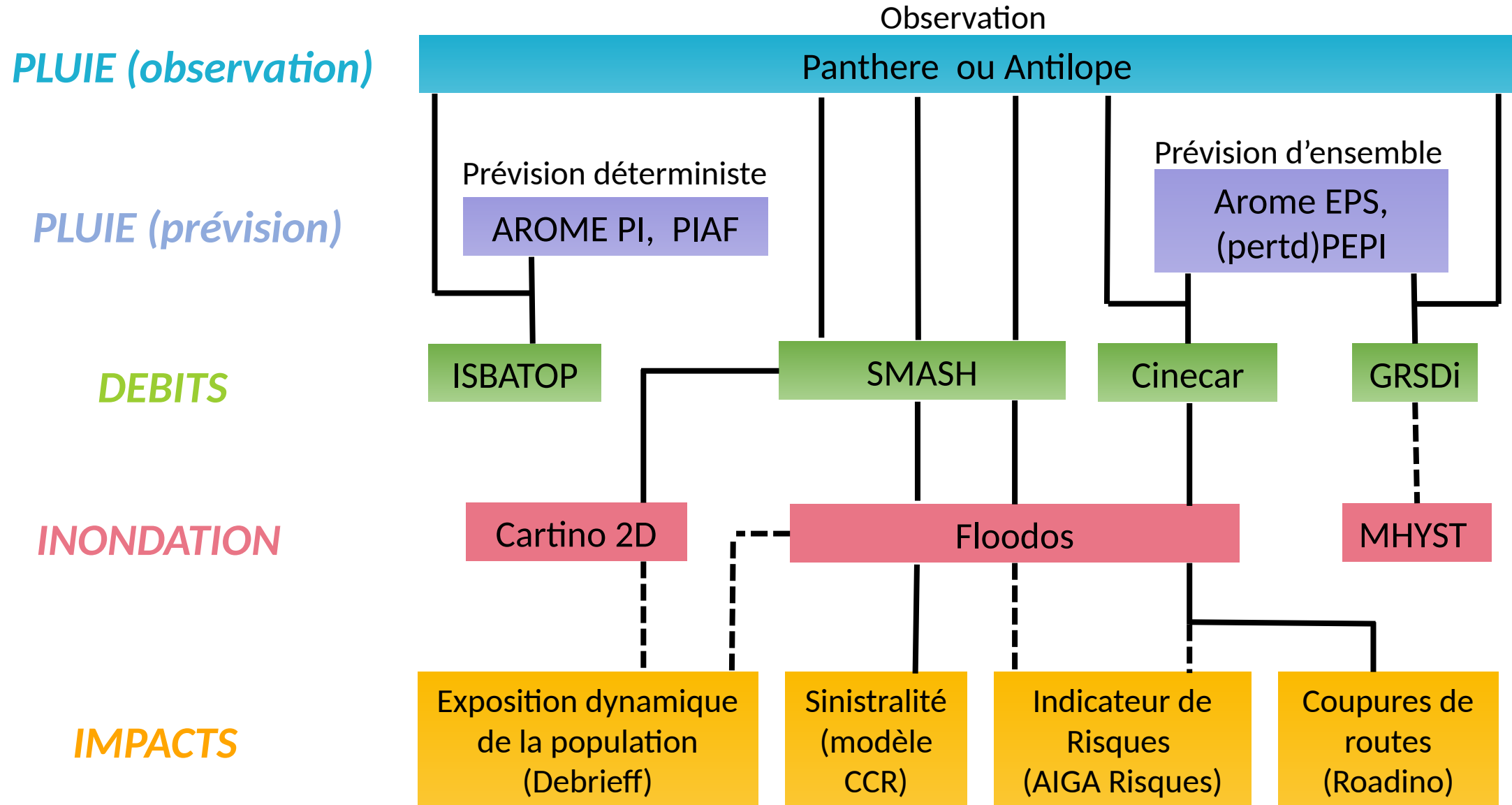
- **Transfert d'information** (direct et inverse) entre les composantes des modèles météo-hydro-hydraulique-dommages et les échelles (ruissellement $O(1\text{m}^2)$ → propagation de crues - inondation $O(10^3 - 10^4\text{km}^2)$)

- Maximiser l'**intégration d'information multi-capteurs** (in situ, satellite, opportuniste) et bases de données en vue de réduire les incertitudes de prévision.

“The overarching goal of MUFFINS project is to develop new accurate and computationally efficient flood forecasting approaches, enabling transferring information between modelings (météo-hydrologie-hydraulique-damage) and scales (from local runoff generation over areas lesser than 1-km^2 to flood propagation on catchments of thousands km^2), and taking advantage of innovative data (in situ, remote observation, opportunistic) to reduce forecasts uncertainties.”



➤ Context - chains from PICS project



➤ Objectifs du projet MUFFINS

- Comprendre et spécifier les besoins des utilisateurs : avant, pendant et après la crise
- Concevoir, en fonction des besoins des utilisateurs, la prochaine génération de chaînes d'alerte aux crues inondation
 - ingestion de produits de pluie prévue à courte échéances,
 - chaînes de modélisation intégrées hydrologie-hydraulique régionalisables et multi-échelles,
 - Précision, Rapidité pour des calculs temps réel
 - Cartographie de l'impact des inondations,
 - Synergies renforcées avec des données de sources multiples
- Démonstrations des méthodes sur des bassins versants méditerranéens avec des problèmes multi-échelles et des ensembles de données riches.

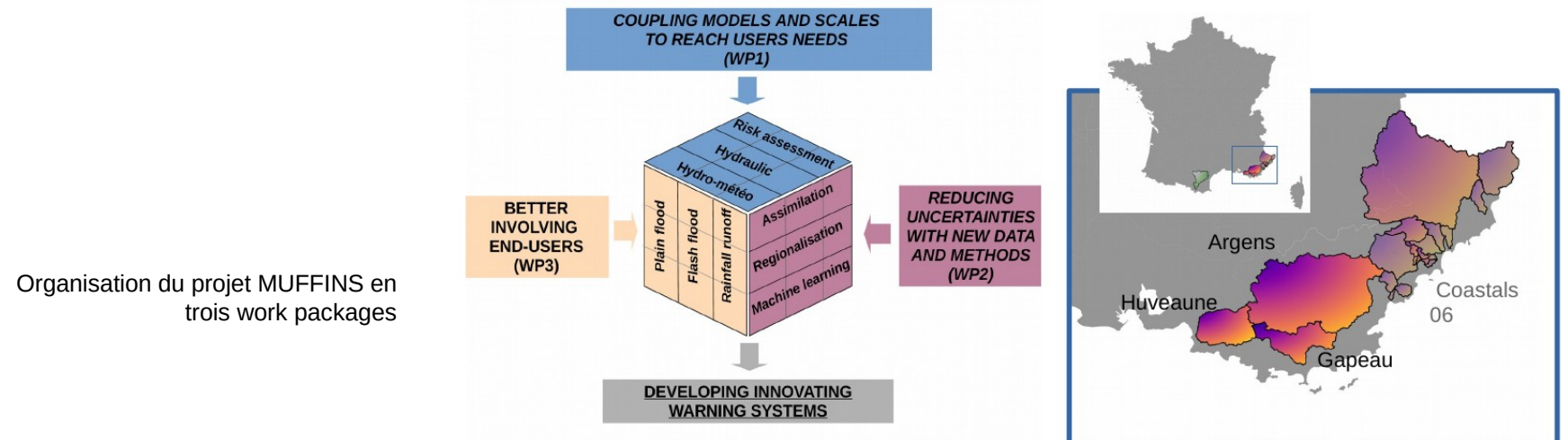


Figure 1. (Left) Overall objectives of the MUFFINS project and new insights. (Right) Main study catchments in the French Mediterranean region (magma), Aude catchment (green), fall-back/additional case.

➤ MUFFINS - Vers des chaînes de modélisation intégrée des crues-inondations, avec assimilation de données

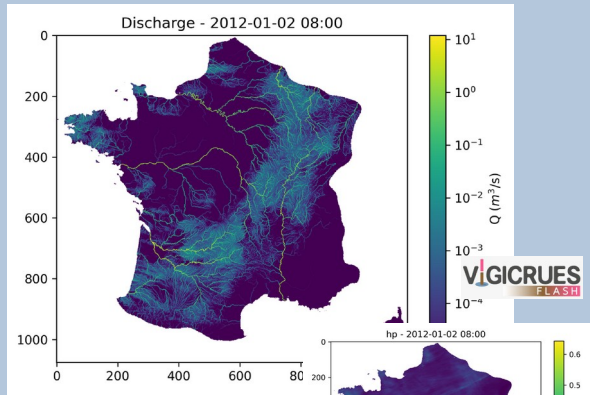
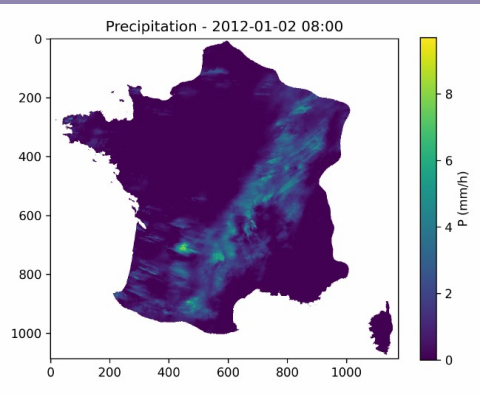
Forçage Météorologique



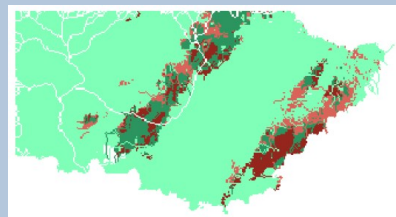
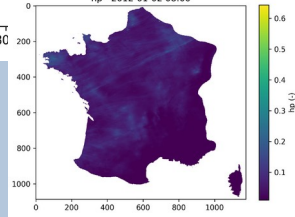
Réponse Hydrologique



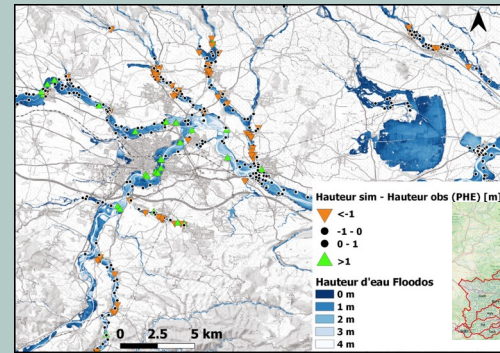
Hydraulique haute résolution - débordement de cours d'eau, ruissellement



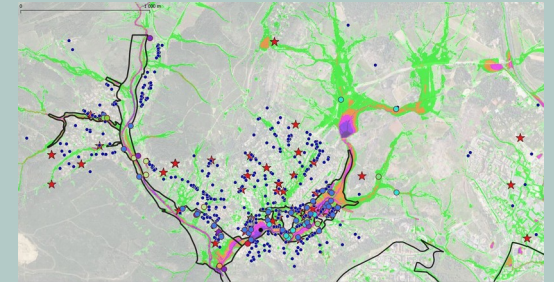
Discharge and moisture simulated with SMASH (Colleoni et al. 2022)



Hydrological evaluation of rainfall ensemble forecasts PIAF at t+3h (Godet et al. 2022)



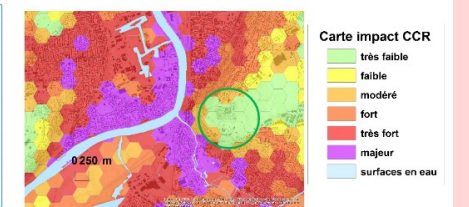
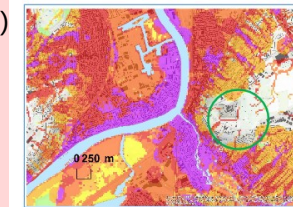
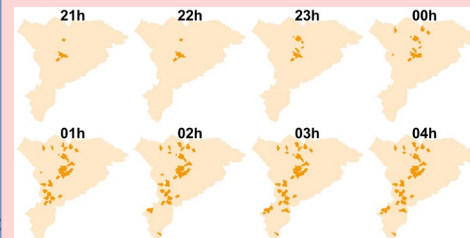
Catalogue of flood extents (Hocini et al. 2021; Payrastre, Nicolle et al. 2022)



Runnof simulated with Cartino 2D (Telemac 2D) (Pons et al.)

Evaluation des risques et impacts

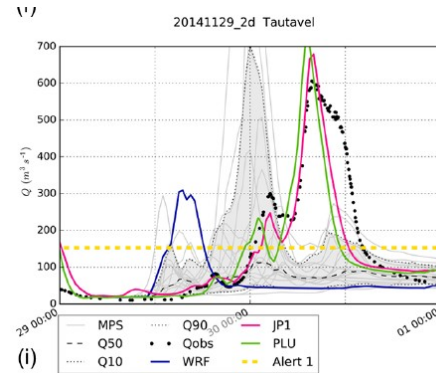
Impacts map, CCR (Naulin et al.)



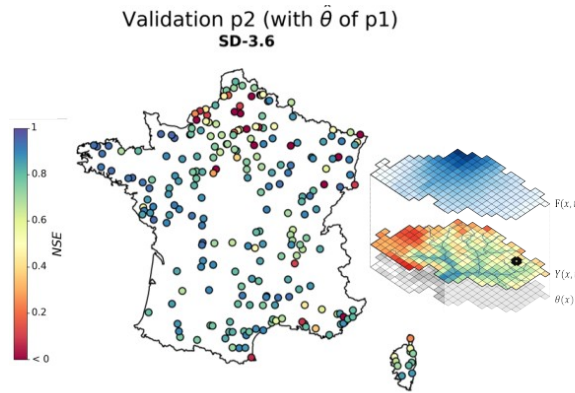
Localisation of rescue teams -SDIS (Charpentier-Noyer, Payrastre)

➤ Modèles utilisés/développés dans le projet MUFFINS

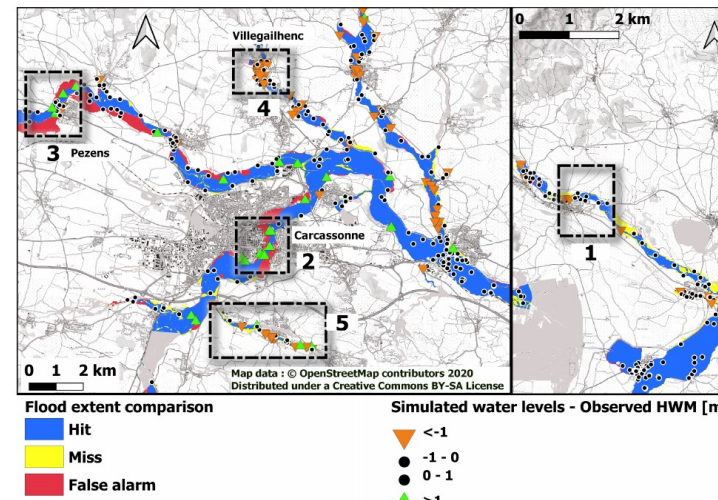
- Hydrologie distribuée
 - Cinecar
 - MARINE (Plathynes)
 - SMASH (VDA)
- Hydraulique ; couplages H&H
 - DassFlow (VDA)
 - SW2D
 - Floodos
 - Cartino2D (Telemac2D)
- Dommages – CCR model
- Outils pré-post proc & couplage



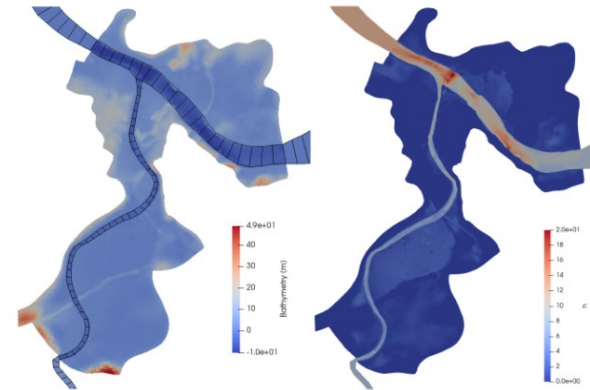
Prévisions d'ensemble avec MARINE et forçages WRF (Roux et al. 2020)



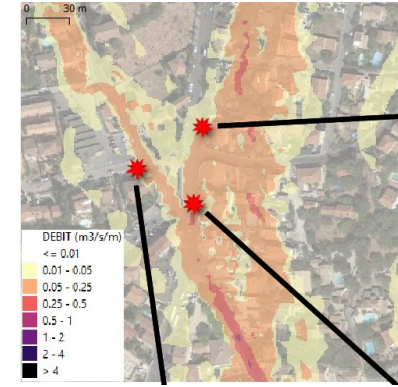
Performances SMASH SD-3.6 en validation temporelle sur 235 jauges aval (Colleoni et al. 2022)



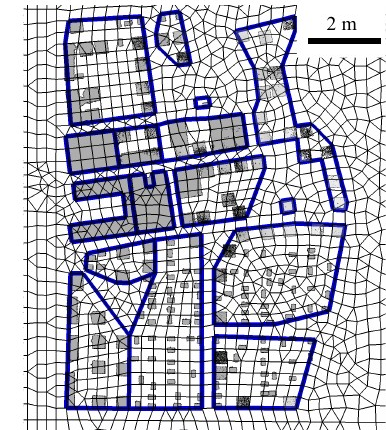
Simulation avec Cinecar-Floodos, Aude 2018 (Hocini et al. 2020)



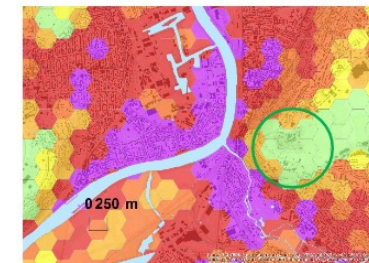
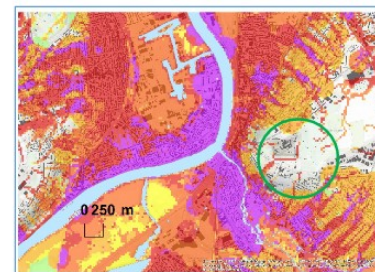
DassFlow Multi-D : zoom sur zone inondée à Bayonne, modèle intégré H&H bassin de l'Adour (Pujol, Garambois, Monnier, 2022)



Cartino2D (Pons et al. 2020)



Mesh for DDP porosity model (Guinot et al. 2018) implemented into SW2D software (Steinstraesser et al. 2021)



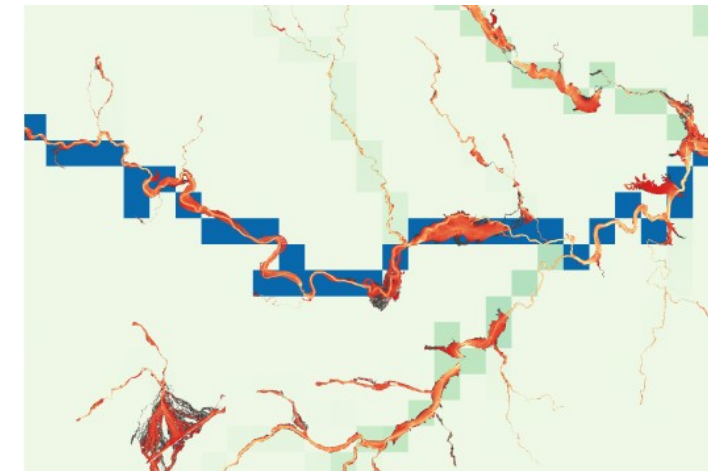
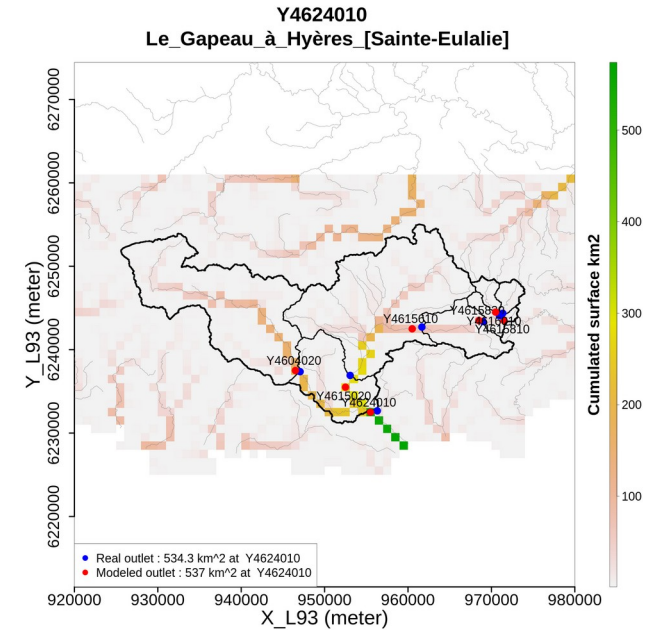
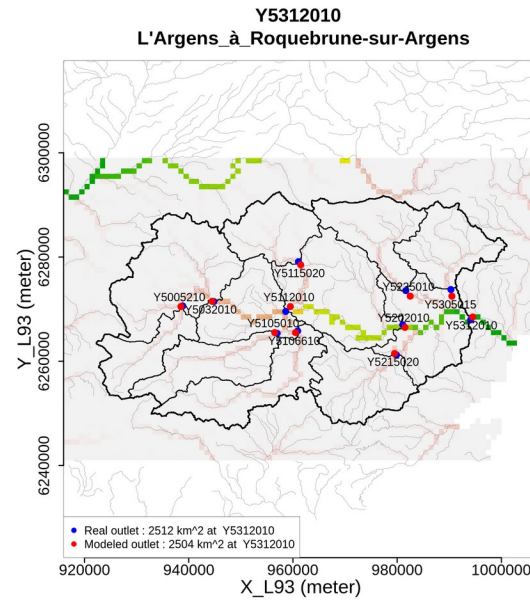
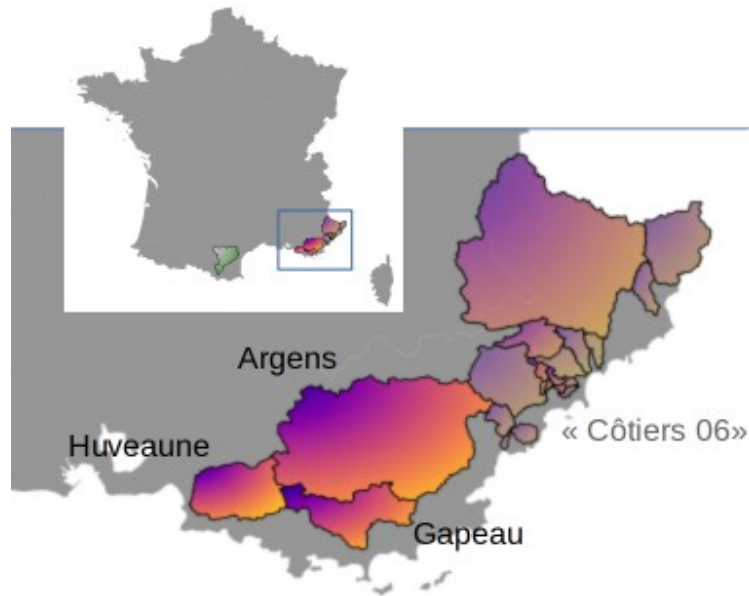
- Carte impact CCR
- très faible
 - faible
 - modéré
 - fort
 - très fort
 - majeur
 - surfaces en eau

Cartographie de d'impacts d'inondation – synthèse données modélisation et assurantielles (source doc en ligne CCR)



INRAE

➤ Main study area of the MUFFINS project in the French Mediterranean region



Comparaison brute des "maillages" SMASH (vert-bleu ~ aires drainées) et floodos (rouge-jaune ~ vitesses) sur le bassin de l'Argens (Y5312010)

➤ Travaux en cours - 4 thèses, 1 res. Engineer

- PhD on hydrological models regionalization and DA (Task 1.2 and 2.2) ; Truyen Huynh – september 22, INRAE-IMFT
« Vers une meilleure anticipation des crues méditerranéennes sur les bassins versants non jaugés - modélisations hydrologiques hybrides régionalisées. »
- PhD4,5 on hybrid ML - DA with offline-online (real time) strategy (Task 2.3 and Task 2.2), IMT-INRAE.

Mustapha Allabou (oct. 2021), « Réductions de modèle d'hydrodynamique pour simuler en temps réel la dynamique de plaines d'inondations »

Hugo Boulenc (avril 2022, « Résolution de problèmes inverses par approches hybrides apprentissage automatique – modèles d'EDP-EDO pour la simulation numérique d'inondations »

- PhD6 on full hydrometeo-hydrau chain (Tasks 3.2 and 3.3) Juliette Godet – october 2022, Univ. Eiffel-INRAE,
« Evaluation d'une chaîne de prévision immédiate des impacts des crues soudaines à l'échelle de l'arc méditerranéen français »
- CDD Cerema, preprocessing and simulations for hydro-au cartographic modeling, (June 2022, 12month) (Tasks 1.3 and 2.1) Nabil Hocini

NB. Other external funding already obtained in relation with the MUFFINS project serving as an "attractor", engineering support (NB. NEPTUNE project, PhD grants, OFB grant, ...)



Towards integrated multi-scale flood modeling and data assimilation

Recent research and developments of SMASH - DassFlow variational data assimilation chains

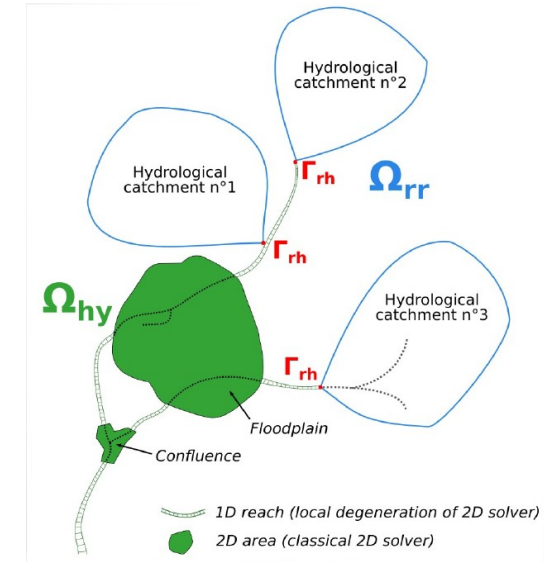
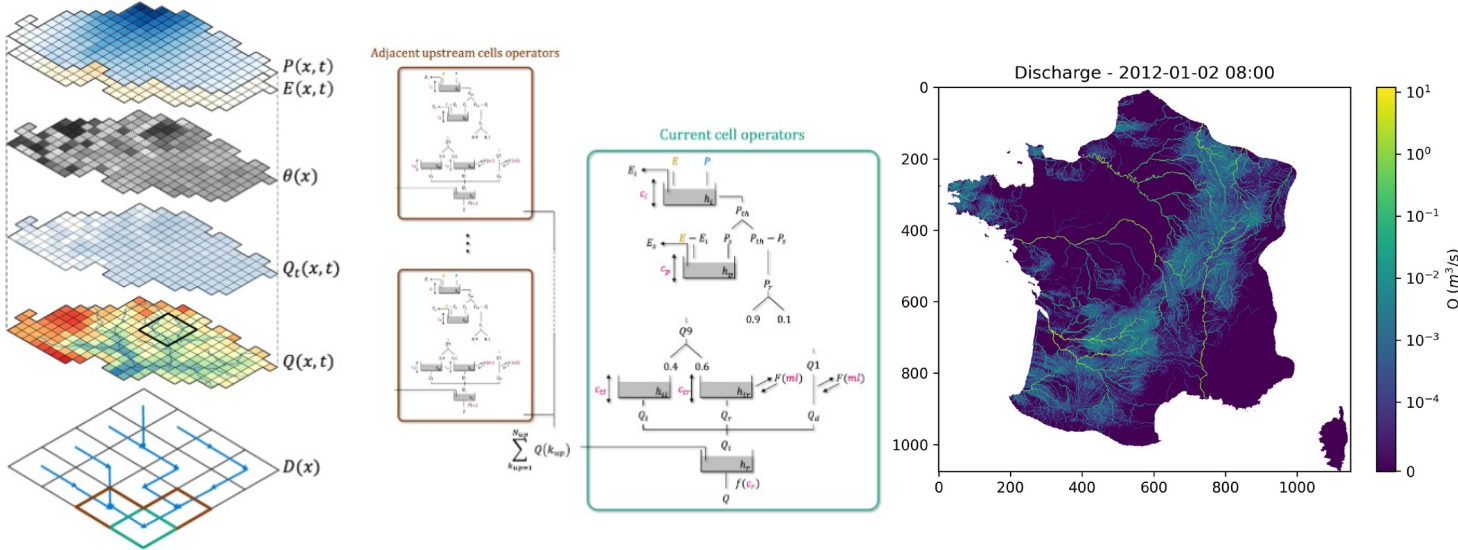
(INRAE-IMT, collab. With J. Monnier)

Plateforme de modélisation-assimilation de données développées dans nos recherches :

- Hydrologie distribuée : SMASH (<https://smash.recover.inrae.fr>), dépôt <https://github.com/DassHydro-dev/smash>
- Hydraulique 2D, multiD : DassFlow (<https://www.math.univ-toulouse.fr/DassFlow/>), dépôt <https://github.com/DassHydro-dev/dassflow2d>



➤ Modélisation hydro-au multi-D et assimilation variationnelle de données (VDA) Plateformes SMASH et DassFlow



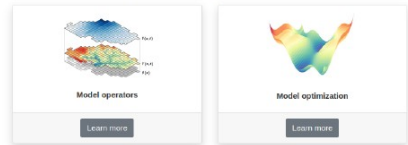
Plateforme SMASH (Spatially distributed Modelling and ASSimilation for Hydrology model) (Jay-Allemand et al. 2020, Colleoni et al. 2022).

Modèle hydrologique-hydraulique multi-D DassFlow (Pujol et al., GMD 2022); (Bas gauche) Inférence d'un lit mineur effectif sur la Garonne ; (Bas droit) zoom 2D sur la ville de Bayonne

Getting started User Guide API Reference **Model description** References

Model description

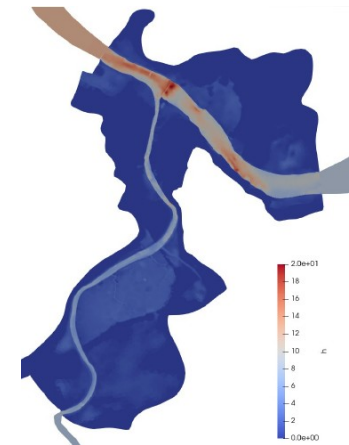
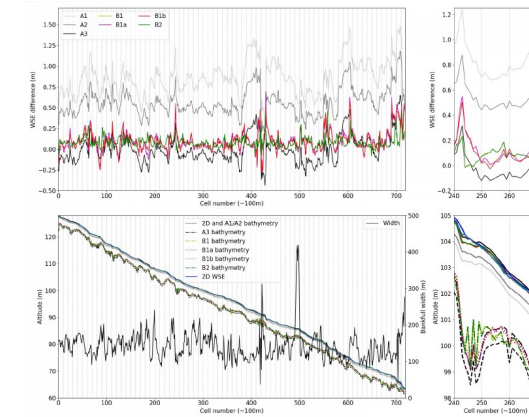
This document describes the source code of the `swash` hydrological platform. `swash` is a computational software framework dedicated to spatially distributed hydrological modeling including variational data assimilation, sensitivity analysis and calibration method (adjoint) adapted to high dimensional problems. This model is designed to simulate discharge hydrographs at any spatial location within a basin and reproduce the hydrological response of constricted catchments, both for operational flood (Javelle et al., 2016) and low flows (Folien and Anand, 2020) forecasting, by taking advantage of spatially distributed meteorological forcings, physiographic data and hydrometric observations. It is based on a conceptual representation and numerical approximations of constraint hydrological processes while aiming to maintain a relative generality. All `swash` source files are written in Fortran and wrapped in Python using `SWWrap` (Kerroude, 2020). The adjoint code is automatically generated using the differentiation tool `TapeRade` (Hascoet and Pascual, 2013) and some final tricks. The adjoint is used in the variational data assimilation algorithm presented in Jay-Allemand et al., 2020.



Previous `smash.operational.run_parallel` **Model operators** Next

Plateformes de VDA SMASH et Dassflow :

- Solveurs Fortran wrappés en Python
- Code adjoint de chaque plateforme dérivé automatiquement avec TAPENADE (Hascoet and Pascual 2013)
- Documentations Sphinx
- Codes open source (<https://github.com/orgs/DassHydro-dev/repositories>)



Amélioration constante de la modélisation de composantes d'écoulement (approches hybrides) : génération du ruissellement, influence de l'occupation des sols et sols, morphologie des cours d'eau et plaines d'inondation, échanges en milieux urbains, friction complexe, ...

➤ Vers des chaînes intégrées de modélisation des crues-inondations avec assimilation de données

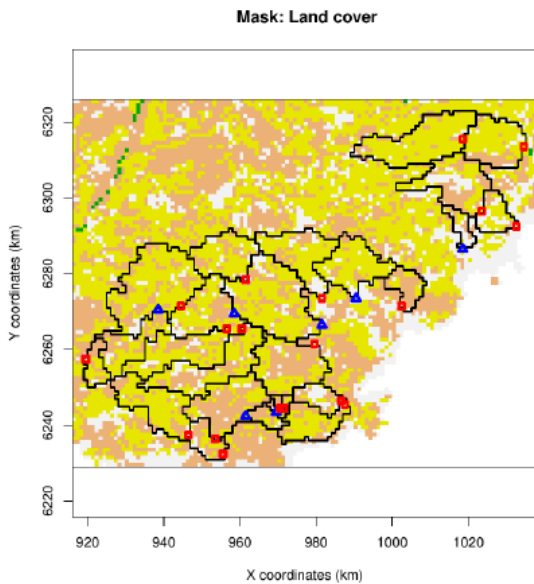
Contribution INRAE-IMT au projet MUFFINS

Objectif : Combinaison optimale modèle hydro-au couplé avec des données multi-sources (hétérogènes) en vue de réduire les incertitudes de modélisation

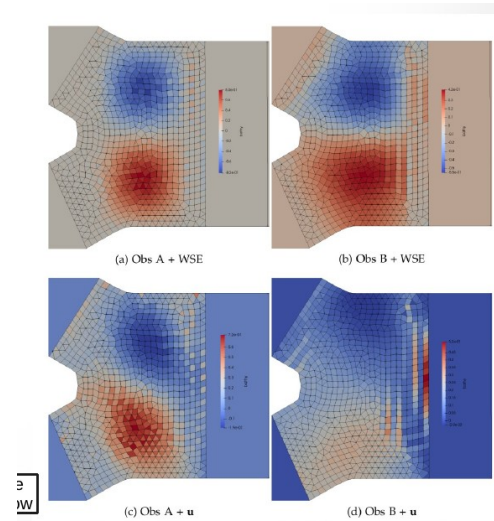
Data:

- Cartes haute résolution de descripteurs physiographiques (DEM, images satellites – occupation du sol, végétation, etc)
- Observations des réponses hydrologiques (in situ, satellites) (Q, h(t), Z, W, Slope, V_surf par video, humidité de surface de versants)
- Nouvelles données ? (ex. drones, crowdsourcing, réseaux et coupures)

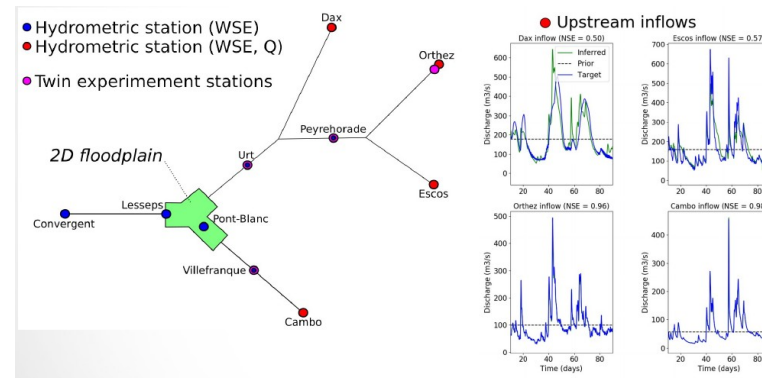
Méthodes : Modélisation hydro-au, Assimilation variationnelle de données, apprentissage statistique (IA), approches hybrides



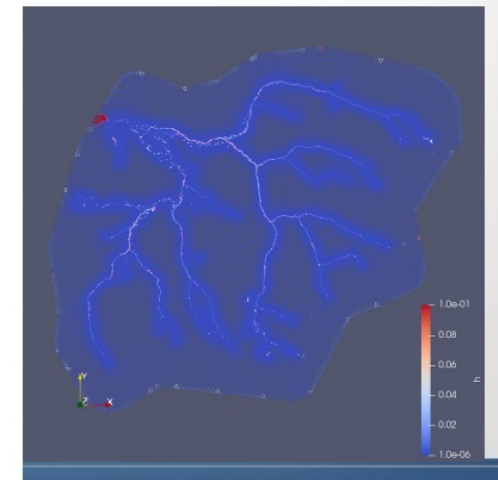
Soil occupation constrain used in a VDA regionalization algorithm used with multi-site data, SMASH hydrological model (Huynh, Colleoni et al.)



Inference of bathymetry from surface velocity, twin experiment – 1Dlike-2D SW hydraulic model, DassFlow (Pujol et al., PhD 2022)



Inference of upstream-lateral hydrographs with DassFlow (Pujol et al., GMD 2022)

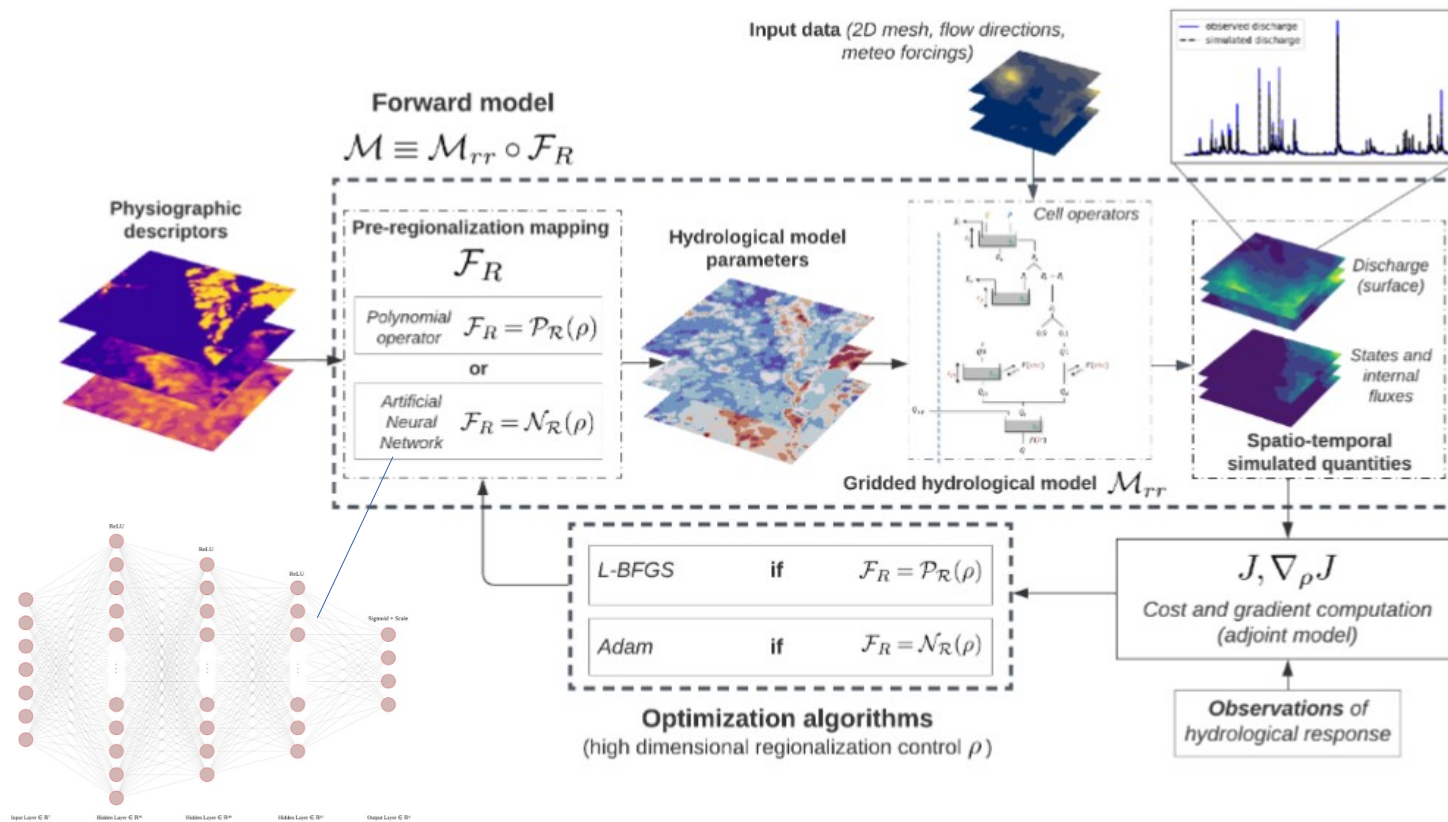


Inference of spatially distributed infiltration parameters – 2D SW hydraulic model, DassFlow (Pujol, et al. In prep)

➤ Apprentissage de la pré-régionalisation d'un modèle hydrologique différentiable à haute résolution avec des gradients spatiaux

(Huynh T. PhD at INRAE, superv. Garambois, Renard, Roux)

Mise au point d'un algorithme hybride apprentissage-assimilation, appliqué à la régionalisation de paramètres hydrologiques conceptuels (Huynh et al., final redaction)



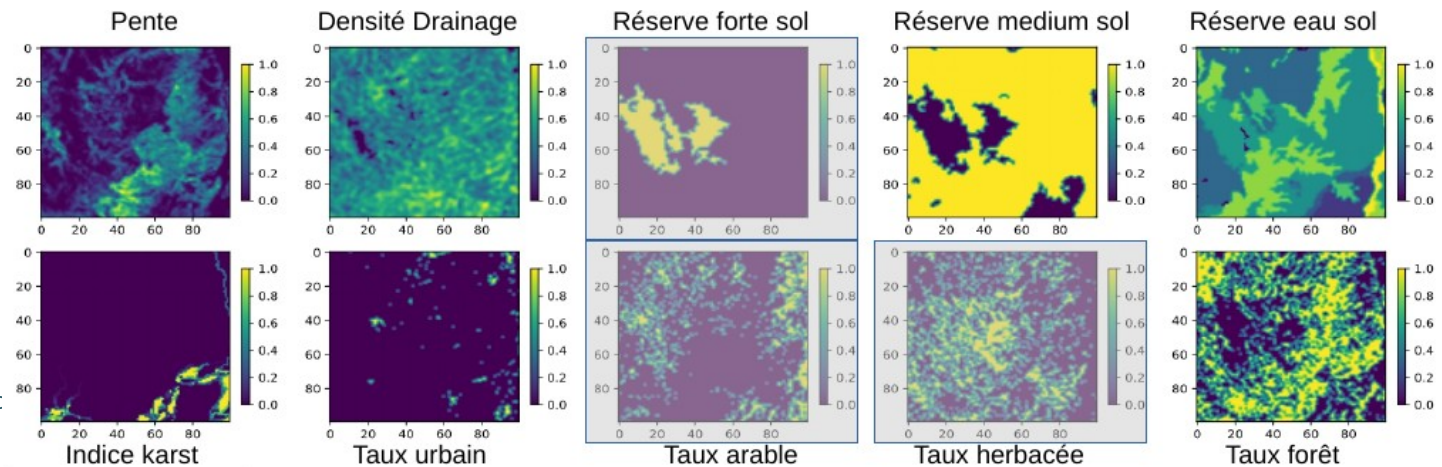
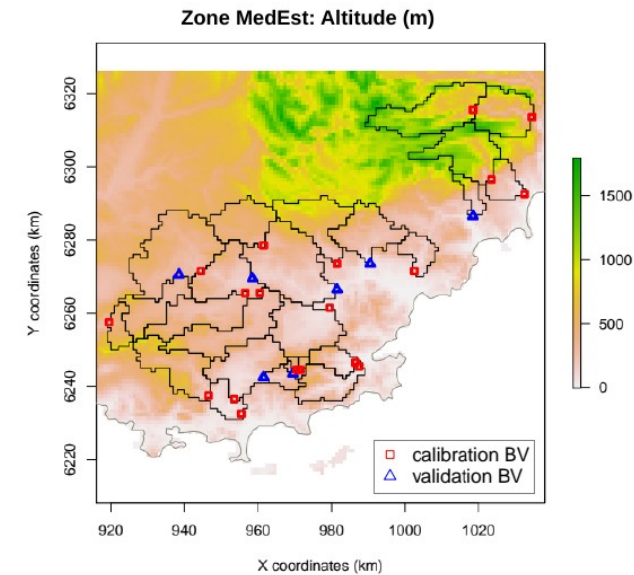
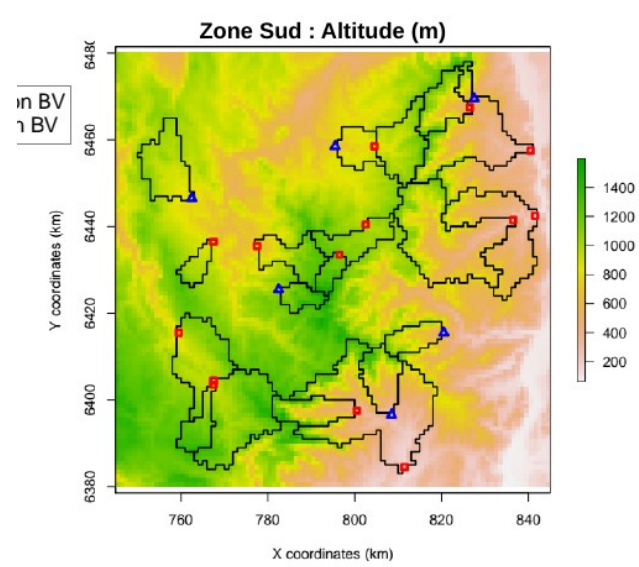
Hybrid Variational Data Assimilation Parameter Regionalization (HVDA-PR) (Huynh et al. Final redaction)



➤ Apprentissage de la prérégionalisation d'un modèle hydrologique différentiable à haute résolution avec des gradients spatiaux

(Huynh T. PhD at INRAE, superv. Garambois, Renard, Roux)

Zones de test des algorithmes de régionalisation à partir de Demargne et al. 2022 (Ardèche, Sud-Est) :



INRAE

Réunion plénière 1 - projet ANR MUFFINS (MULTisc
2022-10-17 **MUFFINS**

➤ Apprentissage de la pré-régionalisation d'un modèle hydrologique différentiable à haute résolution avec des gradients spatiaux

(Huynh T. PhD at INRAE, superv. Garambois, Renard, Roux)

(Huynh et al. Final redaction)

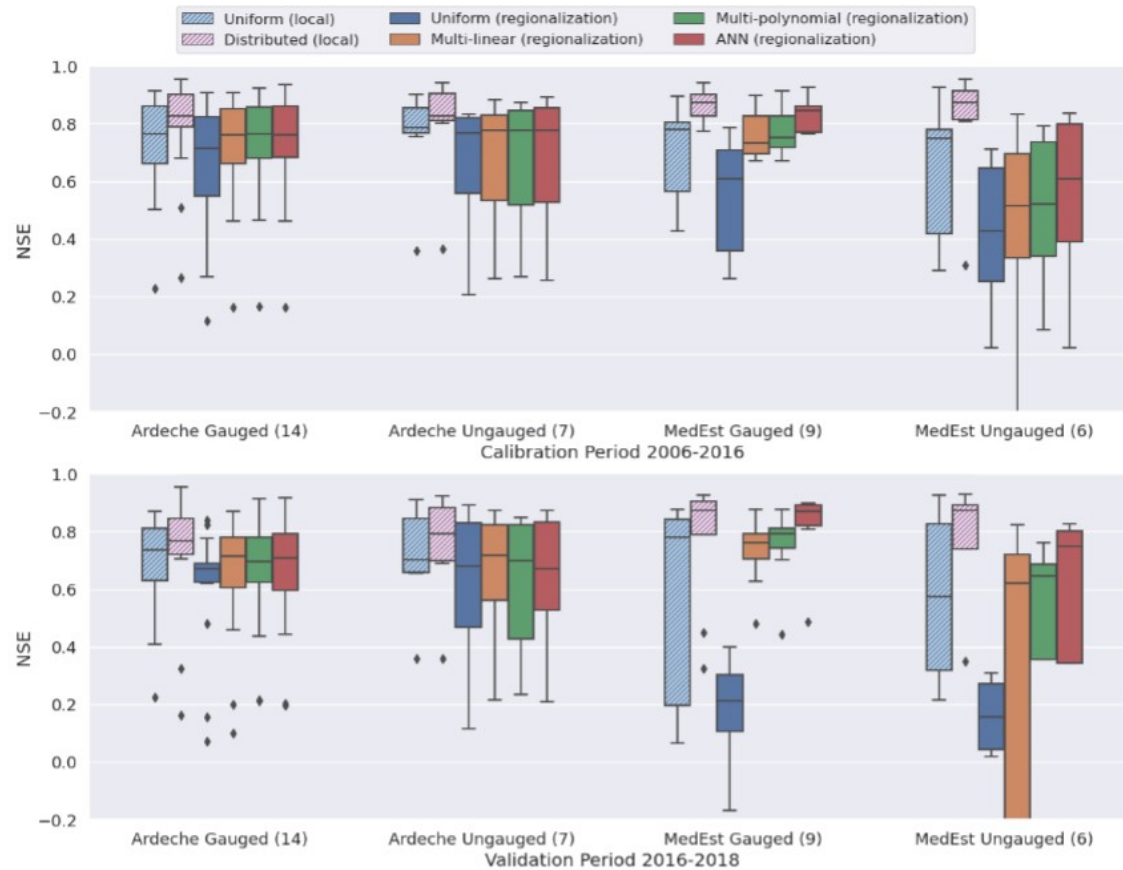


Figure 5. Comparison of NSE scores at gauged and pseudo-ungauged locations during the calibration (upper sub-figure) and validation (lower sub-figure) periods for two local calibration methods and four regionalization methods in both study areas. The numbers in parentheses denote the number of catchments in each boxplot.

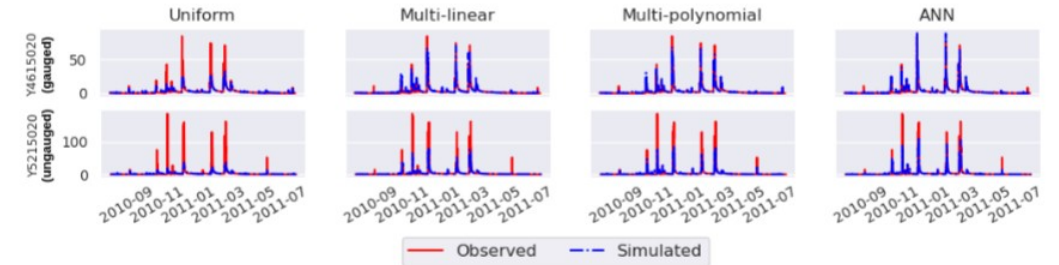


Figure 3. Study area: MedEst. Observed and simulated discharges (in m^3/s) in hourly time step at gauged catchment (Y4615020) and pseudo-ungauged catchment (Y5215020).

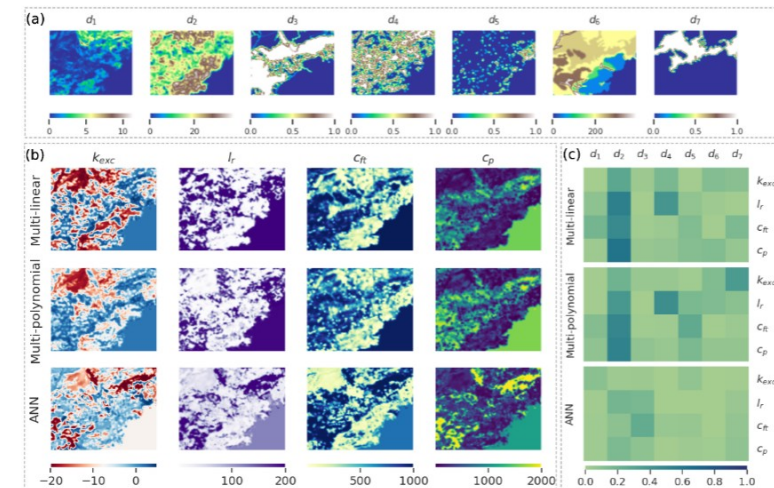


Figure 8. Study area: MedEst. Sub-figure a: The maps of input descriptors (d_1-d_7), whose information is provided in Table 1. Sub-figure b: Calibrated hydrological parameters (k_{exc} , l_r , C_{ft} , C_p) for three regionalization methods. Sub-figure c: Linear covariance between descriptor and parameter for three regionalization methods.

➤ Apprentissage de la pré-régionalisation d'un modèle hydrologique différentiable à haute résolution avec des gradients spatiaux

(Huynh T. PhD at INRAE, superv. Garambois, Renard, Roux)

(Huynh et al. Final redaction)

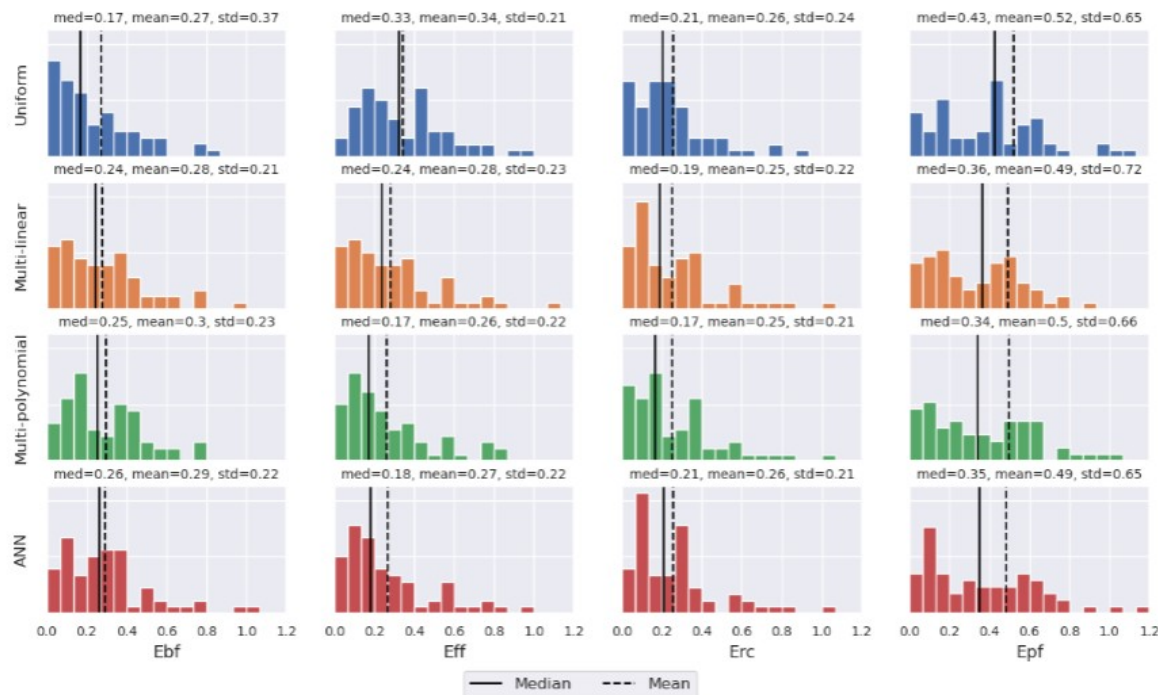
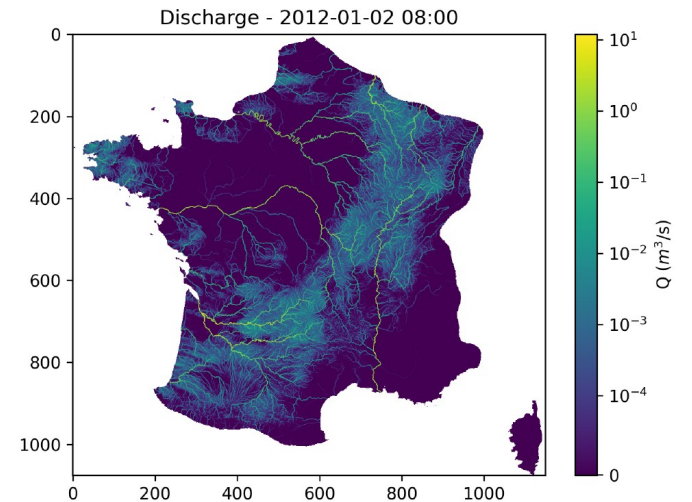


Figure 9. Study area: Ardeche. Distribution over 67 flood events of relative error (optimal value = 0) of four flood event signatures (Ebf - base flow, Eff - flood flow, Erc - runoff coefficient, Epf - peak flow) evaluated in pseudo-ungauged catchments during the validation period 2016-2018.

Test d'application de la méthode de régionalisation au modèle smash national en cours (dx=1km, dt=15mins), à des bassins mondiaux



Perspectives : amélioration de la sélection de descripteurs et de structures de modèles flexibles par IA ; ajout d'information via des observations multi-sources ; couplage à l'hydraulique...

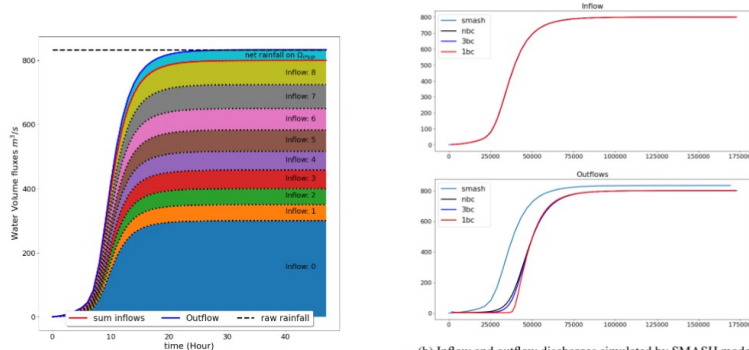
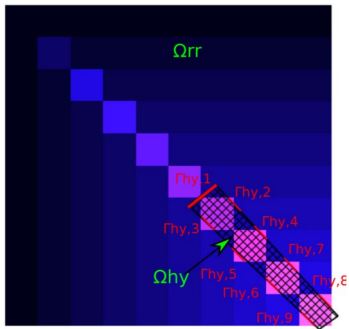


➤ Chaîne d'assimilation hydrologique-hydraulique SMASH-DassFlow; meilleur-coupleur automatique, remontée d'information (Villenave L., Garambois and Monnier)

(Villenave et al. Final redaction)

- Couplage (interfaces Γ) entre modèle hydrologique distribué (bassin Ω_{rr}) et modèle hydraulique 2D (réseau hydrau-floodplains Ω_{hy}) différentiables : SMASH-DassFlow, codes Fortran wrappés en Python, open source.
- Maillor et coupleur (flux latéraux BC/termes source – hydrogrammes d'apport, pluie nette, pluie) automatique (Pyhton)
- Algorithme d'assimilation de donnée variationnelle sur la chaîne, à partir d'observaiton multi-sources

Validation du couplage latéral (masse, dynamique), effet du routage hydrau



(a) Flux identifiability in SMASH model (b) Inflow and outflow discharges simulated by SMASH model and DassFlow model, considering various geometries

Modélisation hydro-au 'automatique' de l'Aude avec zoom 2D sur carcassonne

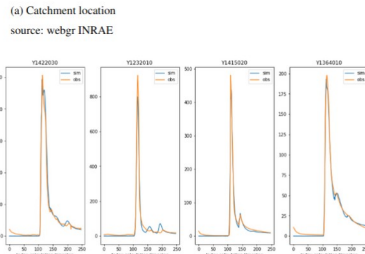


Figure 10: Hydrogrammes obtenus en calage multi-Jauge par le modèle SMASH sur l'évènement du 10 au 20 octobre 2018.

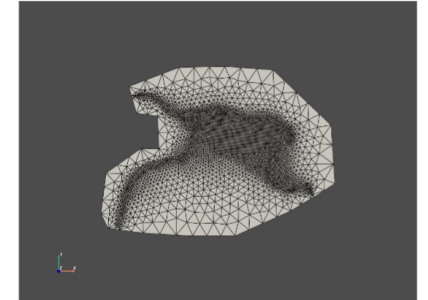
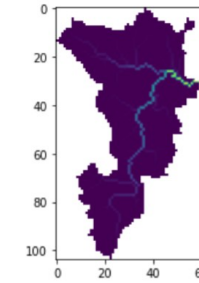


Figure 5. Representation of the study domains with relatively unrefined meshes for first tests (Left: Smash, Right: DassFlow)

Remontée d'information – calage hydrologique distribué à partir d'obs hydraulique

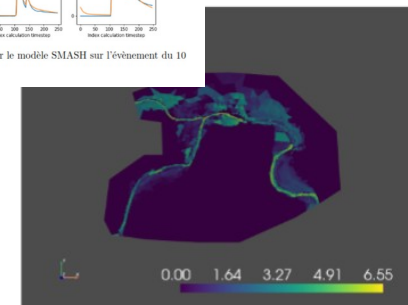
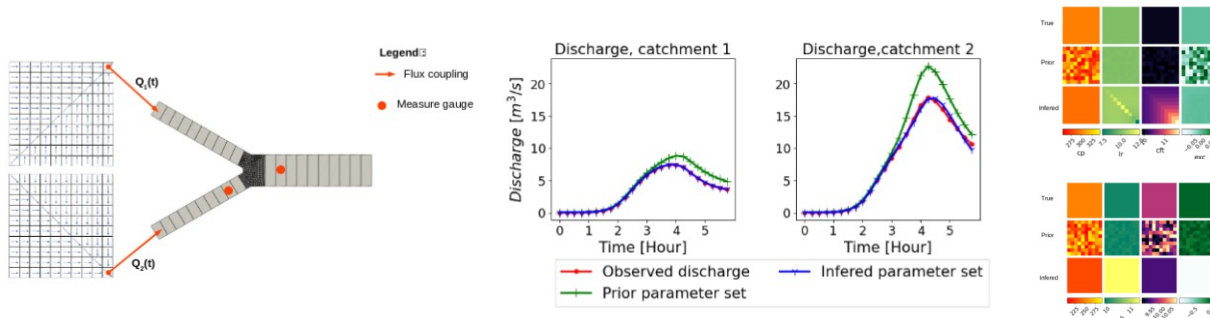


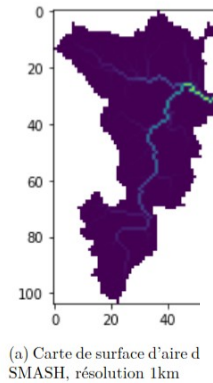
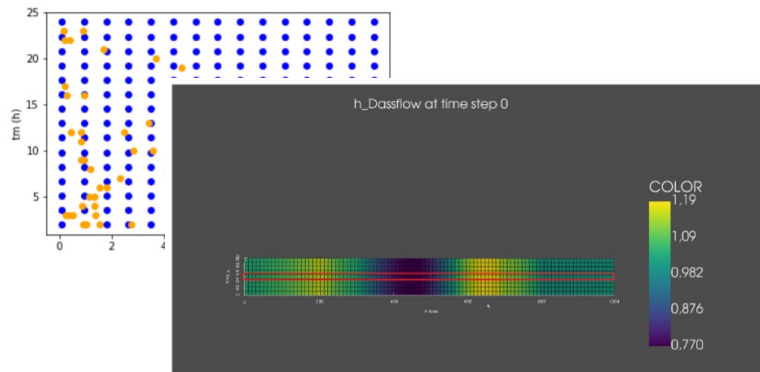
Figure 11: Etendue d'inondation maximale, Evènement du 14 au 16 octobre 2018. (A droite) simulations DassFlow, (A gauche) observations utilisées dans Hocini et al., [2021]

➤ Réduction-apprentissage de modèle hydraulique 2D

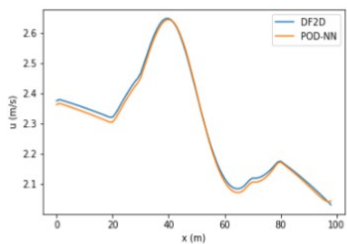
(Allabou M. PhD at IMT, superv. Monnier, Bouclier, Garambois)

Travaux en cours d'application de la méthode POD-NN (Hestaven et al. 2018 JCP) à la modélisation hydraulique 2D (apprentissage à partir de DassFlow 2D) : "prévision online" (très rapide) à partir d'un apprentissage offline

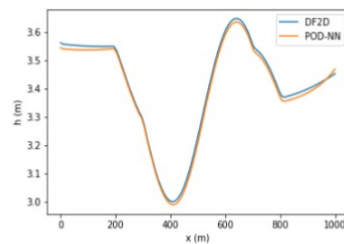
Canal synthétique
INSA Tlse student project (Oziol, Cueille et al.)



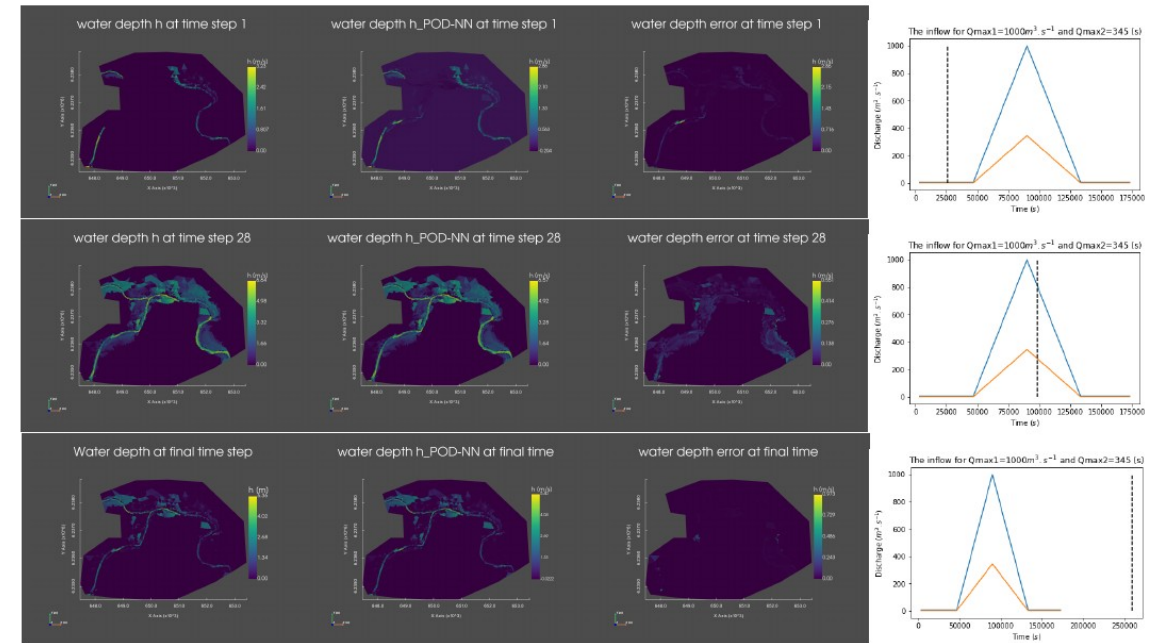
Cas de l'Aude à Carcassonne, DassFlow 2D forcé par SMASH



(a) u



(b) h



(Allabou et al, in prep.)



INRAE

Réunion plénière 1 – projet ANR MUFFINS (MULTiscale Flood Forecasting with INnovating Solutions)

2022-10-17 MUFFINS

➤ Amélioration de la précision des modèles par intégration de données multi-sources: Assimilation de vidéos d'écoulement en hydraulique 2D (Postdoc Pujol L., superv. Cassan, Roux, Garambois)

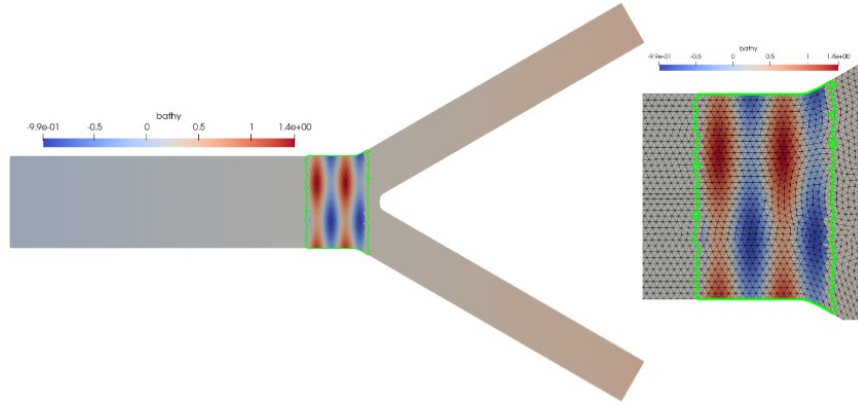
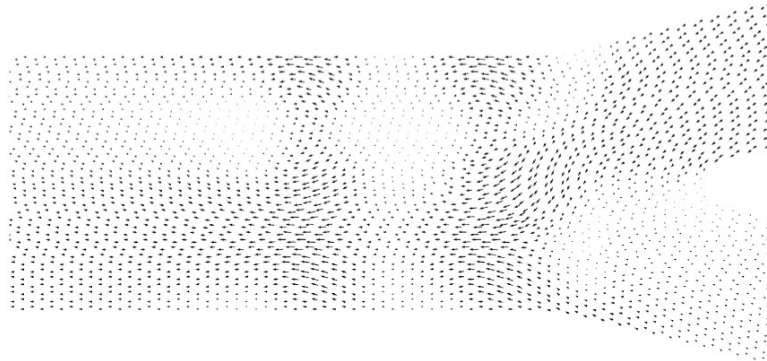


Figure 2: Target bathymetry for the confluence case with observed area Ω_{obs} outlined in green



Inférences de paramètres hydrauliques (bathymétrie, débit amont) par assimilation de champs de vitesses de surface issus de vidéos d'écoulements (Pujol et al. In prep)

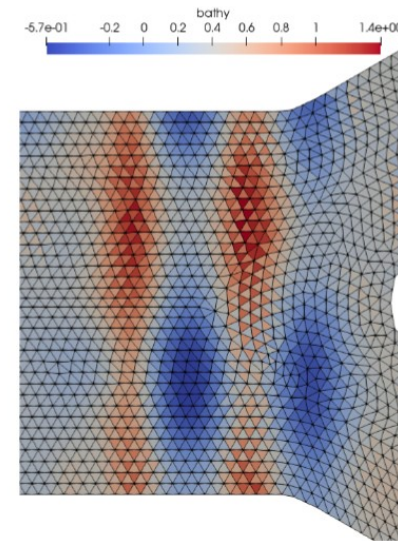


Figure 4: Inferred bathymetry for case B1, with control vector $c = (b(x, y), \forall(x, y) \in \Omega_{obs})$.

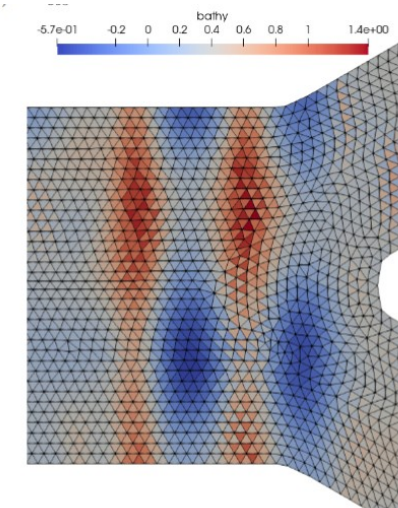
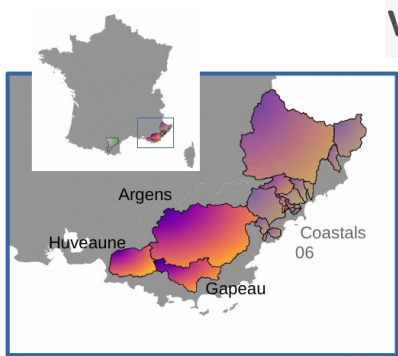


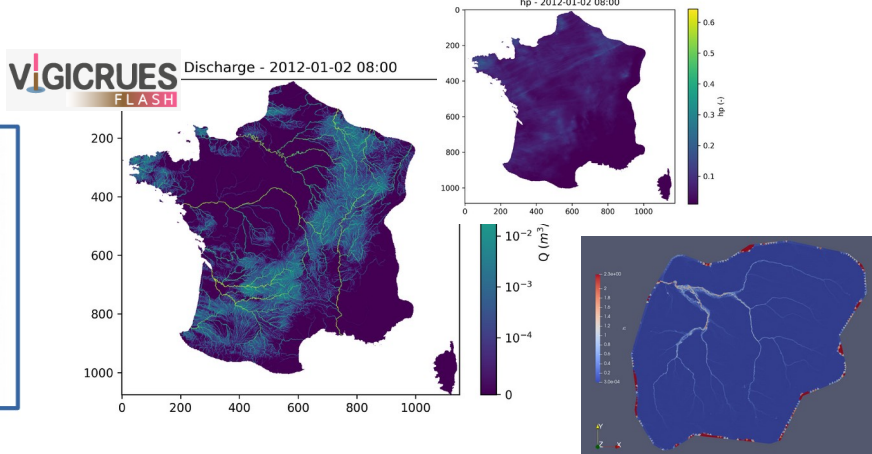
Figure 5: Inferred bathymetry for case QB1, with control vector $c = (Q_1, Q_2, b(x, y), \forall(x, y) \in \Omega_{obs})$.

➤ Perspectives de travail

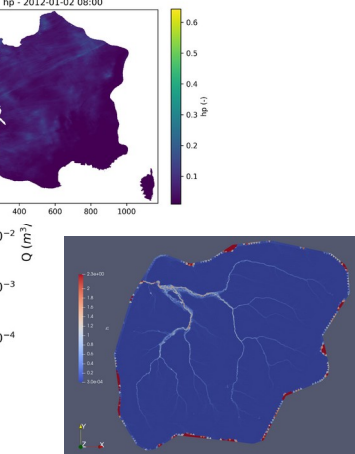
- Mise au point de chaînes de modélisation hydrologie-hydraulique multi-échelle & approches de calage/régionalisation/assimilation, analyse de sensibilité, quantification d'incertitudes (collab. INRAE - IMT - IMFT)
 - Développement de modèles couplés, d'approches hybrides (solveurs, méta-modèles, assimilation) (plusieurs thèses en cours).
 - Bibliothèques Python/Fortran SMASH, DassFlow. Algorithmes de pré et post traitement
- Exploitations d'observations multi-sources, notamment de crues inondations (capteurs hydro, cartes sat « HR ». humidité, occupation sol), tests (incl. V surface via vidéos, coupures de routes, ...)
- Plusieurs applications complexes réalisées et en cours en métropole et ailleurs, à partir de données multi-sources,
 - Appli national de SMASH sous tend VigicruesFlash (SMASH), Dassflow pour les applications du CNES, SMASH-DassFlow à venir (Adour, Maroni, ...)
 - Perspective : problèmes inverses soulevés par applis HR en urbain, avec les nouvelles données (Lidar HD, SWOT, ...)



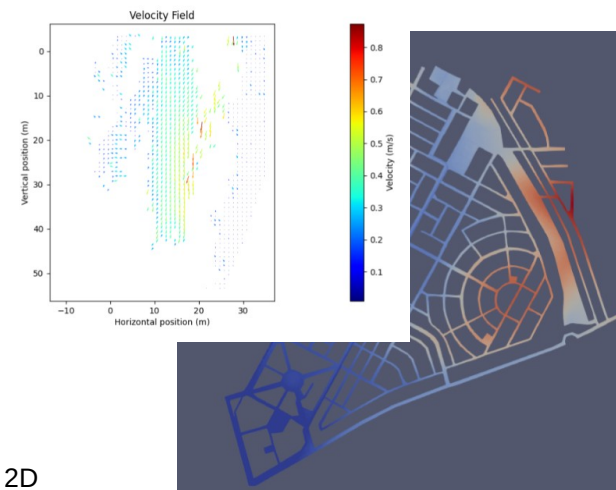
Mise en place de démonstrateurs haute résolution météo-hydro-audommages sur des bassins méditerranéens (projet MUFFINS)



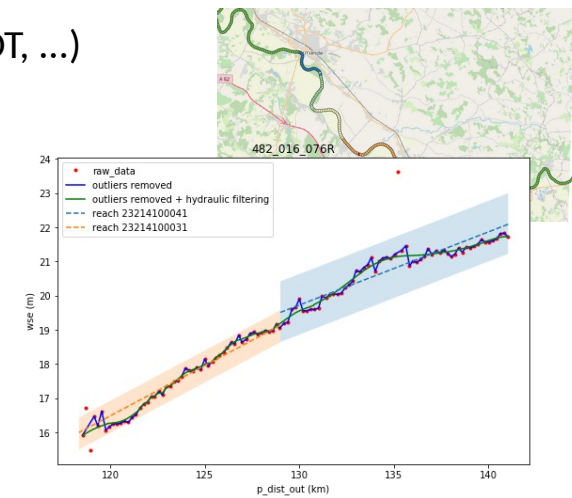
Discharge and moisture simulated with SMASH (Colleoni et al. 2022)



High resolution runoff simulation: 2D shallow water model with rain and infiltration, Real Collobrier catchment (Pujol et al.)



Assimilation of flow videos ; improved urban flood modeling (Pujol et al.)



SWOT data over the Garonne River, relatively good accuracy, ongoing test of spatio-temporal inference of p . 23 friction-bathymetry-inflows