



Chaire industrielle ANITI – PILearnWater

« Physics-Informed Learning Methods for Continental Waters and Marine Risks »

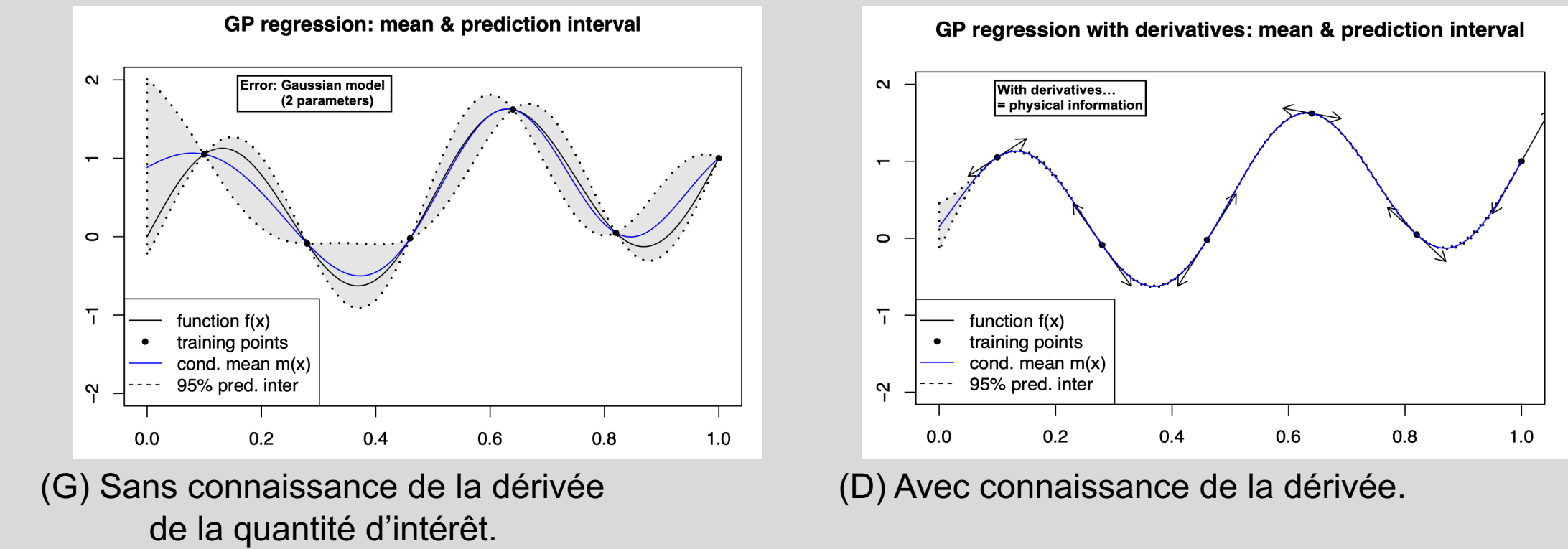
PIs : J. Monnier & O. Roustant (INSA – Institut de Mathématiques de Toulouse)
Co-chairs : R. Baraille (SHOM), R. Bouclier (INSA – IMT, IUF) , P.-A. Garambois (INRAe) , J. Garnier (Ecole Polytechnique, Académie Sc.), N. Luthen (ETH), P. Noble (INSA – IMT).
+ nombreux collaborateurs, ingénieurs de recherche, post-doctorants, doctorants, élèves ingénieurs.
Partenaires industriels CNES, SHOM, BRGM, CS Lab / Sopra-Steria, HydroMatters.

3 domaines d’actions

- Dynamique d’inondations (plaines, milieux urbains) et hydrologie des bassins versants.
- Hydrologie spatiale (échelle planétaire) : débits des rivières
- Océanographie côtière : submersions marines.

Processus gaussiens informés par la physique

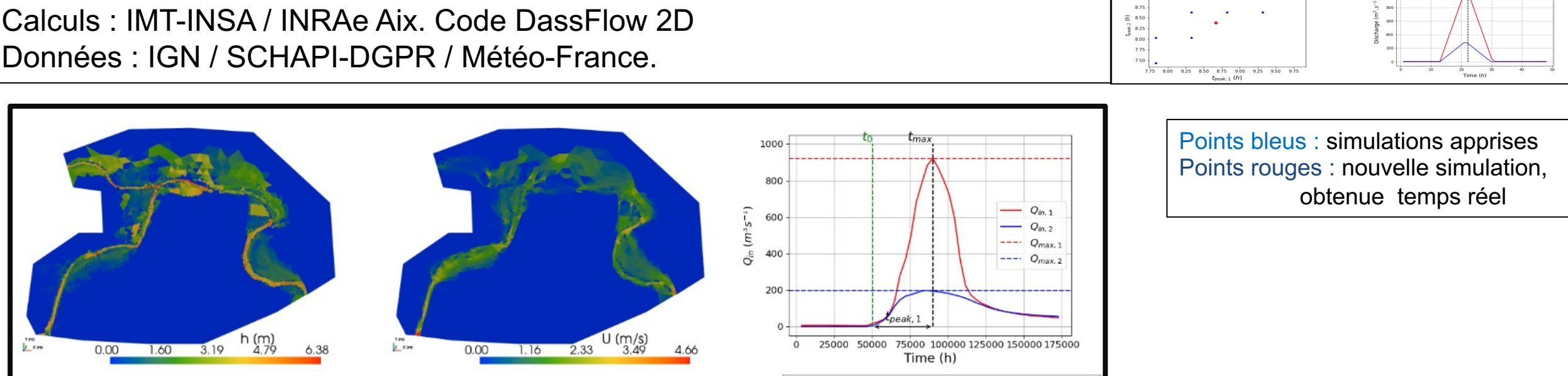
Collaboration INSA – IMT / Ecole Polytechnique.
Exemple simple : signal 1D interpolé avec modèle probabiliste Gaussien (2 paramètres).



Thèse de F.Z. El-Boukkouri en cours (2024-27), dans un contexte multi-fidélité.
Thèse de A. Padilla en cours (ONERA / INSA-IMT). Resolution de modèles d’EDP par processus gaussiens informés par la physique.

Dynamique d’inondations
Modèles réduits (« surrogates ») – calculs temps réels

Méthodologies de construction de modèles réduits en vue calculs « temps réel ».
Thèses de M. Allabou (2021-2025) et T.-V. N’Guyen (2025-) en cours.
Exemple : dynamique de plaine d’inondation : rivières de l’Aude et Fresquel.
Données mixte académiques et réelles - évènement de 2018.



Dynamique en milieux péri-urbains et urbains : travaux en cours et thèse CIFRE potentielle à venir (2026-2x).

Hydrologie spatiale
Problèmes inverses & assimilation de données
variationnelle, apprentissage, bayésienne.

Objectif.
Estimations de débit de dizaines milliers de portions de rivières planétaires, à partir de mesures SWOT.

Algorithme HiVDI : mix d’apprentissage, d’analyse Bayésienne et d’assimilation variationnelle de données procura nt des estimations de débits avec quantification d’incertitudes mais des modèles spatio-temporels d’hydrodynamiqu ue, calibrés pour les rivières observées (tronçons ou réseaux).
Collaboration CNES – INSA-IMT – CS Group/HydroMatters (SWOT Science Team).
Algorithmes et codes ouverts, transférés auprès du CNES.
Codes DassFlow.

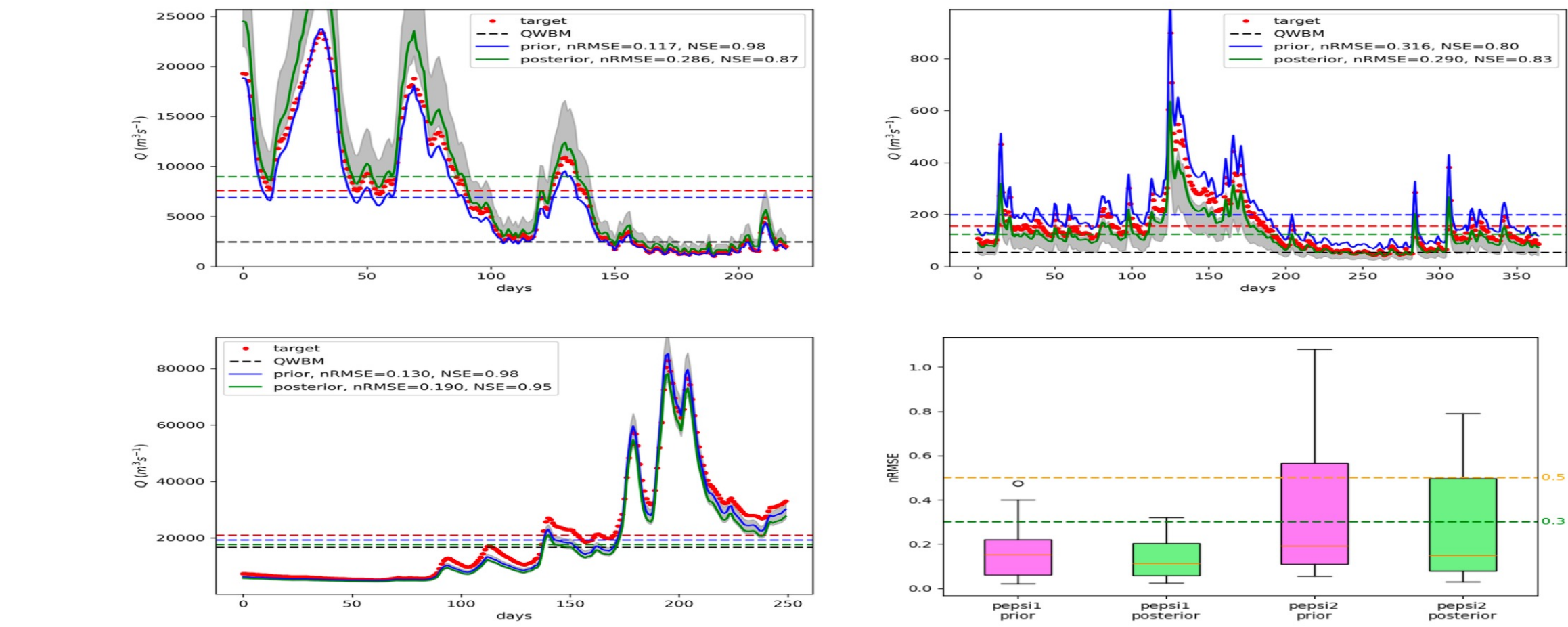
L’algorithme HiVDI est un algorithme modulaire comprenant :

- une estimation des débits avec quantification des incertitudes (UQ), issue d'une analyse bayésienne (et potentiellement de l'apprentissage automatique) ;
- un modèle d’hydrodynamique, calibré à partir de données multi-sources et valide à des échelles spatiales fines ;
- un modèle d’écoulement plus simpliste, calibré en temps réel avec de nouvelles mesures et valide à l’échelle du tronçon.

La méthodologie HiVDI peut s'appliquer à des sections fluviales ou à des réseaux hydrographiques entiers.

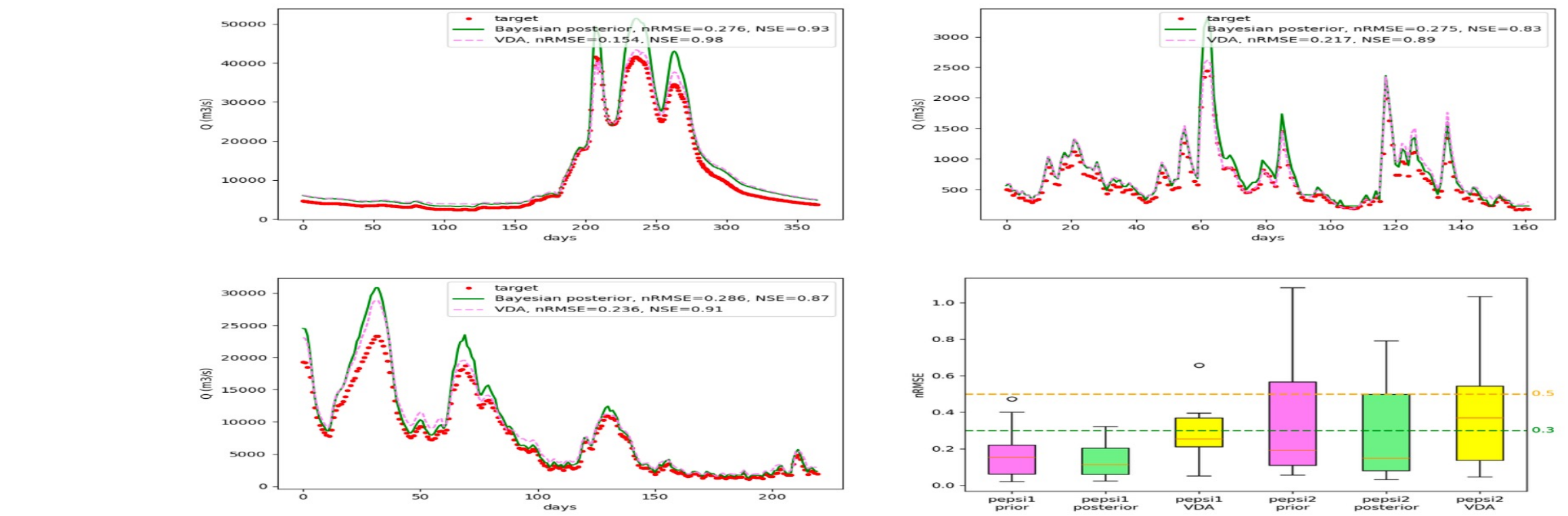
Illustrations numériques.
Estimations pour plusieurs dizaines de rivières d’études (Science Team SWOT / NASA-CNES et al.)
Entraînement = database Pepsi1, mix de données synthétiques et réelles.

Cas 1) Le profil bathymétrique des rivières est fourni (avec une faible incertitude).
Intériorité sur K : 15.
Prédiction sur jeu de données test Pepsi2 (Science Team SWOT)
→ Médiane du nRMSE sur la distribution de posteriori = 0,149 (≈ 15 % d'erreur sur la médiane de Q).



Cas 2) Rivières non jaugées : seules des mesures de surface de type SWOT sont disponibles.
(La bathymétrie est alors également estimée, non montrée ci-dessous).

Prédiction sur jeu de données réelles (Europe Unconstrained devset – Confluence).

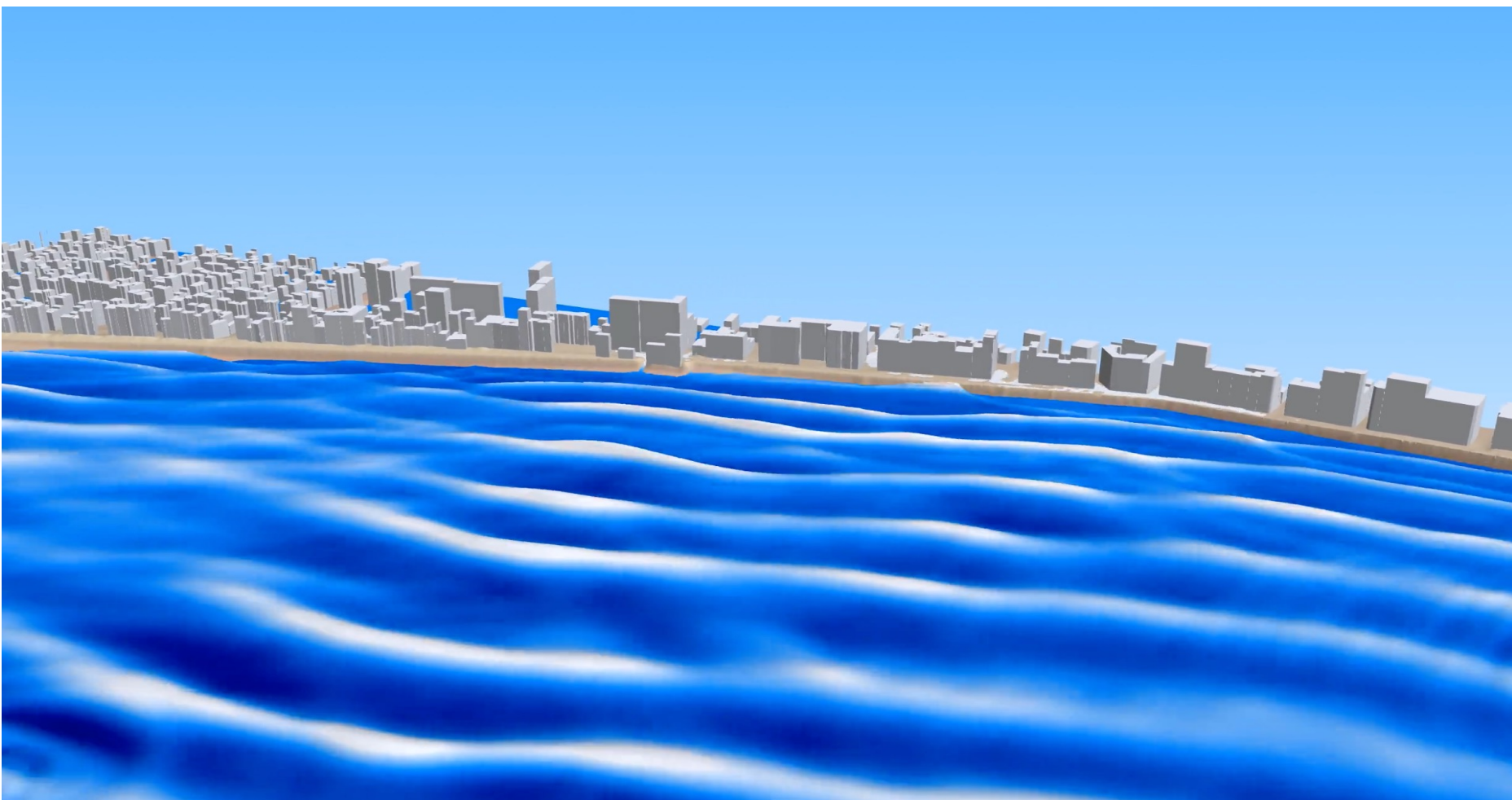


5 axes de recherche interconnectés

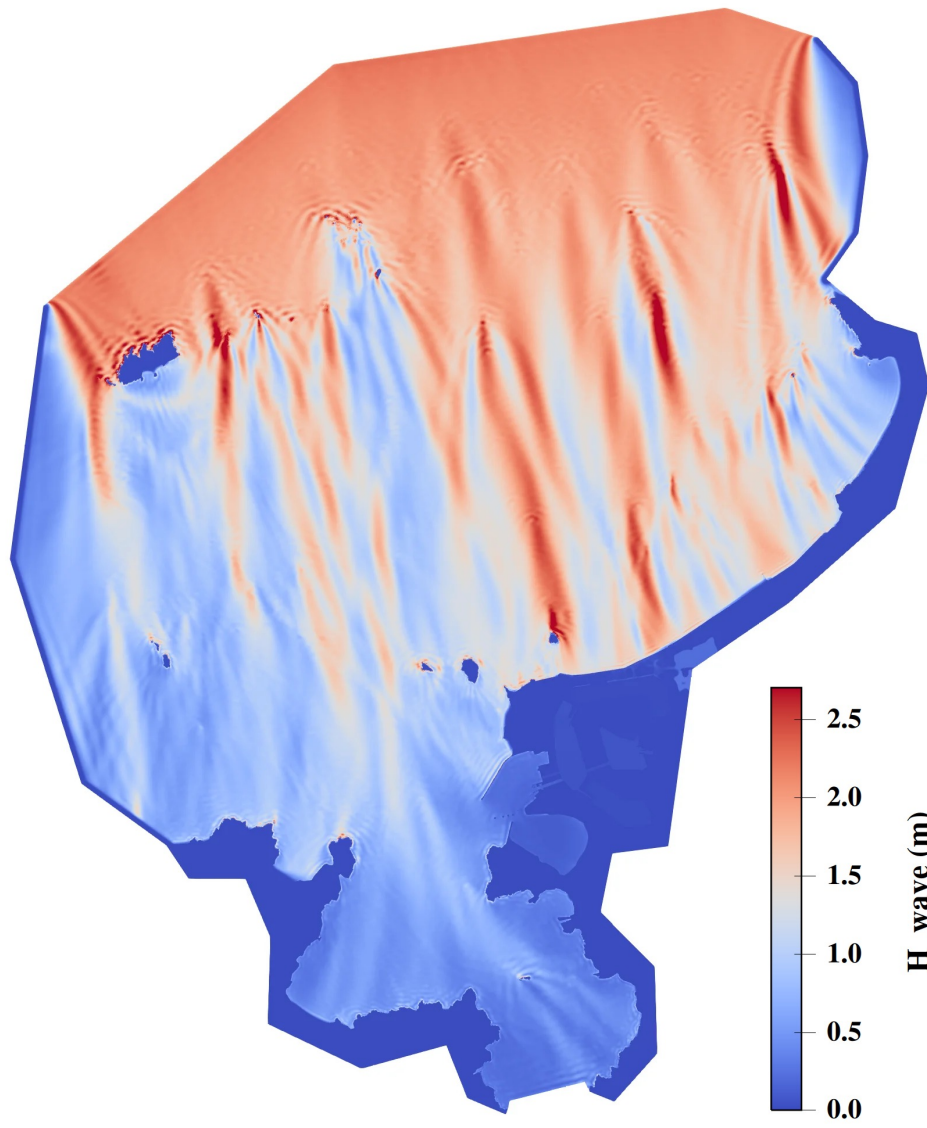
(Mathématiques appliquées – « IA scientifique »)

- Méthodes d'apprentissage informées par la physique
 - Hybridation de réseaux neuronaux et de processus gaussiens, avec les modèles physiques.
 - Étude des modèles de substitution résultants.
 - Modélisations avec assimilation de données mixant le déterministe, le probabiliste et l’apprentissage machine.
- Modèles réduits par méthodes hybrides physique - apprentissage.
- Modèles multi-fidélités
 - Méthodes prenant en compte des sorties de codes de calculs hiérarchiques.
- Quantification d'incertitudes
 - Analyse de sensibilités globales, notamment pour l'explicabilité des modèles.
- Planification d'expériences
 - Stratégies pour créer de nouvelles données à partir de sorties de codes de calculs.

Océanographie côtière, submersions marines
Modélisations avancées, HPC



Simulation au large de Saint-Malo (spectre de vagues de JONSWAP en CL) pour une hauteur significative des vagues de 3m, avec débordement de paquets de mer par dessus la digue.



Simulation de Saint-Malo sur une emprise de 50 km2 avec un maillage de 16 M d'éléments.
Plot : hauteur significative en chaque élément, en réalisant un calcul de la variance de ssh=(h+zb) de manière incrémentale sur une fenêtre temporelle de 4h.

Code de calcul Tolosa (tolosa-project.com)

Hydrologie des bassins versants
Modélisations hybride apprentissage – physique
avec assimilation de données

Travaux dans le cadre du projet TOSCA CNES « SWOT Hydro2Learning » (2025–27).
PIs : P.-A. Garambois & J. Monnier.
Partenariat : INRAe Aix, INSA – IMT, HydroMatters, SERTIT, IMFT, CNES, CNRS / IRD-LEGOS

Ci-dessous: un exemple d'étude récente.

