

Caractérisation des rugosités par données satellitaires pour les calculs d'inondations

Jean-Paul Travert

Soutenance de thèse, Chatou, 14 octobre 2025

Membres du jury

Eric BLAYO
Renaud HOSTACHE
Florence TUPIN
Hélène ROUX
Sébastien BOYAVAL
Cédric GOEURY
Vito BACCHI
Fabrice ZAOUÏ
Philippe MOIREAU

Professeur
Directeur de Recherche
Professeure
Professeure
ICPEF
Ingénieur Chercheur
Ingénieur Chercheur
Ingénieur Chercheur
Professeur

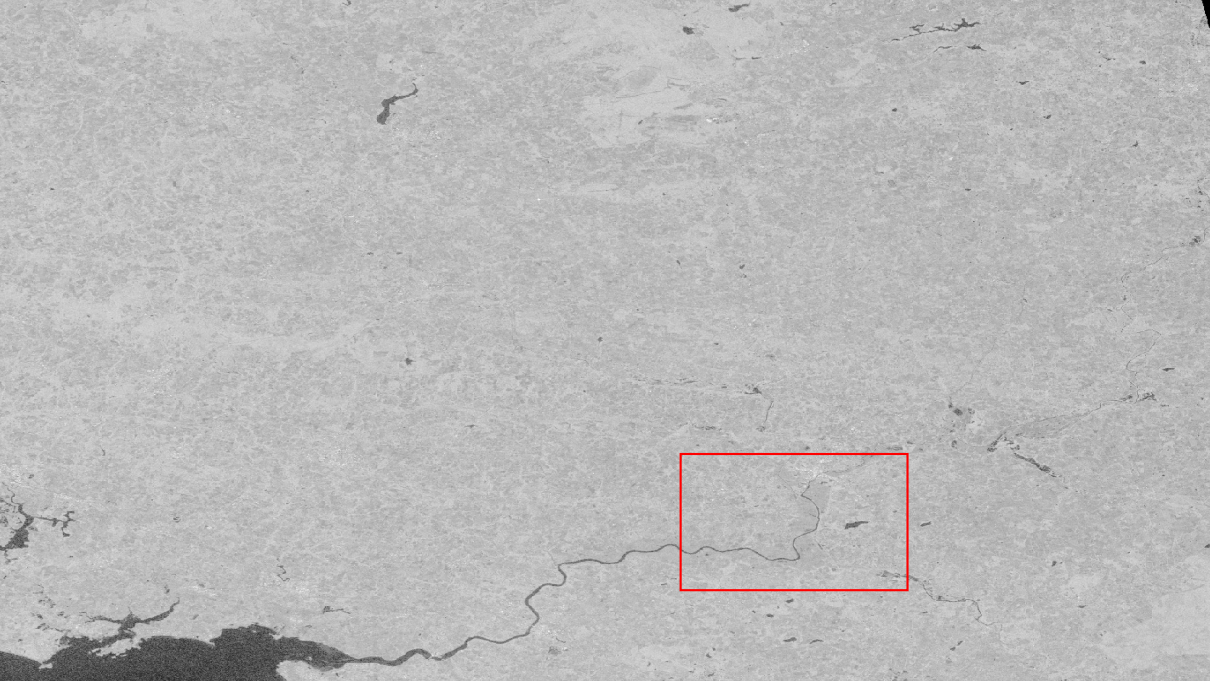
Inria & LJK, UGA
UMR Espace-Dev, IRD
LTCI, Télécom Paris, IP Paris
IMFT, Toulouse INP
LHSV, ENPC, IP Paris & Inria
EDF R&D & LHSV, ENPC, IP Paris
EDF R&D
EDF R&D
CMAP, École Polytechnique, IP Paris &
Inria

Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinatrice
Directeur de thèse
Co-Encadrant de thèse
Co-Encadrant de thèse
Co-Encadrant de thèse
Invité



ouest
france





Contexte industriel

- Protection des CNPEs contre les inondations externes (Guide ASN n°13)



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

Contexte industriel

- Protection des CNPEs contre les inondations externes (Guide ASN n°13)



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

- Propagation de l'inondation qui dépend de la rugosité



Rivières à rugosité faible (gauche) et élevée (droite). Crédit : U.S. Geological Survey.

Contexte industriel

- Protection des CNPEs contre les inondations externes (Guide ASN n°13)



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

Objectif

Quantifier les coefficients de rugosité en plaine d'inondation

- Propagation de l'inondation qui dépend de la rugosité



Rivières à rugosité faible (gauche) et élevée (droite). Crédit : U.S. Geological Survey.

Simulation numérique des inondations



- Modélisation 2D type Saint-Venant :

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -g h \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g Q^2}{\kappa_*^2 h^{1/3}} + \frac{h}{\rho} F_x + \nabla \cdot (h v_e \nabla u) \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -g h \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g Q^2}{\kappa_*^2 h^{1/3}} + \frac{h}{\rho} F_y + \nabla \cdot (h v_e \nabla v) \end{cases}$$

- Coefficient K_s à définir dans les simulations

Coefficient de rugosité

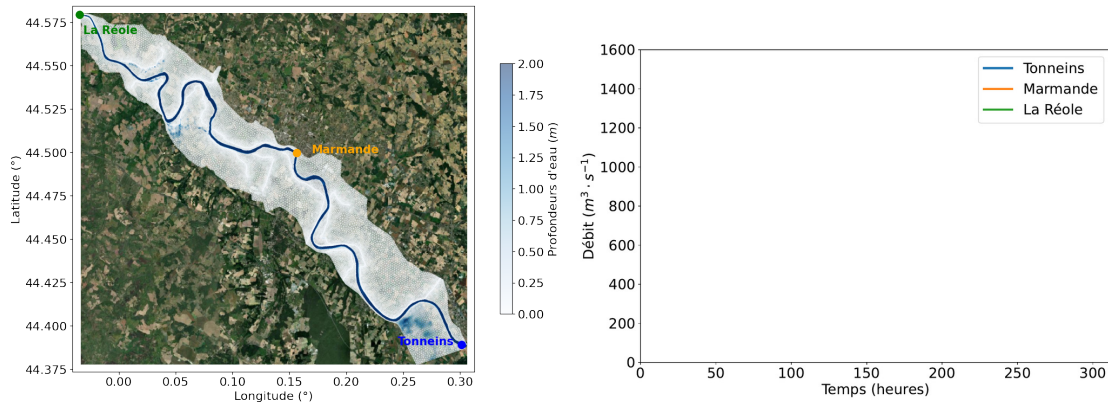
Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

- Observations des niveaux d'eau et débits le long des rivières



Coefficient de rugosité

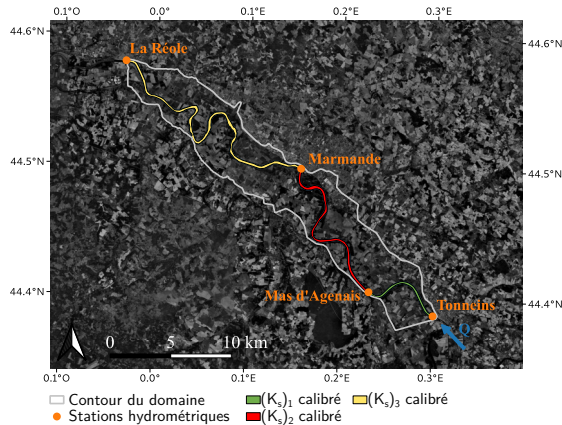
Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité



Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

► Lit mineur calibré avec les stations

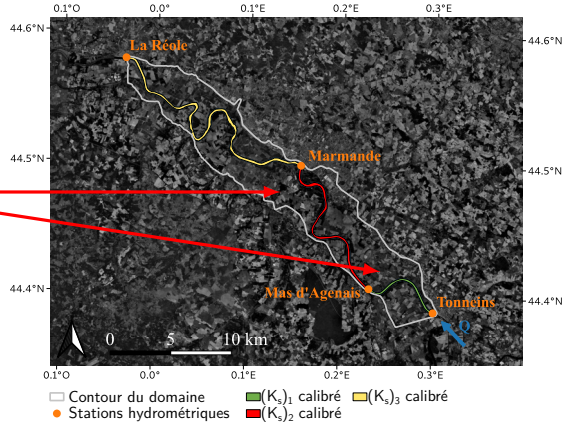


Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

- Lit mineur calibré avec les stations

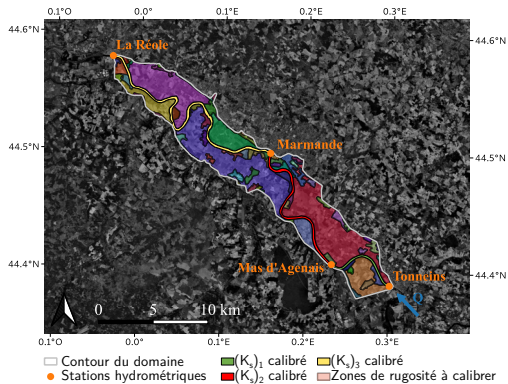
Rugosité des plaines ?



Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

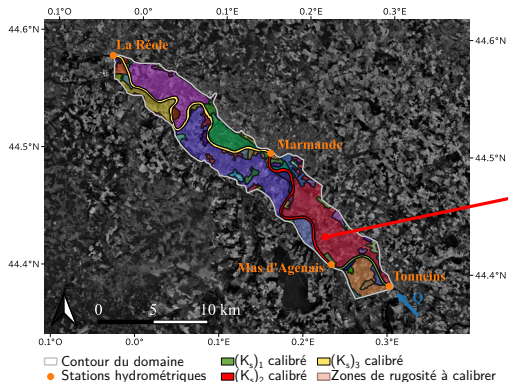
► Découpage par occupation du sol



Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

► Découpage par occupation du sol

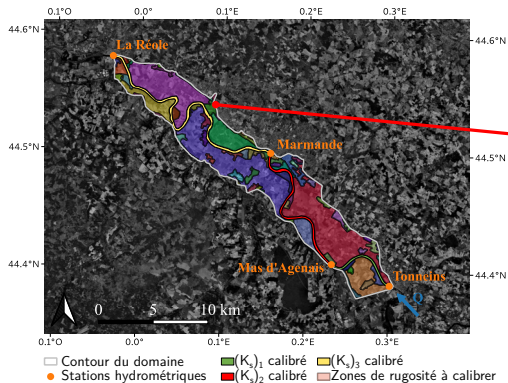


Champs cultivés avec végétation basse, $K_s = 15$ à $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Crédit : Google Maps

Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

► Découpage par occupation du sol

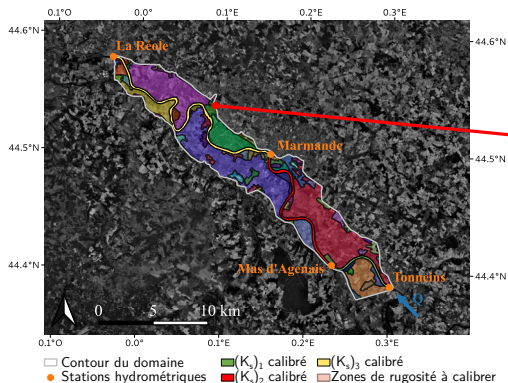


Zone faiblement urbanisée, $K_s = 8$ à $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Crédit : Google Maps

Coefficient de rugosité

Méthode actuelle de quantification des coefficients de rugosité

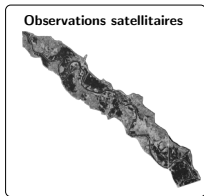
► Découpage par occupation du sol



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

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

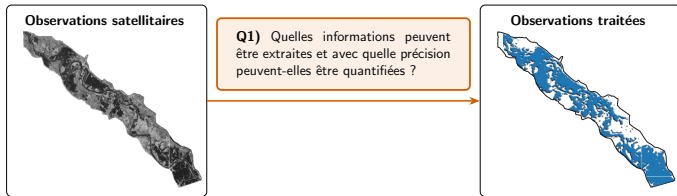
Questions de recherche



Questions de recherche



Questions de recherche



Questions de recherche

Observations satellitaires

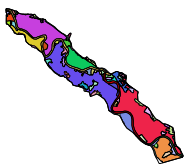


Q1) Quelles informations peuvent être extraites et avec quelle précision peuvent-elles être quantifiées ?

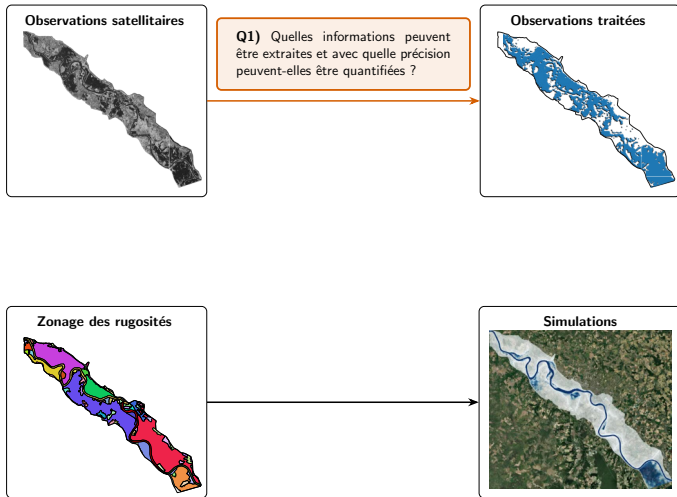
Observations traitées



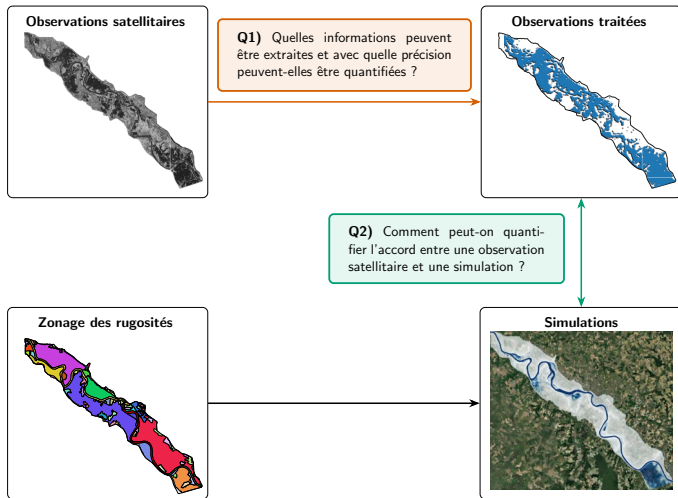
Zonage des rugosités



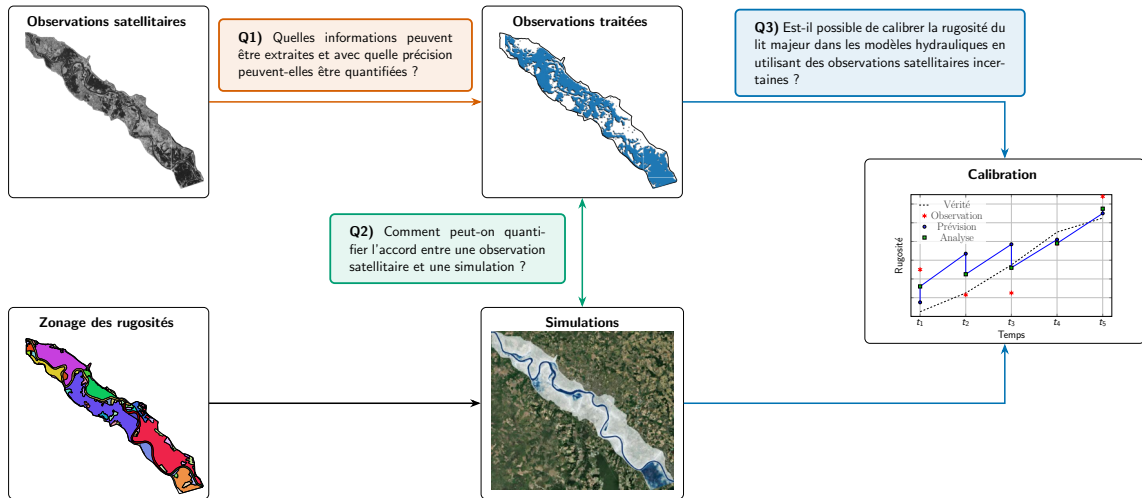
Questions de recherche



Questions de recherche



Questions de recherche



Question de recherche

Observations satellitaires



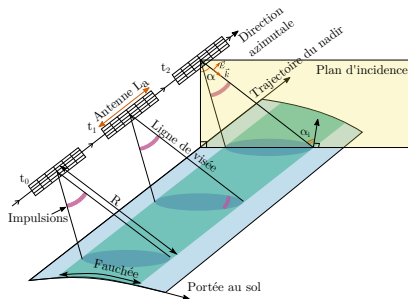
Q1) Quelles informations peuvent être extraites des observations satellitaires, et avec quelle précision peuvent-elles être quantifiées ?

Observations traitées



Radars à synthèse d'ouverture (SAR)

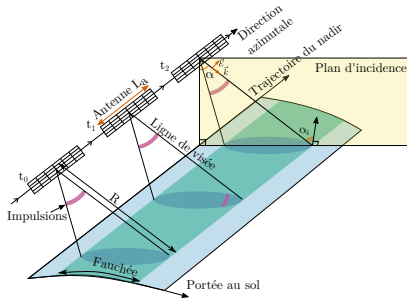
- ▶ Fonctionne jour et nuit dans n'importe quelles conditions météorologiques (ex : nuages)
- ▶ Données distribuées dans l'espace, avec une résolution spatiale élevée, mais peu fréquentes



Géométrie d'acquisition.

Radars à synthèse d'ouverture (SAR)

- ▶ Fonctionne jour et nuit dans n'importe quelles conditions météorologiques (ex : nuages)
- ▶ Données distribuées dans l'espace, avec une résolution spatiale élevée, mais peu fréquentes



Géométrie d'acquisition.

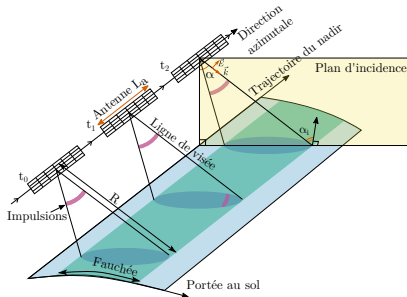


Image Sentinel-1.

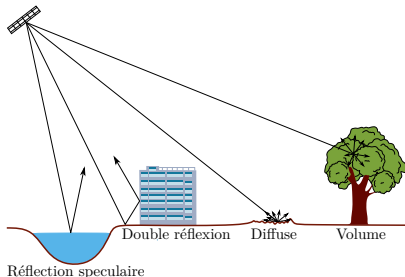
- ▶ Faible coefficient de rétrodiffusion $\sigma^0 \propto \frac{\text{Énergie reçue}}{\text{Énergie émise}}$ pour les zones inondées

Radars à synthèse d'ouverture (SAR)

- ▶ Fonctionne jour et nuit dans n'importe quelles conditions météorologiques (ex : nuages)
- ▶ Données distribuées dans l'espace, avec une résolution spatiale élevée, mais peu fréquentes



Géométrie d'acquisition.

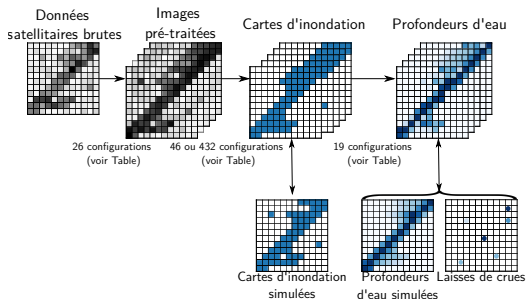


Mécanismes de rétrodiffusion sur différents types de cibles.

- ▶ Faible coefficient de rétrodiffusion $\sigma^0 \propto \frac{\text{Énergie reçue}}{\text{Énergie émise}}$ pour les zones inondées

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



Flux de traitement des images SAR.

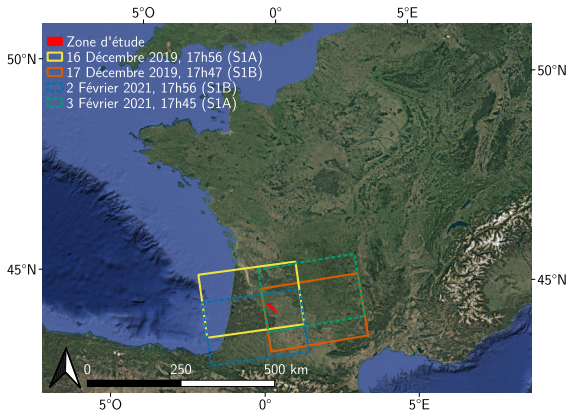
Catégorie	Méthode/Filtre	Hyperparamètre	Valeurs de l'hyperparamètre
Filtrage du chatoiement	Aucun prétraitement	-	-
	Médian	Taille de la fenêtre	{3; 5; 7}
	Lee	Taille de la fenêtre	{3; 5; 7}
	Lee Sigma	Taille de la fenêtre	{3; 5; 7}
		Probabilité cumulative (ζ)	{0,7; 0,8; 0,9}
	Frost	Taille de la fenêtre	{3; 5; 7}
Cartographie des inondations		Facteur d'amortissement (α)	{1; 2; 3}
	Basé sur Deep Learning (SAR2SAR)	Poids du modèle	Poids pré-entraînés (fixes)
	Seuillage global	Procédure de sélection du seuil	{Otsu, Kittler et Illingworth}
	Seuillage local	Taille minimale des tuiles en pixels	{100 × 100; 200 × 200}
		Seuil Ashman D	{1,9; 2,0; 2,1}
		Coefficient de Bhattacharyya	{0,98; 0,99}
Estimation de la profondeur d'eau		Rapport de surface	{0,05; 0,1; 0,15}
	Contour actif	Lissage du contour (α)	{0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5}
	Détection de changement	Méthode de classification	Seuillage global ou local
	Classification supervisée	Modèle	CNN ou Random Forest (poids fixes)
	Opérations morphologiques	Aire des trous en pixels	{10; 50; 100}
		Suppression des patches en pixels	{10; 50; 100}
Analyse de coupe transversale	Fw-DET	Seuil de pente	{aucun seuil; 5%; 10%}
		Nombre d'itérations de lissage	{3; 5; 10}
	FLEXTTH	Seuil de pente	{aucun seuil; 5%; 10%}
		Nombre maximal de voisins	{5; 10; 20}
		-	-

Résumé des méthodes utilisées et hyperparamètres associés.

Travert J.-P., Goeury C., Boyaval S., Bacchi V., Zaoui F. (2025). 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*. (Submitted)

Cas d'étude : Inondations sur la Garonne

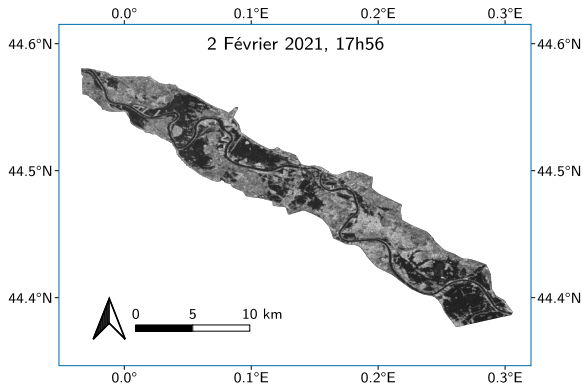
- ▶ 2 évènements d'inondation sur la Garonne en décembre 2019 et février 2021 avec 2 images SAR Sentinel-1 disponibles pour chacun



Zone d'étude et étendue des acquisitions Sentinel-1 lors des inondations de 2019 et 2021.

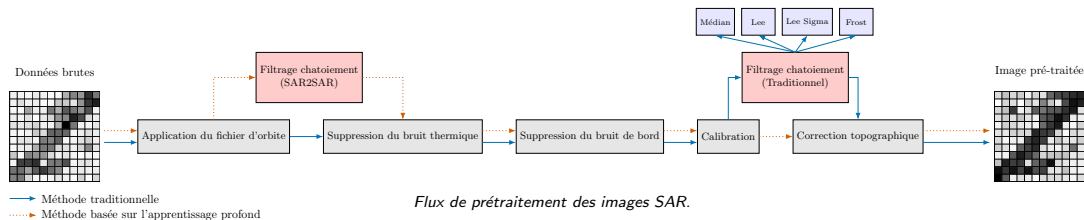
Cas d'étude : Inondations sur la Garonne

- ▶ 2 évènements d'inondation sur la Garonne en décembre 2019 et février 2021 avec 2 images SAR Sentinel-1 disponibles pour chacun

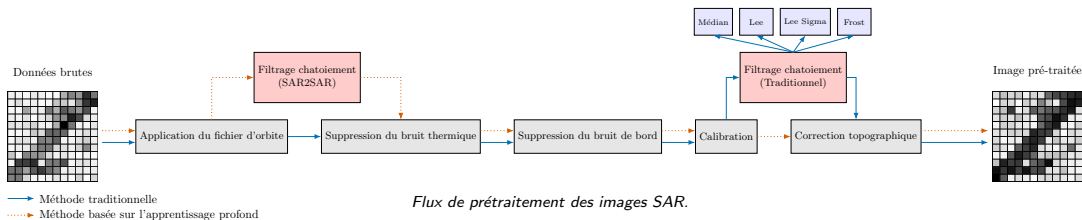


Acquisition Sentinel-1 sur la zone d'étude le 2 février 2021.

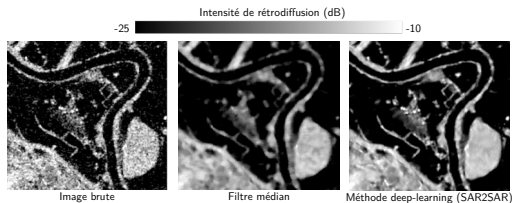
Traitement du chatoiemment



Traitement du chatoiemment

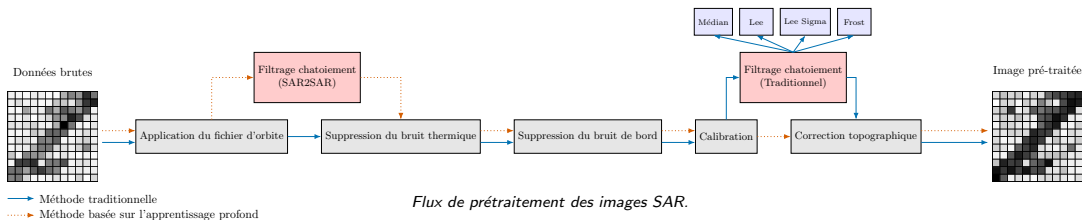


Flux de prétraitement des images SAR.

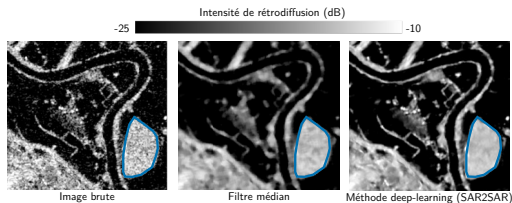


Application de différents filtres sur une image Sentinel-1.

Traitement du chatoiemment

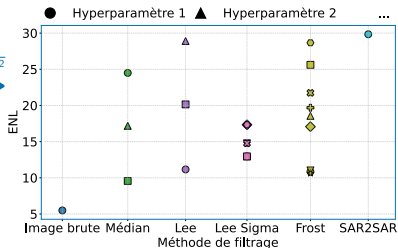


Flux de prétraitement des images SAR.



Application de différents filtres sur une image Sentinel-1.

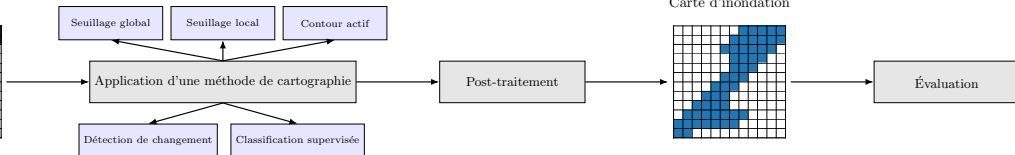
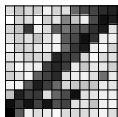
$$ENL = \frac{(\text{Mean } \sigma^0)^2}{(\text{Variance } \sigma^0)^2}$$



► Réduction de bruit impactée par le choix des méthodes et des hyperparamètres

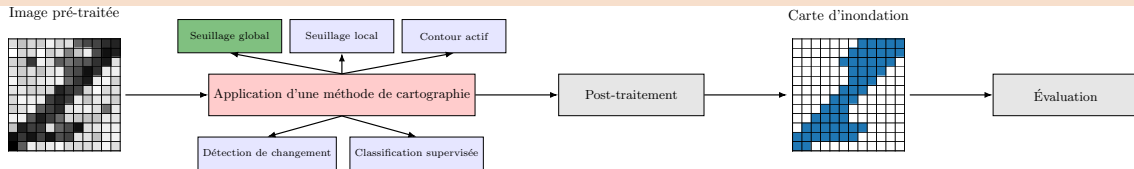
Génération de cartes d'inondation

Image pré-traitée



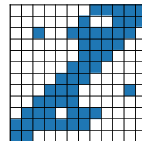
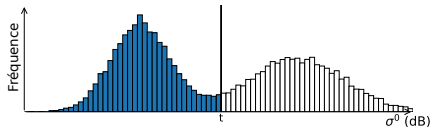
Cartographie des inondations à partir des images pré-traitées.

Génération de cartes d'inondation

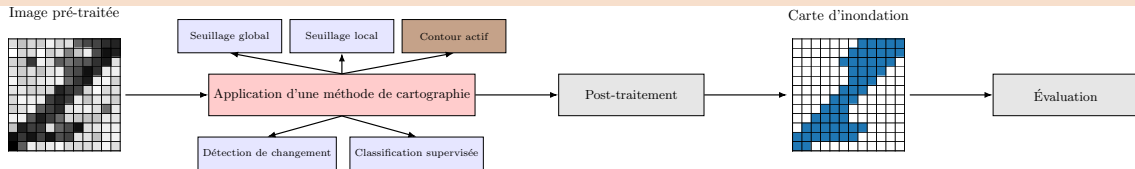


Cartographie des inondations à partir des images pré-traitées.

Seuillage global

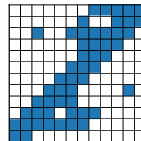
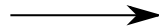
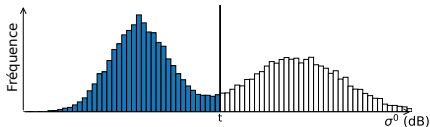


Génération de cartes d'inondation

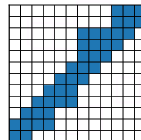
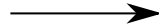
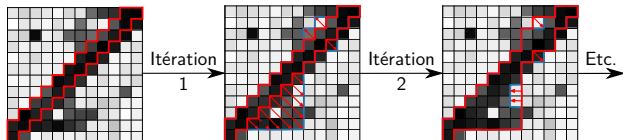


Cartographie des inondations à partir des images pré-traitées.

Seuillage global

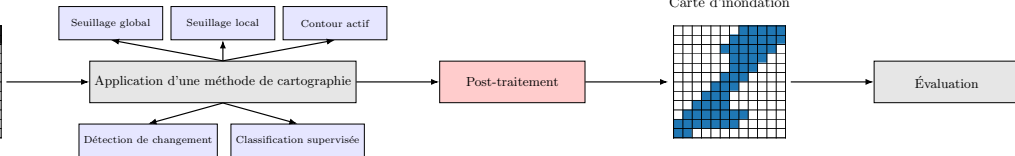
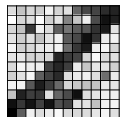
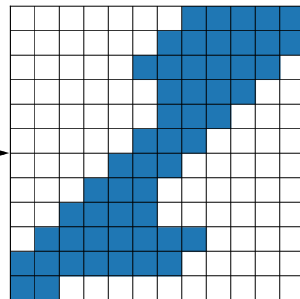
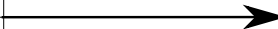
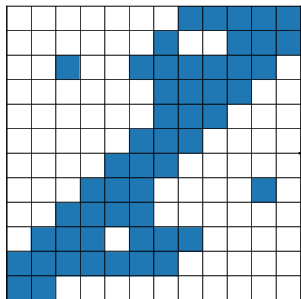


Contour actif



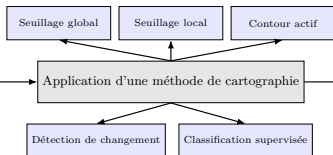
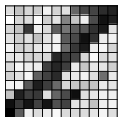
Génération de cartes d'inondation

Image pré-traitée

*Cartographie des inondations à partir des images pré-traitées.*

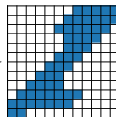
Génération de cartes d'inondation

Image pré-traitée



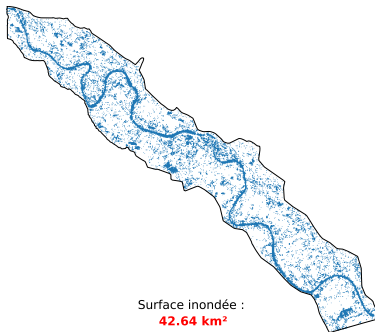
Post-traitement

Carte d'inondation



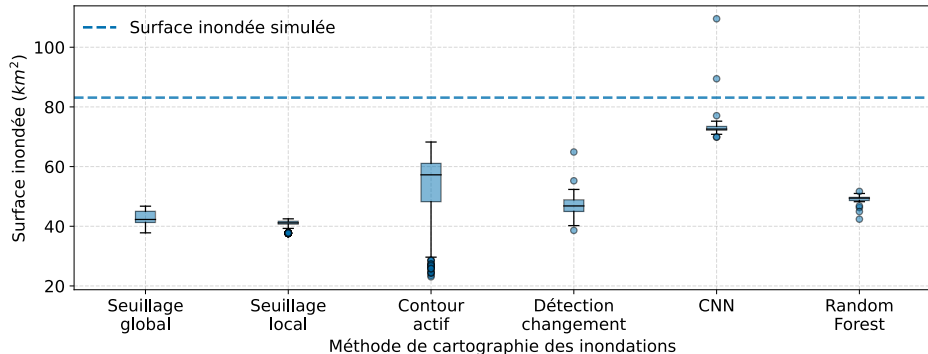
Évaluation

Cartographie des inondations à partir des images pré-traitées.



Surface inondée :
42.64 km²

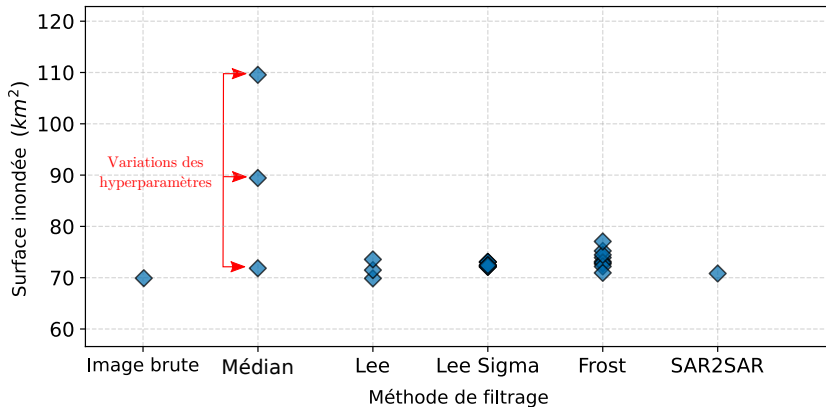
Analyse globale de variabilité des cartes générées



Variation de la surface inondée pour les cartes d'inondation générées.

- ▶ Variabilité de la surface inondée entre les méthodes de cartographie des inondations
- ▶ Influence des méthodes de prétraitement et hyperparamètres

Impact du prétraitement sur les cartes d'inondation



Impact du prétraitement sur la surface inondée avec une méthode de cartographie fixée (CNN).

► Impact du choix du filtre et de ses hyperparamètres sur la surface inondée

Conclusions

- ▶ Chaque étape (prétraitement, choix de méthode, hyperparamètres) influence fortement la qualité des cartes d'inondation
- ▶ Profondeurs d'eau incertaines, dues aux incertitudes sur la segmentation des cartes d'inondation

Conclusions

EVALUATING THE EFFECTS OF PREPROCESSING, METHOD SELECTION, AND HYPERPARAMETER TUNING ON SAR-BASED FLOOD MAPPING AND WATER DEPTH ESTIMATION

Jean-Paul Travert

EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France
Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV), ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D, Chatou, France
jean-paul.travert@edf.fr

Cédric Goeury

EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France
Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV), ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D, Chatou, France

Sébastien Boyaval

Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV), ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D, Chatou, France
Inria, Paris, France

Vito Bacchi

EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France

Fabrice Zaoui

EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France

ABSTRACT

Flood mapping and water depth estimation from Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery are crucial for calibrating and validating hydraulic models. This study uses SAR imagery to evaluate various preprocessing (especially speckle noise reduction), flood mapping, and water depth estimation methods. The impact of the choice of method at different steps and its hyperparameters is studied by considering an ensemble of preprocessed images, flood maps, and water depth fields.

The evaluation is conducted for two flood events on the Garonne River (France) in 2019 and 2021, using hydrodynamic simulations and in-situ observations as reference data. Results show that the choice of speckle filter alters flood extent estimations with variations of several square kilometers. Furthermore, the selection and tuning of flood mapping methods also affect performance. While supervised methods outperformed unsupervised ones, tuned unsupervised approaches (such as local thresholding or change detection) can achieve comparable results. The compounded uncertainty from preprocessing and flood mapping steps also introduces high variability in the water depth field estimates.

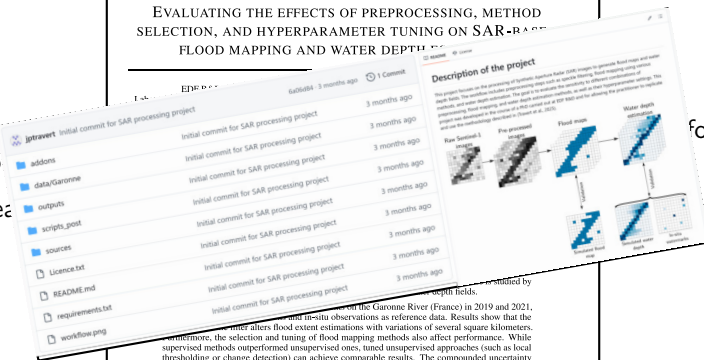
- ▶ Chaque étape (prétraitement des cartes d'inondation)
- ▶ Profondeurs d'eau incertaines

influence fortement la qualité
de la
estimation des cartes d'inondation

Conclusions

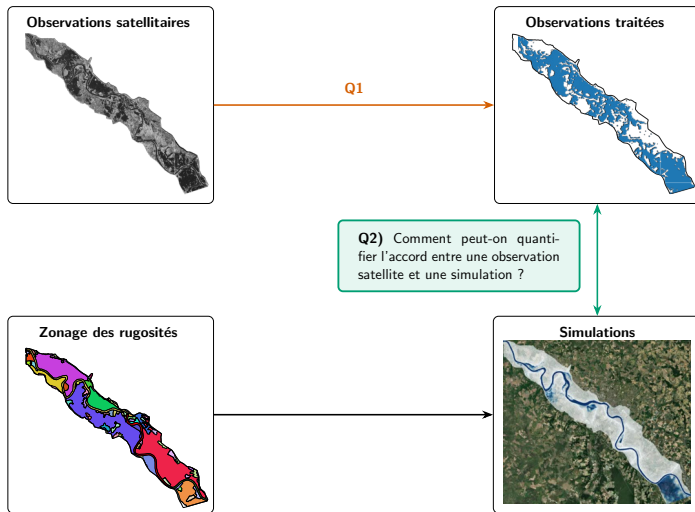
EVALUATING THE EFFECTS OF PREPROCESSING, METHOD SELECTION, AND HYPERPARAMETER TUNING ON SAR-BASED FLOOD MAPPING AND WATER DEPTH ESTIMATION

- ▶ Chaque étape (prétraitement, sélection de la méthode, réglage des hyperparamètres) des cartes d'inondation
- ▶ Profondeurs d'eau



fortement la qualité
des cartes d'inondation

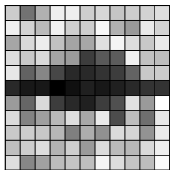
Question de recherche



Comparaison cdes artes d'inondation observées et simulées

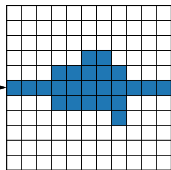
Observation

Observation satellitaire brute



Traitement /
Seuillage

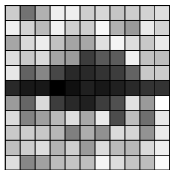
Carte d'inondation O



Comparaison cdes artes d'inondation observées et simulées

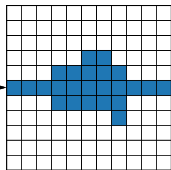
Observation

Observation satellitaire brute



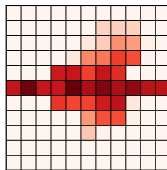
Traitement /
Seuillage

Carte d'inondation O



Simulations

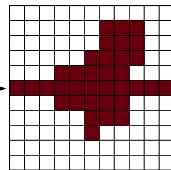
Profondeurs d'eau



Seuillage

$h > 10 \text{ cm}$

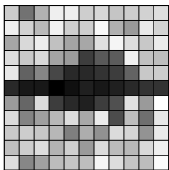
Carte d'inondation S



Comparaison cdes artes d'inondation observées et simulées

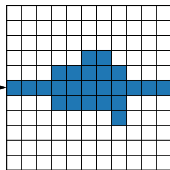
Observation

Observation satellitaire brute



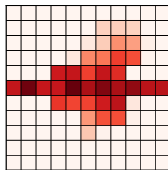
Traitement /
Seuillage

Carte d'inondation O



Simulations

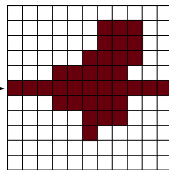
Profondeurs d'eau



Seuillage

$h > 10 \text{ cm}$

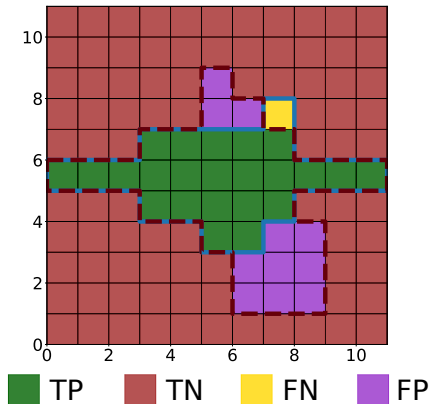
Carte d'inondation S



Quelle est la meilleure mesure de performance $\mathcal{L}$ pour comparer O et S ?

Mesures de performance pixel à pixel

— Carte d'inondation O - - - Carte d'inondation S



Exemples de mesures de performance pixel à pixel.

Nom	Évaluation
False positive rate (FPR)/Precision (F)	$FP / (FP + TN)$
True positive rate (TPR)/Recall (H)	$TP / (TP + FN)$
Positive predicted value (PPV)	$TP / (TP + FP)$
Negative predicted value (NPV)	$TN / (FN + TN)$
Peirce skill score (PSS)	H-F
Accuracy (ACC)	$(TP + TN) / (TP + FP + TN + FN)$
Fβ-score	$(1 + \beta^2) \cdot (H \cdot F) / (\beta^2 \cdot F + H)$
Matthews correlation coefficient (MCC)	$\frac{TP \cdot TN - FP \cdot FN}{\sqrt{(TP + FP) \cdot (TP + FN) \cdot (TN + FP) \cdot (TN + FN)}}$
Bias (B)	$(TP + FP) / (TP + FN)$
Critical success index (CSI)	$TP / (TP + FP + FN)$
$F^{<3>}$	$(TP - FN) / (TP + FP + FN)$
$F^{<4>}$ / Measure of fit	$(TP - FP) / (TP + FP + FN)$
Cohen's Kappa formula (κ)	$\frac{2 \cdot (TP \cdot TN - FN \cdot FP)}{(TP + FP) \cdot (FP + TN) + (TP + FN) \cdot (FN + TN)}$

Comparaison de cartes d'inondation observées et simulées pixel à pixel.

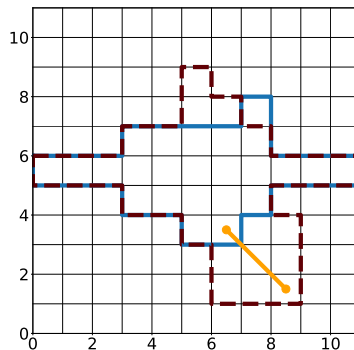
Mesures de performance “géométriques”

- Comparaison de contours, de textures, de formes, etc. Exemple : Distance de Hausdorff

Liste des mesures de performance géométrique évaluées.

Nom	Type de méthode
Distance de Hausdorff (d_H)	Basée sur la distance
Distance de Hausdorff modifiée (d_{MH})	Basée sur la distance
Analyse procrustéenne (P^2)	Alignement de formes
Distance de Wasserstein en tranches (W_2)	Basée sur les distributions
Information mutuelle normalisée (NMI)	Théorie de l'information
Flood Skill Score (FSS_n)	Voisinage

— Carte d'inondation O — Carte d'inondation S



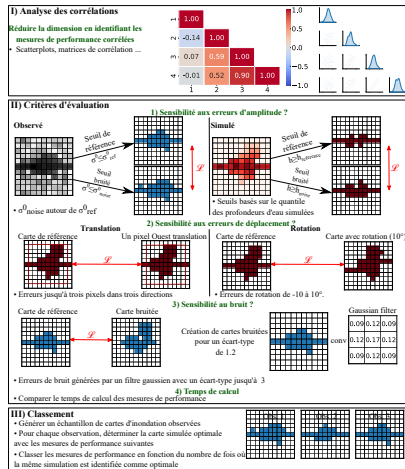
Méthodologie de sélection de mesures de performance

1. Analyse des corrélations

2. Critères d'évaluation

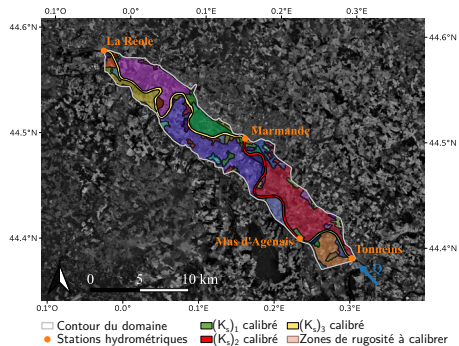
- Sensibilité aux erreurs sur l'étendue d'inondation
- Sensibilité aux erreurs de déplacement (erreurs de translation / rotation de géoréférencement du satellite)
- Sensibilité au bruit (ajout d'un bruit gaussien sur l'observation)
- Temps de calcul

3. Classement des mesures de performance



Cas test : Crue de la Garonne

- Simulations avec K_s variable sur la plaine d'inondation



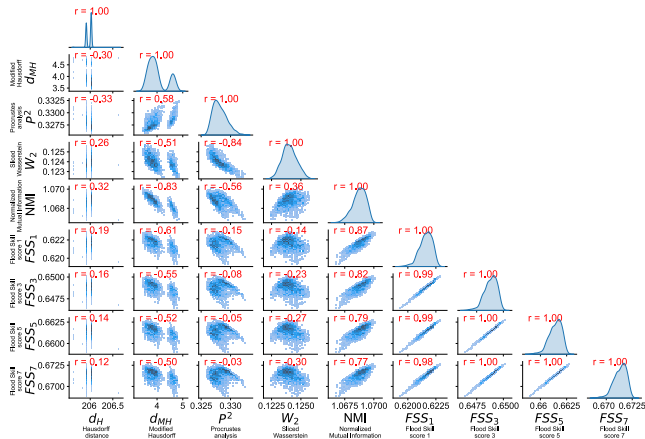
Simulation
T = 140 heures



Observation
T = 209 heures



1. Analyse des corrélations

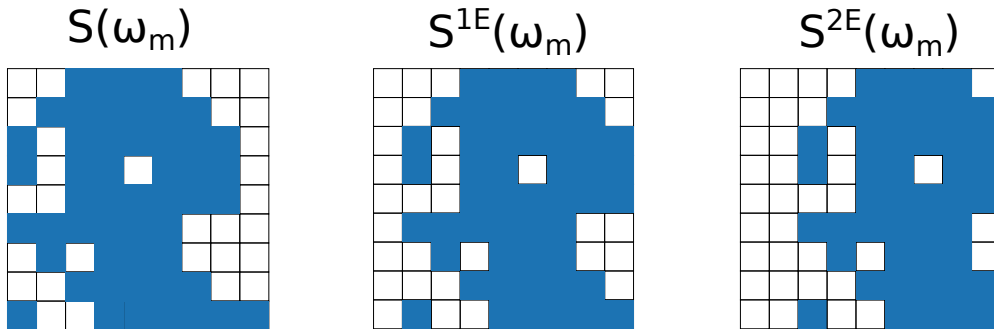


► Réduction du nombre de mesures de performance

2. Exemple de critère : Sensibilité aux translations

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

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

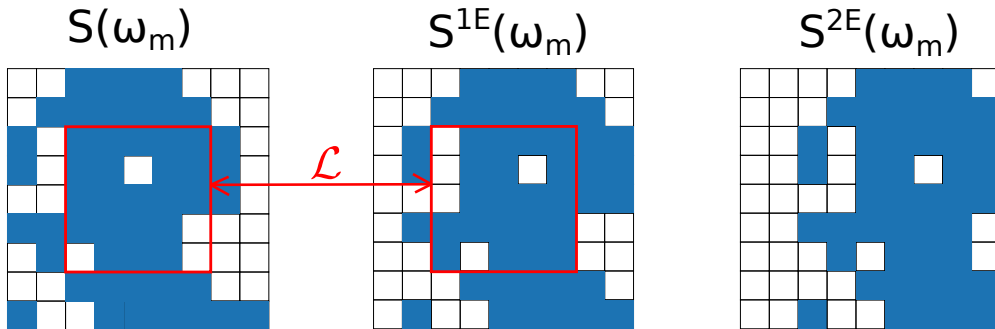


Exemple de comparaison de cartes d'inondation simulées pour une translation vers l'Est.

2. Exemple de critère : Sensibilité aux translations

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

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

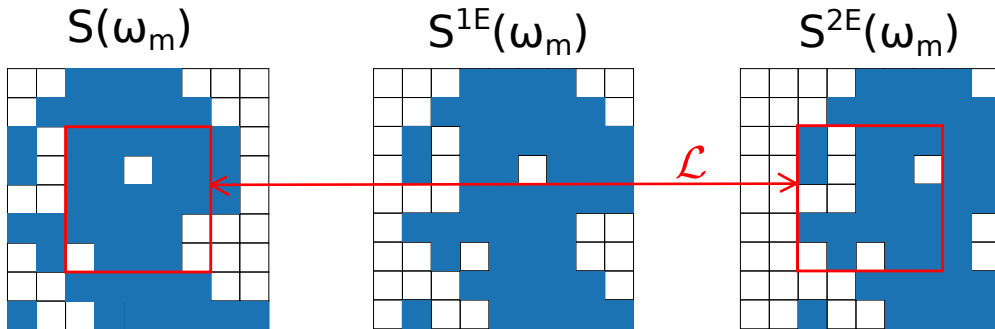


Exemple de comparaison de cartes d'inondation simulées pour une translation vers l'Est.

2. Exemple de critère : Sensibilité aux translations

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

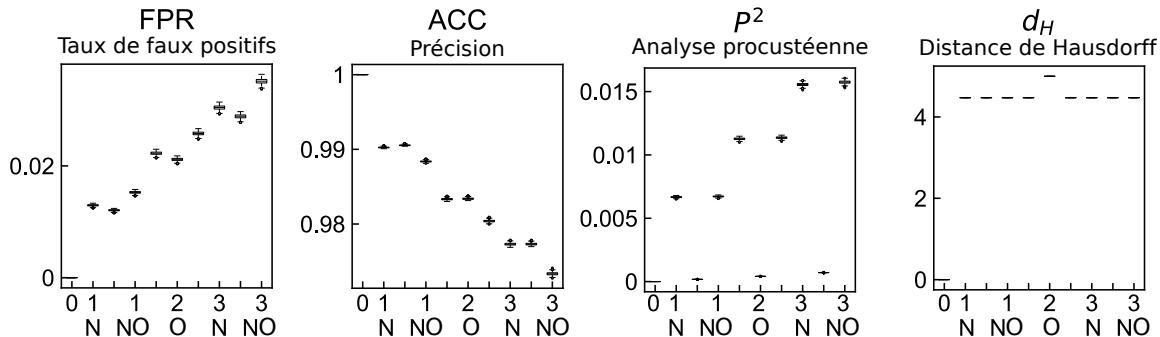
⇒ Étude de sensibilité de $\mathcal{L}$ aux erreurs de translations



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

2. Sensibilité aux translations - Résultats

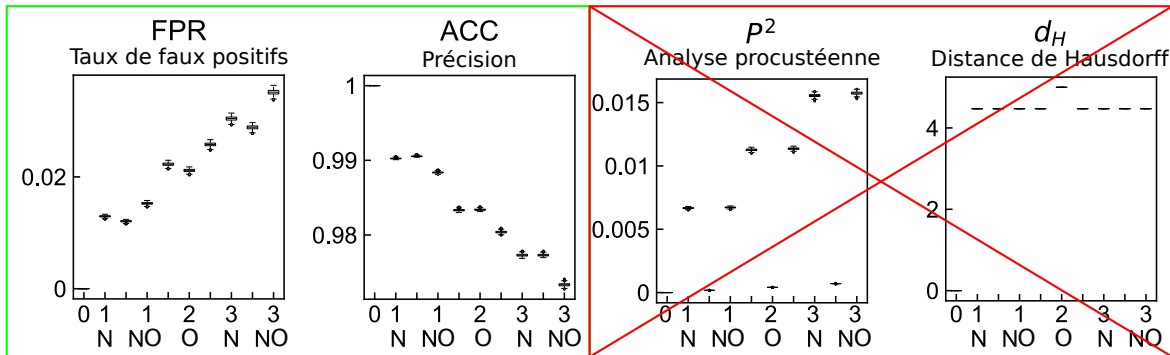
► Exemple avec 4 mesures de performance



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 traduites (1 à 3 pixels dans les directions nord (N), nord-ouest (NO) et ouest (O)).

2. 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 traduites (1 à 3 pixels dans les directions nord (N), nord-ouest (NO) et ouest (O)).

Résumé des critères

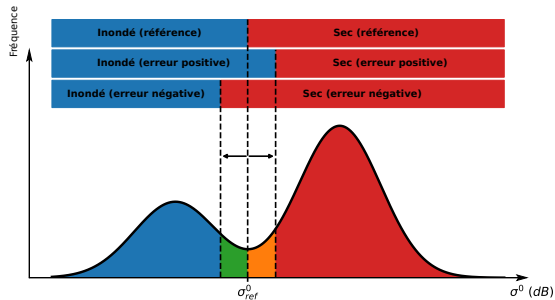
Résumé de la sélection des mesures de performance pour les comparaisons pixel à pixel et géométriques. $\times$ = rejeté par le critère, $\checkmark$ = accepté par le critère, et $\sim$ = intermédiaire.

Pixel à pixel	FPR	TPR	PPV	NPV	PSS	ACC	$\beta = 1$	$\beta = 1.5$	$\beta = 2$	MCC	B	CSI	$F^{<3>}$	$F^{<4>}$	κ
Amplitude	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\sim$	$\sim$	$\sim$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\sim$	$\sim$	$\checkmark$	$\checkmark$
Translation	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
Rotation	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
Bruit	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
Temps	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
Géométrique	d_H	d_{MH}	P^2	W_2	NMI	FSS_1	FSS_3	FSS_5	FSS_7						
Amplitude	$\checkmark$	$\checkmark$	$\sim$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\sim$	$\sim$	$\sim$	$\sim$						
Translation	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$						
Rotation	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$						
Bruit	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$						
Temps	$\checkmark$	$\checkmark$	$\sim$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$						

- Seulement 7 mesures de performance sont retenues, puis réduites à 6 en tenant compte des corrélations

3. Classement des mesures de performance

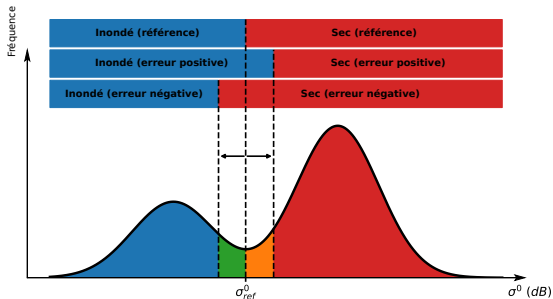
- **But** : identifier la mesure de performance $\mathcal{L}$ la plus robuste aux erreurs d'extraction des cartes d'inondation.



Effet du choix du seuil σ^0 sur l'extraction d'une carte d'inondation.

3. Classement des mesures de performance

- **But** : identifier la mesure de performance $\mathcal{L}$ la plus robuste aux erreurs d'extraction des cartes d'inondation.



Effet du choix du seuil σ^0 sur l'extraction d'une carte d'inondation.

- Pour chaque carte d'inondation $O_j^{\sigma^0}$, on retient la **simulation la plus proche** :

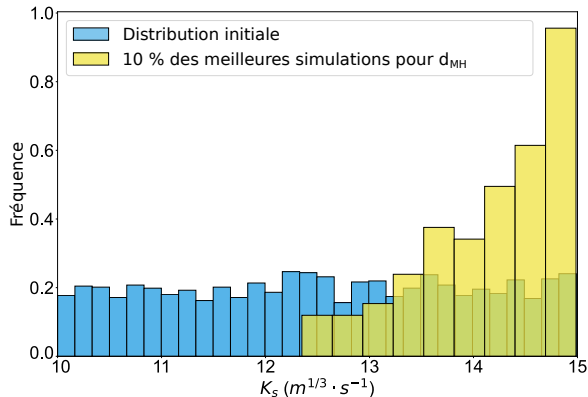
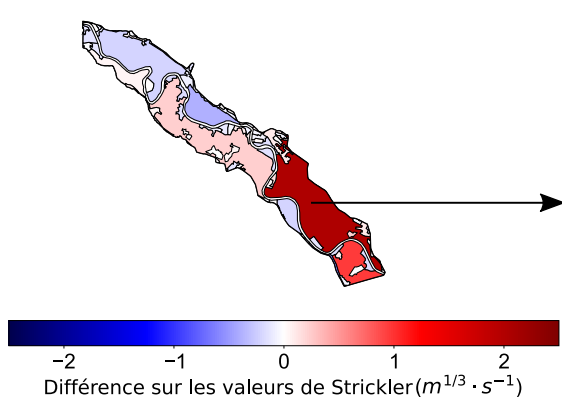
$$E_j = \min_{1 \leq m \leq M} |\mathcal{L}(O_j^{\sigma^0}, S(\omega_m)) - \mathcal{L}(O_j^{\sigma^0}, O_j^{\sigma^0})|$$

- On compte le nombre de fois où une même simulation est optimale :

$$n_{max} = \max_{1 \leq j \leq 100} |\{E_{j'} \mid E_{j'} = E_j\}|$$

	$F^{<4>}$	d_{MH}	κ	PSS	MCC	NMI
n_{max}	76	100	96	60	95	100

Analyse spatialisée des rugosités



- Différences de rugosité entre la distribution des simulations “optimales” et la distribution initiale

Conclusions principales

- ▶ Développement d'une méthodologie pour sélectionner et classer les mesures de performance
- ▶ Application sur un cas réel
- ▶ Méthodologie générique à tester sur d'autres événements, modèles et types d'observations pour définir des recommandations plus générales
- ▶ Perspectives : généralisation de la méthode pour d'autres variables (ex., profondeurs d'eau)

Conclusions principales

- Développement d'un
- Application sur un c
- Méthodologie généri
- définir des recomma
- Perspectives : génér



Water Resources Research[®]

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2024WR038506

Key Points:

- A methodology is reported to select a performance measure; for numerical comparison between flood models and satellite observation data
- Possible performance measures are ranked according to their robustness with regard to satellite observation errors
- The methodology was tested in a real flood case study, and was effective in selecting the most relevant performance measures

Supporting Information:
Supporting Information may be found in the online version of this article.

Correspondence to:
J.-P. Travers,
jean-paul.travers@edf.fr

Citation:
— — — — —

Evaluation of Performance Measures for Comparing Flood Models With Satellite Observations

J.-P. Travers^{1,2} , S. Boyaval^{2,3} , C. Goeury^{1,2} , V. Bacchi¹ , and F. Zaoui¹ 

¹EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France, ²Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV), ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D, Chatou, France, ³Inria, Paris, France

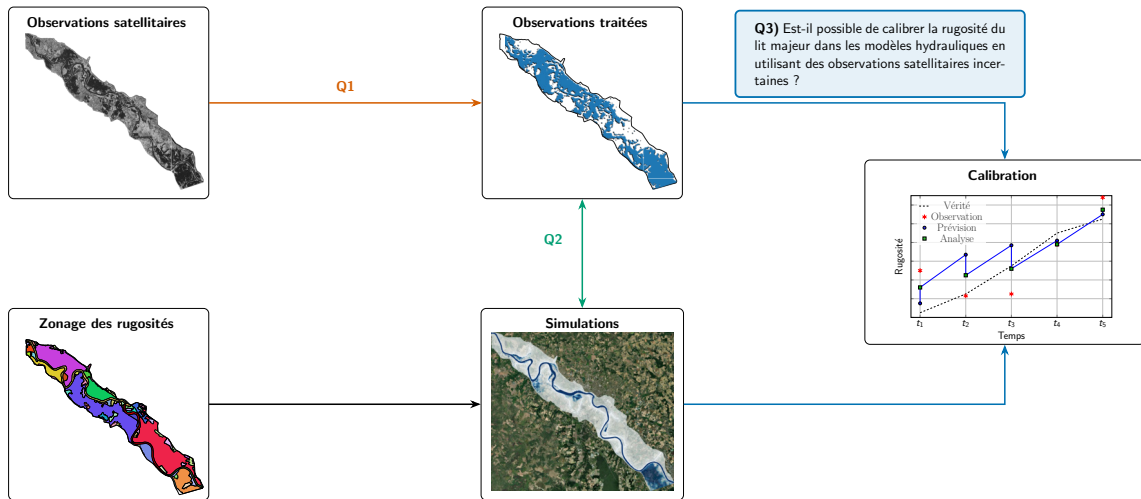
Abstract Selecting appropriate performance measures is crucial for calibrating numerical flood models with satellite images, as differences between performance measures can significantly impact model predictions. The present study reports a step-by-step methodology to guide the selection of performance measures to compare numerical simulations of a flood event with a satellite image, for purposes of model calibration or validation. Faced with a set of performance measures, practitioners need to assess which are most suitable for comparing observed and simulated flood maps. First, a correlation analysis was conducted to determine the relationships between various performance measures. A series of criteria were then applied to evaluate the sensitivity of the performance measures with respect to flood extent, satellite characteristics (position and orientation), and errors in measurement or processing (raw satellite values or extraction of flood maps). The performance measures meeting the most criteria were then ranked based on the identifiability of parameter values with regard to observation errors. The methodology is discussed numerically in the context of a single flood event (on the Garonne River in France in February 2021), using a distribution of water depths simulated from a shallow-water model (parameterized by an uncertain friction field). The methodology was shown to be useful in the study case in identifying 4 performance measures out of 24. The proposed methodology is intended to be generic, and therefore, applicable to any flood model or flood event.

es de performance

s d'observations pour

profondeurs d'eau)

Question de recherche

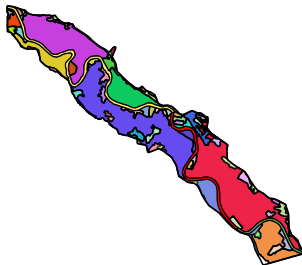


Rappel des connaissances

Modèle numérique

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -g h \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g Q^2}{K_s^2 h^{7/3}} + \frac{h}{\rho} F_x + \nabla \cdot (h \nu_e \nabla u) \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -g h \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g Q^2}{K_s^2 h^{7/3}} + \frac{h}{\rho} F_y + \nabla \cdot (h \nu_e \nabla v) \end{cases}$$

- K_s seul paramètre incertain du modèle (bathymétrie, topographie, débit en entrée sont fixés)

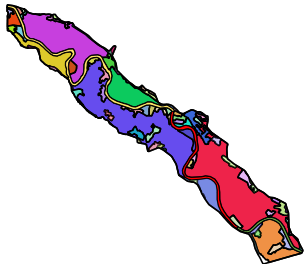


Rappel des connaissances

Modèle numérique

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

- K_s seul paramètre incertain du modèle (bathymétrie, topographie, débit en entrée sont fixés)



Observations satellitaires

- **Cartes d'inondation** issues d'images SAR
- **Profondeurs d'eau** dérivées (MNT + cartes d'inondation)

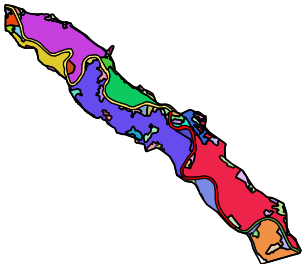


Rappel des connaissances

Modèle numérique

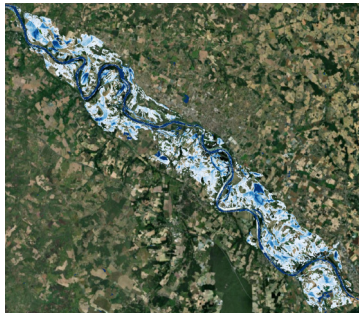
$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gQ^2}{K_s^2 h^{7/3}} + \frac{h}{\rho}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

- K_s seul paramètre incertain du modèle (bathymétrie, topographie, débit en entrée sont fixés)

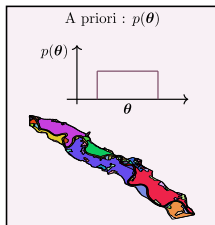


Observations satellitaires

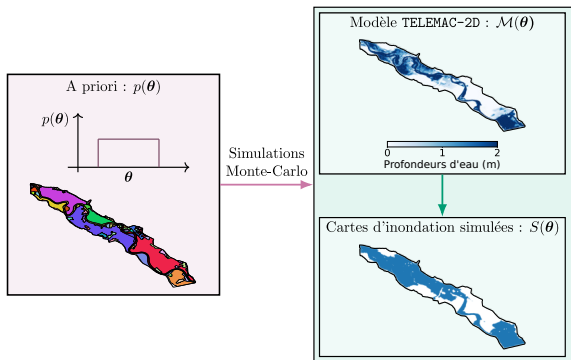
- **Cartes d'inondation** issues d'images SAR
- **Profondeurs d'eau** dérivées (MNT + cartes d'inondation)



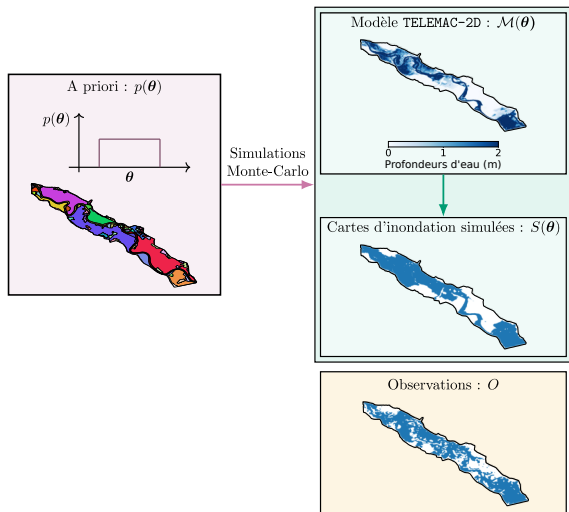
Méthodologie de calibration



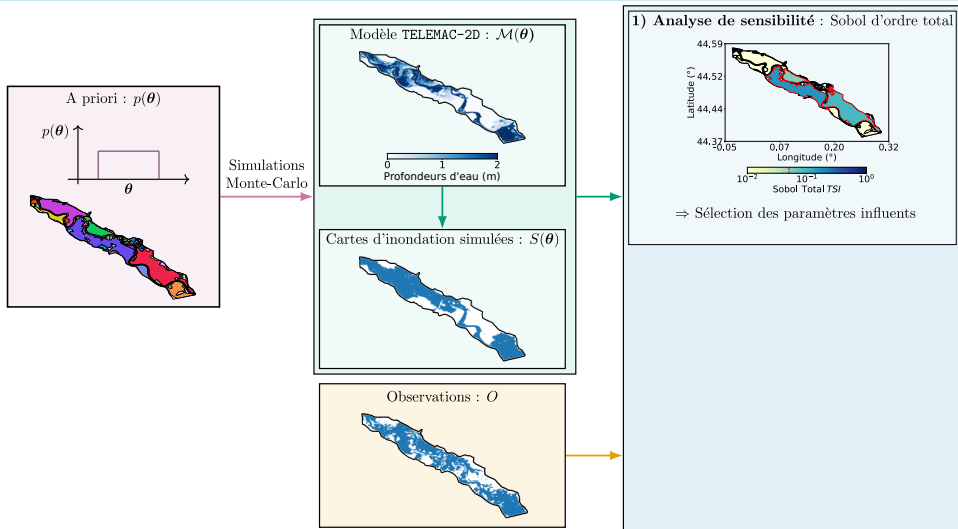
Méthodologie de calibration



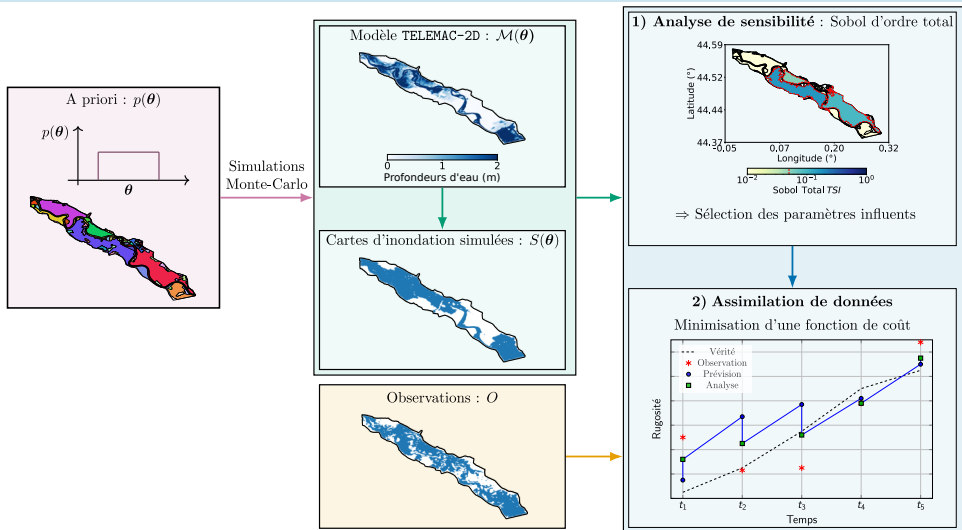
Méthodologie de calibration



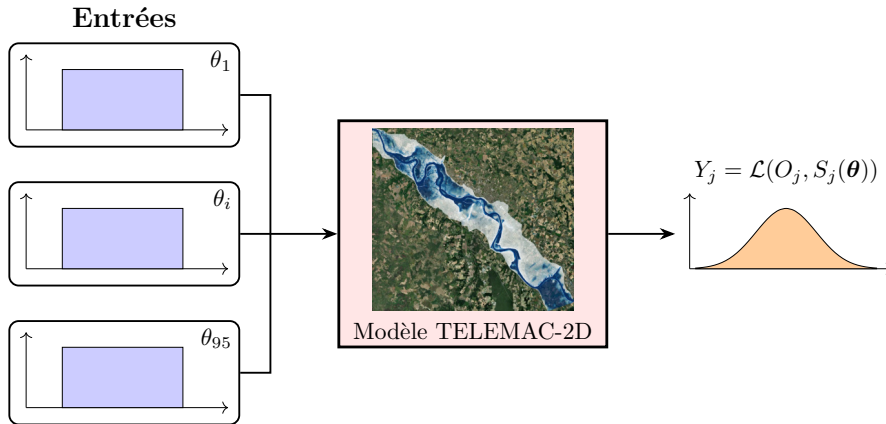
Méthodologie de calibration



Méthodologie de calibration

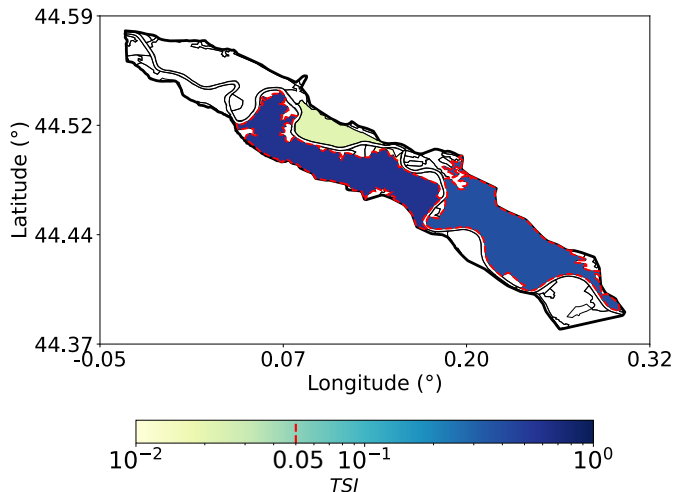


Analyse de sensibilité



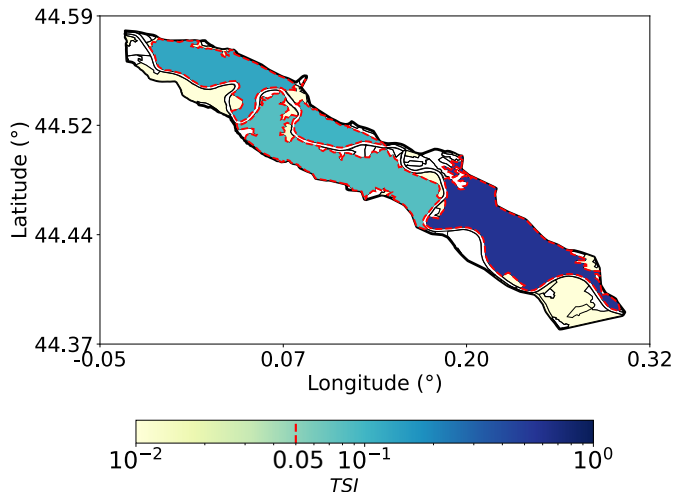
- But : Quantifier l'impact de chaque entrée sur la sortie $Y_j = \mathcal{L}(O_j, S_j(\theta))$
- Méthode de Sobol' basée sur la décomposition de la variance de la sortie

Analyse de sensibilité



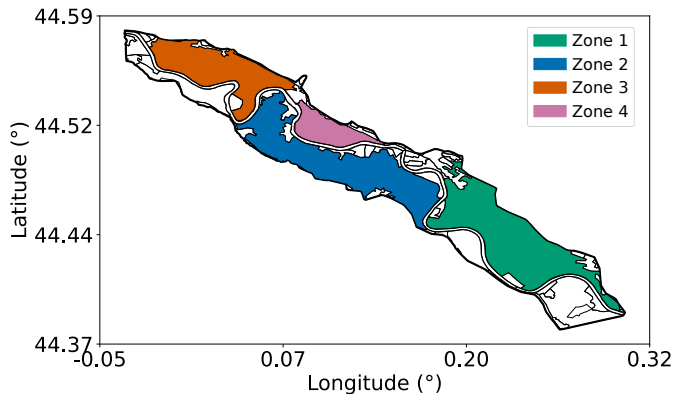
Sobol' d'ordre totaux (TSI) pour la première observation et $\mathcal{L}$ = distance de Hausdorff modifiée.

Analyse de sensibilité



Sobol' d'ordre totaux (TSI) pour la seconde observation et $\mathcal{L}$ = distance de Hausdorff modifiée.

Analyse de sensibilité



Zones à calibrer en utilisant la distance de Hausdorff modifiée.

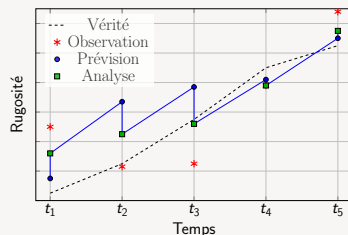
⇒ Réduction du nombre de paramètres

Calibration automatique

Assimilation de données variationnelles

- ▶ Minimisation d'une fonction coût :

$$\begin{cases} J(\theta) = J_b(\theta) + J_o(\theta) \\ J_b(\theta) = \frac{1}{2}(\theta - \theta^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\theta - \theta^b) \\ J_o(\theta) = \omega_1 \mathcal{L}(O_1, S_1(\theta))^2 + \omega_2 \mathcal{L}(O_2, S_2(\theta))^2 \end{cases}$$

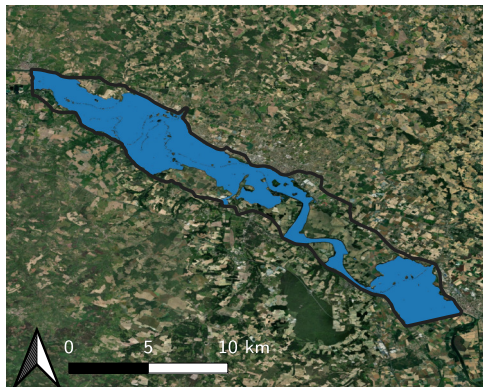


- ▶ $[O_1, O_2]$ cartes d'inondation observées réelles ou générées à partir d'une expérience jumelle et $[S_1(\theta), S_2(\theta)]$ les cartes d'inondation simulées aux deux temps d'observation
- ▶ $\mathbf{B} = \sigma^b \mathbf{I}$ la matrice de covariance d'erreur à priori, ω_1 et ω_2 ($\omega_1 = \omega_2$) des facteurs de pondération sur les erreurs d'observation

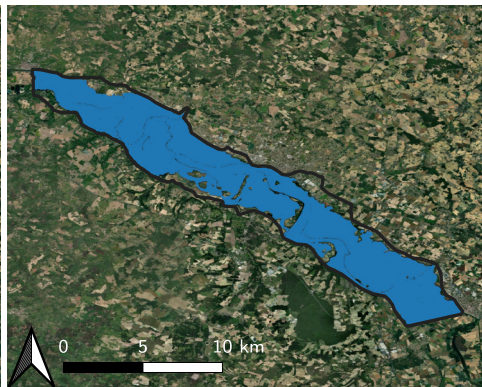
Étape 1 : Validation de la méthodologie sur une expérience jumelle

Cas synthétique : Assimilation de cartes d'inondation simulées à θ fixé

Observation 1 (O_1)

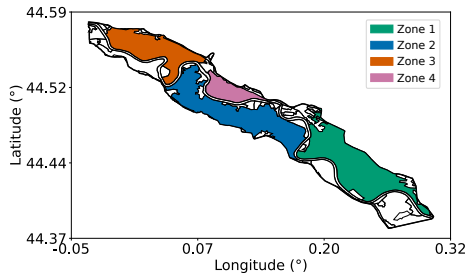


Observation 2 (O_2)

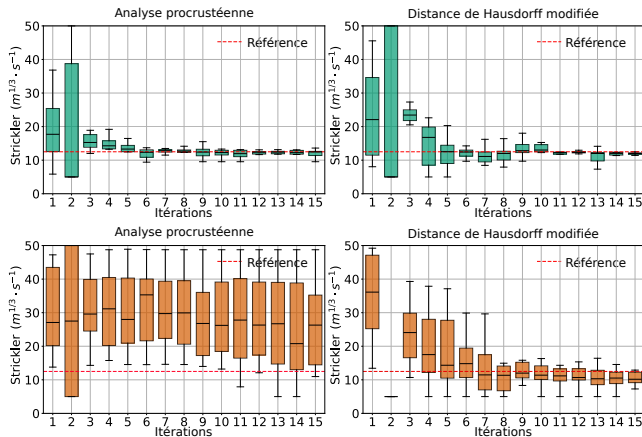
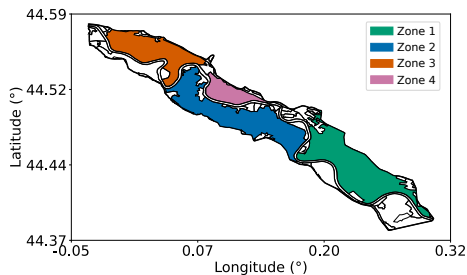


► Observations parfaites sans bruit : $\sigma^b \gg \omega$

Étape 1 : Validation de la méthodologie sur une expérience jumelle



Étape 1 : Validation de la méthodologie sur une expérience jumelle

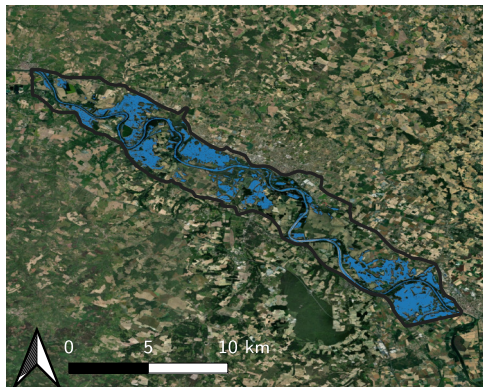


► Impact du choix de $\mathcal{L}$

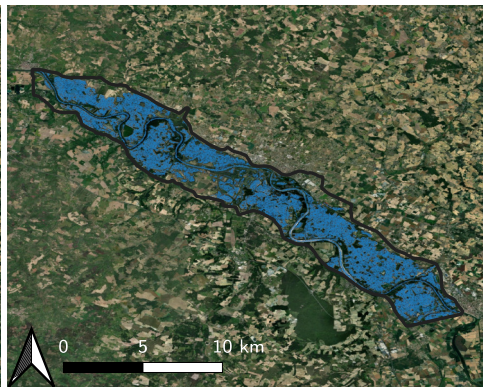
Étape 2 : Application avec de réelles observations

Cas réel : Assimilation de cartes d'inondation extraites avec une méthode de seuillage

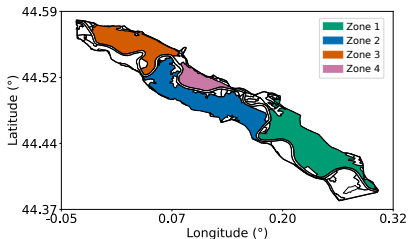
Observation 1 (O_1)



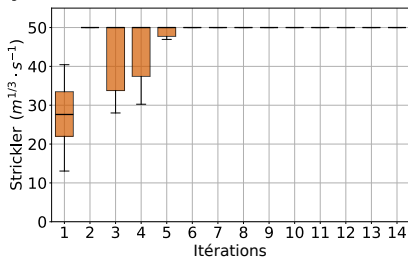
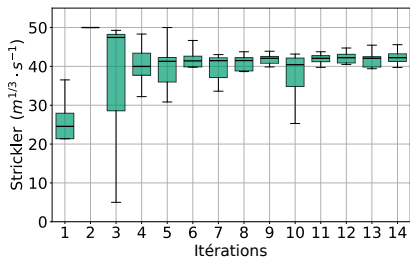
Observation 2 (O_2)



Étape 2 : Application avec de réelles observations

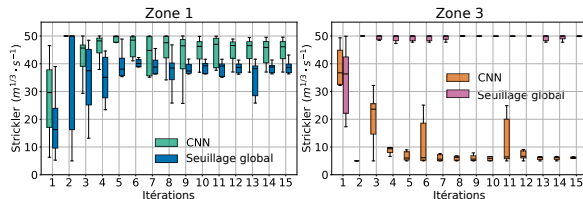


- ▶ Rugosités très éloignées des valeurs à priori ou sur les bornes
- ▶ Besoin de prendre en compte les erreurs d'observation et de modèle



Tests de sensibilité

- Influence du choix de l'observation extraite ($[O_1, O_2]$ obtenues avec une autre méthode d'extraction)



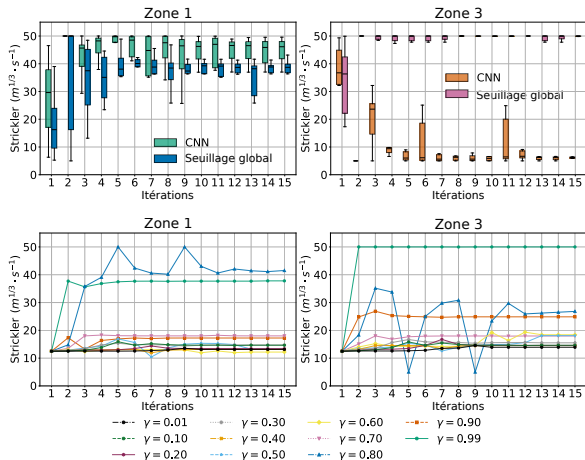
Tests de sensibilité

- Influence du choix de l'observation extraite ($[O_1, O_2]$ obtenues avec une autre méthode d'extraction)

- Influence des erreurs d'observation à travers le facteur de pondération ω

$$\frac{\text{Std}(J_b(\theta))}{\text{Std}(J_o(\theta))} = \frac{\gamma}{1 - \gamma},$$

$$\frac{1 - \gamma}{\gamma(\sigma^b)^2\omega} = \frac{\text{Std}(\mathcal{L}(O_1, S_1(\theta))^2 + \mathcal{L}(O_2, S_2(\theta))^2)}{\text{Std}(\|(\theta - \theta^b)\|^2)},$$



Tests de sensibilité

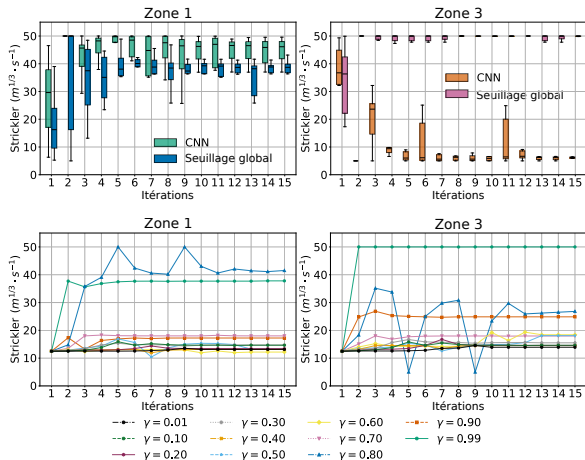
- Influence du choix de l'observation extraite ($[O_1, O_2]$ obtenues avec une autre méthode d'extraction)

- Influence des erreurs d'observation à travers le facteur de pondération ω

$$\frac{\text{Std}(J_b(\theta))}{\text{Std}(J_o(\theta))} = \frac{\gamma}{1 - \gamma},$$

$$\frac{1 - \gamma}{\gamma(\sigma^b)^2\omega} = \frac{\text{Std}(\mathcal{L}(O_1, S_1(\theta))^2 + \mathcal{L}(O_2, S_2(\theta))^2)}{\text{Std}(\|(\theta - \theta^b)\|^2)},$$

- Tests d'assimilation avec des modèles plus incertains (lit mineur non fixé)



Impact de l'assimilation

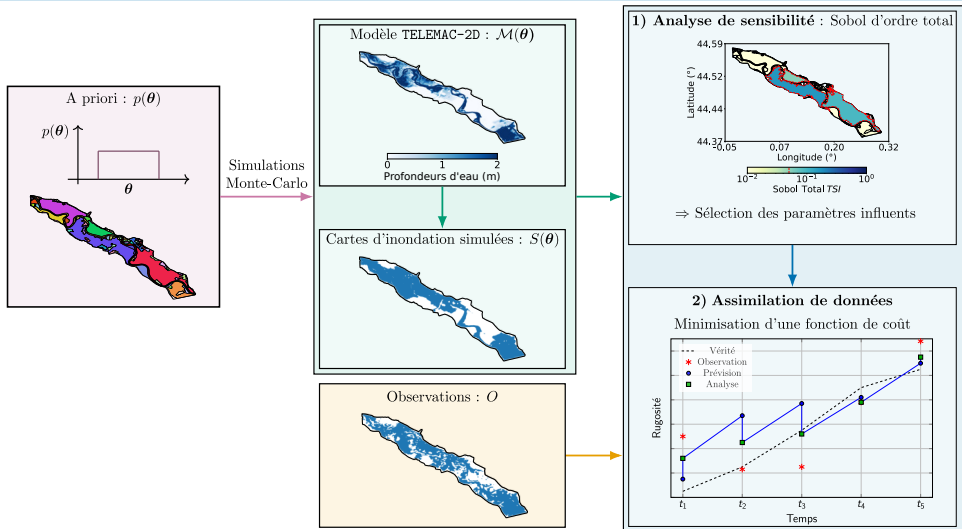
Avant assimilation



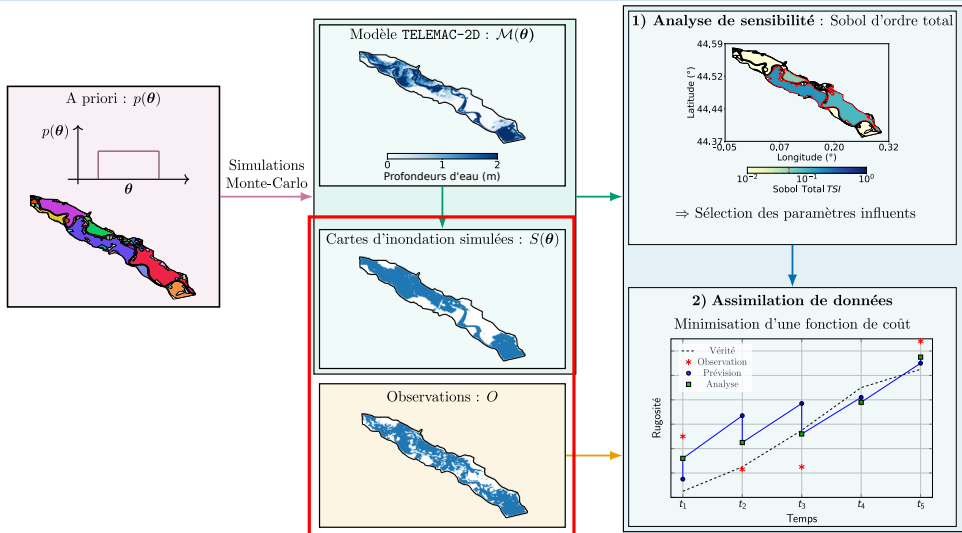
Après assimilation



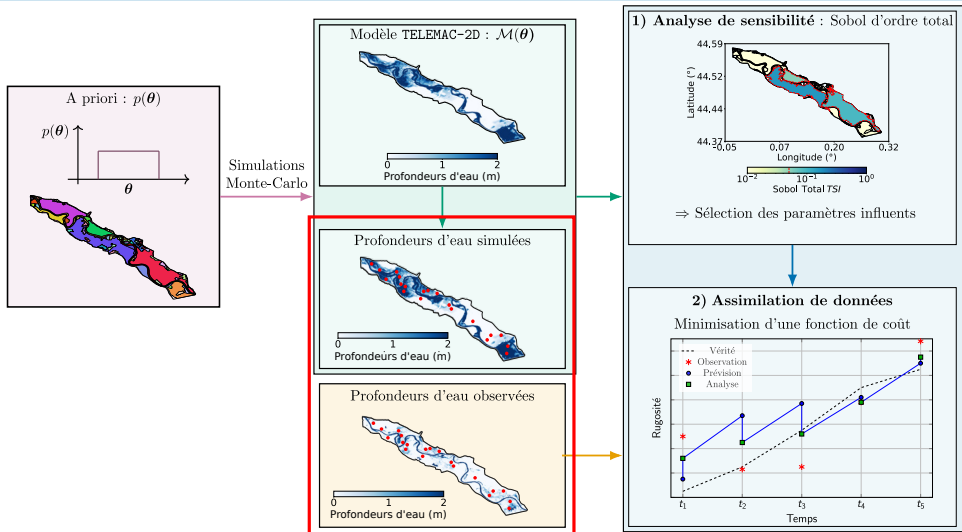
Méthodologie de calibration



Méthodologie de calibration



Méthodologie de calibration



Conclusions principales

- ▶ Calibration de la rugosité dans des expériences contrôlées
- ▶ Le choix de la mesure de performance influence l'assimilation des cartes d'inondation
- ▶ Possibilité de calibrer le lit mineur mais pas le lit majeur (pour cas Garonne)
- ▶ Importance de la localisation des mesures de profondeurs d'eau

Conclusions principales

- ▶ Calibration de la rugosité
- ▶ Le choix de la mesure
- ▶ Possibilité de calibrer
- ▶ Importance de la localisation

DATA ASSIMILATION OF FLOOD MAPS IN A 2D FLOOD MODEL FOR DIFFERENT PERFORMANCE MEASURES

Jean-Paul Travert

EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France
Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV), ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D, Chatou, France
jean-paul.travert@edf.fr

Sébastien Boyaval

Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV), ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D, Chatou, France
Inria, Paris, France

Cédric Goeury

EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France
Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV), ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D, Chatou, France

Vito Bacchi

EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France

Fabrice Zaoui

EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou, France

ABSTRACT

This study explores the assimilation of uncertain flood maps derived from satellite observations into a 2D hydraulic model to calibrate a spatially varying roughness parameter, which is divided into subdomains. First, a sensitivity analysis is carried out to identify the influential subdomains for each performance measure. Afterwards, Data Assimilation (DA), specifically the three-dimensional variational (3D-Var) method, is used on the reduced subset of parameters to calibrate the roughness field. Different cost function formulations are considered in the 3D-Var using various performance measures to compare the misfit between observed and simulated flood maps. Using synthetic and real observations, the study evaluates how these measures influence the calibration of model parameters and flood prediction accuracy. The application case is the Garonne River in France, where Synthetic Aperture Radar satellite images were available during flood events. The results indicate that the choice of performance measures in the 3D-Var cost function influences the calibration process, even without observation noise. Furthermore, the study highlights that the current precision of derived flood maps is not sufficient for calibrating floodplain roughness within the tested framework.

inondation
e)

Conclusions

Q1) Données

- ▶ Évaluation des incertitudes de la chaîne de traitement

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

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

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

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

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

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

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)



Perspectives

Q1) Données

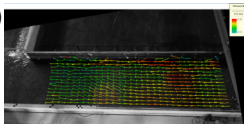
- ▶ Fusion multi-capteurs
(optique, SWOT, drones)
- ▶ Expériences contrôlées en
laboratoire



Perspectives

Q1) Données

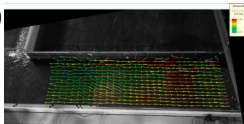
- ▶ Fusion multi-capteurs
(optique, SWOT, drones)
- ▶ Expériences contrôlées en
laboratoire
- ▶ Nouvelles variables :
champs de vitesse



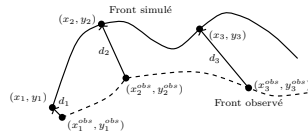
Perspectives

Q1) Données

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



Q2) Mesures de performance

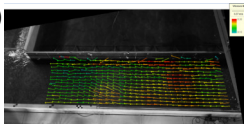


- ▶ Zones informatives (fronts de crue)

Perspectives

Q1) Données

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



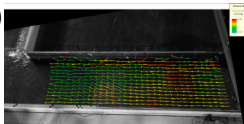
Q2) Mesures de performance

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

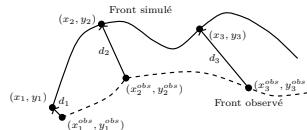
Perspectives

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

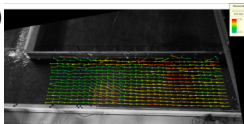
Q3) Calibration

- ▶ Prise en compte de l'erreur modèle

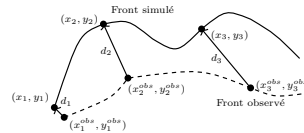
Perspectives

Q1) Données

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

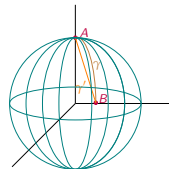


Q2) Mesures de performance

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

Q3) Calibration

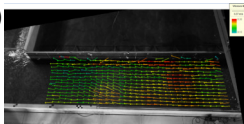
- ▶ Prise en compte de l'erreur modèle
- ▶ Assimilation sur des variétés (espaces non-euclidiens)



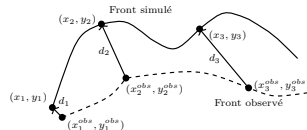
Perspectives

Q1) Données

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



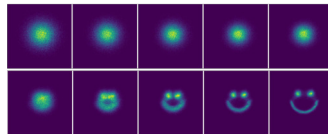
Q2) Mesures de performance



- ▶ 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)
- ▶ Assimilation de données par Deep Learning



Contributions

Articles de revues :

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. **(Publié)**

Travert J.-P., Boyaval S., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F. (2025). 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*. **(Soumis)**

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*. **(En cours de révision)**

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*. **(En cours de révision)**

Travert J.-P., Boyaval S., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F. (2025). Data assimilation of flood maps in a 2D flood model for different performance measures. *Computational Geosciences*. **(A soumettre)**

Articles de conférences :

Travert J.-P., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F., Boyaval S. (2023). Comparing data assimilation algorithms for parameter estimation on TELEMAC-2D. In *Proceedings of the XXIXth TELEMAC Users Conference*, 12–13 October 2023.

Travert J.-P., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F., Boyaval S. (2024). Influence of 3D-VAR Dissimilarity Measure on Flood Model Calibration with Satellite Data. In *Proceedings of the XXXth TELEMAC Users Conference*, 08–10 October 2024.

Posters :

Travert J.-P., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F., Boyaval S. (2023). Flood twin experiment for estimating the potential of satellite observations in shallow-water simulations. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, pp. EGU-17379.

Travert J.-P., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F., Boyaval S. (2023). Flood twin experiment for evaluating the potential of satellite data in shallow-water simulations. *40th IAHR World Congress, Rivers – Connecting Mountains and Coasts*, 21–25 August 2023.

Présentations en congrès :

Travert J.-P., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F., Boyaval S. (2023). Mapping of roughness zones in 2-D hydraulic models with satellite observations. *SimHydro 2023*.

Travert J.-P., Goeury C., Bacchi V., Zaoui F., Boyaval S. (2024). Parameterization of Roughness Distribution on Floodplains in 2D Shallow-Water Simulations. *8th IAHR Europe Congress*, Lisbon, 4–7 June 2024. *Mention spéciale : Gerhard Jirka Award for Young Researchers 2024*.

Article de vulgarisation :

Travert J.-P., Coulaud G. (2023). Numerical simulation of flood risks in nuclear power plants.

<https://ingenius.ecoledespoints.fr/en/articles/numerical-simulation-of-flood-risks-in-nuclear-power-plants/>

Merci pour votre attention !