

Jumeaux numériques hydrologiques : fusion physique–IA, données multi-sources et prédictions multi-échelles

Atelier « Digital Twin of the Earth »
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, Paris
Le 29 juin 2026

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

➤ Plan

- 1 Contexte et enjeux en hydrologie
- 2 Avancées en modélisation physique-IA et applications nationales
- 3 Jumeau numérique Hydr'Avatar (projet ESA)
- 4 Bilan global et perspectives

- **Digital Model** : pas d'échange automatique.
- **Digital Shadow** : flux automatique du physique vers le numérique.
- **Digital Twin** : flux automatique dans les deux sens.

Digital twin en hydrologie ?

- assimilation de données en continu ;
- estimation/prévision de l'état futur ;
- quantification des incertitudes ;
- boucle d'aide à la décision ou de contrôle.

Jumeaux numériques – Fondations

Glaessgen, E. H., & Stargel, D. S. (2012). *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles*. AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>

Grieves, M., & Vickers, J. (2016). *Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems*. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

van der Horn, E., & Mahadevan, S. (2021). *Digital twin: Generalization, characterization and implementation*. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>

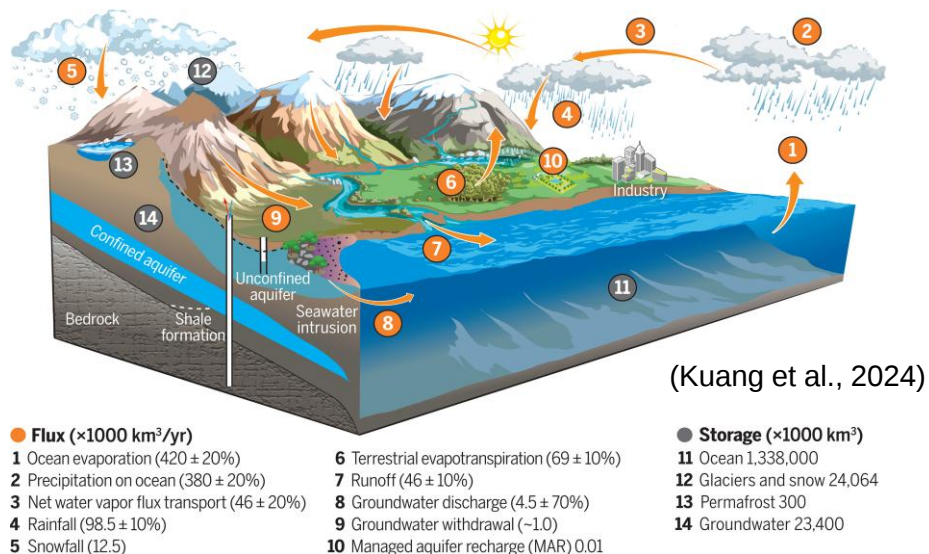
Applications en hydrologie

Rigon, R., et al. (2022). *Participatory Digital Earth Twin Hydrology systems (DARTHS) for Everyone*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 4773–4800. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4773-2022>

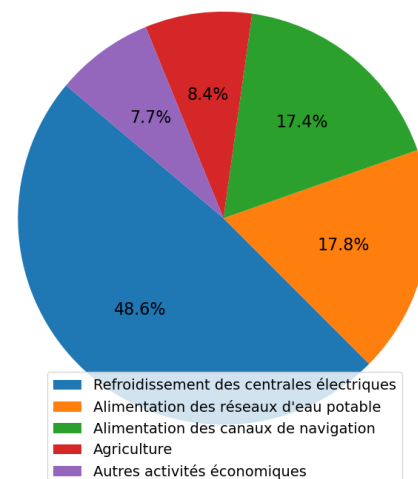
Brocca, L., et al. (2024). *A Digital Twin of the terrestrial water cycle*. *Frontiers in Science*, 1, 1190191. <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1190191>

➤ Hydrologie – enjeux socio-économiques majeurs

Cycle de l'eau : processus couplés, 1,4 Gkm³ d'eau : 97 % salée, 2,5 % glaces, 0,5 % douce



Usages de l'eau en France (2021) : 30 Gm³ (82 % surface, 18 % souterrain) (OFB/gouv)



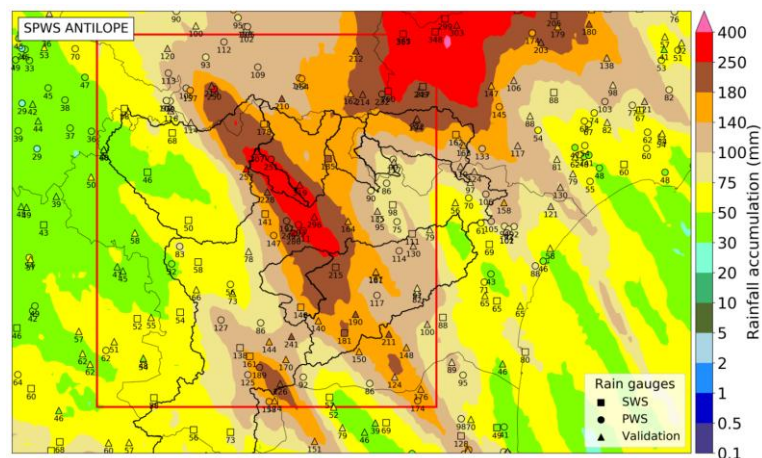
Aléas crues–inondations (géomorpho.), étiages



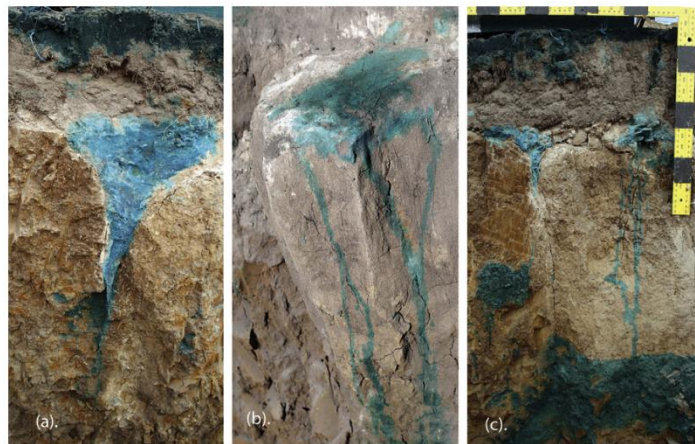
- **Hydrologie** : science du cycle de l'eau et de ses interactions (météorologie, hydraulique, pédologie, géologie, biologie et chimie).
- **Question centrale** : répartition spatio-temporelle des eaux de surface et souterraines, clé pour la gestion des ressources et des risques, pour l'aménagement en contexte de changement global.
- **Besoin de modélisations numériques fiables et haute résolution** des états et flux hydrologiques et hydrauliques, couvrant passé–présent–futur.

Introduction

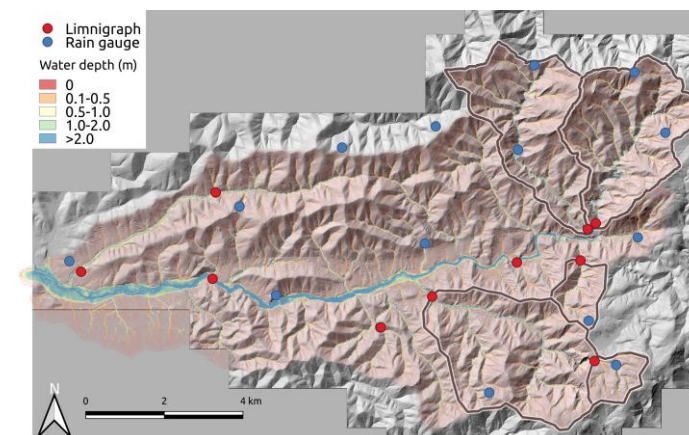
Variabilité et Complexité des processus hydrologiques et des milieux



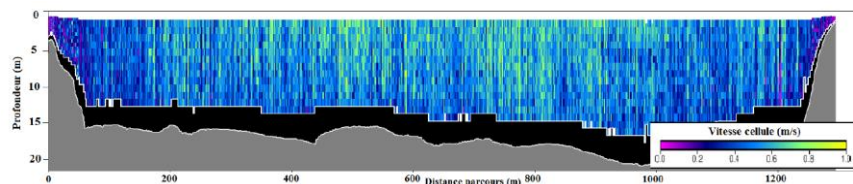
Cumul de pluie Antilope 48h
Aude 14-16 octobre 2018
(source : Caumont et al. 2021)



Chemins d'écoulement dans le sol
(source : Hardie et al. 2010)



Topographie et écoulements de surface
simulés, BV Réal Collobrier (Pujol et al. 2025)



Écoulement au droit d'une section de cours d'eau : profil de
vitesse ADCP, Rio Negro@Novo Airão 12/2015



(a) View of the channel, at the limnigraph location.
Posterior to HWM dataset.



(b) Still from news footage on the 2018 flood:
the Ministre street after the flood peak.
Approximate location of channel edges in red.

Écoulements complexes - inondations urbaines, Abidjan (Pujol et al. 2024)

➤ Hydrologie – systèmes dynamiques complexes

Processus hydrologiques

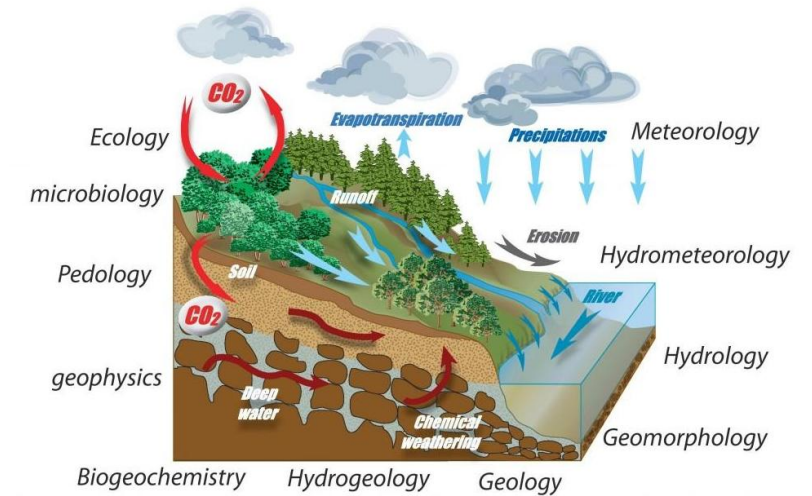
- Multi-physiques, non-linéaires, couplés, multi-échelles
- Forte variabilité spatio-temporelle, milieux hétérogènes

Observabilité

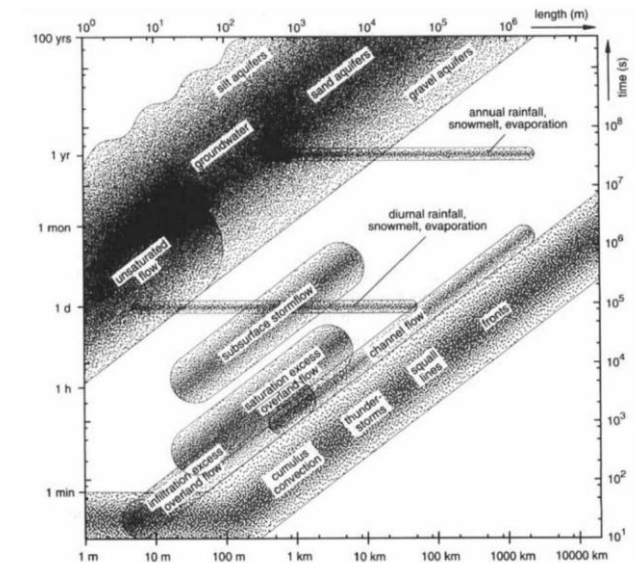
- Limite : nombreux cours d'eau non jaugés, processus souterrains,
- Opportunité : données multi-sources (in situ, drones, satellites),

Modélisation incertaine

- Problèmes d'échelle ; absence de premier principe directement exploitable en hydrologie (Dooge, 1986) → avenue pour assimilation de données & IA
- Débit in situ clé ; simule-t-on un "bon débit pour de bonnes raisons ?"
- Intérêt d'observations internes aux bassins (humidité, niveaux d'eau, vitesses de surface, végétation/surface, etc) (in situ + drones + satellites)
- Problème d'estimation de paramètres/modèles à partir de données hétérogènes, sparsité

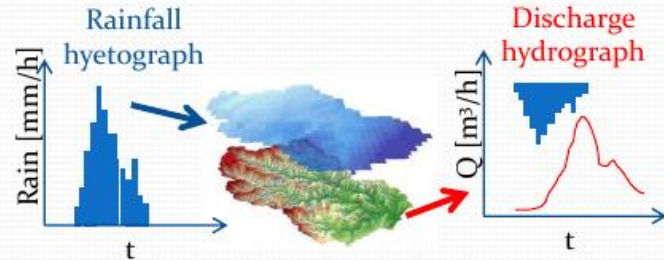


La zone critique, siège des processus de surface et interactions air-eau-sol-roches-vivant (source : CRITEX)



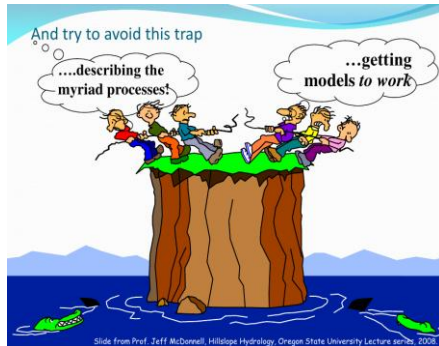
Processus hydrologiques et échelles spatio-temporelles caractéristiques (Blosch & Sivapalan 1995)

➤ Approches de modélisation hydrologiques – Empirisme, dépendance d'échelle



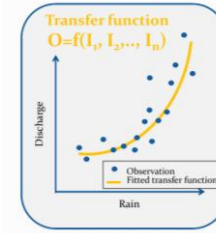
(source : Roux)

$\mathcal{M} ?$



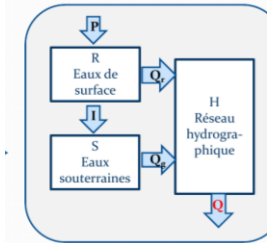
Boite noire

Aucune identification ni compréhension du processus,
Ajustement d'une fonction de transfert
Extrapolabilité hors plage d'apprentissage ? explicabilité ?



Conceptuel

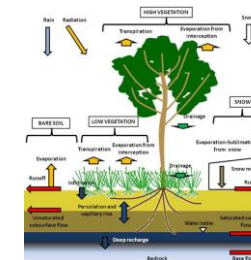
Représentation système en compartiments ; flux d'échange
Bilan de masse – EDO, paramètres d'ajustement
Besoin de calage, interprétabilité physique limitée



$$\frac{dV_s(t)}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t)$$

Base physique

Lois de conservation (masse, moment, energie)
Lois empiriques (évaporation, perméabilité, friction, etc)
Problèmes d'échelle,
« Moins » de calage, besoin de données accru, performance ?



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + \int_A p dA \right) = (S_0 - S_f)g + I \end{array} \right.$$

Équation de Saint Venant pour les écoulements en rivière

(In Fatichi 2012)

- Comment les **représentations non linéaires multi-échelles apprises par les réseaux de neurones profonds** (LeCun et al., 2015) peuvent-elles améliorer les modèles physiques, et quelles hybridations permettent de concilier données et lois physiques ?
- Peut-on **apprendre des lois hydrologiques/hydrauliques indépendantes de l'échelle** à partir des données (Universal Differential Equations, Rackauckas et al., 2019 ; Huynh et al., 2026) ?

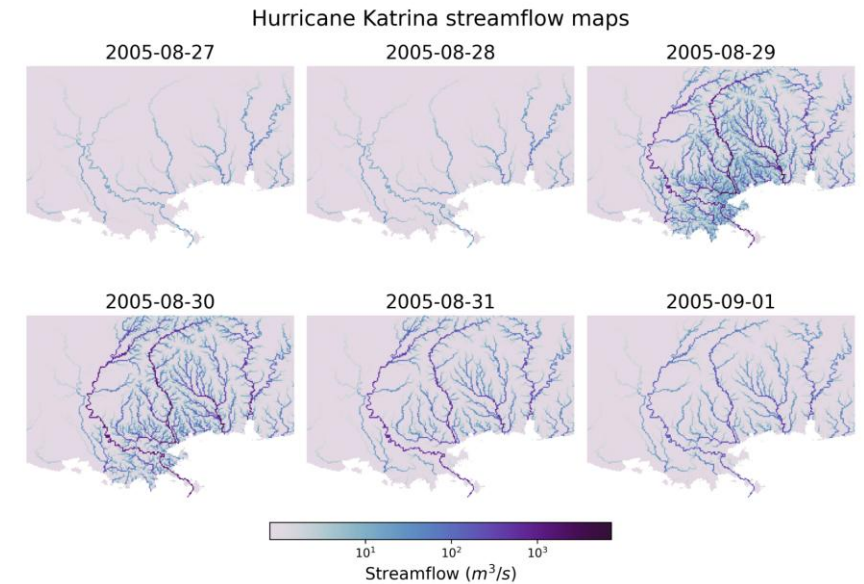
➤ Disponibilité de données massives à grande échelle : Possibilités de modélisation hydrologique-hydrodynamique (H&H)

- **Atmosphérique/débit** : réanalyses (SAFRAN, ERA5), pluie radar/satellite (ANTILOPE, COMEPHORE, IMERG, MSWEP), hydrométrie (Vigicrues, GRDC)
- **Géométrie & environnement** : MNT (IGN, LiDAR HD, SRTM/CO3D), sols, géologie, occupation du sol, variables biophysiques (LAI, T°)
- **Observations des écoulements** : débits, niveaux, altimétrie et imagerie satellitaire des rivières

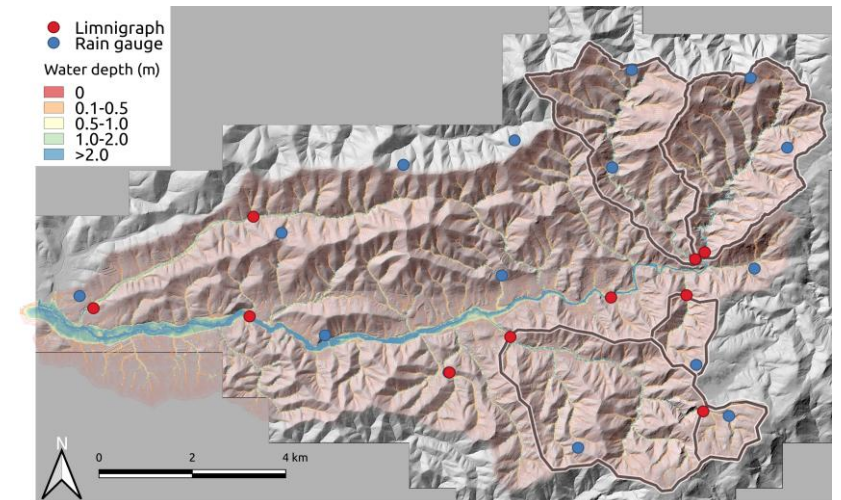
Possibilité : Modélisation H&H multi-échelle de grands domaines, apprentissage de paramètres/lois selon observations d'écoulement disponibles pour calage, ressources calcul

Défis :

- Extrapolation spatiale -- cours d'eau sous/non jaugés, bathymétrie lit mineur incertaine (pas de base nationale) --, temporelle en contexte d'instationarités
- Haute résolution en milieu urbain (ouvrages, complexité 3D),
- Problèmes de calage grande dimension, sparsité, non unicité locale/spatiale (équifinalité)



Évolution des débits simulés pendant l'ouragan Katrina (27 août–1er sept. 2005) avec SMASH (Colleoni et al., 2025 GMD). et régionalisation descripteurs paramètres apprise (Huynh et al. 2024 WRR)



Hydrodynamique haute résolution : Modélisation hydraulique 2D avec pluie infiltration, Real Collobrier, estimation variationnelle de paramètres spatialisés (Pujol et al. 2025 AWR), maillage Cartino 2D (Pons et al. 2026, preprint)

Objectifs

- **Répondre aux besoins sociétaux** de prévision des débits des rivières et des inondations
- **Améliorer la compréhension physique et la représentation** des écoulements de surface (bassin versant, réseau hydrographique, plaines d'inondation), avec **intégration d'information** à partir de données multi-sources hétérogènes

Approche de **modélisation effective**, de complexité adaptée à la physique du système, aux quantités et échelles physiques observables et aux incertitudes en jeu – volonté de **mise en cohérence modèles-données**

- Enrichissement des modèles H&H, analyse de sensibilité, résolution de problèmes inverses pour exploiter les données
- Compréhension fine des signaux physiques, de leur observabilité et de leur modélisation directe-inverse

Co-développement d'outils open source de modélisation-assimilation H&H hybrides physique-IA

Librairies Python-Fortran, noyau différentiable, calcul direct-adjoint // CPU, avec algorithmes d'assimilation de données variationnels, méthodes hybrides (modèles physiques avec IA) :

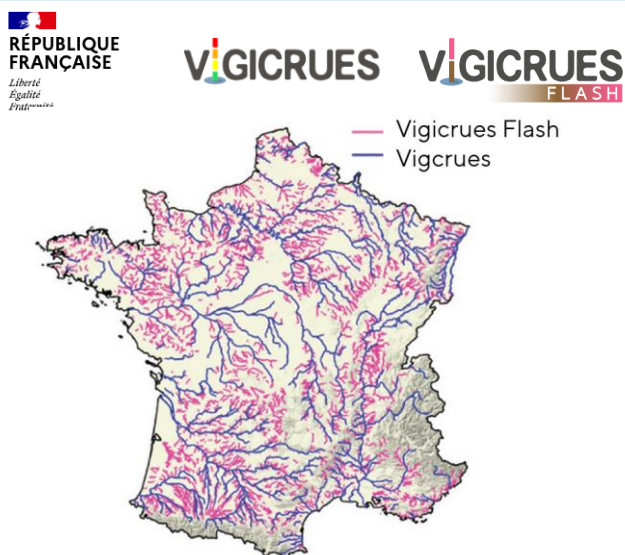
- **SMASH** (INRAE, Hydris, IMFT) : Hydrologie distribuée (*Prix Logiciel libre de recherche 2025, MESR*)
(doc : <https://smash.recover.inrae.fr/>, code : <https://github.com/DassHydro/smash>)
- **DassFlow** (INSA-IMT, INRAE, Hydromatters), Hydraulique 1D, 2D, multi-D (<https://dasshydro.github.io/>)

Nouvelle plateforme hydrologie – hydraulique, physique-IA , direct-inverse // GPU, assimilation en Python/Jax (Colleoni et al. In redaction)
(INRAE – Hydro Matters)

> Vigilance crues nationale

Partenariat de recherche long terme INRAE–Service Central Vigicrues (depuis 2003) pour améliorer la connaissance des débits, la prévision des crues et les outils d’alerte, avec quantification des incertitudes et transfert opérationnel (Perrin et al., 2022).

Contributions des unités de recherche INRAE Hycar, Recover, Riverly



- **Vigicrues** : surveillance de ~23 000 km de cours d’eau, réseau de ~3 000 stations hydrométriques (dont ~2 000 en temps réel), prévisions sur ~600 stations et vigilance crues expertisée par les Services de Prévision des Crues (SPC).
- **Vigicrues Flash** : avertissement automatique des crues soudaines sur >30 000 km de cours d’eau (~10 000 communes), complémentaire à Vigicrues pour les petits bassins à réaction rapide.

INRAE

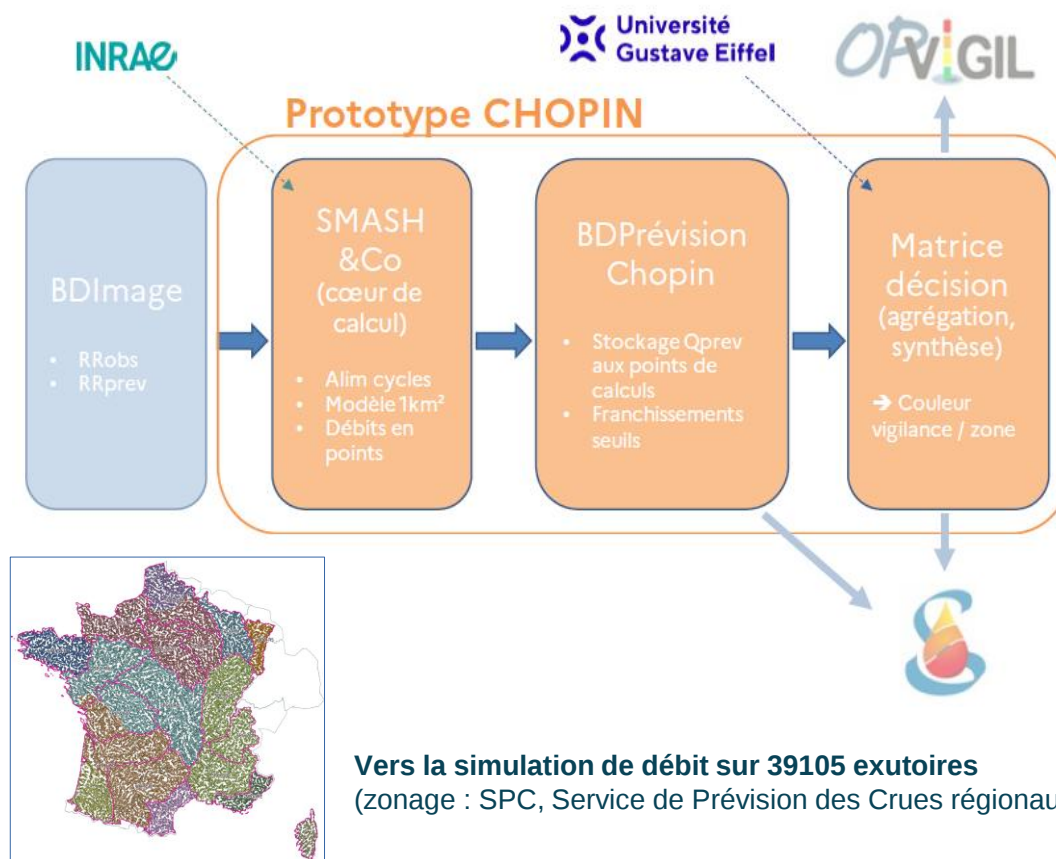
Jumeaux numériques Hydrologiques. P.-A. Garambois

29 juin 2026, « Digital Twin of the Earth », MESRE



Vigilance 2030 : Chaîne Hydrologique Opérationnelle pour la Prévision des Inondations au niveau National

Objectif : Couverture totale du territoire, améliorer lisibilité du service et alertes



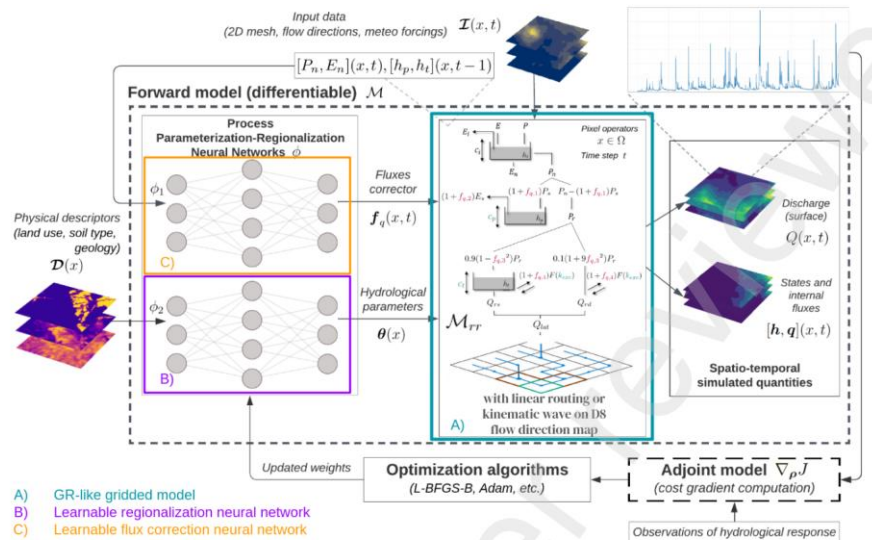
Vers la simulation de débit sur 39105 exutoires
(zonage : SPC, Service de Prévision des Crues régionaux)

➤ Solveurs hybrides physique–IA, équations différentielles universelles (UDE)

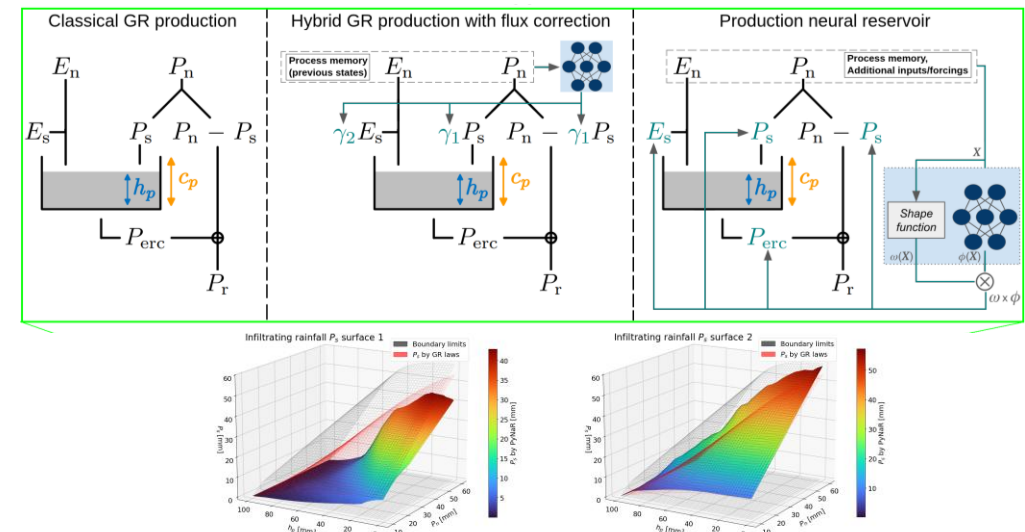
(Thèse Truyen Huynh 2025, INRAE-IMFT) (projet ANR MUFFINS, 2022-2026)

<https://smash.recover.inrae.fr/>

- **Question** : Comment intégrer des réseaux de neurones dans les modèles hydrologiques pour améliorer performances et versatilité tout en préservant régionalisabilité, robustesse et interprétabilité ?
- **Méthodologie** : Approches hybrides physique–IA, programmation différentiable et évaluation sur larges ensembles de bassins.
- **Résultat principal (rupture)** : Nouveau paradigme de modèles hybrides de complexité croissante, régionalisables et apprenables, respectant les lois physiques et capables d'inférer des comportements/fermetures à partir des données, généralisables à d'autres systèmes physiques.



Principe de la modélisation hydrologique distribuée hybride et de l'algorithme d'assimilation de données (Huynh et al. 2024, 2025a,b)



Principe de la modélisation hydrologique hybride physique–IA : **correction des flux internes et apprentissage de lois de fermeture par équations différentielles universelles** (ex. infiltration) (Huynh et al., 2025a,b; 2026).

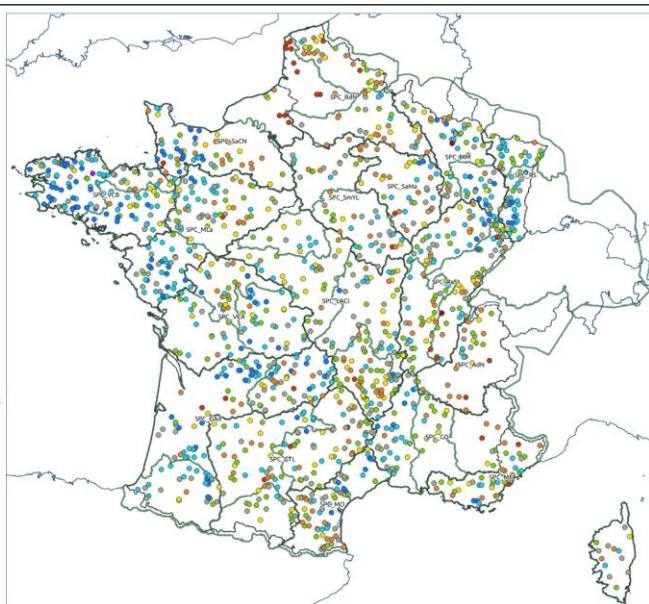
Vers des jumeaux numériques nationaux (Travaux pour Vigicrues, DGPR) (projet ANR MUFFINS, 2022-2026)

- **Objectif** : Construire des jumeaux numériques robustes pour simuler les crues et le ruissellement-inondation à l'échelle nationale
- **Méthodologie** : (1) Calage régionalisé descriptor-based de SMASH sur >1000 bassins à partir des débits (INRAE-Hydris) ; (2) Cartino2D forcé par SHYREG 100 ans avec paramètres a priori (scs, friction) pour simulation 2D Saint-Venant automatisée (CEREMA).
- **Résultat principal** : Faisabilité de chaînes nationales automatisées démontrée, hydrologie régionalisée ; mise en évidence du rôle critique des conditions initiales (humidité) pour C2D et de la qualité des pluies et débits in situ

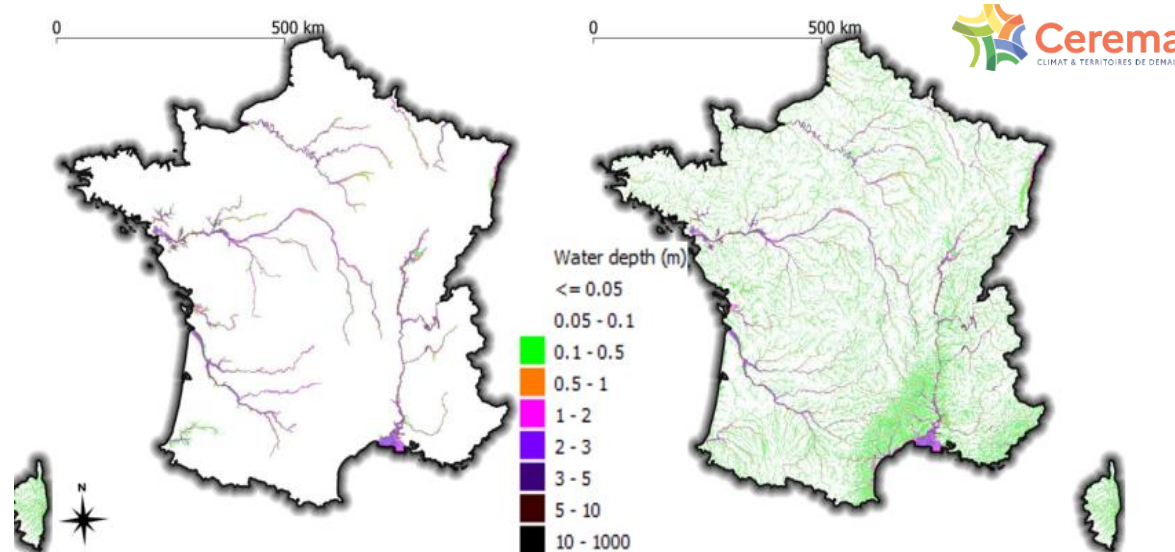
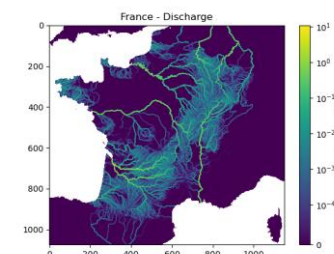
Calages 2025 : NSE du calage régional multi-linéaire à 15 minutes sur 10 ans pour 39 zones

Index	SPC	Zone	Nb gauges	Nb activécels	Comments
1	GD	GD3	13	4452	
2	GD	GD3	37	6933	
3	GD-ME	GD1-ME1	23	5108	
4	ME	ME2	24	4258	
5	MO	MO1	46	6930	
6	MO	MO2	19	3230	
7	CO	CO	13	1784	
8	LACI	LACI1	66	6352	
9	LACI	LACI2	44	10610	
10	LACI	LACI3	30	9237	
11	LACI	LACI4	10	3337	
12	GAD	GAD1	32	8464	
13	GAD	GAD2	51	6539	
14	GAD	GAD3	49	11157	
15	GTL	GTL1	18	4554	
16	GTL	GTL2	56	11223	
17	GTL	GTL3	40	12465	
18	AN	AN12	29	3676	
19	MLA	MLA1	60	12527	
20	MLA	MLA2	45	7507	
21	RAS	RAS1	48	6217	
22	RAS	RAS2	40	7523	
23	RAS	RAS3	32	4892	hors FR

NSE 15min
 -1 - 0.0
 0.0 - 0.5
 0.5 - 0.7
 0.7 - 0.75
 0.75 - 0.8
 0.8 - 0.85
 0.85 - 0.9
 0.9 - 0.95
 0.95 - 0.98



Régionalisation nationale de SMASH @dx=1km, dt=15min (Akhtari, Demargne, Javelle et al.)



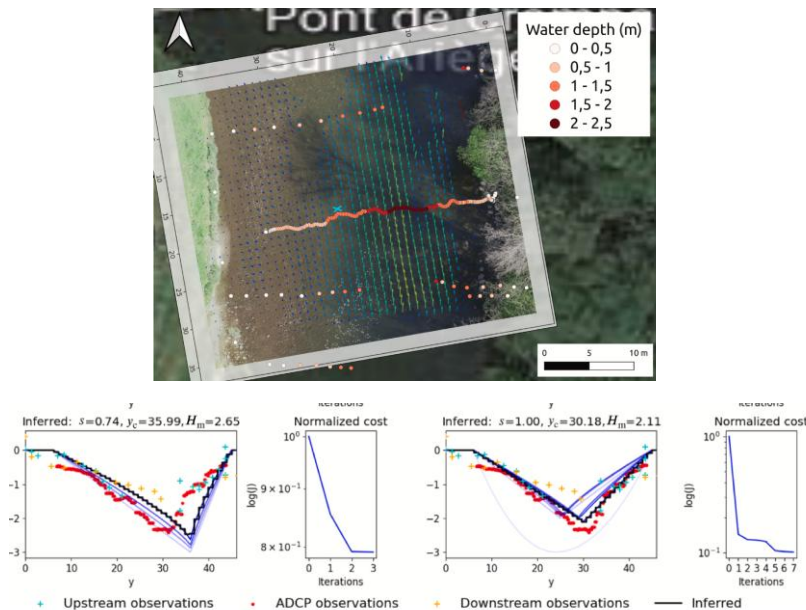
Carte socle nationale des inondations – Cartino2D-Telemac2D @dx=25m forcé par Shyreg 100ans (Pons et al. 2025)

Akhtari A., Demargne J., Javelle P., Huynh N. N. T., Colleoni F., Jay-Allemand M., Renard B., Garambois P.-A. (final redaction). Regionalization of a 1-km and 15-min distributed hydrological model for flood forecasting over France.

Pons F., Hocini N., Garambois P.-A. (2026). Cartino2D: Scalable and Automated 2D Shallow Water Rainfall-Flood Inundation Modeling up to Very High Resolution for Large Domains. *EGUsphere*, 1–41. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3333>

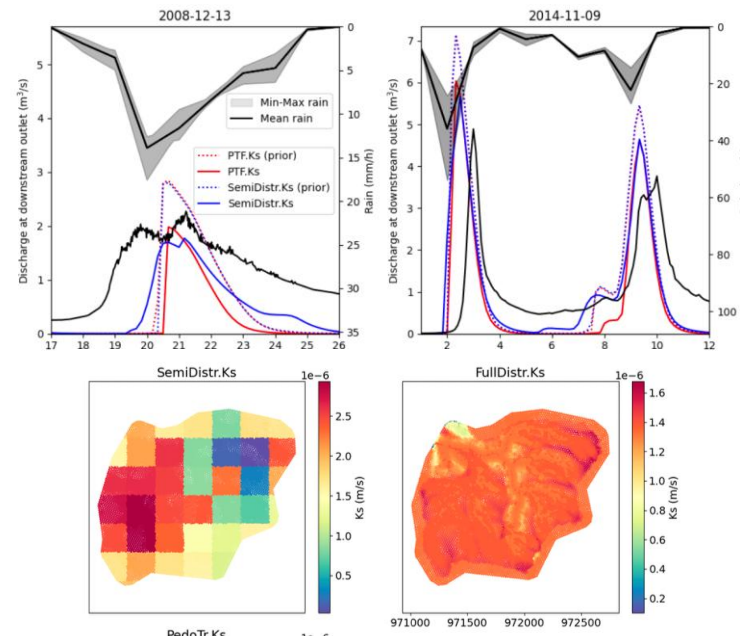
➤ Assimilation variationnelle de données multi-sources en modélisation hydrologique-hydraulique (Post doc Léo Pujol, IMFT-INRAE-HSM)

- **Objectif** : Améliorer l'estimation des paramètres d'un modèle hydraulique 2D Saint-Venant d'inondation à partir de données multi-sources
- **Méthodologie** : Assimilation de données variationnelle (hauteurs, débits, vitesses, plus hautes eaux), DassFlow 2D, analyse de sensibilité avec gradients (DGSM),
- **Résultats principaux** : cartographie des zones informatives, meilleure estimation des paramètres et amélioration du modèle hydraulique.



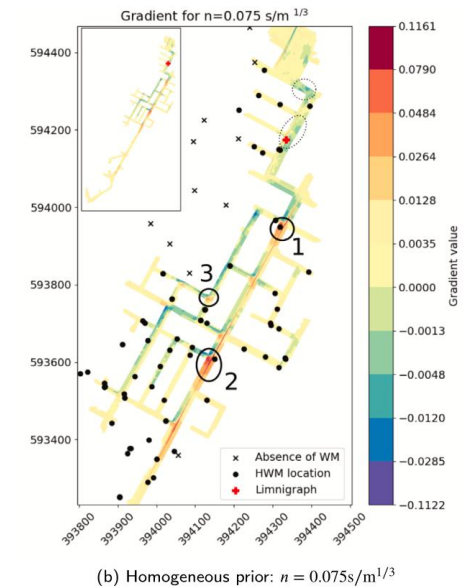
Assimilation de vitesse de surface et inférence de débit et/ou bathymétrie (Pujol et al. 2025a, après Honnorat, Monnier et al. 2009)

Pujol L., Cassan L., Garambois P.-A., Roux H. (2025) River bathymetry and discharge estimation using video surface velocity data assimilation in the 2D differentiable shallow water model DassFlow. *Environmental Modelling & Software* <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106589>



Assimilation de débit pour estimation de paramètres d'infiltration spatialisés d'un modèle Saint-Venant 2D – Green Ampt, Réal Collobrier

Pujol L., Chen S., Garambois P.-A. (2025) Gradient-based estimation of spatially distributed parameters of a 2D shallow water rainfall-runoff model. *Advances in Water Resources* <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2025.104978>



Maps of observation cost function sensitivity to friction parameter $\partial J(n)/\partial n$ for urban flood model, Abidjan, before assimilation of high water marks

Pujol L., Garambois P.-A., Delenne C., Perrin J.-L. (2024) Adjoint-based sensitivity analysis and assimilation of multi-source data for the inference of spatio-temporal parameters in a 2D urban hydraulic model. *Journal of Hydrology* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131885>

➤ Jumeau numérique Hydr'Avatar (Projet ESA, 2026-2027)

Hydr'Avatar : un jumeau numérique hydrodynamique de bassins versants avec modélisations multi-fidélité et données satellitaires

Project Lead: A. Paris (Hydro Matter)

Science Lead: P.-A. Garambois (INRAE)

Hydr'Avatar exploite les données multi-satellites (dont SWOT) via assimilation de données et modélisation hydrologique-hydrodynamique couplée, physiquement cohérente à l'échelle des bassins, pour des estimations multi-échelles (sol-débit-réseau-inondation), permettant la remontée d'information, l'apprentissage à partir des données via composantes physique-IA, vise l'implication d'utilisateurs finaux

Recherche, cas d'usage appliqués et plateforme

<https://portal.hydravatar.org/>

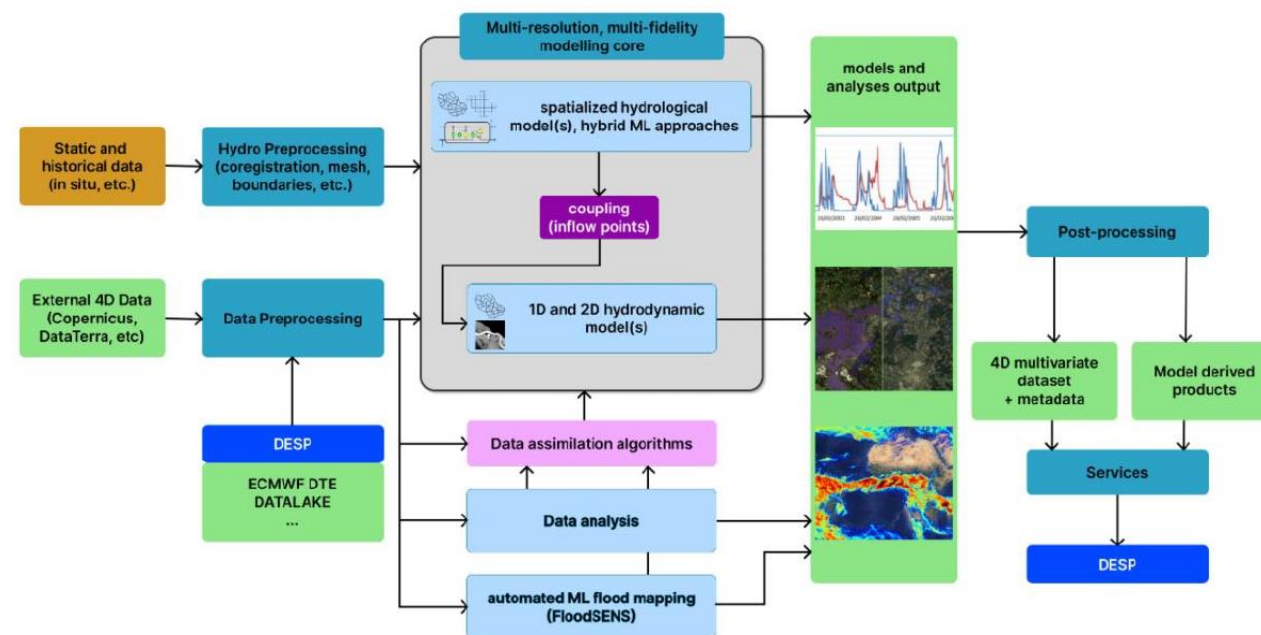


Figure 7: General architecture and workflow of Hydr'Avatar.

➤ Jumeau numérique Hydr'Avatar – avancées scientifiques (Projet ESA, 2026-2027) (contributions projets ANR MUFFINS, Tosca SWOT-)

Data processing and model construction

Water extent (Sentinel) and flow lines (SWOT, hydraulic denoising, Montazem et al. 2026) for building hydraulic model geometry (hypsoetry constrain) (Larnier et al. 2025)

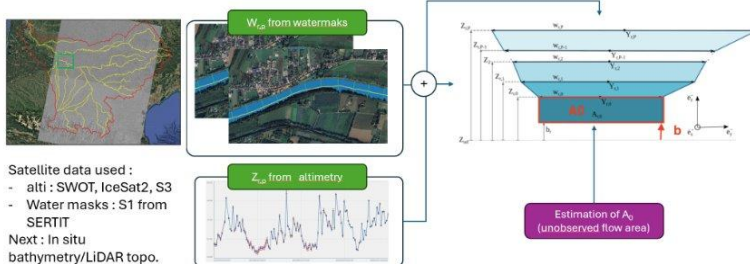
Model parameters calibration

Hydrology model parameters regional calibration by hydraulic backpropagation of WSE obs., Garonne basin, differentiable H&H chain SMASH-DassFlow 1D, 50k cells (Ettalbi et al. In prep)

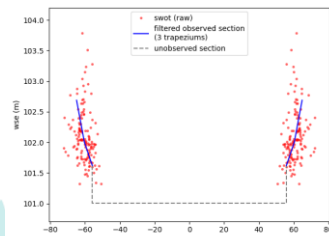
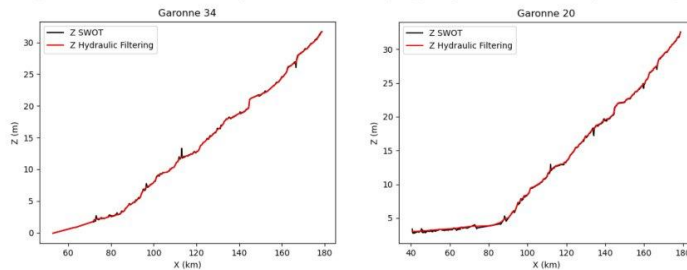
Model correction

Assimilation of (top) SWOT altimetry (bottom) SWOT-based discharge into the MGB model on the Maroni basin

1D Saint-Venant River network model geometry construction

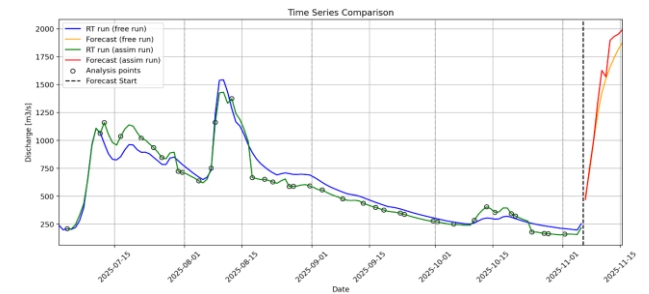
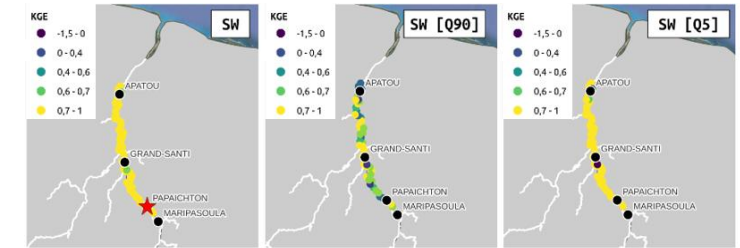
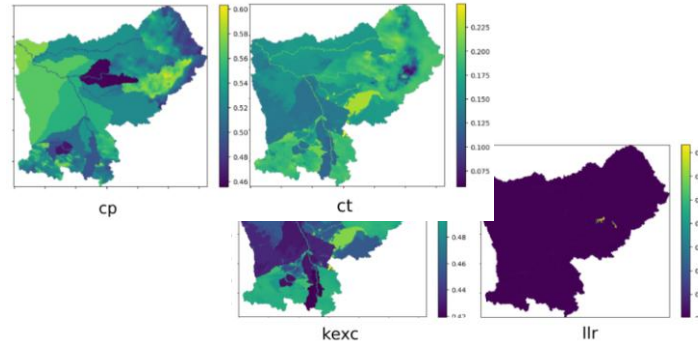


Hydraulic preserving filtering of SWOT data and analysis, wavelet-based algorithm (Larnier, Montazem, Ledauphin, Garambois in prep) flwg Montazem et al. (2019 GRL)



Logiques. P.-A. Garambois

29 juin 2026, « Digital Twin of the Earth », MESRE



Démonstration de l'apport des données altimétriques (nadir et SWOT), de l'imagerie satellitaires pour enrichir les modèles hydrologiques-hydrauliques en complément des données in situ



➤ Jumeau numérique Hydr'Avatar (Projet ESA, 2026-2027)

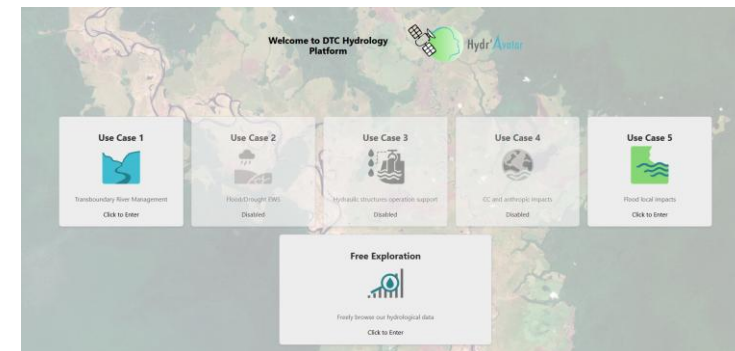
Plateforme Hydr'Avatar

Plateforme de modélisation hydrologie–hydraulique à l'échelle des bassins, conçue pour des applications multi-sites intégrant les spécificités physiques et les besoins des utilisateurs finaux.

Elle combine **pré- et post-traitements avancés**, **assimilation de données (DA)**, **intelligence artificielle (IA)** et **données d'observation de la Terre à haute résolution** pour améliorer la représentativité et la performance des modèles.

5 cas d'usage

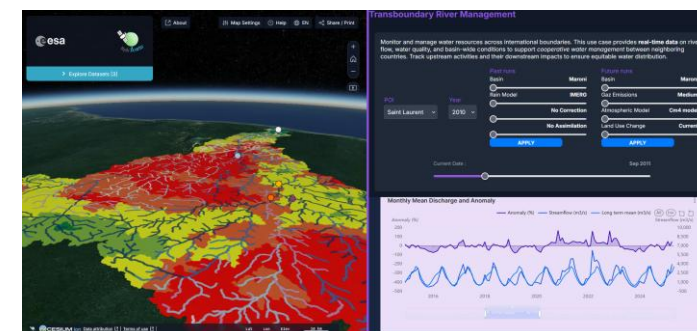
- Gestion de rivières transfrontalières
- Prévion des crues et inondations (« early warning »)
- Appui à la gestion d'ouvrages hydrauliques
- Analyse des impacts du changement climatique et de l'anthropisation
- Évaluation des impacts des crues et inondations



Vue de la page d'accueil de Hydr'Avatar



Rendu 3D d'une simulation d'inondation sur la Garonne marmandaise (UC5).



View of Hydr'Avatar platform under use case 1.

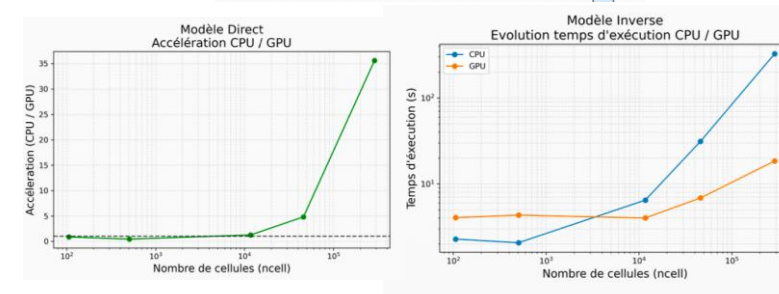
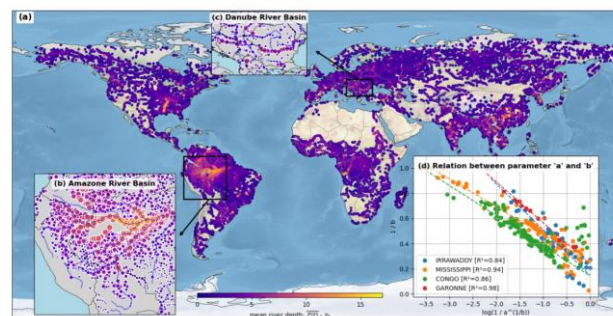
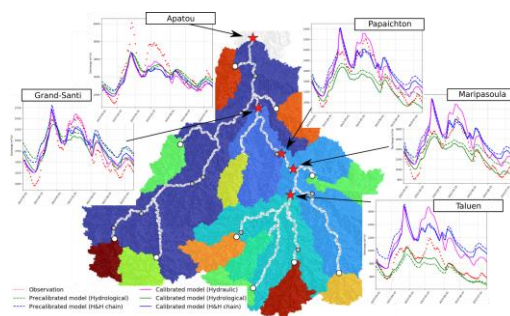
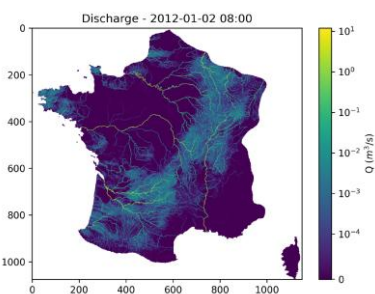
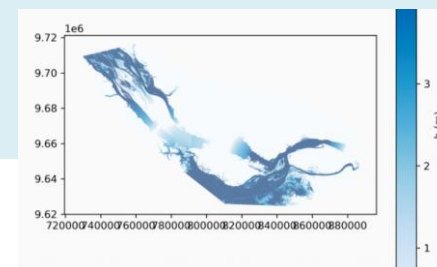
➤ Bilan global et perspectives

Bilan

- Avancées majeures : régionalisation descripteurs-paramètres, hydrologie–hydraulique GPU, physique-IA hybride
- Assimilation de données renforcée et production de modèles nationaux / globaux haute résolution
- Développement du jumeau numérique Hydr'Avatar, grands bassins versants (Europe, Afrique, Amérique du Sud), valorisant fortement les données satellitaires, lien utilisateurs
- Mise en opérationnel (SCV) d'un modèle hydrologique national (1 km, 15 min) (Vigicrues Flash, tests Caisse Centrale de Réassurance)
- Consolidation du logiciel SMASH (*logiciel libre de recherche primé 2025 - MESR*)

Perspectives

- Jumeaux numériques de bassins versants, régions-pays (ruissellement-inondation, ressource, lien végétation)
- Systèmes bidirectionnels avec intégration des usages et retours terrain
- Plateforme EOhydrolab (CNES–INRAE–HM) : workflows pour intégration massive de données satellites
- Couplage hydrologie–hydraulique–IA pour inférence conjointe des paramètres distribués
- Lois de fermeture apprenables (approches UDE) et hybridation physique–IA avancée
- Extension multi-sources : satellites, drones, vidéo, réseaux, enquêtes post-crue



➤ Annexes

Journal Publications

- Colleoni F., Huynh N. N. T., Garambois P.-A., Jay-Allemand M., Organde D., Renard B., de Fournas T., El Baz A., Demargne J., Javelle P. (2025). *SMASH v1.0: A differentiable and regionalizable high-resolution hydrological modeling and data assimilation framework*. **Geoscientific Model Development**.
- Garambois P.-A., Colleoni F., Huynh T., Akhtari A., Nguyen B., El Baz A., Jay-Allemand M., Javelle P. (2025). *Spatially distributed gradient-based calibration and parametric sensitivity of a spatialized hydrological model over 235 French catchments*. **Journal of Hydrology: Regional Studies**. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102485>
- Huynh N. N. T., Garambois P.-A., Colleoni F., Javelle P. (2023). Signatures-and-sensitivity-based multi-criteria variational calibration for distributed hydrological modeling applied to Mediterranean floods. **Journal of Hydrology**. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129992>
- Huynh N. N. T., Garambois P.-A., Renard B., Roux H., Demargne J., Javelle P. (2024). Learning regionalization within a differentiable high-resolution hydrological model using accurate spatial cost gradients. **Water Resources Research**. <https://doi.org/10.1029/2024WR037544>
- Huynh N. N. T., Garambois P.-A., Renard B., Colleoni F., Monnier J., Roux H. (2025). A distributed hybrid physics–AI framework for learning corrections of internal hydrological fluxes and enhancing high-resolution regionalized flood modeling. **Hydrology and Earth System Sciences**. <https://doi.org/10.5194/hess-29-3589-2025>
- Huynh N. N. T., Garambois P.-A., Colleoni F., Monnier J. (2026). A hybrid physics–AI approach using universal differential equations with state-dependent neural networks for learnable, regionalizable, spatially distributed hydrological modeling. **Geoscientific Model Development**. <https://doi.org/10.5194/gmd-19-1055-2026>
- Larnier K., Garambois P.-A., Emery C., Pujol L., Monnier J., Gal L., Paris A., Yesou H., Ledauphin, T., Calmant S. (2025) Estimating channel parameters and discharge at river network scale using hydrological-hydraulic models, SWOT and multi-satellite data. **Water Resources Research**. <http://dx.doi.org/10.1029/2024WR038455>
- Pujol L., Garambois P.-A., Delenne C., Perrin J.-L. (2024). Adjoint-based sensitivity analysis and assimilation of multi-source data for the inference of spatio-temporal parameters in a 2D urban hydraulic model. **Journal of Hydrology**. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131885>
- Pujol L., Cassan L., Garambois P.-A., Roux H. (2025). River bathymetry and discharge estimation using video surface velocity data assimilation in the 2D differentiable shallow water model DassFlow. **Environmental Modelling & Software**. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106589>
- Pujol L., Chen S., Garambois P.-A. (2025). Gradient-based estimation of spatially distributed parameters of a 2D shallow water rainfall-runoff model. **Advances in Water Resources**. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2025.104978>

➤ Preprints, articles soumis

- Berkaoui M. A., Colleoni F., Huynh N. N. T., Akhtari A., Larnier K., Garambois P.-A. (2026). *A Raster–Vector Framework for Multi-Scale Hydrological–Hydraulic Modeling Across Large Domains*. **EGUsphere (preprint)**. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2026-1557>
- Ettalbi M., Nguyen N. B., Huynh N. N. T., Garambois P.-A. (2026). *A learnable and differentiable spatialized hydrological model with tensor-based kinematic wave PDE solver*. **SSRN (preprint)**. <https://ssrn.com/abstract=5379188>
- Huynh N. N. T., Garambois P.-A., Ettalbi M., et al. (2026). *Physics-Constrained Neural Reservoirs: A Powerful Neural Replacement of Conceptual Hydrological Laws for Learning Spatially Distributed Flow Dynamics*. **ESS Open Archive (preprint)**. <https://doi.org/10.22541/essoar.177100580.07190684/v1>
- Pujol L., Garambois P.-A., Larnier K., Monnier J. (2026). *Basin-Scale Variational Hydrological–Hydraulic Model Calibration for River Discharge Estimation Using SWOT Altimetry*. **Authorea (preprint)**. <https://doi.org/10.22541/au.176901862.25424328/v1>
- Paris A., Garambois P.-A., Gal L., Cerbelaud A., Larnier K., David C., Oliveira R., Wongchuig S., Tourian M.J., Calmant S. *Global Scale River Discharge and Mean Depth from Radar Altimetry and Model* (revised for Nature Communications)
- N.B. Nguyen, P.-A. Garambois, B. Renard, K. Larnier, J. Le Coz, A. Cerbelaud, A. Paris, N.N.T. Huynh, L. Pujol, M. Ettalbi, S. Coss, H. Oubanas, M. Durand, C. Gleason, J. Monnier, S. Calmant. *Bayesian Stage–Fall–Discharge Laws and Effective River Depth from SWOT Altimetry and Slope* (tb submitted to Geophysical Research Letters)