L'assimilation de données au service de l'hydrodynamique

Des crues fluviales aux dynamiques côtières

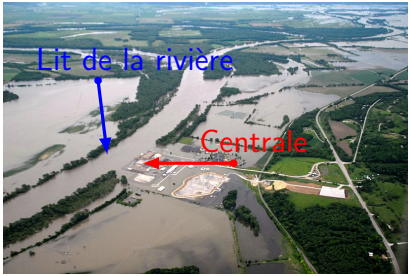
Jean-Paul Travert

Rencontres chercheur·euse·s et ingénieur·e·s Phimeca – *"Mathématiques à flots"*

Travaux menés chez EDF R&D en collaboration avec :
S. Boyaval, C. Goeury, V. Bacchi, F. Zaoui, G. Farina

Contexte industriel

- Protection des CNPEs contre les inondations externes (fluviales ou submersions marines)
- Développement des EMR et estimation de la ressource
- Morphodynamique cotière et transport de sédiments

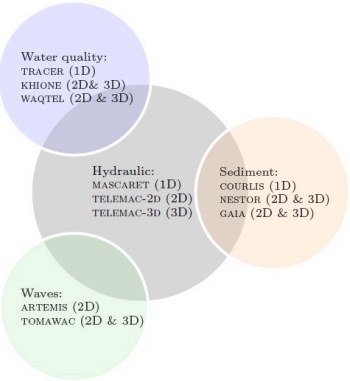


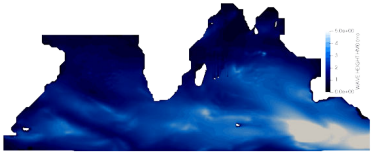
Inondation à la centrale nucléaire de Fort Calhoun (USA) en juin 2011.



Modélisation numérique et codes de calcul

- Utilisation de codes de calculs (openTELEMAC) dédiés à la modélisation numérique des écoulements à surface libre.







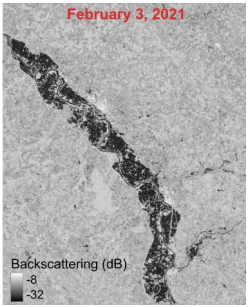
Observations

Mesures hydrologiques

Niveaux d'eau et débits le long des rivières



Images satellitaires



Observations par drones

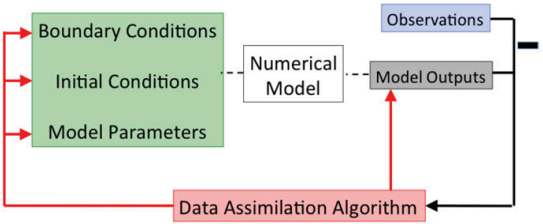


Combiner modèles et données incertaines

- **Modèles physiques imparfaits ($\mathcal{M}$)** :
  - Discrétisation EDP sur maillages complexes
  - Paramètres physiques clés méconnus : frottement K_s, forçages vent, conditions aux limites
- **Observations réelles bruitées ($\mathbf{y}^o$)** :
  - Satellites (SAR, altimétrie), drones optiques, bouées houlographes, stations in situ

Rôle de l'assimilation de données

Trouver le **meilleur compromis** entre connaissance à priori et observations pour corriger les paramètres physiques incertains.



Le cadre mathématique unifié de l'inversion variationnelle

Problème d'optimisation variationnelle

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg\min_{\boldsymbol{\theta}\in\Theta_{\text{ad}}} \mathcal{J}(\boldsymbol{\theta})$$

$$\mathcal{J}(\boldsymbol{\theta}) = \underbrace{\frac{1}{2}\|\boldsymbol{\theta}-\boldsymbol{\theta}^b\|^2_{\mathbf{B}^{-1}}}_{\mathcal{J}_b(\boldsymbol{\theta})\,:\,\text{Régularisation a priori}} + \underbrace{\mathcal{D}(\mathbf{y}^o, \mathcal{H}(\mathcal{M}(\boldsymbol{\theta})))}_{\mathcal{J}_o(\boldsymbol{\theta})\,\text{Écart aux observations}}$$

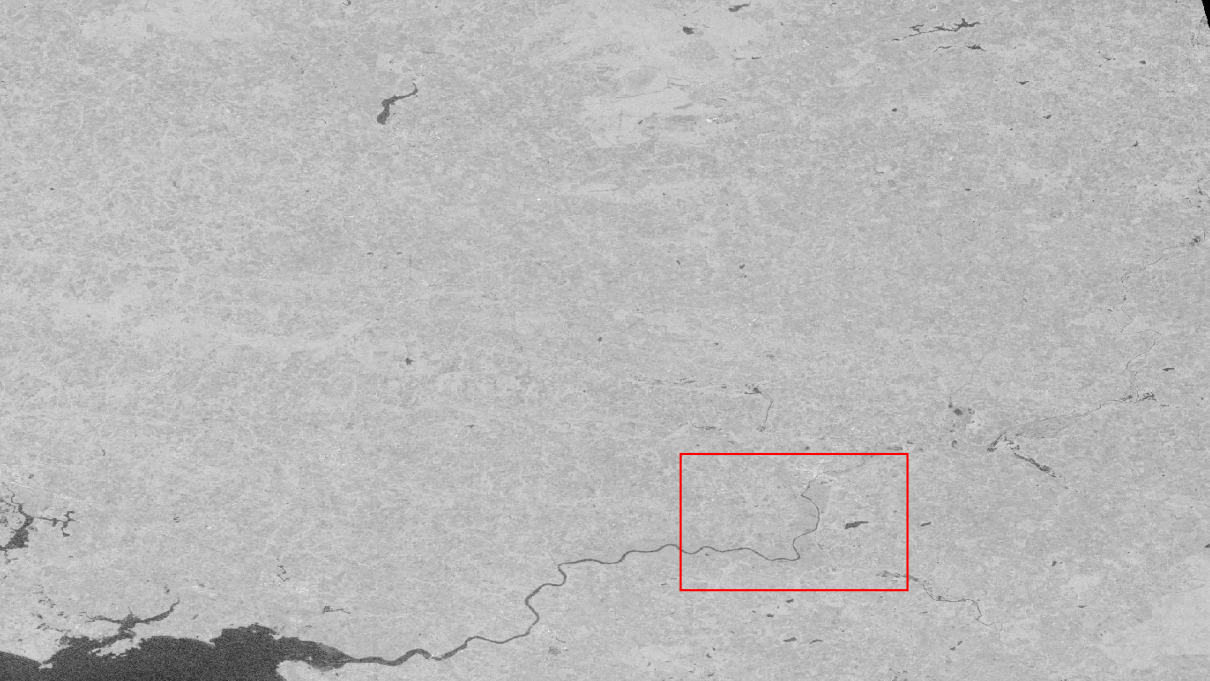
- $\mathcal{M}$: Solveur EDP direct (**openTELEMAC** : 2D/3D Saint-Venant, TOMAWAC)
- $\boldsymbol{\theta}$: Paramètres physiques à calibrer (rugosité K_s, frottement marin, vent)
- $\mathcal{H}$: **Opérateur d'observation** (projection de l'état modèle sur les données)
- $\mathcal{D}$: **Métrique d'écart** adaptée à la topologie de l'observation

Trois étapes :

1. **Réduction de dimension (UQ)**
   - Analyse de sensibilité pour isoler le sous-espace actif des paramètres.
2. **Choix des espaces métriques $\mathcal{D}$**
   - Moindres carrés $\mathbf{R}^{-1}$ pour données ponctuelles.
   - **Distances géométriques & transport optimal** (d_{MH}, $\mathcal{W}_2$) pour les images satellitaires.
3. **Opérateurs non linéaires $\mathcal{H}$**
   - Couplage vertical d'échelles (2D $\leftrightarrow$ 3D libre).


ouest
france





Simulation numérique des inondations (TELEMAC-2D)



Propagation d'une onde de crue 2D (TELEMAC-2D).

- Modélisation 2D Saint-Venant :

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial (hu)}{\partial t} + \frac{\partial (hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial (huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gQ^2}{K_s{}^2 h^{7/3}} + \nabla \cdot (h\nu_\varepsilon \nabla u) \\ \frac{\partial (hv)}{\partial t} + \frac{\partial (huv)}{\partial x} + \frac{\partial (hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gQ^2}{K_s{}^2 h^{7/3}} + \nabla \cdot (h\nu_\varepsilon \nabla v) \end{cases}$$

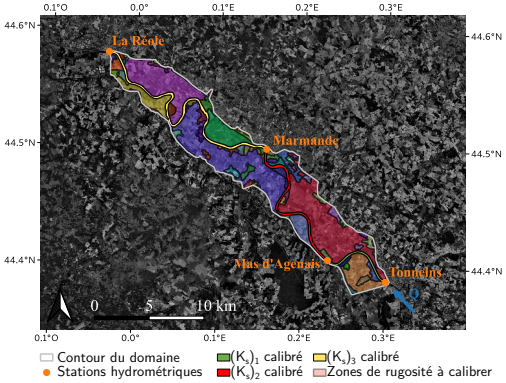
La question

Les stations calibrent bien le lit mineur. Mais lors des débordements, **la rugosité en lit majeur (plaine)** est incertaine et peu de mesures sont disponibles pour les calibrer

Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

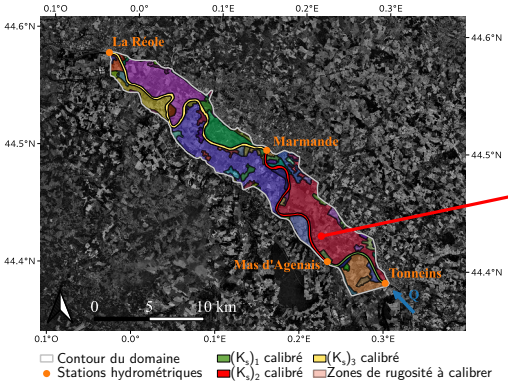
- Découpage par occupation du sol



Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

- Découpage par occupation du sol



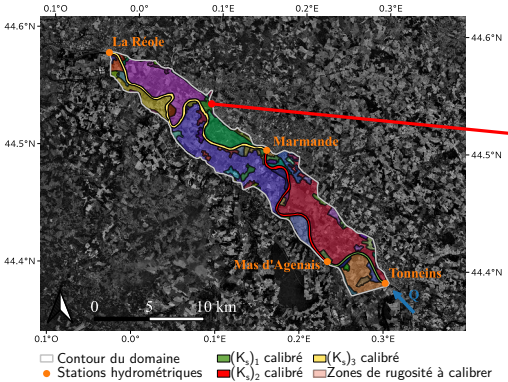


Champs cultivés avec végétation basse, $K_s = 15$ à $20\ m^{1/3}/s$. Crédit : Google Maps

Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

- Découpage par occupation du sol



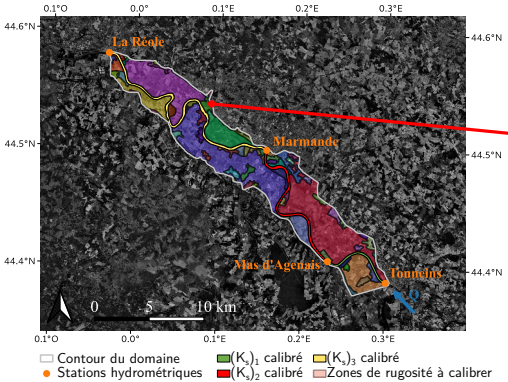


Zone faiblement urbanisée, $K_s = 8$ à $10\ m^{1/3}/s$. Crédit : Google Maps

Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

- Découpage par occupation du sol





Zone faiblement urbanisée, $K_s = 8$ à $10\ m^{1/3}/s$. Crédit : Google Maps

Calibrer les zones du lit majeur avec plus d'informations ?

Questions de recherche

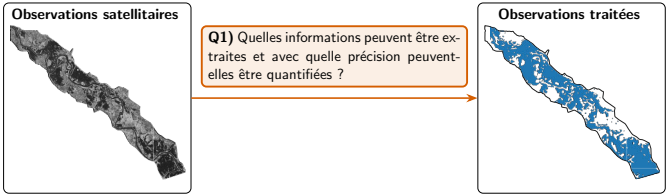
Observations satellitaires



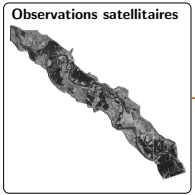
Questions de recherche



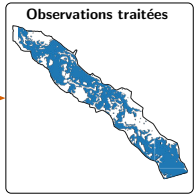
Questions de recherche



Questions de recherche

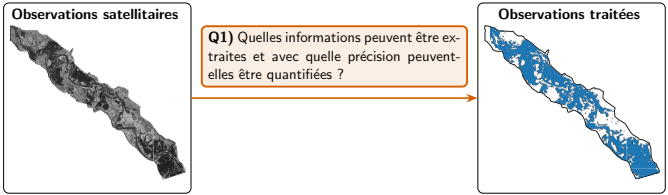


Q1) Quelles informations peuvent être extraites et avec quelle précision peuvent-elles être quantifiées ?



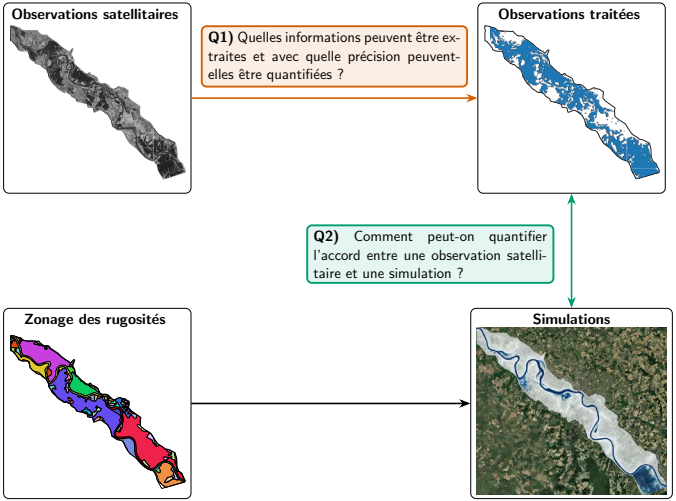


Questions de recherche

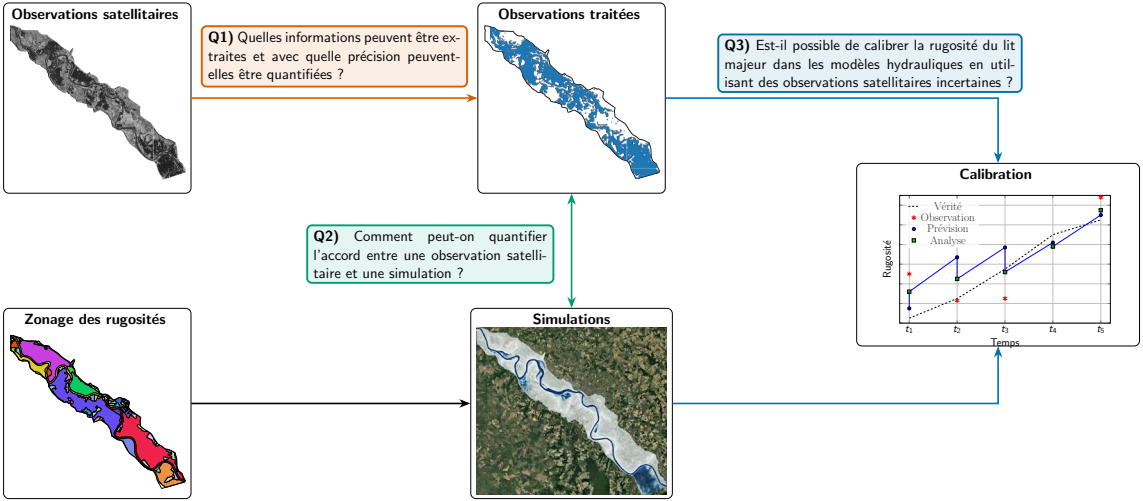




Questions de recherche

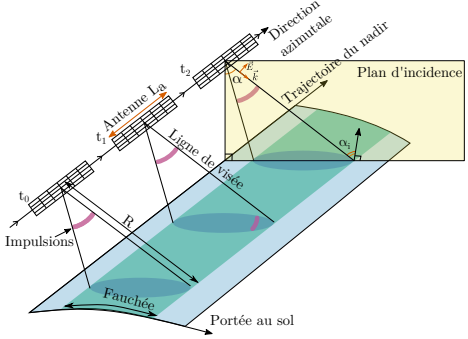


Questions de recherche



Observations satellitaires SAR

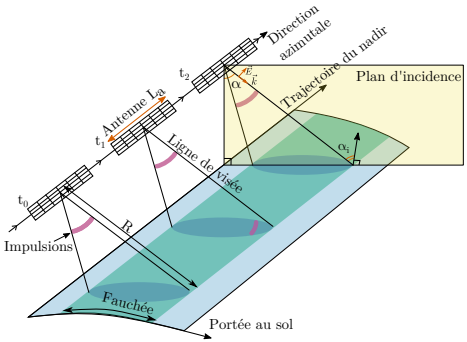
- **Radar micro-ondes tout-temps** : traverse nuages/pluie, jour et nuit, résolution 10 m.
- **Physique** : Réflectance spéculaire $\Longrightarrow$ faible coefficient de rétrodiffusion σ^0 sur l'eau plane.



Géométrie d'acquisition.

Observations satellitaires SAR

- **Radar micro-ondes tout-temps** : traverse nuages/pluie, jour et nuit, résolution 10 m.
- **Physique** : Réflectance spéculaire $\Longrightarrow$ faible coefficient de rétrodiffusion σ^0 sur l'eau plane.



Géométrie d'acquisition.

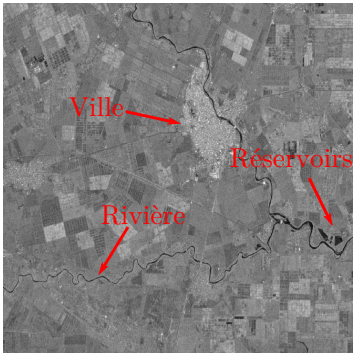
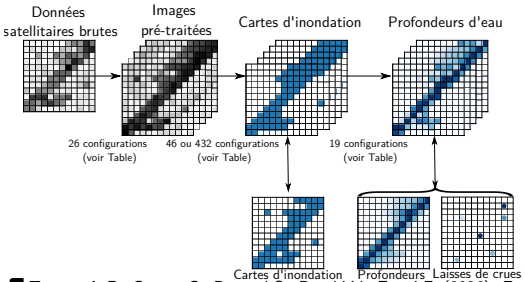
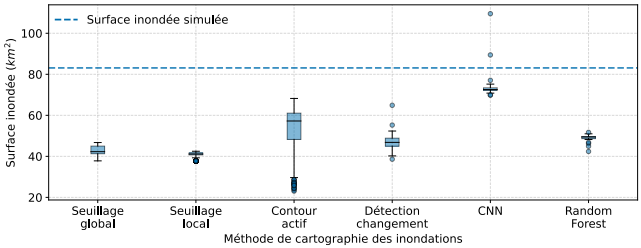


Image Sentinel-1.

Variabilité des extractions due au traitement des images satellitaires

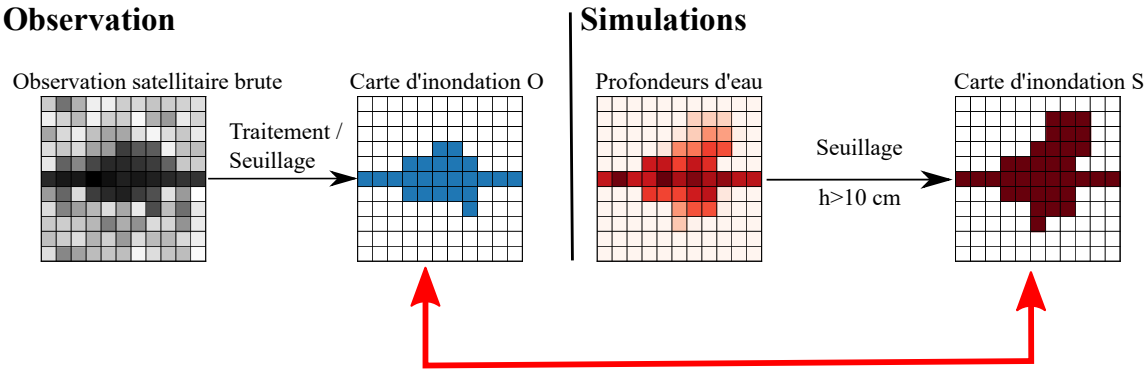
- Incertitudes sur l'extraction des cartes d'inondation ou de profondeurs d'eau due aux choix des méthodes et hyperparamètres





Travert J.-P., Goeury C., Boyaval S., Bacchi V., Zaoui F. (2026). Evaluating the effects of preprocessing, method selection, and hyperparameter tuning on SAR-based flood mapping and water depth estimation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.

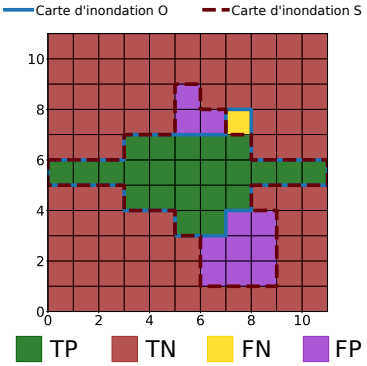
Comparaison des cartes d'inondation observées et simulées



Quelle est la meilleure mesure de performance pour comparer O et S ?

Choix de l'outil de comparaison

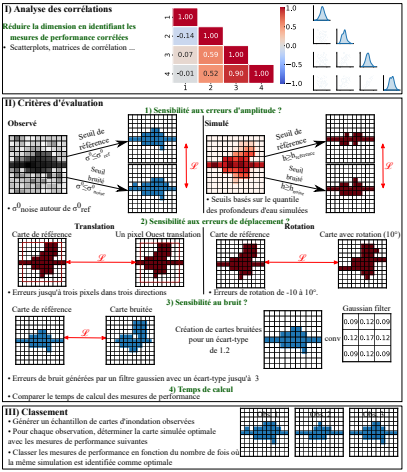
- **L'échec des métriques pixel-à-pixel** :
  - Scores classiques issus de la matrice de confusion (CSI, κ, IoU).
  - **Effet de double pénalité** : un décalage de 1 pixel compte comme faux positif ET faux négatif $\Longrightarrow$ paysage d'optimisation non convexe et sans gradient !
- **Métriques géométriques & transport optimal** :
  - **Hausdorff modifiée (d_{MH})** : écart moyen aux contours les plus proches.
  - **Transport optimal (W_2)** : coût de déplacement de masse.
  - **Information Mutuelle (NMI)** : dépendances statistiques.



Travert et al. (2025), *Water Resources Research*, 61, e2024WR038506.

Méthodologie de sélection de mesures de performance

1. Analyse des corrélations
2. Critères d'évaluation
   - Sensibilité aux erreurs sur l'étendue d'inondation
   - Sensibilité aux erreurs de déplacement (erreurs de translation / rotation de géoréférencement du satellite)
   - Sensibilité au bruit (ajout d'un bruit gaussien sur l'observation)
   - Temps de calcul
3. Classement des mesures de performance

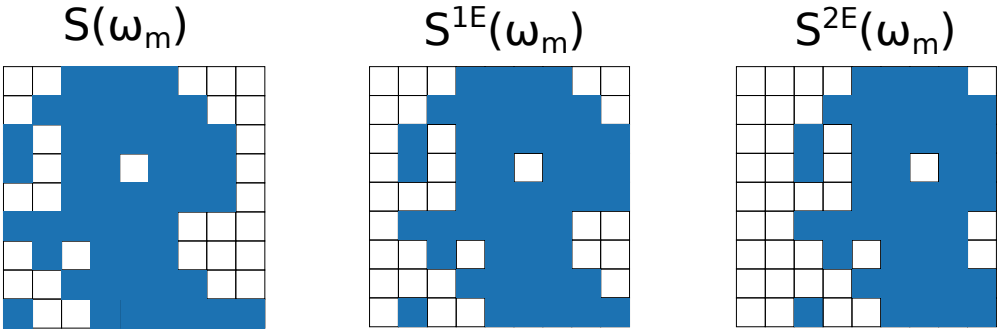


Travert J.-P., Boyaval S., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F. (2025). Evaluation of performance measures for comparing flood models with satellite observations. *Water Resources Research*, 61, e2024WR038506.

Exemple de critère : Sensibilité aux translations

- Des erreurs de géoréférencement de l'observation jusqu'à 3 pixels

$\Rightarrow$ Étude de sensibilité de $\mathcal{L}$ aux erreurs de translations

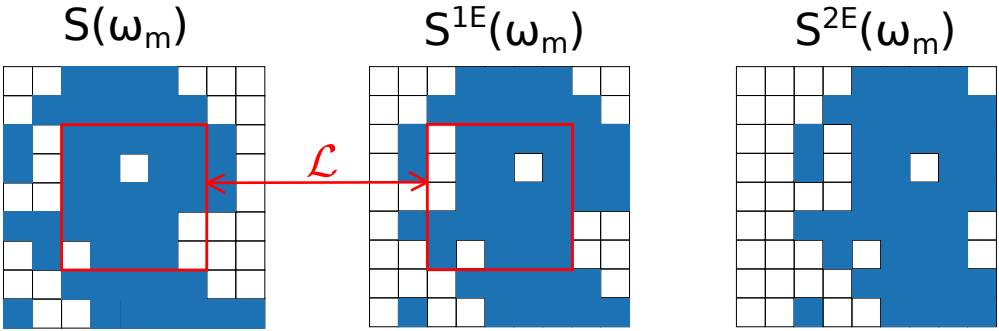


Exemple de comparaison de cartes d'inondation simulées pour une translation vers l'Est.

Exemple de critère : Sensibilité aux translations

- Des erreurs de géoréférencement de l'observation jusqu'à 3 pixels

$\Rightarrow$ Étude de sensibilité de $\mathcal{L}$ aux erreurs de translations

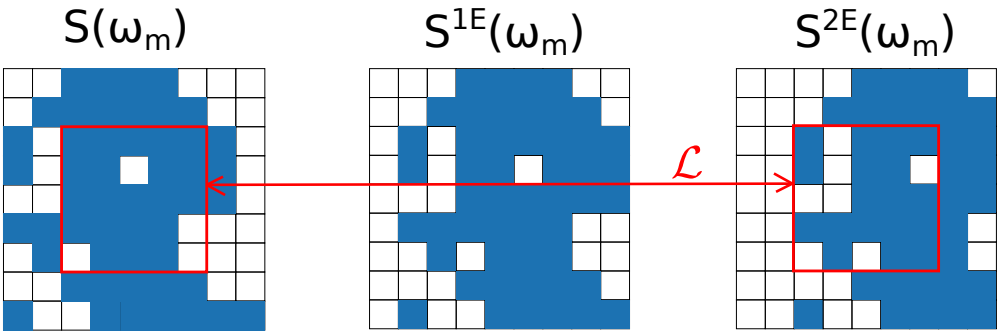


Exemple de comparaison de cartes d'inondation simulées pour une translation vers l'Est.

Exemple de critère : Sensibilité aux translations

- Des erreurs de géoréférencement de l'observation jusqu'à 3 pixels

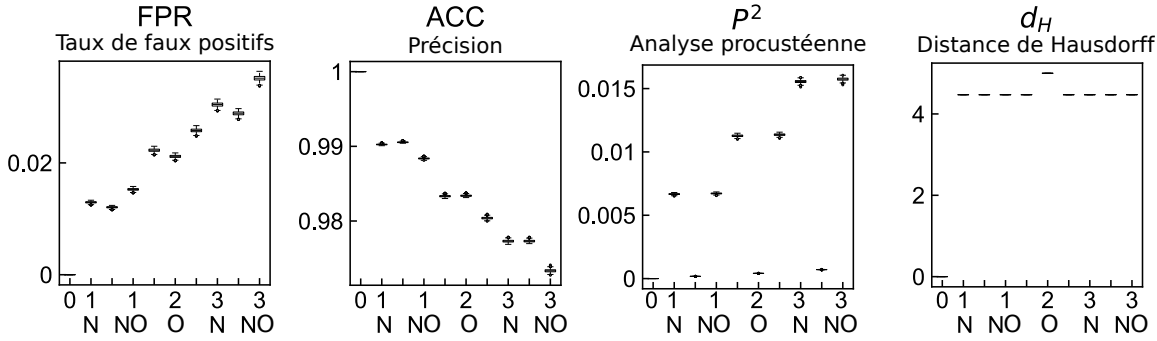
$\Rightarrow$ Étude de sensibilité de $\mathcal{L}$ aux erreurs de translations



Exemple de comparaison de cartes d'inondation simulées pour une translation vers l'Est.

Sensibilité aux translations - Résultats

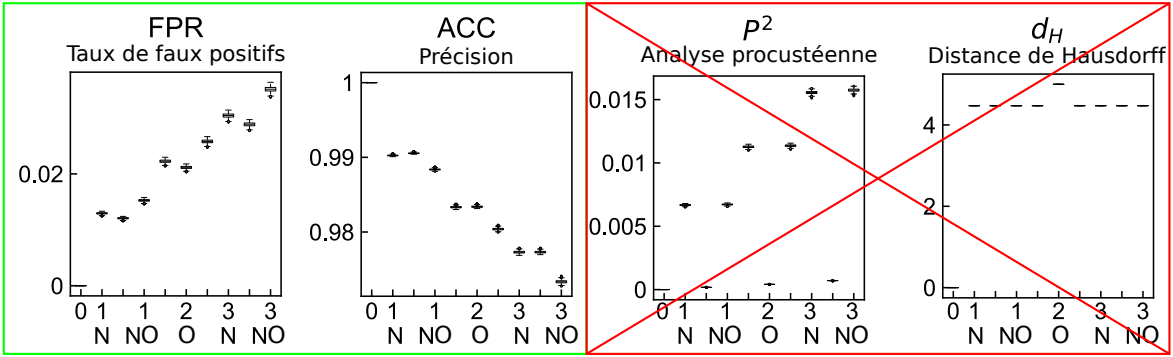
- Exemple avec 4 mesures de performance



Évaluation de 4 mesures de performance par rapport aux erreurs de translation sur des cartes d'inondation simulées. Les cartes d'inondation de référence sont comparées aux cartes translatées (1 à 3 pixels dans les directions nord (N), nord-ouest (NO) et ouest (O)).

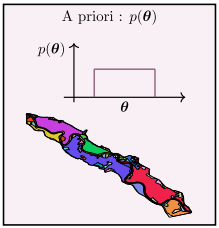
Sensibilité aux translations - Résultats

- Exemple avec 4 mesures de performance

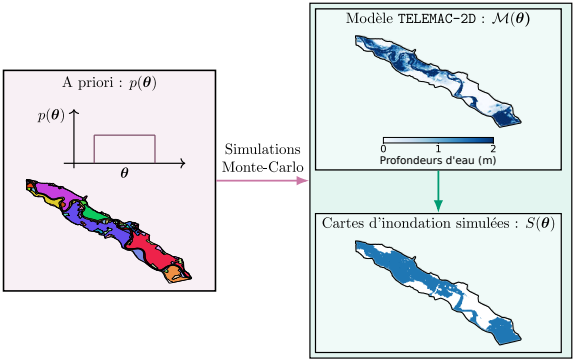


Évaluation de 4 mesures de performance par rapport aux erreurs de translation sur des cartes d'inondation simulées. Les cartes d'inondation de référence sont comparées aux cartes translatées (1 à 3 pixels dans les directions nord (N), nord-ouest (NO) et ouest (O)).

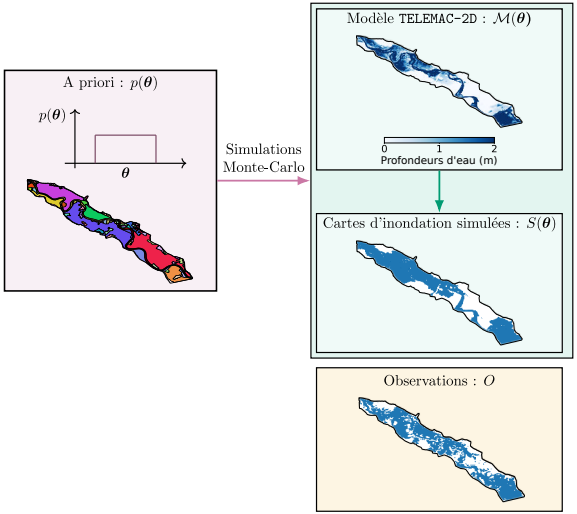
Méthodologie de calibration



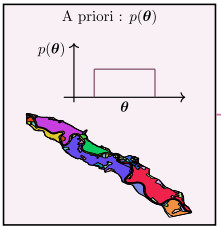
Méthodologie de calibration



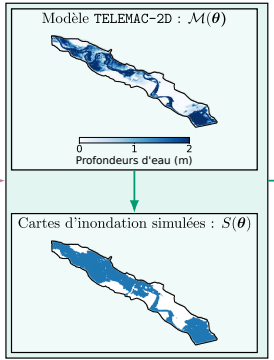
Méthodologie de calibration

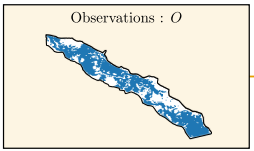


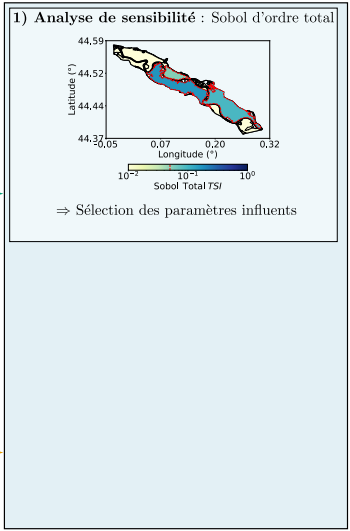
Méthodologie de calibration



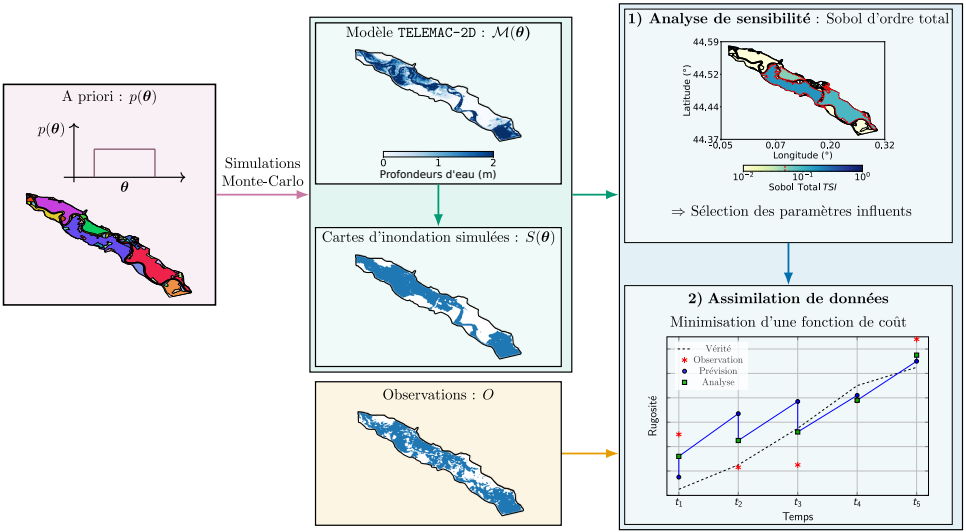
Simulations Monte-Carlo



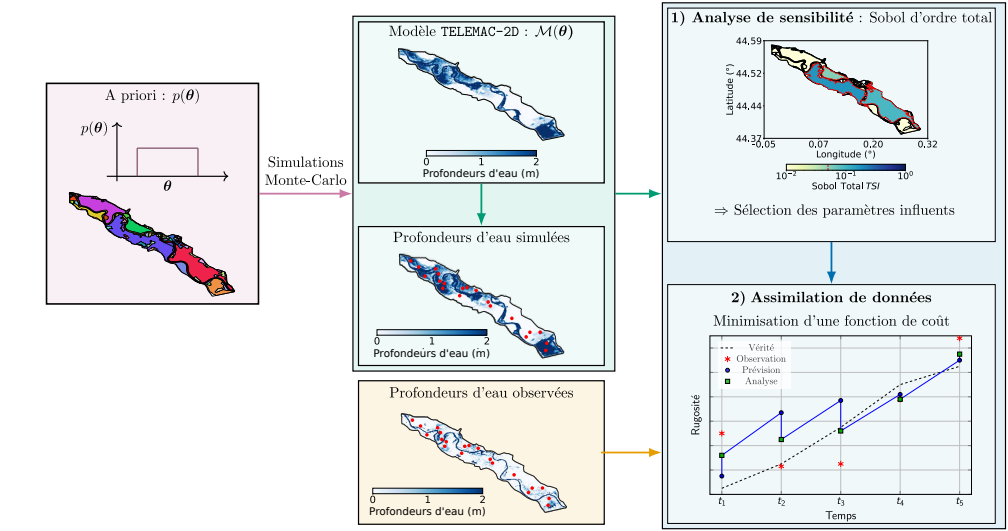




Méthodologie de calibration



Méthodologie de calibration

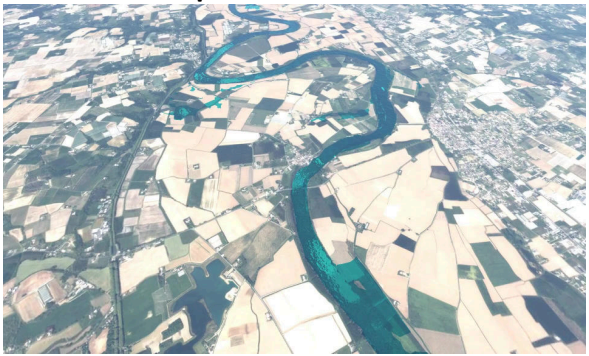


Impact de l'assimilation

Avant assimilation



Après assimilation



- Calibration de la rugosité dans des expériences contrôlées ✓
- Le choix de la mesure de performance influence l'assimilation des cartes d'inondation
- Trop d'erreurs d'observations pour calibrer le lit majeur sur cas réel

Conclusions

Q1) Données

- Évaluation des incertitudes de la chaîne de traitement
- Variations de 10 à 20% de la surface inondée en fonction des méthodes choisies
- Outil développé pour faciliter l'usage opérationnel

Q2) Mesures de performance

- Développement d'une méthodologie de sélection et de classement
- Sous-ensemble fiable de mesures de performance identifiées

Q3) Calibration

- Assimilation de cartes d'inondation et de profondeurs d'eau
- Influence du choix de la mesure de performance sur la calibration
- Incertitudes trop élevées des observations pour calibrer le lit majeur, mais calibration possible du lit mineur

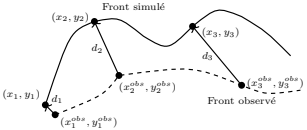
Perspectives

Q1) Données

- Fusion multi-capteurs (optique, SWOT, drones)
- Expériences contrôlées en laboratoire
- Nouvelles variables : champs de vitesse



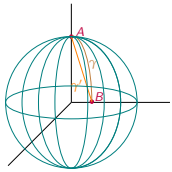
Q2) Mesures de performance



- Zones informatives (fronts de crue)
- Autres pistes de mesures à exploiter

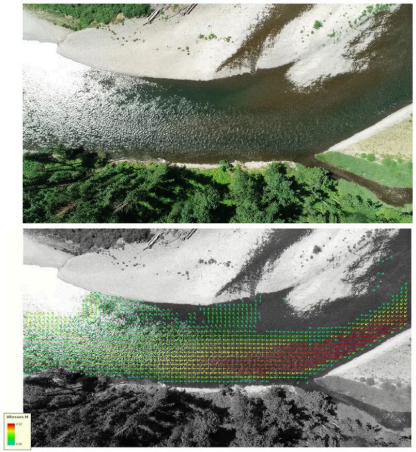
Q3) Calibration

- Prise en compte de l'erreur modèle
- Assimilation sur des variétés (espaces non-euclidiens)



Nouveau vecteur d'observation : Vélocimétrie par drone (LSPIV)

- **Principe de la LSPIV** (*Large Scale Particle Image Velocimetry*) :
  - Vidéo aéroportée par drone au-dessus de la crue.
  - Corrélation croisée d'images pour suivre les traceurs en surface (rides, mousse).
  - Logiciels : Fudaa-LSPIV, ANDROMEDE, PIVlab.
- **Atouts majeurs** :
  - **Sécurité** : mesure sans contact en crue violente.
  - Champ continu 2D de vitesse de surface $\mathbf{u}_{\text{surf}}(x, y)$ à haute résolution.
- **Bruits optiques maîtrisés** : reflets solaires, ombres portées des berges.



L'opérateur d'observation $\mathcal{H}$: De la profondeur à la surface

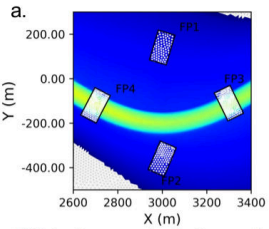
- **Incompatibilité d'échelle** :
  - TELEMAC-2D calcule la vitesse moyennée sur la verticale : $u_{\text{depth}-\text{avg}}$.
  - Le drone mesure la vitesse en surface libre : u_{surf}.
- **Indice de vitesse**

$$\alpha = \frac{u_{\text{depth}-\text{avg}}}{u_{\text{surf}}}$$

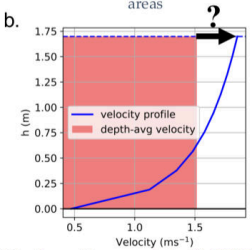
- **Profil logarithmique vertical**

$$u_{\text{surf}} = u_{\text{depth}-\text{avg}} \left(1 + \frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{C_f}{2}}\right), \qquad C_f = \frac{2g}{h^{1/3} K_s^2}$$

- $\kappa \approx 0.41$ (constante de von Kármán).

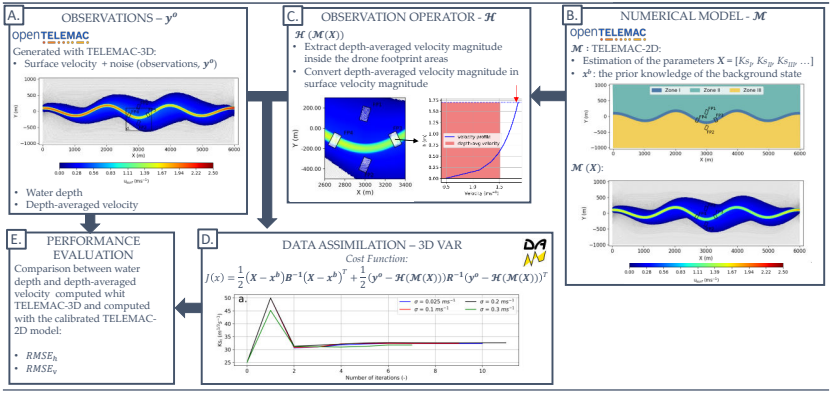


T2D depth-averaged velocity magnitude in correspondence of the drone footprint areas



Calibration à l'aide de données synthétiques drones

- Vérité terrain générée avec **TELEMAC-3D** (10 plans verticaux, frottement Nikuradse).
- Bruit optique réaliste injecté : $\sigma^I \in [0.025, 0.3]\,\mathrm{m/s}$.

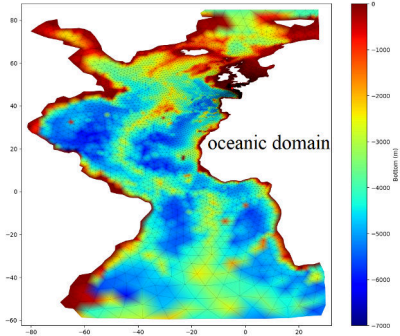


États de mer extrêmes & Modèle de vagues TOMAWAC (ANEMOC-3)

- **La base hindcast ANEMOC-3 (EDF R&D)** :
  - 45 ans d'états de mer (1979–2023) couvrant l'Atlantique et la Manche.
  - Modèle spectral de vagues **TOMAWAC** couplé à **TELEMAC-2D** pour la marée et les surcotes.
- **Physique de génération et dissipation** :
  - Équation de bilan d'action d'onde :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\dot{\mathbf{x}} N) = Q_{in} + Q_{ds} + Q_{nl}$$

  - Terme source de vent Q_{in} (Janssen) et déferlement en eau profonde Q_{WC} (*whitecapping*, van der Westhuysen).

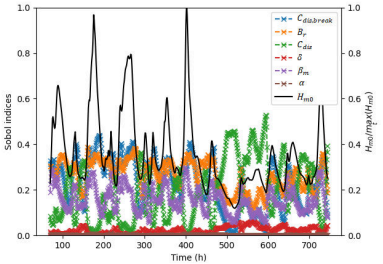


Maillage océanique et côtier ANEMOC-3 (EDF R&D).

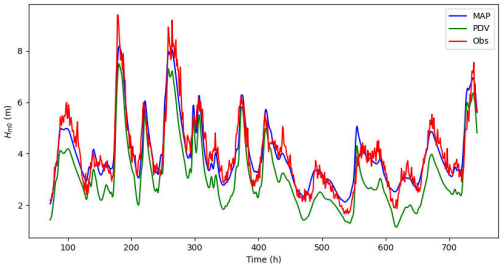
Assimilation 3D-Var des vagues lors de tempêtes extrêmes (Fév. 2014)

Démarche d'assimilation :

1. **Analyse de sensibilité** : identification des 4 paramètres dominants de vent et déferlement (β_m, C_{ds}, C_{dis}, B_r).
2. **Calibration 3D-Var** minimisant l'écart aux mesures de hauteur significative H_{m0} issues des bouées houlographes (Cap Ferret, Belle-Île).



Évolution temporelle des indices de Sobol' en tempête.



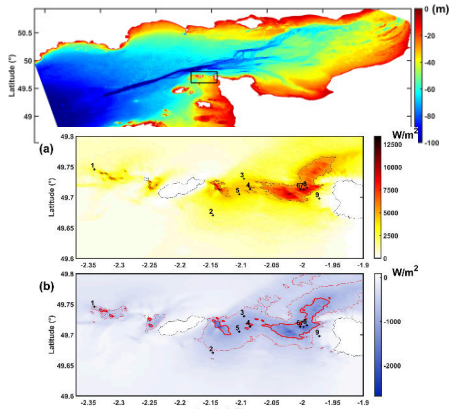
Hauteur significative H_{m0} mesurée vs simulée avant et après calibration 3D-Var (Cap Ferret).

Gain prédictif

Réduction des sous-estimations lors des pics de tempête extrême.

Courants de marée extrêmes : Le Raz Blanchard (Énergie Hydrolienne)

- **Le site du Raz Blanchard (Alderney Race)** :
  - Courants de marée parmi les plus violents au monde ($> 5\,\mathrm{m/s}$), emplacement majeur pour les fermes hydroliennes.
  - Modélisation hydrodynamique 2D avec TELEMAC-2D.
- **Calibration conjointe par assimilation de données** :
  - Analyse de sensibilité globale pour la ressource hydrolienne.
  - Estimation simultanée du frottement de fond marin et des conditions aux limites (marée astronomique amont/aval).



Thiébot J., Goeury C., Travert J.-P., Sebastian A., Salomon J. (2025). The contribution of sensitivity analysis and data assimilation to tidal-stream resource assessment: the example of the Alderney Race. *Applied Ocean Research*.
Sebastian A., Thiébot J., Goeury C., Travert J.-P., Poizot E., Gregoire G. (2025). Automatic Calibration and Simultaneous Estimation of Bottom Friction and Open Boundary Conditions in a Tidal Model. *Applied Ocean Research*.

Synthèse

Aspect	Océanique (TOMAWAC)	Fluvial Macro (Sentinel-1)	Fluvial Local (Drone LSPIV)
Échelle spatiale	Océanique / Côtière ($> 500\,\mathrm{km}$)	Régionale ($> 100\,\mathrm{km}$)	Tronçon fluvial ($< 1\,\mathrm{km}$)
Observations $\mathbf{y}^o$	Bouées houlographes (H_{m0}), marégraphes	Cartes SAR 2D (Sentinel-1)	Champs vidéo 2D $\mathbf{u}_{\mathrm{surf}}$
Paramètres θ	Forçage vent β_m & déferlement C_{ds}	Rugosités zonées K_s (lit majeur)	Rugosités K_s (lit mineur + majeur)
Métrique $\mathcal{D}$	Moindres carrés pondérés $\mathbf{R}^{-1}$	Distance géométrique (d_{MH}, Wasserstein)	Moindres carrés via opérateur $\mathcal{H}(K_s)$
Apport industriel	Prévision des surcotes & vagues extrêmes	Délimitation de l'enveloppe de crise	Contrainte dynamique locale des débits

Chaîne de calcul

Une même chaîne logicielle (**openTELEMAC, TelApy, ADAO**) déclinée du grand large jusqu'aux cours d'eau pour maîtriser les risques d'inondation et de submersion.

Merci pour votre attention !

Jean-Paul Travert – jean-paul.travert@edf.fr