

SOMMAIRE DES RESUMES

Thème	Type	N°	1 ^{er} auteur	Titre	Page
2	Poster	002	Remy Gasset	Nouvelles technologies pour la prédiction des inondations : les résultats du projet Inundatio	5
IX	Oral	003	Thanh Huy Nguyen	Amélioration de la capacité de la prédiction d'inondation avec un modèle chaîné hydrologie-hydraulique et assimilation de données de télédétection	9
1	Poster	004	Sabine Cavellec	Montée en compétence progressive de la mission Référent Départemental Inondation (RDI) pour le risque de submersion marine	14
1	Poster	005	Anaïs Cazaubon	AgiRisk, un outil d'aide à la décision pour gérer les impacts des inondations	19
2	Poster	006	Sarah Vigoureux	Evaluation du modèle de prédiction des crues GRP sur les bassins versants de l'est de la côte méditerranéenne française	26
II	Oral	007	Céline Martins	Tempête ALEX – Retour d'expérience des crues torrentielles du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes	29
1	Poster	008	Ludovic Cassan	Elaboration de cartes d'érosion/dépôt lors des crues soudaines	33
III	Oral	009	Olivier Piotte	Consiliari : un jeu sérieux au service des missions RDI	37
II	Oral	010	Frederic Pons	Consensus hydrologique de la tempête ALEX du 2 et 3 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes	41
1	Poster	011	Frederic Pons	Apport des nouvelles méthodes automatiques de calculs hydrauliques, exemple du principe, données d'entrée et cas d'usage de Cartino2D	45
1	Poster	013	Jean-Nicolas Audouy	Statistiques hydrologiques en crue : de la banque HYDRO à l'Hydroportail	50
IV	Oral	014	Sylvain Chave	L'intégration des réseaux sociaux dans la gestion des risques d'inondation et de séisme : le projet RéSoCIO	54
1	Poster	015	Fabrice Klein	Les jumeaux numériques du fleuve : une plateforme applicative opérationnelle ouverte pour accélérer la résilience territoriale face au changement climatique	57
VII	Oral	016	Florent Baby	Prédiction des crues en milieu montagneux sous climat tropical : exemple de la Réunion	61
III	Oral	018	Sophie Lecacheux	Outil d'aide à la gestion de crise pour la mission RDI33 : atlas de scénarios de submersion sur le bassin d'Arcachon	65
2	Poster	020	Cyril Thébault	Que peut-on attendre d'une approche multi-modèle semi-distribuée pour la prédiction des crues ? Evaluation sur le bassin du Rhône	69
2	Poster	021	Quentin Bonassies	Implementation of the Chan-Vese distance in an Ensemble Kalman filter for the assimilation of SAR image as front-type data	71
1	Poster	022	Martin Le Mesnil	Influence des zones karstiques sur les crues et intégration aux modèles de prédiction hydrologique	77
VII	Oral	023	Denis Paradis	Le Projet Homonim, en soutien des prévisions d'inondation côtière	82

IX	Oral	024	Pierre-André Garambois	Coupled 2D hydrologic-hydraulic catchment scale flood modeling with data assimilation capabilities: the DassHydro platform	84
2	Poster	025	Léo Pujol	Pattern-aware flash flood modeling with a 2D hydraulic-hydrological model and multi-source variational assimilation	88
I	Oral	026	Jérôme Le Coz	Développement d'outils pour la quantification des incertitudes des données hydrométriques	93
2	Poster	027	Élodie Paya	Appui du Cerema aux Services de Prédiction des crues, d'hydrométrie et missions RDI : le "GASP-RDI" de 2007 à aujourd'hui	97
2	Poster	028	Gabin Bouvard	Prédiction des crues et des inondations en cas de rupture de digue : Performance de différentes architectures de modèles hydraulique 1D	101
VII	Oral	029	Eric Caillaud	Vigilance vagues-submersion : prévoir les inondations par la mer. Etat des lieux et perspectives	107
III	Oral	030	Rachel Puechberty	Structuration de la mission de Référent Départemental Inondation : avancées depuis 2020	110
1	Poster	031	Damien Puygrenier	Prévisions des crues à EDF : vers des outils permettant une meilleure prise de décision	112
I	Oral	032	Yann Laborda	Crue de septembre 2020 sur le Gardon : illustration du phénomène souvent insaisissable de vague de crue	115
2	Poster	033	Sanda Genin	Estimation des incertitudes associées aux prévisions de pluie expertisées et intégration dans la chaîne de prédiction des crues	119
2	Poster	034	Matthieu Nicolas	Prévisions quantitatives : analyse et apport de l'expertise. Application aux stations de la Loire	123
IV	Oral	035	Maryse Charpentier-Noyer	Intérêt des prévisions d'ensemble des impacts des crues éclair pour un service de secours : évaluation menée sur les inondations d'octobre 2018 dans le bassin de l'Aude (France)	127
2	Poster	036	Jean-Michel Sigaud	Modélisation hydraulique uni-dimensionnelle de la propagation des crues sur la Saône et le Doubs	130
2	Poster	037	Ngo Nghi Truyen Huynh	Multi-gauge Hydrological Variational Data Assimilation: Regionalization Learning with Spatial Gradients using Multilayer Perceptron and Bayesian-Guided Multivariate Regression	134
VIII	Oral	038	Anne-Laure Tiberi-Wadier	Prévisions d'ensemble hydrologiques au sein du réseau national de prédiction des crues en France « Vigicrues »: expérimentations avec le post-traitement des prévisions dans le bassin de l'Odette	138
2	Poster	039	Felipe Mendez Rios	Estimation bayésienne d'un modèle hydrodynamique 1D d'une rivière influencée par la marée : application à la Seine aval, France	144
1	Poster	040	Antoine Dussuchale	Evolution de l'outil d'aide à la vigilance BHYCHOCO pour répondre aux besoins de l'appui à la VPI de Météo-France et future vigilance crue surfacique	148
1	Poster	041	Dominique Ollivier	Un outil de pilotage des prévisions expertisées pour le prévisionniste de crues	151
VIII	Oral	042	Anne Belleudy	Vers la généralisation de la prédiction hydrologique probabiliste au sein du réseau Vigicrues : estimation, évaluation et communication	156
2	Poster	043	Mathias Guin	Utilisation opérationnelle de TELEMAC – Hérault Aval	159
2	Poster	045	Yoann Faucard	Production et mise à disposition d'informations sur les crues : focus sur une décennie de développements au service de la prédiction des crues Loire-Allier-Cher-Indre	164
VI	Oral	046	Etienne Le Pape	Utilisation du modèle hydrodynamique 1D Mascaret pour la prédiction des crues	168

2	PosterOral	047	Kevin Larnier	Towards enhanced regionalization of Hydrologic-hydraulic river networks models with assimilation of multi-source data and SWOT hydraulic visibility	170
VIII	Oral	048	Laurent Coron	Elaboration d'une chaine de prévisions hydrométéorologiques probabilistes horaires pour un usage opérationnel quotidien	174
Z	Poster	049	Félicien Zuber	Principales avancées du réseau Vigicrues depuis sa création dans le domaine de la prévision des inondations	177
I	Oral	050	Alexandre Hauet	Hydrométrie en crue : les défis et les solutions	180
VI	Oral	051	Didier Narbais-Jaureguy	PLATHYNES : une plateforme de modélisation hydrologique développée pour les besoins de la prévision des crues	182
Ouverture	Oral	052	Bruno Janet	Vigicrues : 20 ans de progrès pour la prévision des crues, et perspectives	186
2	Poster	053	Tristan Cambonie	Revue d'ensemble des modèles de prévision d'inondation. Forces et faiblesses des méthodes par automates cellulaires. Focus sur le modèle MICA	189
VI	Oral	054	Robin Treilles	Evolution de la stratégie de modélisation au sein du SPC VCB et conséquences sur la production de la vigilance	193
V	Oral	055	Renaud Marty	Les Analogues, une approche statistique adaptée pour la prévision opérationnelle des crues et étendue à l'ensemble de la France	197
2	Poster	056	Paul Royer-Gaspard	Assimilation d'observations de débit dans un modèle semi-distribué de prévision des crues : jusqu'où les observations amont peuvent-elles améliorer les prévisions aval ?	201
1	Poster	057	Océane Poiraud	Retours d'expériences sur les inondations 2022 en Guadeloupe	205
2	Poster	058	Soufiane Kherrou	Amélioration de la prévision des crues grâce au couplage de modèles hydrologiques GRP	209
V	Oral	059	Pierre-Yves Valantin	Apports et limites de l'intégration des prévisions de pluie expertisées dans la modélisation hydrologique pour la prévision des crues à 24 h en milieu cévenol	213
2	Poster	060	Raquel Rodriguez Suquet	The SCO-FLOODDAM project: towards a digital twin for flood detection, prediction and flood risk assessments	216
1	Poster	061	Aurélien Escudier	L'impact de l'évolution des données topographiques dans la cartographie de l'aléa	221
III	Oral	062	Aurélien Escudier	Comment favoriser l'intégration opérationnelle de la mission des référents départementaux inondation au sein des organisations de sécurité civile? Éléments de réponse basés sur un travail collégial en Occitanie et sur le retour d'expérience des crues de 2018 dans l'Aude	225
2	Poster	064	Concetta Di Mauro	Amélioration de la prévision des inondations par l'assimilation de carte d'étendues d'inondations probabilistes satellitaires	228
V	Oral	065	Juliette Godet	Evaluation d'un nouveau produit de prévision d'ensemble sans couture pour l'anticipation des crues soudaines sur l'arc méditerranéen français	231
V	Oral	066	Paul Astagneau	Amélioration de la structure d'un modèle hydrologique pour prévoir la réaction des bassins versants soumis à de très fortes intensités de pluie : application à la prévision des crues	234
V	Oral	067	François Bouttier	Vers une anticipation à 1-6h des risques de pluies intenses quasi-stationnaires	238

2	Poster	069	Pierre Javelle	Nowcasting and impact-based predictions of flash floods: the NEPTUNE European project on the French-Italian basin of La Roya	242
2	Poster	070	Fadil Boodoo	Comparison of an artificial neural network with a conceptual rainfall-runoff model for streamflow prediction	246
1	Poster	071	Denis Lognon	Gestion des détarages de la relation Hauteur-Débit pour la mesure et prévision des crues estivales	250
1	Poster	072	Roger Moussa	Evaluation par modélisation inverse des échanges latéraux en crues et des concentrations en solutés : application sur une plateforme expérimentale et sur des bassins naturels	255
2	Poster	073	Laurent Dieval	Quelle intelligence artificielle pour battre l'expertise du prévisionniste ? Exemple des outils combinés dédiés à la prévision des niveaux d'eau sur l'estuaire de la Gironde	260
II	Oral	074	Arthur Marchandise	Capitalisation des données de la crue majeure de février 2021 sur la Garonne aval, exploitation actuelle et perspectives d'amélioration de la prévision des crues et des inondations	265
2	Poster	076	François Tilmant	GRP et OTAMIN, deux outils pour la prévision de crue opérationnelle et la quantification des incertitudes associées	270
III	Oral	077	Romane Perrin	Place de l'humain dans le service public Vigicrues ? Analyse au SPC GAD à partir d'un exercice grandeur nature	272
V	Oral	078	Fabien Rinaldi	Méthodologie de construction de forçages météo probabilistes pour la prévision hydrologique	276
II	Oral	079	Sylvain Chave	Retour d'expérience de la gestion des crises d'inondations récentes par les EPCI des Alpes Maritimes	277
1	Poster	080	François Peron	De 2018 à 2022, bilan de cinq années d'application de la doctrine du SPC GAD pour le déclenchement de vigilance jaune montée rapide	280
2	Poster	081	Vincent Dourdet	Modèle opérationnel hydrologique distribué couplé à un modèle d'apprentissage automatique : cas de la station d'Argelès-Gazost sur le Gave de Pau	283
1	Poster	082	Lucas Gibert	Élaboration d'une méthode d'évaluation des temps caractéristiques des petits bassins versants	287
IV	Oral	083	Anne-Marie Fromental	La plateforme nationale collaborative des repères de crues, bilan de 7 ans d'existence et perspectives	291
2	Poster	084	Charles Perrin	Retour sur vingt ans de recherches partenariales DGPR-INRAE sur la prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives	295
2	Poster	085	Jules Pali	Prévisions ponctuelles et régionales des crues fluviales et des crues soudaines avec le modèle de bilan hydrologique LARSIM	298
1	Poster	087	Eugénie Rey	Fiches réflexes : interface entre ouvrages en crue et gestion de crise	300
V	Oral	088	Adrien Warnan	Approche probabiliste de prévision immédiate de dépassements de seuils de précipitations à l'échelle communale	305
VI	Oral	089	Renaud Tzanos	Evolutions récentes du système APIC-Vigicrues Flash	309
IX	Oral	090	Audrey Lavoie	INFO-Crue : prévision spatialisée des inondations au Québec	312
IV	Oral	094	Anne-Marie Prunier Leparmentier	Evolution récente du réseau piézométrique de l'Inspection générale des Carrières – Ville de Paris	315

NOUVELLES TECHNOLOGIES POUR LA PREVISION DES INONDATIONS : LES RESULTATS DU PROJET INUNDATIO

Artificial intelligence in flood forecasting: results of the Inundatio project

Auteurs : GASSET Rémy^{1*}, SERGENT Philippe², BADER Bruno², MAQUIGNON Nicolas², SMAOUI Hassan², HADJI Sofiane³

* *auteur correspondant*

¹Cerema Sud-Ouest, rue Pierre Ramond CS 60013 33160 Saint-Médard-en-Jalles, France,
remy.gasset@cerema.fr

²Cerema Risques eaux et mer, 134 rue de Beauvais - CS 60039 60280 Margny-lès-Compiègne cedex, France, philippe.sergent@cerema.fr

³Sixense Engineering, 22-24 rue Lavoisier - Bâtiment A 92000 Nanterre, France,
sofiane.hadji@sixense-group.com

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs

Intelligence artificielle, modélisation hydrologique, modélisation hydraulique, prévision des crues, prévention des inondations

1. Présentation du projet Inundatio et enjeux scientifiques abordés

Inundatio [1] est un projet européen (2020-2022) développé dans le cadre du programme Interreg Sudoe, pour lequel s'associent des partenaires Espagnols, Français et Portugais, financé à hauteur de 75% par le fond européen de développement régional. Il associe, sous la coordination de la Fondation Santa María la Real, une équipe multidisciplinaire composée de techniciens de l'Institut technologique de Castille et León, de l'Université de Castille-La Manche, de l'Association des entreprises innovantes pour une construction efficace, du Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema) et le Laboratoire National d'Ingénierie Civile de Portugal.

Son principal défi est de créer un système capable de détecter et d'anticiper les crues soudaines de manière automatisées par la collecte et l'analyse des informations hydrométéorologiques et des prévisions, leur traduire en impact sur le territoire, le croisement avec les enjeux. Les résultats sont publiés sur une plateforme Web qui propose également des simulations de scénarios de risque.

Cette preuve de concept vise à compléter le maillage du territoire non couvert par les outils de prévention expertisés (par exemple par les SPC en France) et à évaluer la qualité des résultats pouvant être déduits de chaînes de traitement sans intervention humaine.

Le projet aborde également d'autres méthodologies innovantes pour la prévention des inondations : utilisation de sources non systémiques (ici végétales) pour la reconstitution d'événements passés), détection automatique des ouvrants, instrumentation spécifique aux ouvrages patrimoniaux...

2. Aperçu des méthodes de modélisation

Les modélisations ont été déployées sur les bassins de la Nive avec exutoire à Ustarritz et du Gave de Pau avec exutoire à Lourdes. Sensiblement plus grand (environ 1000km²) que les bassins ciblés initialement par le projet, ils présentent l'avantage de disposer de données existantes conséquentes.

La démarche générale de la chaîne de traitement est assez classique et conforme aux pratiques en cours pour la prévision des crues : modélisation hydrologique pour interpréter la réaction du bassin versant

aux variables météorologiques, modélisation hydraulique pour produire des scénarios vraisemblables, analyse des observations et prévisions pour déterminer les scénarios de crues les plus probables.

L'hydrologie des bassins versants a été représentée par de multiples jeux de données, intégrant des fenêtres temporelles et fenêtres de prédictions de tailles et de positionnement divers. Les variables considérées (a minima un débit mesuré à la station cible et une pluviométrie observée et prévue) peuvent être quantitative, qualitative voire empiriques. Ont notamment été testés les apports des températures, de l'humidité quotidienne, des variations quotidiennes des stocks neigeux issus des modèles Météo France Safran et Isba ramenées à un pas de temps horaire par distribution en fonction des températures, d'une composante non quantifiable mais fixée comme cyclique sur 24h d'une production hydroélectrique, ...

Le choix des jeux de données les plus pertinents a été réalisé par la mise en œuvre d'algorithmes de machine learning. Les performances des modèles sur les différents scénarios ont été évalués par calcul d'un RMSE et évaluation empirique de la qualité de représentation des crues prédites.

Des algorithmes de deep learning ont été comparés entre eux et avec les meilleurs résultats de machine learning sur le scénario privilégié. Une analyse de Sobol est menée sur les meilleurs modélisations, ses résultats sont employés pour pondérer la formule de distance utilisée par le raisonnement à base de cas. La modélisation hydrologique entièrement distribuée (FD) et hydraulique 2D du bassin de la Nive a été menée dans une optique de couverture d'un territoire large avec une résolution fine. Plusieurs approches ont été testées : modèle d'onde diffusive, méthode de lattice Boltzmann [2], modèles numériques classiques basés sur les équations de Saint-Venant (Telemac 2D, IRIC) alimentés par des pluies (méthode SCS). Ces modèles servent ici à pré-calculer des cartographies classiques d'inondations (hauteur, vitesse) en fonction des paramètres servant au calcul de distance

En période de vigilance, un raisonnement à base de cas (CBR) est mené au pas de temps horaire sur les variables observées et prévues pour sélectionner dans le jeu d'atlas les scénarios d'inondation les plus probables. Compte-tenu du très grand nombre de scénarios bancarisés, ces cartes sont regroupées en cluster. Si toutes les cartes retenues appartiennent au même cluster, la carte la plus proche est proposée en scénario prévu. Si des scénarios appartenant à plusieurs clusters sont retenus ou si la dispersion dépasse une valeur seuil, le scénario prévu est un composite des scénarios retenus.

Le scénario prévu est affiché via un site web dédié. Un croisement avec une base d'enjeux, spécifiquement constituée pour chaque bassin, permet également d'afficher une carte de risque.

3. Principaux résultats

Les performances de 5 algorithmes de machine learning ont été évaluées sur la Nive et le Gave de Pau, sur 4 scénarios. Le modèle de machine learning basé sur régression linéaire a été le plus efficace sur tous les scénarios. 5 algorithmes de deep-learning ont été confrontés au meilleur modèle de machine learning sur le meilleur scénario et une variante. La meilleure configuration est obtenue avec l'utilisation d'un réseau de convolution neuronal multi-têtes (MH CNN), nécessitant en outre des ressources informatiques moindres que les algorithmes basés sur LSTM notamment. L'ensemble des configurations de deep learning est plus performant que la meilleure configuration de machine learning.

Les modèles de la Nive basés sur LBM, Telemac et IRIC ont montré des résultats corrects au regard des retours d'expériences disponibles pour la crue de 2014 et des débits mesurés aux stations SPC. IRIC s'est révélé le plus précis, Telemac le plus performant. 9000 cartes ont été générées à partir du modèle Telemac sur la Nive.

L'analyse CBR, basée sur une formule de distance intégrant les 18 indices de Sobol (3 variables, 6 pas de temps) aboutit à des situations suffisamment discriminantes pour permettre un choix de 10 cartes effectivement centré sur l'événement test à reproduire. Sans surprise, plus l'horizon est lointain, plus la précision est dégradée.

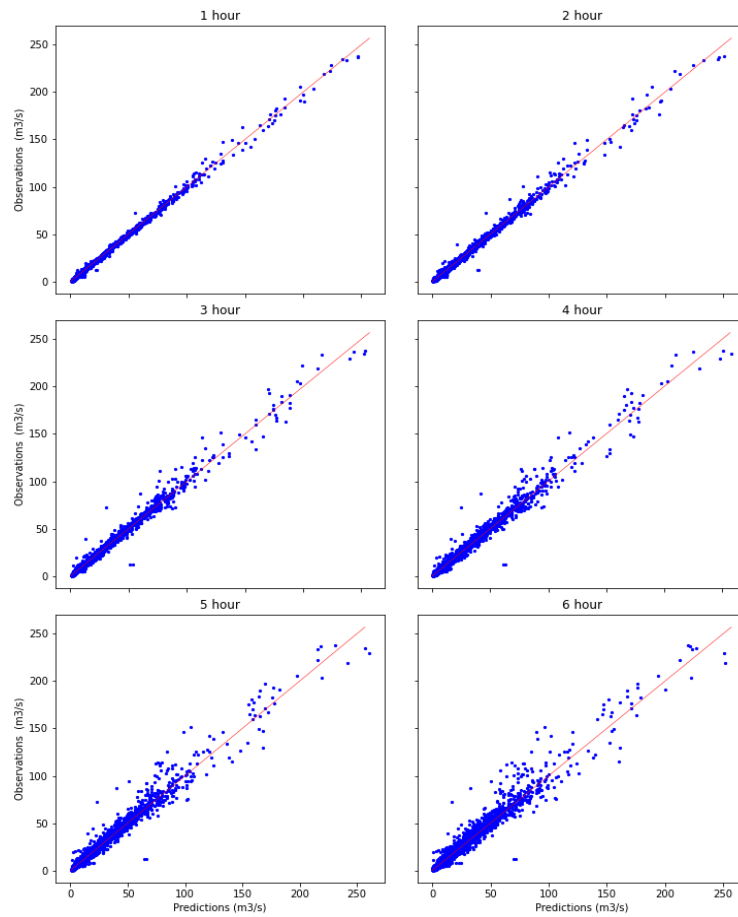


Figure 1 Comparaison entre observations et prédictions pour les prévisions de 1 à 6h par MH CNN pour la station de Cambo-les-Bains sur la Nive

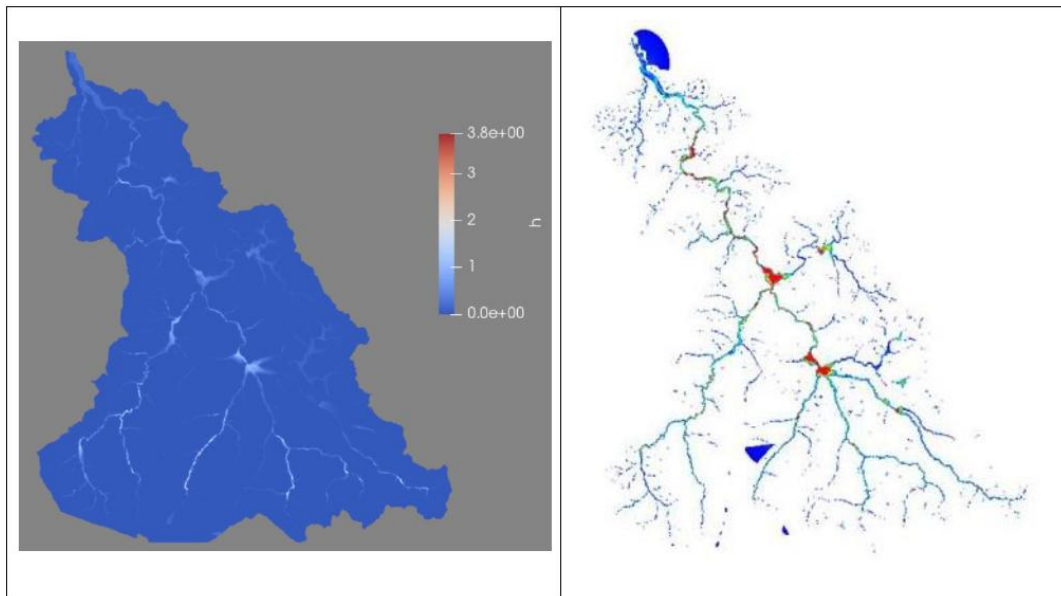


Figure 2 Exemples de cartes de hauteur d'eau via modèle LBM (gauche) et IRIC (droite)

4. Principales conclusions et perspectives

L'utilisation du deep learning, bien que nécessitant une intervention experte dans les choix de constitution du jeu de donnée et dans la calibration du modèle, a montré une performance très encourageante pour des stations où les chroniques de débits restent limitées.

Le couplage analyse de Sobol sur modèle hydrologique – raisonnement à base de cas apparaît pertinent pour les bassins réactifs au comportement complexe, qui sont mal caractérisés par une valeur de débit unique à l'aval.

Les gains de ressource informatique supposés par l'utilisation méthode de lattice Boltzmann en lieu et place d'un modèle numériques 2D classiques basés sur les équations de Saint-Venant ont été décevantes pour ce projet, en raison d'instabilités plus importantes nécessitant un raffinement du pas de calcul.

Des améliorations notables des résultats et de l'intérêt de l'approche sont attendues par l'intégration d'une spatialisation des pluies injectées. Un choix de variable pertinent pourrait également permettre d'apprécier des phénomènes déterminants pour les bassins étudiés et peu prévisibles par les modèles hydrologiques conventionnels, comme les phénomènes de blocage orographiques.

Le raisonnement à base de cas permet de sélectionner des scénarios pré-calculés pour des combinaisons complexes de variables observées et prédites. Sa rapidité de mise en œuvre reste cependant contrainte par la taille de la base cartographique. Un regroupement en cluster a été nécessaire pour traiter avec des délais courts la base de 9000 cartes couvrant la Nive.

La preuve de concept d'outil de prévision automatisé a suscité un intérêt pour les partenaires locaux du projet. Une proposition est en cours d'élaboration pour rendre opérationnel l'outil sur le réseau non surveillé du Pays Basque français. Sa principale limitation est la nécessité de disposer d'une station hydrométrique à l'aval du bassin étudié.

Une méthode alternative [3], inspirée des travaux Inundatio est été proposée par Sixsense Engineering (groupe Vinci) et adapte la démarche en remplaçant notamment le recours à la méthode à base de cas par l'utilisation des MH-CNN.

5. Références

[1] <http://www.inundatio.eu>

[2] Maquignon, Nicolas & Smaoui, Hassan & Sergent, Philippe & Bader, Bruno. (2022). A simplified and stable lattice Boltzmann shallow water model. Journal of Physics: Conference Series. 2202. 012055. 10.1088/1742-6596/2202/1/012055.

[3] Hadji, Sofiane. (2021). A coupled models Hydrodynamics - Multi headed Deep convolutional neural network for rapid forecasting large-scale flood inundation. IJECS Volume 10 Issue 11 November, 2021 Page No.25420-25430

REPRÉSENTATION DES SURFACES INONDÉES AVEC UN MODÈLE CHAÎNÉ HYDROLOGIE-HYDRAULIQUE ET ASSIMILATION DE DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION

Flood Extent Representation With a Chained Hydrologic-hydraulic Model and Remote Sensing Data Assimilation

NGUYEN Thanh Huy^{1,2*}, PIACENTINI Andrea¹, MUNIER Simon³, RICCI Sophie^{1,2}, PENA LUQUE Santiago⁴, RODRIGUEZ SUQUET Raquel⁴, BONASSIES Quentin^{1,2}, FATRAS Christophe⁵, LAVERGNE Emeric⁵, ANDRAL Alice⁵, BRUNATO Sylvain⁶, GAUDISSERT Vincent⁶, GUZZONATTO Eric⁶, VALLADEAU Guillaume⁷, POISSON Jean-Christophe⁷, FROIDEVAUX Alice⁸, GUIOT Antoine⁸, RAYNAL Romaine⁸, HUYNH Thanh-Long⁸, HUANG Thomas⁹, KETTIG Peter⁴, BLANCHET Gwendoline⁴, BRETAR Frederic⁴

* *auteur correspondant*

¹ CERFACS, 31057 Toulouse Cedex 1, France (e-mail: piacentini.palm@gmail.com)

² CECI, CNRS UMR 5318/CERFACS, 31057 Toulouse Cedex 1, France (email: thnguyen@cerfacs.fr; ricci@cerfacs.fr; bonassies@cerfacs.fr)

³ CNRM, 31057 Toulouse Cedex 1, France (e-mail: simon.munier@meteo.fr)

⁴ CNES, 31401 Toulouse Cedex 9, France (e-mail: raquel.rodriguezsuquet@cnes.fr; santiago.penaluche@cnes.fr; peter.kettig@cnes.fr; gwendoline.blanchet@cnes.fr; frederic.bretar@cnes.fr)

⁵ CLS, 11 rue Hermès, Parc Technologique du Canal, 31520 Ramonville Saint-Agne, France (e-mail: cfatras@groupcls.com; elavergne@groupcls.com; aandral@groupcls.com)

⁶ CS Group, 31500 Toulouse, France, France (e-mail: sylvain.brunato@csgroup.eu; vincent.gaudissart@csgroup.eu; eric.guzzonato@csgroup.eu)

⁷ Vortex.io, 31401 Toulouse Cedex 9, France (e-mail: guillaume@vortex-io.fr; jeanchristophe@vortex-io.fr)

⁸ QuantCube Technology, 75002 Paris, France (e-mail: a.froidevaux@quant-cube.com; a.guiot@quant-cube.com; r.raynal@quant-cube.com; thanh-long.huynh@quant-cube.com)

⁹ NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA (thomas.huang@jpl.nasa.gov)

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs: Hydrology model, Hydrodynamic model, Flooding, Flood extent, Multiphysics coupling, Remote sensing, Data assimilation

1. Introduction

Early warning and prediction of flood events have become all the more essential as the occurrence and intensity of flooding have increased in recent decades, especially in the context of climate change. In this regard, hydrodynamic models are fundamental to estimate water level and flood extent that provide necessary information to predict, prevent and/or mitigate devastating consequences of floods. Flood simulation and forecast capabilities have been greatly improved thanks to advances in data assimilation (DA) algorithms and strategies. DA combines in-situ gauge measurements, remote-sensing (RS) data with numerical models to correct the hydraulic states and reduce the uncertainties in the model state, parameters and forcings (e.g. friction, inflow discharge). In the context of operational flood forecasting, the challenges lie in producing reliable forecasts given constrained computational resources and within processing times that are compatible with real-time forecasting. Ideally, flood hydrodynamic models should exploit observed data from gauge networks, e.g. water level and/or discharge that describe the forcing time-series at the upstream and lateral boundary conditions of the

model. However this type of information is not always available, either due to a lack of in-situ gauge data or because measurements acquired during high overflowing events are unreliable. Additionally, constraining the model with BCs from observed time-series forcings limits its forecast capability lead time below the transfer time of the river network. In order to reach longer forecast lead times, a forecasted inflow should be described, for instance, using discharge simulated by large-scale hydrologic models. Hydrologic model outputs can also provide inputs for local-scale models with interfaces that are located where gauge stations are not available. Therefore, a chained hydrologic-hydraulic model is interesting to allow extended lead time forecasts and overcome the limits of forecast when using observed only gauge measurements.

In the present work, the BC for a high-fidelity and local-scale hydrodynamics model with TELEMAC-2D (T2D, www.opentelemac.org) are provided by the large-scale river network hydrologic model CTRIP [1]. The studied test case is the Garonne Marmandaise catchment with a focus on overflowing events that occurred in 2019 and 2021. The merits of the assimilation of 2D flood observations derived from remote-sensing images (namely Sentinel-1 SAR images) to reduce the uncertainties in friction coefficients as well as in forcing inputs provided by CTRIP at Tonneins upstream station are highlighted.

2. Models And Data

CTRIP is an optimization-based routing model forced by land surface model (LSM) productions from the SAFRAN-ISBA hydrometeorological model over France. The ISBA-CTRIP [2] hydrologic model results from the coupling of the ISBA LSM [3] and a modified version of the TRIP RRM (River Routing Model) [4]. LSMs simulate the energy and water balance at the soil-atmosphere-vegetation interface, while RRM emulates the lateral transfer of freshwater toward the continent-ocean interface. The ISBA model is defined at global scale on a $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ regular mesh grid that establishes the energy and water budget over continental surfaces, considering a three-layer soil. ISBA gives a diagnostic of the surface runoff and the gravitational drainage, later used as forcing inputs for CTRIP. The CTRIP model is defined on a regular latitude-longitude grid at the $1/12^\circ$ resolution and follows a river network to laterally transfer water from one cell to another, down to the interface with the ocean. The study is based on the CTRIP version from [2, 5] for the representation of physical processes. The discharge simulated by CTRIP over France on 15/12/2020 is shown in Figure 1 over France. These discharges are imperfect due mainly to uncertainties in the land surface inputs, RRM parameters and catchment description. The study area (Figure 2) extends over a 50-km reach of the Garonne River between Tonneins and La Réole, where the town of Marmande is located. Since the 19th century, it has been equipped with a system of dikes and weirs to manage submersion and flood retention areas. Observing stations operated by the VigiCrue network (<https://www.vigicrues.gouv.fr>) are located at Tonneins, Marmande, and La Réole providing water-level measurements every 15 minutes. The T2D hydraulic model over this reach is presented in [6]. The description of the friction coefficients is highly prone to uncertainties related to the zoning assumption, the calibration procedure, and the set of calibration events. In addition, the limited number of in-situ observations yields errors in the formulation of the rating curve that is used to translate the observed water level into discharge, especially for high flow that involves an extrapolation beyond the gauged values. In the present study, the discharge time-series at Tonneins is either provided by gauge observations or CTRIP simulation. In both cases, these time-series are prone to uncertainties that should be reduced.

It is worth noting that the hydrologic model SAFRAN-ISBA-CTRIP generally yields better performances for large basins and that a moderate performance is expected for the medium-sized Garonne catchment, especially for high flows. Indeed, for major flood events, the model tends to underestimate the discharge. Figure 3 shows CTRIP-simulated discharge at Tonneins (blue) along with VigiCrue gauge observations in green for two recent flooding events in 2019 and 2021. The acquisition times of Sentinel-1 are indicated as vertical dashed lines. These zoomed-in figures clearly indicate that

CTRIP underestimates flood peaks and that such errors are to be accounted for by the assimilation of water level observations and remote sensing-derived flood extent observations.

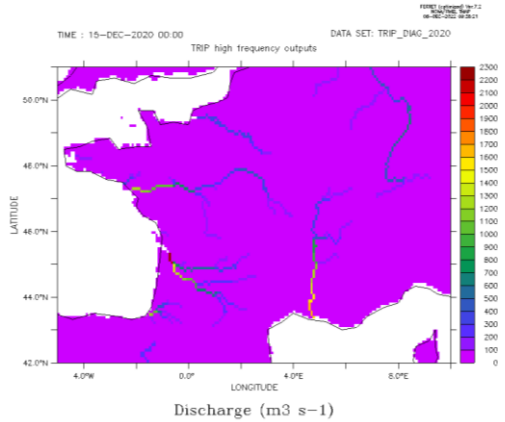


Figure 1: Discharge (m^3/s) simulated by CTRIP over France on 15/12/2020.

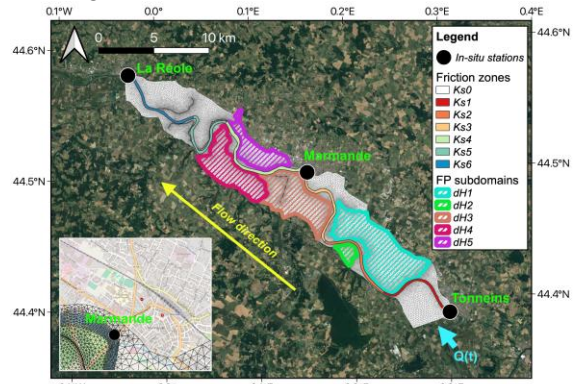


Figure 2: TELEMAC-2D Garonne Marmandaise domain

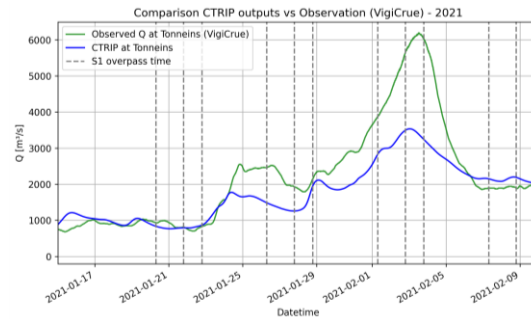
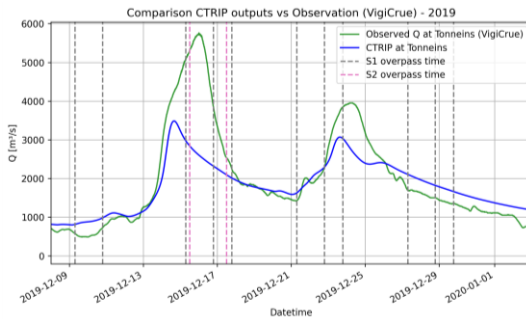


Figure 3: Discharge time-series at Tonneins for the 2019 (left) and 2021 (right) flood events from VigiCruce gauge station (green line) and CTRIP (blue line). The dates for Sentinel-1 images are indicated with vertical dashed lines.

The data that are assimilated in the present work originate from water level observations at the VigiCruce gauge stations at Tonneins, Marmande and La Réole (black circles in Figure 2) and from flood extent maps derived from Sentinel-1 SAR images. In order to derive flood extents from Sentinel-1 SAR images, a Random Forest algorithm is applied [6]. Then, the resulting binary wet/dry maps are expressed in terms of wet surface ratios (WSR) over selected subdomains of the floodplain. This ratio is assimilated jointly with in-situ water-level observations to improve the flow dynamics within the floodplain, as proposed in previous work [7] when T2D is forced by VigiCruce time-series.

3. Method and Results

It is assumed that the major sources of uncertainties in the chained hydrologic-hydraulic model lie in the CTRIP-simulated hydrographs (that themselves stem from the input precipitation and uncertain LSM related to the run-off), in friction parameters as well as in the simulated hydraulic state. These uncertainties are reduced with a time-varying and sequential correction using a dual state-parameter DA analysis from an EnKF enhanced with a Gaussian anamorphosis transformation [8] to deal with non-Gaussian errors in the observation and control space that limits the optimality of the EnKF. The error in the CTRIP forcing is taken into account through a multiplicative factor on the time-dependent discharge time-series. Also, the error in the hydraulic state that is due to the lack of evapotranspiration,

ground infiltration and rainfall processes is taken into account as a state correction implemented over sub-domains of the floodplain. The observation operator associated with the WSR and in-situ observations, the GA-assisted EnKF algorithm with a dual state-parameter sequential correction are devised and assessed using metrics that are formulated in 1D at the observing stations in the river bed and 2D over the floodplain. Two simulations are carried out for each event: a free run without assimilation (FR) and a DA experiment (IGDA) that assimilates both in-situ water-level and remote-sensing WSR observations. Each simulation is achieved using observed forcing at Tonneins from Vigicrue (FR^V and IGDA^V) and using CTRIP forcing (FR^C and IGDA^C).

Table 1: Water level RMSE computing at observing stations with respect to observed WSE for 2021 event

RMSE [m]	Tonneins	Marmande	La Réole	Gain
FR ^V	0.106	0.392	0.536	-
IGDA ^V	0.073	0.074	0.09	83.21%
FR ^C	1.209	1.405	1.598	-
IGDA ^C	0.166	0.160	0.141	73.69%

The results over the 2021 flood event are presented in Table 1 with 1D metrics computed with respect to water level at observing stations located in the river bed and 2D metrics computed with respect to observed flood extents. For both observed and CTRIP-simulated upstream forcings, the joint assimilation of in-situ water level and RS-derived WSR observations in IGDA leads to a significant improvement of the 1D and 2D metrics with reduced RMSE overall and generally increased Critical Success Index (CSI) at flood peak. It should be noted that the CSI of FR^C after the flood peak (35.31%) is higher than that of IGDA^C (32.17%) due to the underestimated discharge from CTRIP throughout the event, but such a comparison should be made alongside with the 1D assessment.

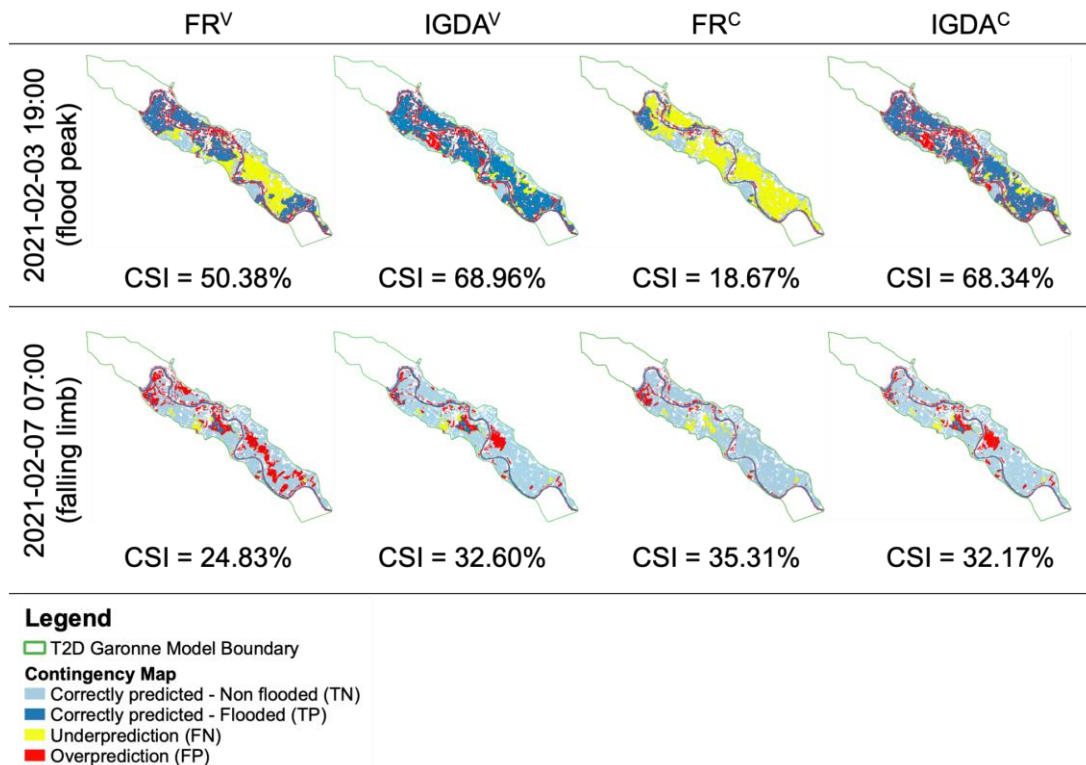


Figure 4: 2D assessment with contingency maps and CSI scores at flood peak and during the falling limb for 2021 event.

REFERENCES

- [1] Munier, S., & Decharme, B. (2022). River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12° resolution for global hydrological and climate studies. *Earth System Science Data*, 14(5), 2239-2258.
- [2] Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J. P., Alias, A., ... & Voldoire, A. (2019). Recent changes in the ISBA- CTRIP land surface system for use in the CNRM- CM6 climate model and in global off- line hydrological applications. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(5), 1207-1252.
- [3] Noilhan, J., & Planton, S. (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly weather review*, 117(3), 536-549.
- [4] Oki, T., & Sud, Y. C. (1998). Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP)—A global river channel network. *Earth interactions*, 2(1), 1-37.
- [5] Decharme, B., Alkama, R., Papa, F., Faroux, S., Douville, H., & Prigent, C. (2012). Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model. *Climate Dynamics*, 38(7), 1389-1412.
- [6] Nguyen, T. H., Ricci, S., Fatras, C., Piacentini, A., Delmotte, A., Lavergne, E., & Kettig, P. (2022). Improvement of Flood Extent Representation with Remote Sensing Data and Data Assimilation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-22.
- [7] Nguyen, T. H., Ricci, S., Piacentini, A., Fatras, C., Kettig, P., Blanchet, G., ... & Baillarin, S. (2022). Dual State- Parameter Assimilation of SAR-derived Wet Surface Ratio for Improving Fluvial Flood Reanalysis. *Water Resources Research*, e2022WR033155.
- [8] Simon, E., & Bertino, L. (2012). Gaussian anamorphosis extension of the DEnKF for combined state parameter estimation: Application to a 1D ocean ecosystem model. *Journal of Marine Systems*, 89(1), 1-18.

MONTEE EN COMPETENCE PROGRESSIVE DE LA MISSION REFERENT DEPARTEMENTAL INONDATION (RDI) POUR LE RISQUE DE SUBMERSION MARINE

*Gradual upskilling of the departmental flood referent mission for marine
submersion risk*

Auteurs : CAVELLEC Sabine^{1*}, BELIN Thomas^{2*}

¹ Cerema REM/ DREL, 55, Rue Pierre Bouguer – BP 5 – 29280 Plouzané, France, sabine.cavellec@cerema.fr

² DREAL Bretagne/SPPR/DPCH/UPC, L'Armorique, 10 rue Maurice Fabre, CS 96515, 35065 RENNES CEDEX, thomas.belin@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session : 1/Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Submersion marine, mission RDI sur le littoral, prévisions météo-marines, préparation de crise, tempêtes, littoral, vagues-submersion

1. Historique et objectifs

La Mission de Référent Départemental Inondation (RDI) a été créée par la circulaire interministérielle du 28 avril 2011. Cette mission, organisée au sein des DDT(M)¹/DEAL²/DRIEAT³ vient en appui technique à la préfecture en préparation et en gestion des crises d'inondation. La note technique du 28 octobre 2018 « relative à l'organisation des missions de référent départemental pour l'appui technique à la préparation et à la gestion de crises d'inondation sur le territoire national » élargit le périmètre de la mission RDI au littoral pour le risque de submersion marine. Le recul du trait de côte et l'érosion n'entrent pas dans le champ de compétence de la mission RDI sur le littoral. Cependant, ces phénomènes aggravants peuvent entraîner une ouverture des cordons littoraux et ainsi provoquer des submersions dans les zones basses qui sont à surveiller.

Sur le littoral, l'objectif principal de la mission RDI consiste à pouvoir interpréter les données météo-océaniques (fournies par Météo-France) d'un événement tempétueux en cours, et les traduire, par analogie historique, en termes de dommages à la côte, en fonction des enjeux du territoire et des données déjà synthétisées à terre. Pour cela, la mission RDI sur le littoral doit effectuer un lourd travail de capitalisation, de synthèse et de traitement des données existantes sur les événements tempétueux passés. En complément, des travaux expérimentaux de modélisation en temps réel de l'aléa inondation par submersion marine sont actuellement conduits à différentes échelles : nationale, régionale et locale (collectivités). Ces travaux visent à améliorer le niveau de connaissance des dommages à la côte, voire la capacité d'alerte sur un territoire littoral. Vu le caractère encore expérimental de ces travaux, il n'est pas demandé à la mission RDI de généraliser ces outils de modélisation pour assurer le conseil au préfet. Par ailleurs, il faut veiller à ce que ces nouveaux outils restent cohérents avec la vigilance vagues submersion (VVS) émise par Météo-France et ne viennent pas bruyamment contredire les informations à disposition des missions RDI.

2. Montée en compétence progressive et réseau d'acteurs

L'environnement et le contexte d'exercice de la mission RDI sur le littoral diffèrent notablement de ceux relatifs à la prévision des crues sur le réseau fluvial, aussi bien en termes de phénomènes météorologiques mis en jeu, d'outils à disposition que d'acteurs concernés. La compréhension des phénomènes marins requiert de s'intéresser à des paramètres (surcote, marée, pression atmosphérique,

1 Direction départementale des territoires (et de la mer), en France métropolitaine

2 Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement, en Outre-Mer

3 Direction régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports

vent, houle, etc.) bien spécifiques, complexes et souvent difficiles à appréhender. De plus, pour réaliser son travail, la mission RDI sur le littoral doit s’appuyer sur une multitude d’acteurs dont la coordination n’est pas encore stabilisée : experts de Météo-France, collectivités, gémapiens, gestionnaires d’ouvrages, services départementaux d’incendie et de secours (SDIS), réseau des Observatoires Littoraux, etc. Ainsi, la structuration de la mission RDI sur le littoral s’inscrit dans le temps et dans une logique de progrès continu et régulier. Le niveau de service attendu doit donc être adapté à la nature de l’aléa, au linéaire côtier et aux moyens disponibles.

Cependant, le dispositif mis en place depuis 2018 a pu être éprouvé et s’est révélé aussi pertinent qu’efficace au fil des différentes vigilances vagues-submersion, en particulier les vigilances de niveau orange, survenues depuis la mise en place d’un bulletin RDI Littoral par Météo-France en décembre 2020 (cf. §4) ; par exemple, lors de la tempête Eunice en février 2022 sur la façade Manche/ Mer du Nord/ Atlantique où tous les départements littoraux étaient au moins en VVS de niveau jaune voire orange pour les départements de Haut-de-France, de Seine-Maritime et de la Manche ; ou sur la façade méditerranéenne, lors des VVS de niveau orange pour la tempête Bella pour les départements de Corse.

3. Contenu de la mission RDI sur le littoral

La mission RDI sur le littoral intervient pendant les trois phases de la crise inondation par submersion marine (figure 1).

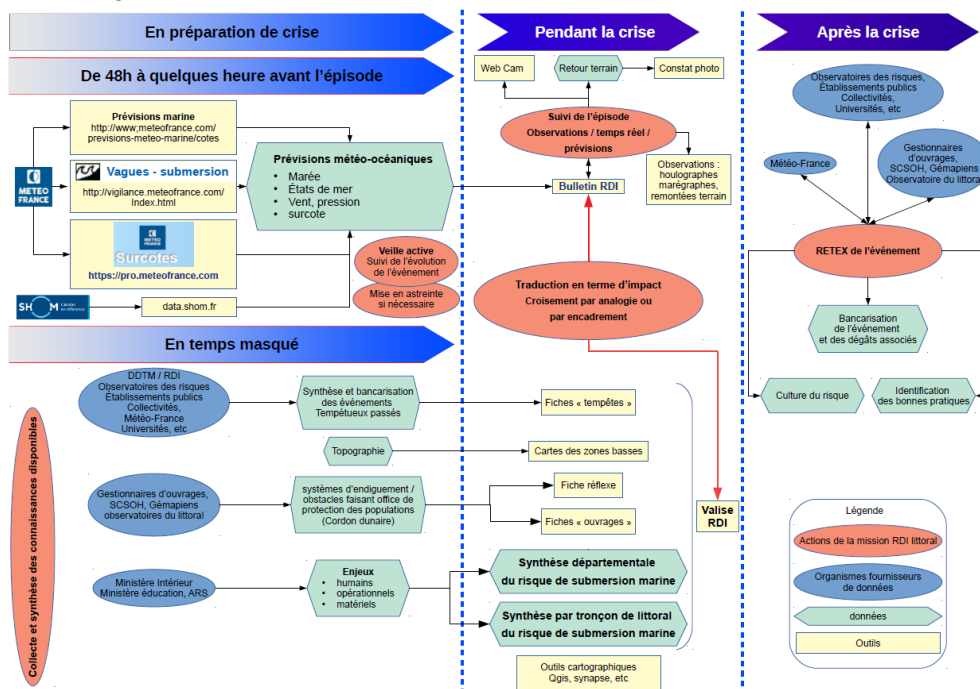


Figure 1 : intervention de la mission RDI sur le littoral pendant les trois phases de la crise

- ✓ En crise, la mission RDI sur le littoral facilite l’interprétation du phénomène sur la base du bulletin spécifique aux missions RDI sur le littoral adapté au secteur, en fonction de son niveau de compétence, de sa connaissance locale des aménagements et des points sensibles recensés. Elle cherche à identifier les zones du territoire littoral qui risquent d’être les plus touchées. En utilisant une approche par analogie, pour affiner cette analyse des conséquences possibles, elle cherche à rapprocher l’évènement en cours, des évènements historiques qui ont touché le littoral, et dont les conséquences à la côte lui sont connues.
- ✓ En préparation de crise, la mission RDI sur le littoral réalise une collecte conséquente d’informations relatives aux événements tempétueux passés (bibliographie, traitement des données, recensement des dommages). Elle effectue la synthèse de leurs effets sur les zones à enjeux à la côte

les plus vulnérables

- ✓ En post-crise, la mission RDI sur le littoral participe aux travaux de capitalisation d’informations et d’analyse quantitative et qualitative des retours d’expérience (RETEX) selon l’ampleur et la gravité des événements, en collaboration avec les différents acteurs du territoire.

4. Les outils mis à la disposition de la mission RDI sur le littoral depuis sa création

Plusieurs travaux ont été réalisés sur le littoral depuis 2018 à l’initiative du Schapi⁴, avec le concours du Cerema⁵, des référents régionaux inondation (RRI) en DREAL, des missions RDI, de Météo-France et du Shom :

- ✓ Mise à disposition de données météo-océaniques par Météo-France via le site extranet de la sécurité civile et le portail data.shom.fr ;
- ✓ Evolution de la vigilance météorologique avec notamment la mise en place de produits relatifs aux phénomènes dangereux, et l’évolution de la vigilance vagues submersion à l’échelle infra-départementale et à J et J+1 ;
- ✓ Rédaction de bulletins expertisés par Météo-France, dédiés spécifiquement à la mission RDI sur le littoral pour les départements littoraux : le bulletin RDI Littoral et ses notices, par façade (atlantique et méditerranée), à destination des cadres d’astreinte ;
- ✓ Mise en place depuis 2019 d’une formation⁶ technique nationale pour les missions RDI sur le littoral (métropole et outre-mer) d’une durée de 4 demi-journées, et réitérée tous les ans (2 par an : une en présentiel et une en distanciel). Cette formation, dédiée à la maîtrise du phénomène maritime, multi-factoriel et physiquement complexe associe des présentations théoriques des différents acteurs du réseau (SCHAPI-SPC, Météo-France, mission RDI, SCSOH, Shom, Cerema) alternant avec des TD de mise en pratique sur les deux façades ;
- ✓ Mise en place de formations techniques régionales (durée d’une 1/2 journée), à l’initiative des animations régionales (formation déjà réalisée en Pays de Loire et en Haut-de-France), associant Météo-France, le Cerema et le SCSOH, avec un objectif principal de vulgarisation du phénomène et de prise en main du bulletin RDI Littoral.
- ✓ Établissement de chronogrammes de sources d’informations ;
- ✓ Mise en place d’un référentiel documentaire méthodologique⁷ avec le Cerema, composés de guides et de fascicules relatifs notamment aux outils d’anticipation et aux données à disposition de la mission RDI pour la submersion marine ; à la capitalisation des données littorales pour l’aide à la décision à la gestion de crise, au recensement des événements météorologiques et dommages associés sur les côtes. La fiche « tempête », notamment, composée d’une partie aléas et d’une partie dommages à terre, permet de faire une analogie entre un événement tempétueux passé dont les conséquences à la côte sont connues et un événement tempétueux à venir de mêmes caractéristiques météo-océaniques.

5. La fiche « tempête »

En simplifiant l’accès aux données, la fiche « tempête » permet de répondre au besoin de capitalisation (organisation sous forme de base de données (locale, voire nationale)) et de valorisation des données de référence sur les tempêtes (forçages atmosphérique et océanique et dommages associés) afin de garder en mémoire les événements passés et mieux se préparer face aux crises futures. Elle permet également de mutualiser les suivis existants afin de les exploiter statistiquement et cartographiquement pour

4 Service central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations

5 Centre d’Etudes et d’Expertise sur les Risques, l’Environnement, la Mobilité et l’Aménagement

6 http://pch.metier.e2.rie.gouv.fr/formation-rdi-littoral-a2323.html?id_rub=1019 ou le site osmose « MTE - Mission RDI - Animation nationale - DDT(M) »

7 <http://pch.metier.e2.rie.gouv.fr/le-referentiel-documentaire-guide-et-fascicules-r969.html>

déterminer des signatures particulières de tempêtes potentiellement à risques. Dans ce sens, elle contribue à améliorer les seuils de vigilance vagues-submersion.

La fiche « tempête » se compose de deux parties :

- ✓ Une partie aléas, renseignée uniquement à partir de données d’observations, et qui concerne les données d’états de mer, de niveaux marins, vent, pression, etc. ;
- ✓ Une partie dommages à terre constituée de données relatives aux phénomènes et dommages observés à l’échelle de la commune et aux arrêtés CAT NAT.

Des tests de remplissage semi-automatique de la partie aléas des fiches « tempêtes » et de constitution de fiches tempêtes (format pdf) sont réalisés par le Cerema pour faciliter le travail de la mission RDI sur le littoral et réduire au maximum le temps passé pour la réalisation de ces fiches. Ils sont menés en collaboration avec Météo-France (sélection des tempêtes) en région Occitanie, PACA et dans le Finistère.

6. Principales difficultés et limites

Les modélisations numériques actuellement disponibles (projet Homonim (Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marin) du Shom/Météo-France) permettant d’obtenir les VVS et les informations contenues dans le bulletin RDI Littoral donnent des informations sur les données de houle et de vent au large. Les phénomènes de diffraction, réfraction, réflexion et déferlement des vagues à la côte ne correspondent pas au niveau de détail synthétisable dans le bulletin RDI Littoral. C’est à la mission RDI sur le littoral d’effectuer ce travail de traduction des états de mer et de niveaux marins au large en dommages à la côte.

La modélisation numérique des dommages à la côte, et en temps réel reste expérimentale et localisée sur certains territoires. A ce stade, l’approche préconisée à l’échelle nationale est celle par analogie historique. Ce type d’approche repose sur l’hypothèse que le littoral n’évolue pas, malgré un contexte d’accélération du changement climatique. Ainsi trois conditions doivent être vérifiées : (1) pas de travaux réalisés sur les systèmes d’endiguement depuis la tempête référencée, (2) pas de changement notoire d’urbanisation et (3) pas de changement important de la configuration du littoral. Pour cette raison, la mission RDI sur le littoral se concentre en premier lieu, sur les tempêtes récentes.

La capitalisation des informations sur les tempêtes passées (aléas et dommages) via les fiches tempêtes reste cependant très chronophage. Elle est limitée par les moyens humains actuellement disponibles au sein des missions RDI Littoral. Toutes les missions RDI sur le littoral ne sont pas au même stade d’appropriation du phénomène de submersion marine.

Une autre difficulté rencontrée est surtout un risque de méprise quant aux sources de données météo-océaniques disponibles autres que celles de Météo-France. Plusieurs risques de dérives ont été identifiés, liés soit à l’utilisation de modèles différents de ceux retenus par l’expertise prévision marine de Météo France, soit par une actualisation tardive des données, bien qu’elles soient issues de la chaîne de modélisation de Météo France. Il en résulte des interprétations qui ne sont pas en phase avec l’expertise des prévisionnistes du CNP (Centre national de prévision). Les limites d’utilisation de données disponibles sont rappelées dans les formations dédiées à la mission RDI Littorale (cf §4).

7. Conclusion

Les différents travaux cités ci-dessus, engagés depuis 2018, permettent d’avoir un référentiel commun national à tous les acteurs de la préparation de crise pour l’aléa submersion marine. Les prévisions météo-océaniques expertisées qui caractérisent l’épisode tempétueux au large et tout le travail de synthèse et d’analyse réalisé sur les données à terre par la mission RDI en collaboration avec le réseau d’acteurs du littoral (identification des enjeux, localisation des ouvrages de protection, des points sensibles, comparaison avec des événements de référence, etc.) sont autant d’outils pour mieux se préparer et améliorer la gestion de crise.

Le dispositif est pleinement fonctionnel, avec des pistes d’amélioration principalement axées autour de la facilitation de la collecte d’informations à froid (poste le plus chronophage) et à moyen/long terme l’accessibilité des prévisions d’aléa à la côte.



« Prédiction des crues et des inondations –
Avancées, valorisation et perspectives », AgiRisk – un outil d'aide à la décision pour gérer les
impacts des inondations, Manuel Collongues & Anaïs Cazaubon,
Toulouse, Automne 2023

Anaïs Cazaubon
anaïs.cazaubon@cerema.fr

AgiRisk, un outil d'aide à la décision pour gérer les impacts des inondations

AgiRisk, a decision-making tool to manage flood impacts

Auteurs : COLLONGUES Manuel – Cerema EST – 71 rue de la Grande Haie, 54510 Tomblaine, France , manuel.collongues@cerema.fr & CAZAUBON Anaïs – Cerema OUEST – 9 rue René Viviani, 44200 Nantes, anaïs.cazaubon@cerema.fr

Choix du thème/session : Progrès réalisés et perspectives d'amélioration pour la prédiction des crues et des inondations

Mots clefs: enjeux, vulnérabilité aux inondations, diagnostics, actions, suivi temporel, acteurs locaux, personnalisation, prévention des risques, impacts, automatisation

Orateurs:

COLLONGUES Manuel / manuel.collongues@cerema.fr

CAZAUBON Anaïs/ anaïs.cazaubon@cerema.fr

Le résumé doit être concis et doit présenter le but du travail, les résultats essentiels et la conclusion. Caractère times new roman 11.

Le résumé doit comporter un titre en français et en anglais.

LA LONGUEUR TOTALE DU RESUME DOIT ETRE ENTRE 2 ET 4 PAGES.

Des figures peuvent être ajoutées, mais l'ensemble ne doit pas dépasser 6 pages.

Les coordonnées de l'auteur correspondant doivent être indiquées clairement.

But du travail

Afin de faciliter la mise en application de la stratégie nationale de gestion du risque d'inondation (SNGRI) et de ses trois objectifs (assurer la sécurité des personnes, réduire le coût des dommages, faciliter le retour à la normale), un guide méthodologique, le référentiel de vulnérabilité aux inondations, a été publié en 2016 puis mis à jour en 2018. Il se compose d'indicateurs permettant d'évaluer la vulnérabilité d'un territoire soumis aux inondations et de proposer des actions pertinentes pour la réduire.

Depuis sa publication, diverses déclinaisons de ce référentiel ont eu lieu sur l'ensemble du territoire national (département du Jura, territoire à risques importants d'inondations de Noirmoutier/Saint-Jean-de-Monts, Schéma de cohérence territoriale de Tours etc.). De ces déclinaisons a émergé le même constat d'un besoin criant de temps et de technicité dans la mise en œuvre de cet outil méthodologique, ainsi que des lacunes significatives en terme de pédagogie et d'appropriation par les acteurs locaux.

En parallèle de ces déclinaisons, les besoins locaux de diagnostic territorial se sont renforcés, dans le cadre, entre autres, de la construction puis du suivi des Programmes d'Actions et de Prévention des Inondations (PAPI). Ce constat a été confirmé lors de la réalisation d'une quinzaine d'entretiens d'utilisateurs finaux potentiels (collectivités, gestionnaires de crise, services de l'État etc.) en 2021.

Ainsi, dès 2020, une équipe-projet nationale au sein du Cerema a démarré la construction d'un outil opérationnel, **AgiRisk**, visant à faciliter la déclinaison opérationnelle du référentiel national de vulnérabilité aux inondations et à aider les acteurs locaux à s'en approprier les résultats.

AgiRisk a pour objectif, d'une part, de faciliter la réalisation de diagnostics de vulnérabilité personnalisés à l'utilisateur grâce aux calculs automatisés d'indicateurs issus ou inspirés du référentiel. D'autre part, à l'issue des diagnostics réalisés, un panel d'actions de réduction de vulnérabilité les plus pertinentes sur le territoire considéré, est proposé aux acteurs pour faciliter la définition des orientations politiques et stratégiques sur leur territoire. Enfin, une des plus-values de l'outil consiste à fournir un suivi temporel de la vulnérabilité, afin de réévaluer périodiquement la pertinence / l'efficacité des actions mises en œuvre par le territoire.

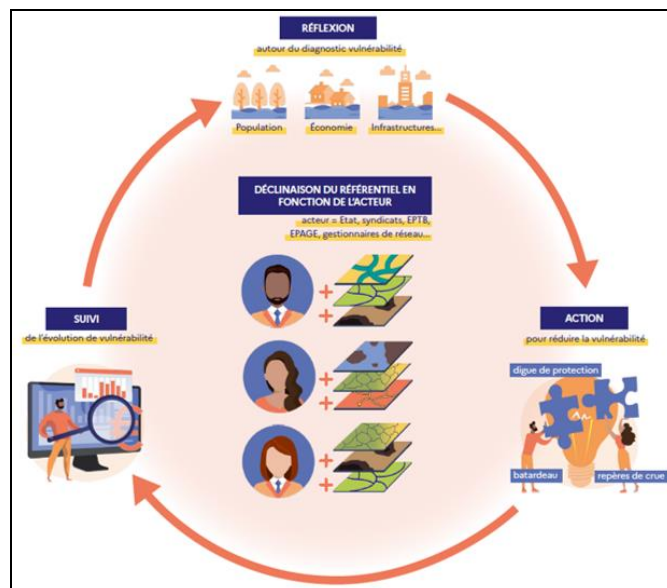


Figure 1 : Processus général de l'outil AgiRisk

Résultats essentiels

Concrètement, **AgRisk** se présente sous la forme d'un plugin du système d'information géographique Qgis. Ce plugin n'est cependant que l'interface entre l'utilisateur (qui a la possibilité de choisir son territoire, ses aléas, les indicateurs à calculer, les modalités de visualisation...) et une base de données au sein de laquelle sont effectués tous les traitements géomatiques nécessaires aux calculs d'indicateurs de vulnérabilité.

Un troisième élément vient compléter ce duo : la documentation, qui se veut interactive et la plus accessible possible (quel que soit le niveau technique de l'utilisateur), qui est fournie sous la forme d'un site web.

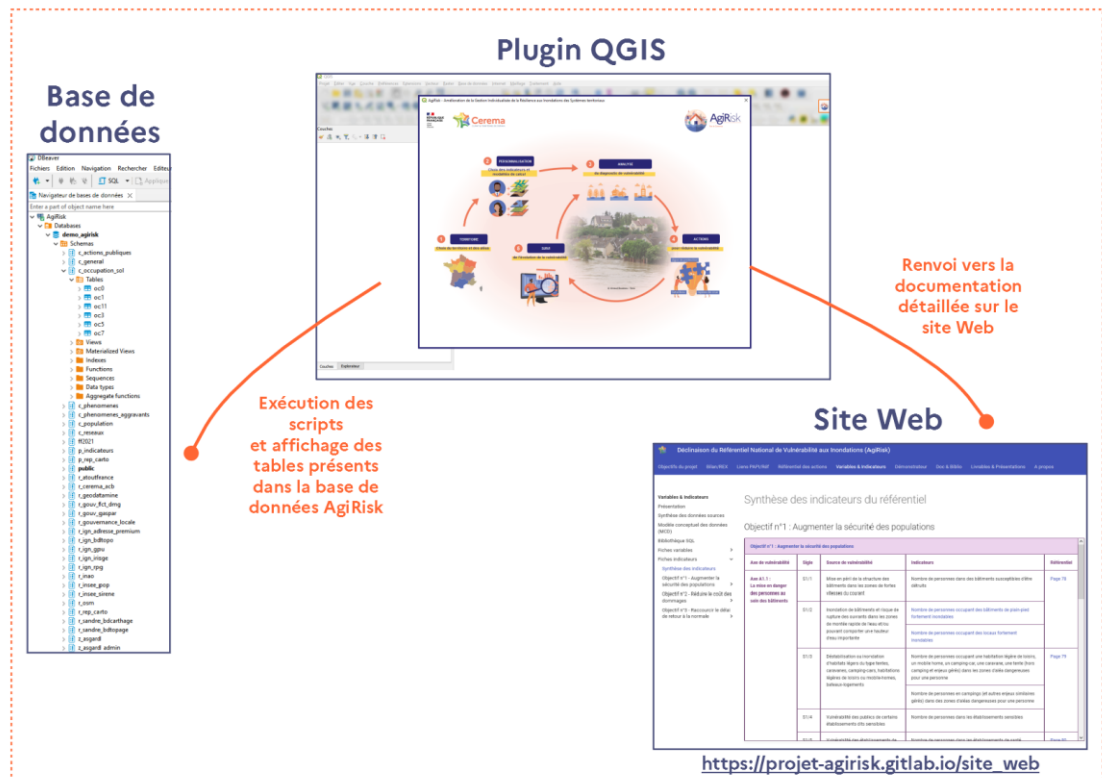


Figure 2 : Ecosystème de l'outil AgiRisk

Sources de données et fondements techniques

Pour ce qui concerne les données d'enjeux, à ce jour, seules des données nationales (de l'IGN : BDTopo, Registre parcellaire graphique, IRIS GE, etc ..., de l'INSEE, de SIRENE...) sont intégrées dans la base de données mais la structure de la base est construite pour faciliter l'intégration ultérieure de données locales, et ce afin d'être au plus proche des territoires.

Concernant la mise à jour des données d'enjeux, elle est à l'heure actuelle déclenchée par l'utilisateur opportunément à chaque mise à jour des données nationales sources. Ce point est intimement lié à la mise à disposition d'une infrastructure de publication de données géographiques (travail en cours en 2023) car c'est en fait le gestionnaire de la base de données (qui peut être différent de l'utilisateur du plugin **AgRisk**) qui détermine cette fréquence de mise à jour. Cependant, l'utilisateur peut utiliser n'importe quel millésime présent en base.

Pour ce qui concerne les données d'aléas, l'outil est construit de façon à pouvoir utiliser en parallèle plusieurs données différentes d'aléas sur un même territoire, chacune de ces données étant la source d'un calcul distinct des impacts de cet aléa. Il est ainsi non seulement possible de gérer plusieurs types d'aléas (submersion marine, débordement de cours d'eau, remontée de nappe...), mais également autant de niveaux d'intensités que souhaité (que ces différentes intensités correspondent à des périodes de retour ou des variabilités entre plusieurs études d'aléas).

La suite du processus d'utilisation de l'outil **AgiRisk** est totalement indépendante de l'aléa choisi : il est tout à fait possible de calculer « (quasiment) à la volée » les impacts d'une inondation prévue avec son incertitude associée. En terme de gestion opérationnelle, cela se traduit par le choix de deux ZIP – une minorant l'évènement, l'autre le majorant – et le calcul de leur impact respectif.

Expérience utilisateur

Le plugin **AgiRisk** est un outil de partage de la connaissance du risque d'inondation à travers la localisation des enjeux impactés et des conséquences d'une inondation sur la population, le tissu économique ou encore l'environnement.

Les diagnostics sont proposés suivant des approches cartographiques, infographiques et statistiques à différentes échelles de visualisation afin de rendre compte de la façon la plus variée, pédagogique et complète des résultats obtenus.

L'interface d'accueil se présente comme suit :

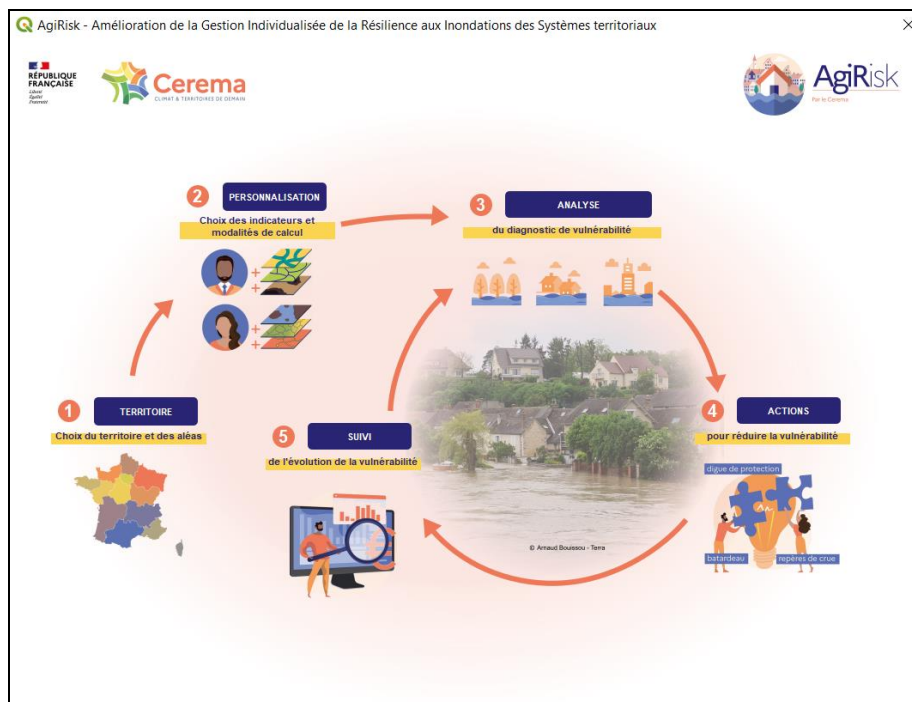


Figure 3 : Interface d'accueil de l'outil AgiRisk

- 1- La première étape essentielle repose sur le choix du territoire d'étude, l'emprise de l'aléa et le type d'occurrence sur lesquels les indicateurs vont être calculés.
- 2- La force de l'outil réside ensuite dans l'étape de personnalisation au point de vue de l'utilisateur (choix des indicateurs et thèmes pour les regrouper). A ce jour, trois points de vue ont été construits :
 - a. un nommé "SNGRI" pour les utilisateurs souhaitant calculer les indicateurs issus du référentiel de vulnérabilité,
 - b. un point de vue "aménagement" à destination des services d'urbanisme et aménagement,
 - c. et un point de vue "gestion de crise" à destination des acteurs oeuvrant pour la sécurité en cas d'événements majeurs.
- 3- A partir du choix effectué, le diagnostic peut être réalisé. Il s'appuie sur le calcul des indicateurs sélectionnés, à savoir le croisement des données d'aléas et d'enjeux intégrées dans la base.

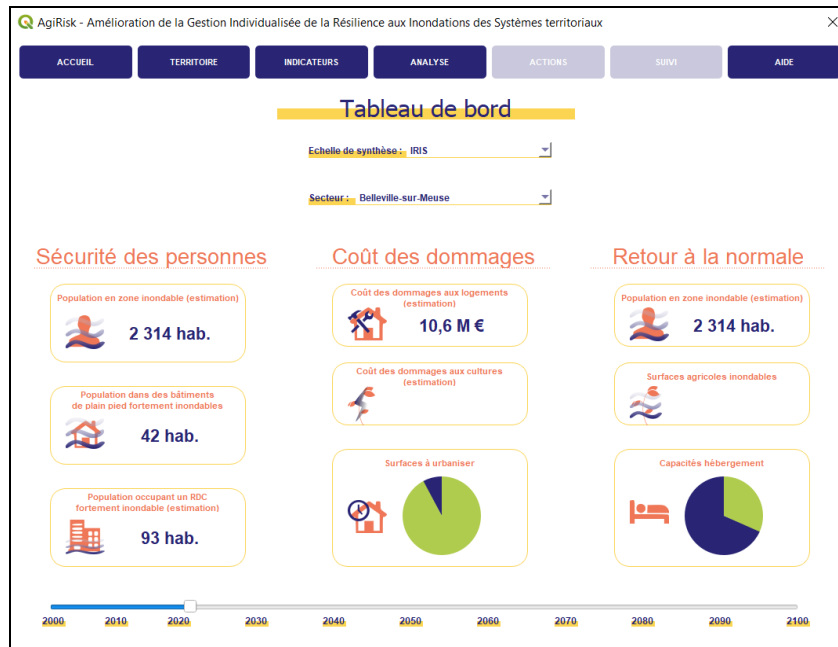


Figure 4 : Tableau de bord de l'outil AgiRisk

- 4- A l'issue du calcul, un tableau de bord récapitulatif s'affiche avec la possibilité de modifier si besoin l'échelle de visualisation. C'est ici qu'intervient le lien avec l'interface de Qgis qui permet :
 - a. l'affichage des résultats sous forme cartographique afin d'identifier visuellement la localisation des enjeux impactés, l'emprise des aléas ainsi que l'ensemble des données spatialisées des indicateurs calculés.
 - b. différentes échelles de zooms et analyses thématiques et un affichage différencié, de l'EPCI au bâtiment, pour rendre compte et répondre aux diverses missions des acteurs locaux.

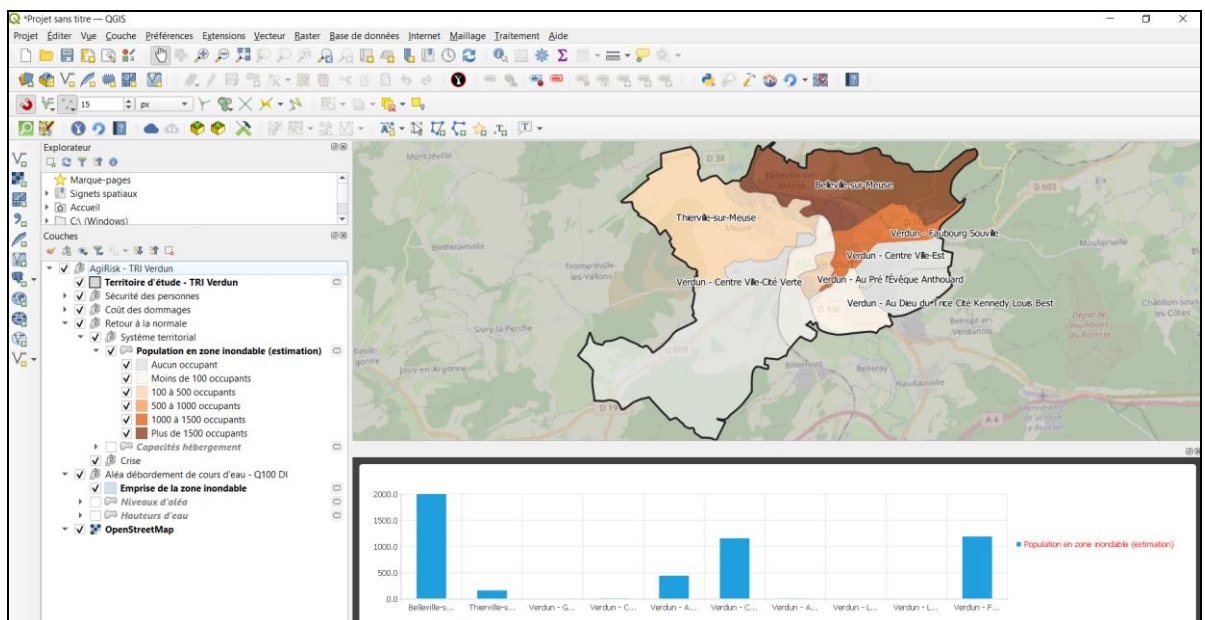


Figure 5 : Cartographie de la population en zone inondable à l'échelle communale

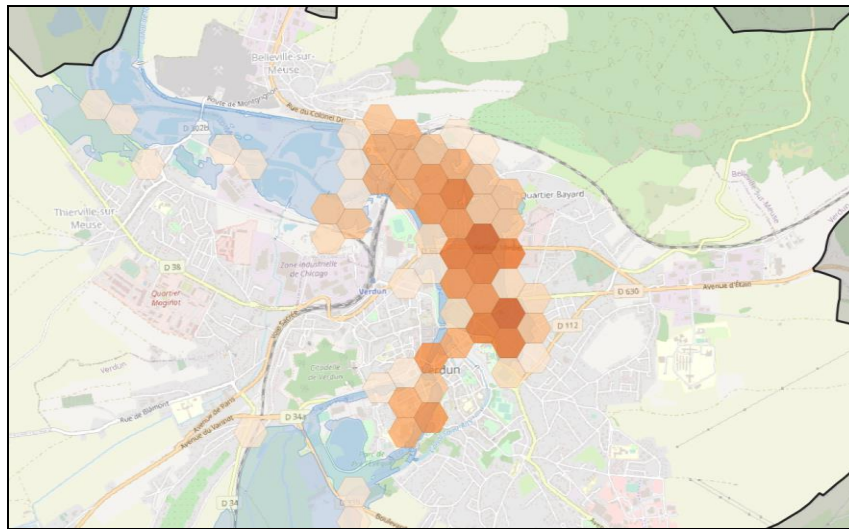


Figure 6 : Représentation cartographique hexagonale pour la localisation des enjeux

- 5- Afin de faciliter le travail des acteurs locaux, le diagnostic doit permettre dans un second temps d'identifier des actions pertinentes à mettre en place sur le territoire étudié. Ainsi, l'onglet "Actions" propose une sélection d'actions considérées comme pertinentes dès qu'un seuil d'alerte (propre à chaque indicateur et paramétré dans l'outil) est atteint. Dès lors, il est possible d'avoir accès aux fiches descriptives des actions proposées pour guider les acteurs locaux. L'objectif de ressource pédagogique est ainsi rempli.

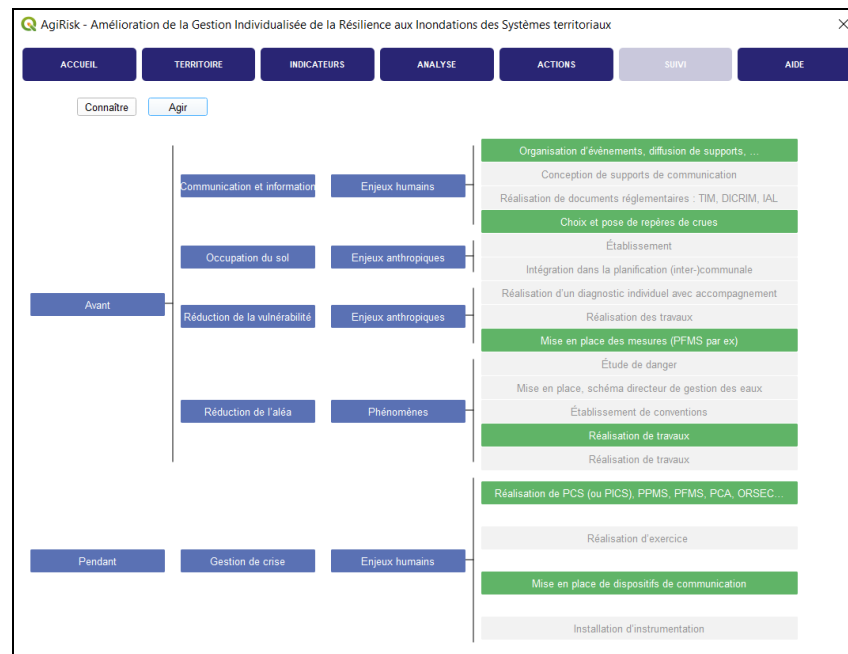


Figure 7 : Extrait de l'arborescence des actions proposées par AgiRisk

- 6- Enfin, l'un des besoins essentiels exprimé par les acteurs locaux est de pouvoir évaluer périodiquement la pertinence des actions à mettre en place. Ainsi, **AgiRisk** permet d'obtenir rapidement, à différentes échéances temporelles, le diagnostic d'un territoire donné et d'étudier le bénéfice des actions précédemment mises en place sur la réduction de la vulnérabilité. Il est ensuite possible de comparer et suivre graphiquement, année après année, l'évolution de la vulnérabilité sur un territoire donné.

Conclusion

En 2022, un premier démonstrateur d'**AgiRisk** a été présenté aux Assises Nationales des Risques Naturels et a suscité l'intérêt des différents acteurs locaux réunis. En 2023, des ateliers d'utilisateurs sont organisés afin de recueillir leurs avis sur la première version finalisée composée de quelques indicateurs tests. L'objectif est de rester fidèle aux besoins des acteurs en terme d'ergonomie, d'indicateurs, de visualisation cartographique et de finalité de l'outil.

Ces ateliers permettront d'orienter le choix des nouvelles fonctionnalités à intégrer et d'entrevoir également des liens avec d'autres organismes oeuvrant pour la prévention des inondations.

En effet, il est notamment prévu de tester l'intégration continue de données d'entrée d'aléas telles que les zones inondées potentielles (ZIP)/zones d'iso classes de hauteurs (ZICH) produites par le SCHAPI. Cela permettrait d'alimenter **AgiRisk** avec de nouvelles emprises d'aléas et pour le SCHAPI de l'utiliser pour produire des diagnostics pour les missions des référents départementaux d'inondations, autour de la préparation à la crise.

De plus, dans une optique de diffusion élargie, l'équipe d'**AgiRisk** et le SCHAPI ciblent pour l'instant la Géoplateforme de l'IGN comme future infrastructure de publication de données afin de mettre à disposition les données produites par le SCHAPI et **AgiRisk**. Cette synergie autour de la géoplateforme devrait permettre une diffusion élargie de données essentielles dans la compréhension et la gestion des phénomènes d'inondation.

Issue d'une méthodologie nationale reconnue dans le domaine de la prévention des risques, **AgiRisk** a vocation, d'un point de vue technique, à faciliter le travail des acteurs locaux grâce aux calculs automatisés des indicateurs de vulnérabilité choisis par l'utilisateur et à leur mise en forme par le biais de cartographies interactives. Au-delà de ses atouts techniques, **AgiRisk** incite au travail collaboratif et à la coopération entre différents acteurs locaux (avec des objectifs différents, propres à leurs missions) autour de la prévention des risques.

EVALUATION DU MODELE DE PREVISION DES CRUES GRP SUR LES BASSINS VERSANTS DE L’EST DE LA COTE MEDITERRANEENNE FRANÇAISE

*Evaluation of the GRP flood forecasting model on the eastern part of the French
Mediterranean coast*

Auteurs : VIGOUREUX Sarah^{1, 2*}, BRIGODE Pierre^{1, 3}, François TILMANT³, Paul C. ASTAGNEAU³, Charles PERRIN³, Julie POGGIO², Raphaëlle DREYFUS², Christophe LAROCHE⁴ et Emmanuel TRIC¹.

* *auteur correspondant*

¹Université Côte d’Azur, CNRS, OCA, IRD, Geoazur, France.
(sarah.vigoureux@geoazur.unice.fr)

²SMIAGE Maralpin, Nice, France.

³ Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR, Antony, France.

⁴ Météo-France, Direction Interrégionale Sud-Est, Aix-en-Provence, France

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : GRP, crue, méditerranée

Plusieurs épisodes pluvieux particulièrement intenses se sont succédés sur le département des Alpes-Maritimes depuis quelques années, impactant différents bassins versants par le ruissellement et le débordement soudain de cours d’eau. Les conséquences associées sont des dégâts colossaux (plusieurs dizaines de décès et des centaines de millions d’euros de dégâts assurés). Si les inondations du 3 octobre 2015 et de fin 2019 (23 novembre et 1er décembre) ont principalement impacté des bassins versants côtiers du département (e.g. Riou de l’Argentière, Brague, cf. Brigode et al., 2021), le passage de la tempête Alex le 2 octobre 2020 a touché les vallées de l’arrière-pays (e.g. Vésubie et Roya, cf. Payrastra et al., 2022) démontrant la diversité des territoires soumis à l’aléa d’inondation et la complexité des phénomènes hydrométéorologiques en jeu. Ces épisodes marquants illustrent le besoin fort de perfectionner les outils numériques de prévisions hydrométéorologiques, permettant de prévoir les cumuls de pluie à venir et d’anticiper les réactions des cours d’eau sur ce territoire.

L’objectif de ce travail est d’évaluer les performances du modèle hydrologique GRP pour réaliser des prévisions de crues sur une vingtaine de bassins versants jaugés situés dans le sud-est de la France (Arc, Argens, Reyran, Brague, Siagne, Loup, Esteron, Var, ...). GRP est un modèle nécessitant peu de données et permettant de prendre en compte des scénarios de prévision météorologique (Tangara, 2005 ; Berthet, 2010). S’il est largement utilisé par les Services de Prévision des Crues (SPC) en France métropolitaine, GRP a encore été peu testé en région méditerranéenne. Une version multi pas-de-temps du modèle GRP a été développée il y a quelques années (Ficchi, 2017 ; Viatgé et al., 2019), permettant de faire des prévisions à pas de temps fin (jusqu’à 5 minutes). Cette version est particulièrement intéressante pour les bassins très réactifs. Des travaux récents ont par ailleurs cherché à améliorer les performances des modèles GR lors des crues générées par les premières pluies automnales, souvent très intenses et très variables dans l’espace (Peredo et al., 2022 ; Astagneau et al., 2022). Ce travail vise à intégrer ces développements récents au sein de l’outil opérationnel GRP, et à

quantifier leurs impacts respectifs sur la performance des prévisions de crues sur les bassins jaugés. Les performances sont évaluées sur la période 2000-2020, par une procédure de calage-contrôle dédiée, en utilisant comme données hydro-climatiques les bases de données COMEPHORE (Tabary et al., 2012), SAFRAN (Vidal et al., 2010), et les débits observés issus de l’HydroPortail (<https://hydro.eaufrance.fr/>).

1. REFERENCES

- [1] Astagneau, P. C., Bourgin, F., Andréassian, V. & Perrin, C. (2022). Catchment Response to Intense Rainfall: Evaluating Modeling Hypotheses. *Hydrological Processes*, e14676. 10.1002/hyp.14676.
- [2] Berthet, L., 2010. Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l’information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), Paris, 603 p (lien).
- [3] Brigode, P., Vigoureux, S., Delestre, O., Nicolle, P., Payrastra, O., Dreyfus, R., Nomis, S. & Salvan, S. (2021). Inondations sur la Côte d’Azur : bilan hydro-météorologique des épisodes de 2015 et 2019. *La Houille Blanche* 107, n° 1: 1- 14. 10.1080/27678490.2021.1976600.
- [4] Ficchi, A., 2017. An adaptive hydrological model for multiple time-steps: Diagnostics and improvements based on fluxes consistency. Thèse de doctorat, Irstea (Antony), GRNE (Paris), 281 p. (lien).
- [5] Payrastra, O., Nicolle, P., Bonnifait, L., Brigode, P., Astagneau, P., Baise, A., Belleville, A. et al. (2022). Tempête Alex du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes : une contribution de la communauté scientifique à l’estimation des débits de pointe des crues. *La Houille Blanche*, 2082891. 10.1080/27678490.2022.2082891.
- [6] Peredo, D., Ramos, M.-H., Andréassian, V. & Oudin, L. (2022). Investigating hydrological model versatility to simulate extreme flood events. *Hydrological Sciences Journal* 67, n° 4: 628- 45. 10.1080/02626667.2022.2030864.
- [7] Tabary, P., Dupuy, P., L’Henaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., & Merlier, C. (2012). A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: Methodology and first results. *International « Wheeler Radar and Hydrology »*, Exeter, IAHS.
- [8] Tangara, M. (2005), Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, EPHE, Cemagref, Paris, 374 p (lien).
- [9] Viatgé J., Pinna T., Ficchi A., Dorchie D., Garandeau L., Perrin C., Tilmant F. (2019). Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prévision des crues GRP. *La Houille Blanche*, 2, 72-80, doi: 10.1051/lhb/2019017
- [10] Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J.-M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system: a 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627- 1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>

- [11] Vigoureux, S., Brigode, P., Poggio, J., Nomis, S., Dreyfus, R., Delestre, O., Moreau, E., Ramos, M.-H., Laroche, C., & Tric, E. (2022a). Spatio-temporal characteristics of heavy precipitation observed over the last 20 years on French Riviera coastal catchments. Assemblée scientifique de l’AISH, Montpellier. Communication orale.
- [12] Vigoureux, S., Liebard, L-L., Chonoski, A., Robert, E., Torchet, L., Poveda, V., Leclerc, F., Billant, J., Rousseau, G., Delestre, O. & Brigode, P. (2022b). Crue du 23 novembre 2019 sur la Côte d’Azur : comparaison de débits estimés par LSPIV et par modélisation hydrologique. La Houille Blanche. doi: 10.1080/27678490.2022.2101391.

Tempête ALEX – Retour d’expérience des crues torrentielles du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes

ALEX storm event – Lessons learned from the debris-floods that occurred on October, 2nd 2020 in the French “Alpes Maritimes” region

MARTINS Céline¹, KUSS Damien¹, GUITET Cécile^{1*}, CARLADOUS Simon¹, ROBERT Yannick¹, ANDREIS Nathalie¹, PITON Guillaume², LIEBAULT Frédéric², FLIPO Myriam³, CHAPUIS Margot⁴, PASSY Paul⁵, MELUN Gabriel⁶, QUEFFELEAN Yann¹

* *auteur correspondant*

1 ONF-RTM, Direction des risques naturels, services RTM Alpes Maritimes et Isère, France

2 Univ. Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France.

3 Sorbonne Université, UR Médiations, Paris, France

4 Université Côte d’Azur, CNRS, ESPACE, Nice, France

5 Université Paris-Cité, UMR 8586 PRODIG, Paris, France

6 OFB, Direction de la recherche et de l’appui scientifique, Vincennes, France

Choix du thème/session : 1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs : Tempête ALEX ; Retour d’expérience ; Crue torrentielle ; Évolutions hydro-morphologiques ; Transport sédimentaire

1. Un événement pluviométrique exceptionnel

Le 2 octobre 2020, les Alpes-Maritimes ont subi, lors du passage de la tempête Alex, un épisode méditerranéen exceptionnel qui s’est traduit par de très forts cumuls pluviométriques, avec des records absolus de pluviométrie observés en Tinée, en Vésubie et en Roya. Les cumuls pluviométriques enregistrés sur 12h, sur les bassins versants de la Roya et de la Vésubie ainsi que sur la basse Tinée, sont associés à des périodes de retour comprises entre 500 et 1000 ans [1, 2].

Au-delà de la qualification des débits de la crue (consensus hydrologique piloté par le CEREMA [3]), ce sont les évolutions morphologiques majeures qui témoignent de la rareté de l’occurrence d’un événement de cette ampleur. Sur le haut Boréon, l’érosion de terrasses fluvio-glaciaires datant de l’époque du retrait des glaciers (environ -10 000 ans,) sur plus de 20 m de hauteur par endroit, traduit le caractère extrême de l’événement du 2 octobre 2020. Une analyse exploratoire de la période de retour a été menée en cherchant des exemples équivalents de vallées dévastées dans les Alpes et les Pyrénées sur les 100 dernières années. De façon intéressante, cette méthode simpliste aboutit elle aussi à une période de retour d’une dévastation généralisée d’une vallée de montagne de plus de 25 km de long l’ordre de 600 à 1000 ans [4].

2. Des évolutions hydro-morphologiques majeures et des dégâts considérables

L’intensité et la durée de la crue, sur ces torrents et rivières torrentielles à fortes pentes, sont à l’origine de niveaux d’érosion et de volumes de matériaux charriés sans précédent (Figure 1). Des centaines de bâtiments, des dizaines de kilomètres de voirie et de nombreux ponts ont été emportés ou très fortement endommagés par la crue. Des dizaines d’hectares de ripisylve ont été arrachés. Les lits des cours d’eau ont été métamorphosés.

Au lendemain de la crue, il est apparu nécessaire de caractériser les phénomènes hydrologiques et morphologiques survenus, pour répondre au besoin de compréhension de l'évènement, et en tirer les enseignements au bénéfice de la prévention des risques et de la reconstruction. Le retour d'expérience technique diligenté par la Direction des Territoires et de la Mer des Alpes Maritimes a été organisé en deux volets, un volet hydrologique piloté par le Cerema, qui a donné lieu à un travail de consensus pour établir les débits de la crue, et un volet torrentiel piloté par l'ONF-RTM (Service de Restauration des Terrains de Montagne de l'Office National des Forêts)

Le volet « crue torrentielle » a été dimensionné pour répondre au besoin de caractérisation et de compréhension des phénomènes, et d'anticipation, dans la mesure du possible, de l'évolution prévisible des cours d'eau. Il devait également répondre aux défis immédiats posés par la gestion post-crise, avec un *porter à connaissance* rapide des risques, la mise en place de mesures de sauvegarde et le partage de principes d'aménagement adaptés au contexte torrentiel.



Figure 1 : Photos de terrain post évènement : (gauche) Vue drone, Vieville (source V. Koulinski ETRM) ; (droite) érosion de berge menaçant un bâti (source : F. Adamo Cerema)

3. Approche et contenu du retour d'expérience sur le volet torrentiel

Le retour d'expérience de la crue torrentielle exploite les données relevées sur le terrain par le service RTM avec l'appui des collectivités gemapiennes et de la communauté scientifique. Il valorise largement les photographies réalisées par le Cerema lors de survols en hélicoptère, ainsi que les photographies aériennes de l'IGN et les levés LiDAR *ante* et *post* crue. Les indices morphologiques de la crue ainsi que les dommages aux enjeux ont été relevés entre le 5 octobre et le 20 novembre 2020.

Ce travail a été compilé dans deux rapports, l'un concernant la vallée de la Roya, et l'autre la vallée de la Vésubie. La Tinée, fortement touchée par la crue seulement au niveau de certains de ses affluents et sur la partie aval de son cours principal, n'a pas été traitée dans le cadre de ce retour d'expérience technique. Chaque rapport est articulé selon les points suivants :

- **Une présentation du bassin versant** rappelant le contexte géologique, géomorphologique et historique. Ce chapitre développe notamment l'historique des crues passées et leurs conséquences, commune par commune ;
- **Une présentation détaillée des constats** réalisés dans les semaines suivant la crue du 2 octobre 2020 : identification des secteurs impactés, intensité des phénomènes torrentiels, relevé des dommages aux bâtis et aux infrastructures. Ce chapitre présente également le déroulé de la crue, pour chaque commune, reconstitué d'après témoignages. Les dommages aux bâtis et aux infrastructures sont analysés au regard de l'intensité des phénomènes torrentiels et de leur localisation par bassin versant. Les données relevées (qualification et illustration des

endommagements des bâtis et infrastructures) et les synthèses produites (atlas cartographiques) sont fournies en annexe.

- Une analyse détaillée des évolutions morphologiques survenues lors de la crue :
 - en premier lieu, il s’agit d’appréhender qualitativement la contribution sédimentaire des hauts bassins versants. L’analyse géomorphologique réalisée fait l’objet d’une restitution sous forme d’une cartographie fournie en annexe et de fiches de synthèse disponibles également en annexe ;
 - puis, en fond de vallée sur les cours d’eau principaux, il s’agit de caractériser l’évolution des bandes actives et l’évolution des profils en long de chaque cours d’eau, tronçon par tronçon. La surface de la bande active a par exemple été multipliée par 6 sur certains cours d’eau (Boréon). Par ailleurs, les lits se sont en moyenne exhaussés de plusieurs mètres (jusqu’à 10 m sur certains tronçons, par exemple sur le cours aval du torrent de la Madone de Fenestre), et des érosions de berge mettant à nu des talus de grande hauteur, jusqu’à près de 30 m, ont été observées sur la Vésubie (Figure 1). Sont ainsi expliqués et illustrés les élargissements spectaculaires des lits, de même que les niveaux d’érosion et de dépôts phénoménaux observés lors de la crue, et qui ont radicalement changé la morphologie des vallées de la Roya et de la Vésubie.
Pour la vallée de la Vésubie, la disponibilité de deux LiDAR *ante* et *post*-crue a permis, après réaligement des nuages de points, de développer des analyses complémentaires permettant de quantifier les volumes de matériaux mobilisés, les taux d’érosion et les taux de dépôt. À titre d’exemple sur le haut Boréon, des taux d’érosion en moyenne de l’ordre de 200 m³/ml ont été calculés, avec des valeurs exceptionnelles atteignant localement plus de 1000 m³/ml, valeur supérieure à toutes les références bibliographiques répertoriées à l’échelle mondiale.
De multiples atlas cartographiques et un catalogue des profils en travers exploités dans les analyses constituent une base de documents exceptionnelle pour mieux comprendre l’événement, et, dans une certaine mesure, tenter de prédire les tendances futures.
- **Une analyse de la production et du transport des flottants** mobilisés en quantités considérables lors de l’épisode, et dont la contribution au déroulé de la crue a été déterminante. Un développement spécifique est proposé dans ce chapitre, pour quantifier les volumes de bois arrachés, transférés et déposés. On évalue entre 50 000 et 70 000 m³ le volume de bois exporté pour l’ensemble des deux vallées Roya et Vésubie (hypothèse médiane des modèles). Un atlas cartographique synthétise tronçon par tronçon, les zones contributrices et les zones de dépôt d’embâcles ;
- **Des préconisations pour un réaménagement résilient des vallées en contexte torrentiel.** Les principes fondamentaux visant à réduire la vulnérabilité des réaménagements et des enjeux dans la perspective de futurs épisodes météorologiques marqués, sont énoncés et expliqués, puis déclinés pour les principales traversées urbaines. Sont joints en annexe les supports de présentation préparés par l’ONF-RTM pour partager ces principes lors des ateliers Gemapi organisés par la mission interministérielle pour la reconstruction des vallées entre janvier et août 2021.
- Un dernier chapitre s’intéresse à la **comparaison de l’emprise de la crue du 2 octobre 2020 avec les documents d’affichage du risque existant**. Il souligne le caractère très exceptionnel de cette crue, déjà mis en évidence à travers les différentes analyses, et ouvre sur la question des modalités d’affichage du risque, tant pour la maîtrise de l’urbanisme que pour la gestion de crise.

4. Remarques conclusives

Cette contribution au colloque vise en synthèse à illustrer le caractère exceptionnel de la tempête Alex sur le plan des changements morphologiques. Elle vise aussi à partager la façon dont a été opéré le retour d’expérience, tant sur le plan de la documentation de l’événement (opération qui vise à tirer des leçons à moyen et long termes), que sur celui de court terme qui concernait l’appui aux acteurs sur les mois et années qui ont suivi l’événement. Notons que la façon dont a été mené cet appui a été salué par les inspecteurs de l’Etat [5], ce qui nous laisse penser qu’il est utile de partager la façon dont il a été mené autant que les conclusions auxquelles il a abouti.

5. RÉFÉRENCES

- [1] ONF-RTM, INRAE-ETNA. 2022a. Retour d’expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Roya - Volet torrentiel. Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06): Nice (France). 275 pp.+922 annexes
- [2] ONF-RTM, INRAE-ETNA. 2022b. Retour d’expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie - Volet torrentiel. Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06): Nice (France). 299 pp.+1540 annexes.
- [3] Cerema, DDTM06, DREAL PACA, EauAzur, EDF, INRAE, MNCA, ONF-RTM, SMIAGE, SPC (Météo France), UCA, Univ. Eiffel (2021) RETEX technique ALEX, Inondations des 2 et 3 octobre 2020, Consensus hydrologique
- [4] Piton, G., Y. Quefféléan, F. Liébault, D. Kuss, S. Carlados, Y. Robert, C. Martins, et C. Guitet. « Alpes-Maritimes - Gestion post-Tempête Alex : Réflexions sur l’estimation de la période de retour des changements morphologiques majeurs associés aux crues extrêmes ». INRAE & ONF-RTM, octobre 2021. 9p.
- [5] Arbizzi, S., B. Cinotti, J.F. Desbouis, L. Moreau, P. Sauzey, et F. Vilms. « Retour d’expérience des intempéries des 2 et 3 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes - Enseignements de la crise et propositions pour une reconstruction résiliente ». CGEDD - IGA, octobre 2021. <https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/retour-d-experience-des-intemperies-des-2-et-3-a3155.html>.

ELABORATION DE CARTES D'EROSION/DEPOT LORS DES CRUES SOUDAINES

Development of potential erosion/deposition maps during flash floods

Auteurs : CASSAN Ludovic^{1*}, ROUX Hélène¹, HOSSEINZADEH Atiyeh¹, SCHAFF Aurélien¹

* *auteur correspondant*

¹Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France, lcassan@imft.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Crue éclair, sédiments, carte de risque

1. Contexte

Lors des crues soudaines, le risque lié aux transports de matières est significatif comme l'ont montré les événements sur le gave de Pau en 2013 ou plus récemment la tempête Alex en octobre 2020. Pourtant ce risque reste difficilement prévisible car il nécessite à la fois une bonne modélisation des flux liquides mais également une bonne représentation spatiale des matériaux susceptibles de se mettre en mouvement. De plus, même pour des événements hydrologiques non extrêmes, le transport de sédiments présente un risque pour le bon fonctionnement des ouvrages, notamment des retenues hydroélectriques. Il convient donc de pouvoir quantifier à l'échelle d'un événement le volume total de matière mis en mouvement ainsi que les zones plus spécifiquement soumises à l'érosion ou au dépôt.

Le but du travail présenté ici est de réaliser la modélisation des flux sédimentaires par suspension et par charriage à l'échelle d'un bassin versant pour un événement. Ces modélisations n'ont pas vocation à décrire l'évolution morphologique du cours mais bien d'identifier les zones susceptibles de présenter de forts dépôts ou de fortes érosions en fonction de caractéristiques telles que la granulométrie, l'occupation du sol ou l'intensité de l'évènement.

Dans cet article on s'attachera à décrire et comparer les modélisations possibles pour l'estimation du risque sédimentaire à partir de simulations hydrodynamiques. Un bassin versant d'étude a été choisi pour illustrer la méthode qui est généralisable aux bassins versants soumis aux crues éclair.

2. Modélisation

Les crues éclairs sont modélisées à l'aide du logiciel MARINE spécialement dédiés à ces événements [2]. La transformation pluie-débit est obtenue par une modélisation à base physique distribuée, ce qui permet d'avoir pour chacune des mailles de calcul des grandeurs hydrodynamiques de hauteur d'eau et de vitesse. Ainsi il a été possible de coupler les flux liquides au flux solides en suspension à partir d'une loi de transport [1]. La mise en suspension et le dépôt sont aussi modélisés, ce qui permet de simuler une évolution du fond au cours de la crue. Dans ce processus, un seul diamètre de sédiment est pris en compte. Les volumes transités pendant la crue peuvent être obtenus par intégration temporelle des flux solides en suspension.

A partir des volumes ruisselés et de débits instantanés, il est également possible d'estimer des flux solides à partir de la méthode MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) [3]. Cette méthode est généralement utilisée pour connaître l'érosion sur les bassins versants sur des échelles de temps plus

grandes que l'évènement mais sa comparaison avec les calculs permet d'appréhender les domaines de validité de chaque méthode.

Enfin le risque dû au transport solide est particulièrement important dans le réseau de drainage où le charriage peut aussi entrer en jeu. C'est pourquoi il sera pris en compte de façon découplée dans cette première approche. Cela signifie que des lois de transports seront mis en œuvre pour décrire l'évolution du lit par charriage mais sans qu'il y ait rétroaction sur la partie hydrodynamique.

Enfin des cartes de risques peuvent ainsi être établies sur la base des évolutions les plus importantes du fond en les mettant en regard des enjeux sur le bassin versant.

3. Résultats

Les modélisations de la suspension, du charriage et MUSLE ont été effectuées sur des évènements de crue sur le bassin de la Claduègne. Nous avons sélectionné des évènements pour lesquels les calages hydrodynamiques et sédimentaires ont déjà donné lieu à une étude de sensibilité [1]. Les évènements considérés durent en moyenne 1 à 2 jours avec des intensités de précipitations allant jusqu'à 50 mm/h.

Comme attendu, le transport par charriage est principalement significatif dans le réseau de drainage à cause des contraintes hydrodynamiques élevées. De même les volumes transités y sont plus importants à cause de l'aire drainée amont du bassin versant. On peut cependant y observer des zones de dépôts et d'érosions cohérentes avec les zones d'accélération et de ralentissement. Il est également possible de constater un tri granulométrique si plusieurs classes de sédiments sont considérées. L'utilisation de différentes lois de transports influe sur les valeurs maximales même si les ordres de grandeurs et les zones à risques restent identiques (figure 1).

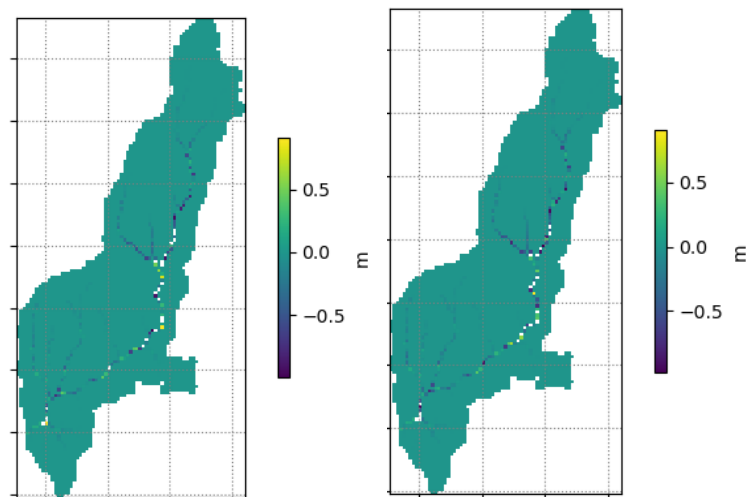


Figure 1 : Evolution du fond pour l'évènement du 18/05/2013 avec la loi MPM (gauche) et Hunziker (droite)

En ce qui concerne les bassins versants, la comparaison du calcul avec suspension et MUSLE donne des résultats du même ordre de grandeurs (figure 2). La méthode basée sur la modélisation du transport semble donc pertinente. Le calage de la rugosité pour le calcul hydrodynamique ou des cartes d'érodabilité (MUSLE) permettent même d'avoir des résultats comparables. L'approche de modélisations des processus semble donc un bon moyen de mieux comprendre et estimer les paramètres spatiaux nécessaires à des méthodes plus simples d'utilisation (MUSLE, RUSLE, ICONA) à destination des décideurs.

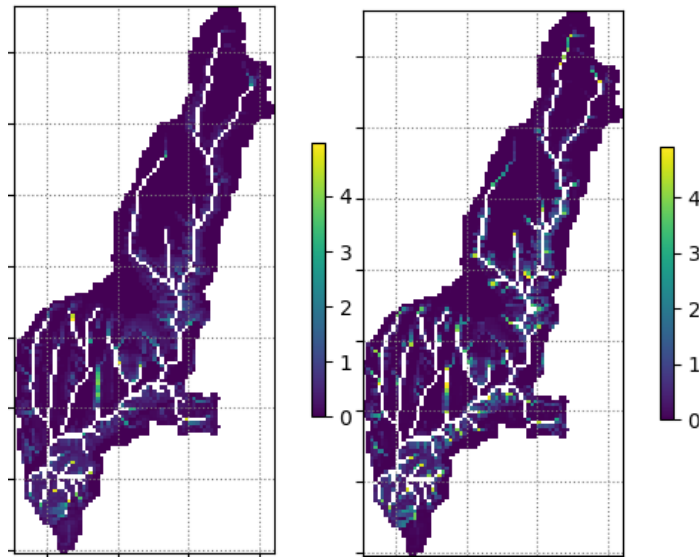


Figure 2 : Volume de sédiments déplacés (en tonnes) au cours de l'événement d'après le calcul MARINE (gauche) et d'après MUSLE (droite).

4. CONCLUSION

La simulation des flux sédimentaires lors de crues éclair revêt une importance significative pour l'estimation du risque global à la fois pour la sécurité mais aussi pour le maintien d'une exploitation durable des versants. A partir de simulations pluie-débit à base physique, il est possible d'estimer ces flux et d'identifier les zones présentant des risques d'érosion ou de dépôts trop importants. Pour cela la modélisation de la suspension et du charriage est effectuée sur chaque maille du bassin versant en prenant directement en compte le ruissellement et les caractéristiques de la surface (pente, couverture, rugosité). Bien que les calages et validations s'effectuent avec des mesures uniquement dans le réseau de drainage, la comparaison avec des méthodes existantes montrent la pertinence de la démarche. L'élaboration de cartes de risques à l'échelle non événementielle est en cours à partir de la définition de scénarii de précipitations. Elles devraient fournir aux décideurs une vision globale des risques sédimentaires sur un bassin versant donné.

5. REFERENCES

- [1] Hosseinzadeh, A., Roux, H., Cassan, L., Douinot, A., 2022. Application of GSA/GLUE methods to evaluate the representation of suspended sediment transport during flash floods in a rainfall-runoff model. IFAC-PapersOnLine, 2nd IFAC Workshop on Integrated Assessment Modelling for Environmental Systems IAMES 2022 55, 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.645>

- [2] Roux, H., Labat, D., Garambois, P.-A., Maubourguet, M.-M., Chorda, J., Dartus, D., 2011. A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 2567–2582. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2567-2011>
- [3] Williams JR. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: *Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources*. Washington (USA): ARS.S-40, US Gov. Print. Office, pp. 244–252

CONSILIARI : UN JEU SÉRIEUX AU SERVICE DES MISSIONS RDI

Consiliari : a serious game designed for RDI missions

Auteurs : PIOTTE Olivier^{1*}, ESCUDIER Aurélie², PUECHBERTY Rachel³, LACAZE Yan¹, DOUKHAN Laurène⁴, WITTEN Aude⁵

* *auteur correspondant*

¹DREAL Nouvelle-Aquitaine, Cité administrative, rue Jules Ferry, 33090 Bordeaux Cedex, France, e-mail : olivier.piotte@developpement-durable.gouv.fr, yan.lacaze@developpement-durable.gouv.fr

²DREAL Occitanie, 1 rue de la Cité administrative, 31074 Toulouse Cedex 9, France, e-mail : aurelie.escudier@developpement-durable.gouv.fr

³SCHAPI, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse, France, e-mail : rachel.puechberty@developpement-durable.gouv.fr

⁴Université Jean Moulin Lyon III, 1c avenue des Frères Lumière, 69372 Lyon Cedex 08, France, e-mail : doukhanlaurene@gmail.com

⁵Agence de l'eau Adour-Garonne, 90 rue de Férétra, 31078 Toulouse Cedex 4, France, e-mail : aude.witten@eau-adour-garonne.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs : mission RDI, gestion de crise, jeu sérieux, professionnalisation

1. La mission de Référent Départemental Inondation (RDI)

La mission de Référent Départemental Inondation (RDI) a été introduite au sein des directions départementales des Territoires et de la Mer (DDTM) par circulaire du 28 avril 2011. Portant en premier lieu sur le réseau fluvial surveillé par l'État, le cadre d'exercice de cette mission a été précisé dans la circulaire du 29 octobre 2018, avec notamment l'élargissement du domaine d'intervention des missions RDI sur le réseau fluvial non surveillé et le littoral pour la métropole ainsi que les départements et régions d'outre-mer. Intégrée en crise dans la mission Sécurité-Défense, la mission RDI a vocation à assurer un conseil technique auprès du Préfet de département en cas de crise inondation, au plus près du terrain et en mobilisant une connaissance locale.

Une animation nationale pour cette mission a été mise en place en 2014 par la DGPR dans une logique d'appui et d'accompagnement des services. Cette animation nationale a été confiée au Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (Schapi). Elle a pour objet de poursuivre la consolidation de la mission initiée depuis 2011 dans les DDT(M) et d'accompagner la déclinaison de la circulaire du 29 octobre 2018, notamment sur des éléments nouveaux. En janvier 2019, avec la mise en place d'une première stratégie d'action triennale pour l'animation nationale des missions RDI, le Schapi a officialisé la mise en place d'une animation régionale – relai de l'animation nationale – portée par les DREAL sur leur territoire par l'intermédiaire de référents régionaux inondation (RRI), et ce pour l'ensemble du périmètre de la mission (réseau surveillé, non surveillé, littoral).

2. Le choix du jeu sérieux comme vecteur de professionnalisation des missions RDI

La mission RDI étant positionnée à l’interface entre la sphère de l’expertise technique et celle de la gestion de crise, elle repose sur de multiples compétences à mobiliser en simultanément, dans le temps très court de la gestion de crise. Celles-ci comprennent à la fois des savoirs techniques (hydro-météorologie par exemple), une connaissance fine du territoire (acteurs, enjeux, etc.) mais également des savoirs-faire et savoirs-être propres à la posture attendue en gestion de crise (capacité d’analyse, travail en équipe, gestion du stress, prise de parole, etc.).

Pour accompagner la montée en puissance des missions RDI, dont la mise en place est encore récente et parfois inégale dans les départements, des actions de professionnalisation ont été menées. Outre la rédaction de guides et fascicules, des formations spécifiques ont été mises en place, d’abord à l’échelle locale ou régionale puis à l’échelle nationale à partir de 2019/2020, sous l’impulsion du Schapi. Ces formations, proposées dans des formats traditionnels, ciblent plutôt les compétences et savoirs-faire techniques. Pour cibler les savoirs-être ainsi que les savoirs-faire moins techniques, le Schapi a souhaité miser sur le jeu sérieux (serious game en anglais) comme vecteur de formation.

Les jeux sérieux sont de plus en plus utilisés pour la formation ou l’entraînement. Lorsqu’ils sont bien construits, ils permettent de proposer des situations d’apprentissage complexes et authentiques tout en favorisant la dynamique et le travail en équipe par leurs aspects ludiques.

Le jeu sérieux est également complémentaire d’un exercice. Là où un exercice propose généralement la simulation d’une situation « grandeur nature » au plus près de la réalité et nécessitant un temps de préparation important, le jeu sérieux propose une simulation ludifiée et orientée vers certains aspects pédagogiques, plus accessible et plus facilement transposable.

3. Conception du jeu

L’article reviendra sur le processus de conception du jeu Consiliari, mené par Laurène Doukhan à l’occasion d’un stage de Master 2 encadré par le Schapi en 2019 [1] et basé sur la méthode dite des six facettes proposée par Marne *et al* [2] (figure 1). Cette méthode fait reposer la conception d’un jeu sérieux sur les 6 thématiques suivantes, qui permettent d’articuler les volets pédagogique et ludique :

- objectifs pédagogiques ;
- conditions d’utilisation ;
- simulation du domaine ;
- interaction avec la simulation ;
- problèmes et progression ;
- décorum.

L’article détaillera également les éléments constitutifs, principes et règles du jeu retenus dans la version finale de Consiliari après cette phase de conception.

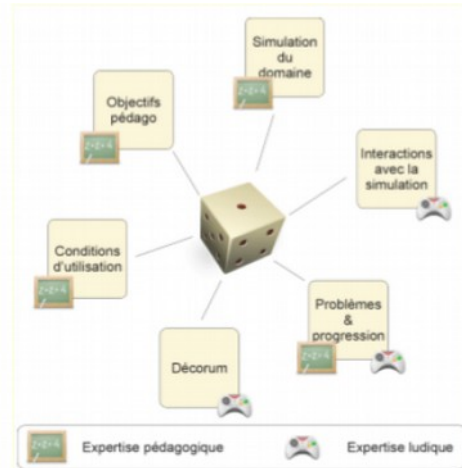


Figure 1: schéma conceptuel des six facettes du jeu sérieux (Marne et al [2])

Après une dernière étape de design confiée à une société spécialisée, Consiliari a été édité sous la forme d’une boîte de jeu (figure 2) et est disponible depuis fin 2021.



Figure 2: photo de la boîte de jeu Consiliari

4. Premiers retours d’expérience et perspectives

Depuis lors, le jeu a été utilisé par les missions RDI dans de nombreux départements, avec un accompagnement assuré par les référents régionaux inondation (RRI). Les sessions de jeu ont pu concerner aussi bien l’équipe RDI, les cadres d’astreinte intervenant en crise, et ont parfois vu la participation de services extérieurs en lien avec la mission RDI (service de prévision des crues, Préfecture) pour lesquels le jeu présente également un intérêt pour se « mettre dans le peau » de la mission RDI et ainsi mieux appréhender ses attentes et ses contraintes.

Les retours sur ces premiers mois d’utilisation confirment le grand intérêt de Consiliari pour les missions RDI. Le jeu apparaît suffisamment authentique et suscite suffisamment de stress positif pour immerger pleinement les joueurs dans la posture voulue et mobiliser les compétences identifiées, avec

en premier lieu le fonctionnement en équipe, la capacité d’analyse et de synthèse en temps contraint, la prise de parole. L’aspect ludique a également été mis en avant avec des joueurs qui en redemandent après avoir passé un moment professionnel très agréable (c’est un jeu) et néanmoins utile (c’est sérieux). Il a été également noté une autre vertu de Consiliari, qui a incité certaines missions RDI (peut-être assez peu fréquemment concernées par des événements réels) à re-questionner leur outillage et certaines de leurs pratiques, au vu d’enseignements tirés du jeu. L’article sera l’occasion de détailler ces retours.

Toutefois, ces premiers mois d’utilisation de Consiliari ont également permis d’identifier quelques pistes d’amélioration. Sur le contenu du jeu lui-même où, à l’usage, certains aménagements sont possibles pour optimiser encore l’expérience des joueurs. À titre d’exemple, certaines règles du jeu ont pu être précisées, quelques coquilles ont été détectées dans certains éléments du jeu, et une adaptation condensée du scénario a été imaginée afin de raccourcir la durée d’une partie pour les services qui manqueraient de temps disponible.

À court terme, les ajustements les plus simples sont proposés aux RRI qui accompagnent les missions RDI pour la prise en main de Consiliari, ainsi qu’aux maîtres du jeu désignés pour animer chaque partie, avec également des tutoriels vidéo permettant de faciliter la mise en œuvre du jeu et de rendre les missions RDI autonomes. À moyen terme, une réédition du jeu est envisageable.

En parallèle, il est également prévu de bâtir un autre scénario de jeu, qui permettrait soit de renouveler l’expérience de jeu dans un contexte similaire (fluvial), soit de changer de contexte (par exemple, traiter de la submersion marine).

5. RÉFÉRENCES

- [1] Doukhan, L. (2019). Le serious game : un outil applicable pour la formation à la mission de Référent Départemental Inondation - Mémoire de stage de master 2, Université Jean Moulin – Lyon III
- [2] Marne B., Huynh-Kim-Bang B., Jean-Marc Labat J. (2011). Articuler motivation et apprentissage grâce aux facettes du jeu sérieux. Conférence sur les Environnements Informatiques pour l’Apprentissage Humain, pp. 69-80.

Consensus hydrologique de la tempête ALEX du 2 et 3 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes

Towards a hydrological consensus about the 2nd – 3rd October 2020 ALEX storm event in the French “Alpes Maritimes” region

Auteurs : Frederic Pons¹, Laurent Bonnifait¹, David Criado¹, Olivier Payrastra², Felix Billaud³, Pierre Brigode⁴, Catherine Fouchier⁵, Philippe Gourbesville⁶, Damien Kuss⁷, Nathalie Le Nouveau⁸, Olivier Martin⁹, Céline Martins¹⁰, Stan Nomis¹¹, Emmanuel Paquet¹², and Bernard Cardelli¹³

¹ Cerema, Aix-en-Provence, France

² GERS-LEE, Univ Gustave Eiffel, Ifsttar, Bouguenais, France

³ Régie Eau d’Azur, Nice, France

⁴ Université Côte d’Azur, CNRS, OCA, IRD, Geoazur, France

⁵ INRAE, RECOVER, Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence, France

⁶ Université Côte d’Azur, Polytech Nice Sophia, Nice, France

⁷ SYMBHI, Grenoble, France

⁸ MNCA, Service Gemapi, Nice, France

⁹ DREAL PACA, Service Hydrométrie, Aix-En-Provence, France

¹⁰ ONF/RTM, Chambéry, France

¹¹ SMIAGE, pole Etude et conception, Nice, France

¹² EDF-DTG, Grenoble, France

¹³ DDTM des Alpes-Maritimes, Nice, France

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Tempête ALEX – Retour d’expérience – Débits de pointe

1. Une pluviométrie exceptionnelle

Après avoir touché l’Ouest de la France, la tempête ALEX a provoqué des pluies intenses et persistantes dans les Alpes-Maritimes, le vendredi 2 octobre jusqu’au milieu de la nuit, avant de s’évacuer en direction de l’Italie. Ces zones de relief sont difficilement couvertes par les radars météorologiques et peu de postes pluviométriques y sont implantés, d’où une sous-estimation des pluies en temps réel. La pluviométrie de cet épisode est localement exceptionnelle, sur des durées comprises entre 6 heures et 24 heures, et dépasse les maximums connus dans les Alpes-Maritimes et la région Provence-Alpes-Côte-d’Azur. Avec 663 mm en 24 heures au poste des Mesces sur le bassin de la Roya, l’évènement du 2 octobre 2020 rejoint la catégorie des évènements extrêmes et des records historiques recensés en France sur le pourtour méditerranéen.

2. Une crue particulièrement morphogène

Ces fortes pluies, particulièrement intenses sur certaines parties des hauts bassins versants ont provoqué une rapide augmentation des débits ; les pics de crue ont été atteints en quelques heures seulement. La présente étude vise à quantifier les débits en différents points des cours d’eau touchés par l’évènement. Cette estimation est particulièrement complexe pour les raisons suivantes :

- La violence des écoulements a provoqué des évolutions morphologiques majeures et irréversibles, tant en extension qu’en altimétrie, dans les lits mineurs et majeurs d’Ouest en Est

de la Tinée, de la Vésubie et de la Roya. Dans certains secteurs, le fond a varié de plusieurs mètres, avec des phénomènes de surcreusement (incision du lit) ou de comblement (exhaussement). Néanmoins, la géométrie du cours d'eau au moment du pic de crue n'est pas connue. Des hypothèses très fortes ont donc dû être retenues sur cette donnée d'entrée qui influence directement et fortement les calculs de capacité hydraulique des cours d'eau ;

- Des volumes considérables de matériaux érodés ont été charriés (transport solide) ; des tronçons entiers de ripisylve (forêts alluviales) ont été emportés et ont provoqué des embâcles sur les ouvrages ; des berges, des ponts, des portions de route et de nombreuses habitations ont été détruits. La chronologie de ces événements est peu ou pas documentée. La prise en compte de ces phénomènes naturels complexes est illusoire dans les calculs hydrauliques utilisés classiquement en ingénierie opérationnelle.



Figure 1: Survol hélicoptère Cerema suite à la tempête ALEX

3. Estimations des débits de pointes

Il n'y a pas de solution unique pour estimer les débits de pointe lors de tempête type ALEX.

Les mesures de hauteur d'eau au droit des stations hydrométriques apportent des informations sur la chronologie de la montée des eaux. Cependant, certains capteurs ont été arrachés (cas du bulle à bulle à Utelle sur la Vésubie), vu la violence des phénomènes et l'importance du transport solide, et les capteurs d'une même station ont parfois fourni des mesures incohérentes (limites physiques et techniques des mesures). Sur la Tinée et la Vésubie, l'important transport solide et les changements morphologiques qui en découlent viennent modifier les relations hauteur- débit au droit des stations et rendent inapplicables les courbes de tarage établies avant l'événement. Au-delà de ces quelques stations, les modèles numériques utilisés par le Cerema [1], les évaluations réalisées dans le cadre d'HyMeX [2], et les estimations RTM, simulent l'écoulement de débits injectés dans le cours d'eau, pour essayer d'atteindre les niveaux des repères des plus hautes eaux (PHE) ou ceux des traces laissées par les crues lors des

débordements (laisses de crues). De nombreuses incertitudes conduisent à ne pouvoir techniquement proposer, sur de nombreux secteurs étudiés, que des intervalles de débits jugés plausibles.

Le principal paramètre de réglage des modèles (le frottement) est difficile à estimer précisément dans ce genre de cours d'eau et pour un événement de cette ampleur. On est donc contraint d'associer un intervalle raisonnable de valeurs de ce paramètre avec un intervalle de valeurs de débits, afin de reproduire les hauteurs d'eau atteintes.

D'autres partenaires ont utilisé des modèles hydrologiques dont l'objectif est de convertir les pluies en débits dans les cours d'eau. Ces modèles sont sensibles à divers paramètres de calcul, notamment ceux caractérisant la part des pluies s'infiltrant dans le sol des bassins versants et celle ruisselant qui produit des écoulements de surface et vient alimenter les cours d'eau. Ces paramètres sont difficiles à caractériser et varient en fonction notamment de la nature des sols et sous-sols, de leur degré de saturation initiale, de l'intensité et de la durée des pluies. Des calages sont en général effectués avec des estimations hydrauliques de débits.

4. Travail de consensus hydrologique

Pour avoir une vue d'ensemble uniforme de tous ces résultats, un consensus de ces différentes approches (hydraulique et hydrologique) a été lancé [3, 4, 5]. L'objectif était de comparer, d'évaluer et de proposer des intervalles de débit dans les différentes vallées impactées. Pour atteindre un consensus, toutes les données ont été mises en commun et standardisées. Un atelier de travail et de nombreux échanges ont permis à chaque équipe de partager ses connaissances, les incertitudes associées à son travail. Un produit de cet atelier a été la livraison de fourchette de débits sur de très nombreux tronçons affectés par la tempête.

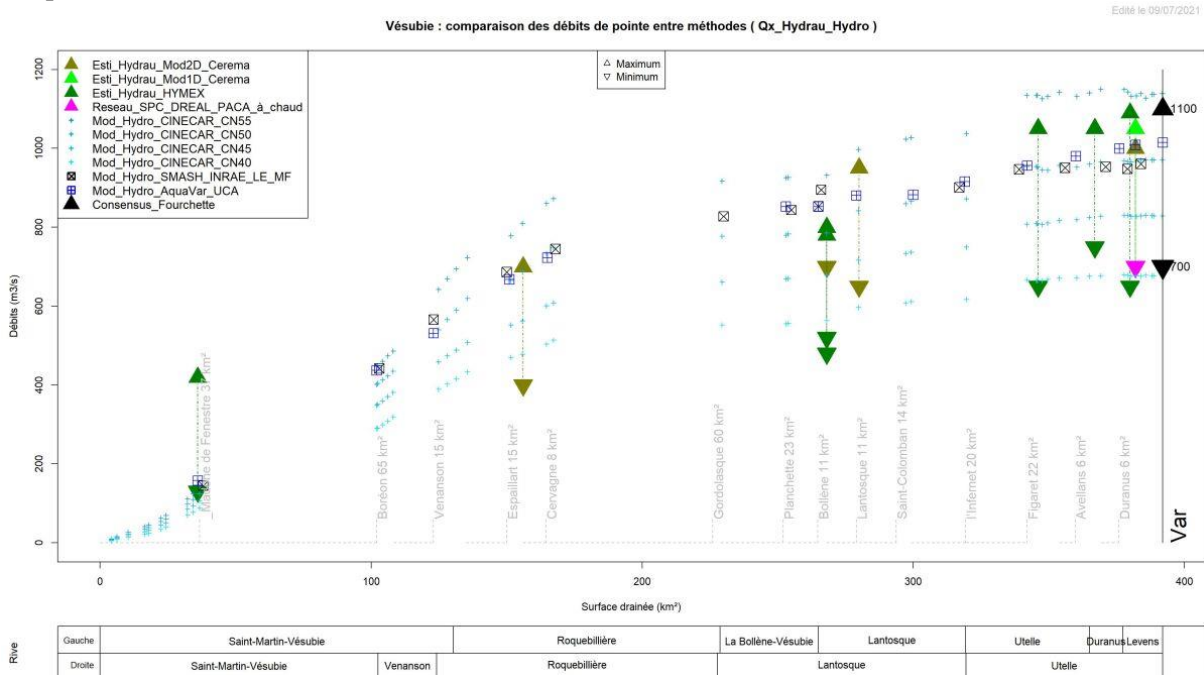


Figure 2: Vésubie - Comparaison des débits de pointe entre méthodes

La fréquence d'occurrence de tels débits a aussi été recherchée. L'évaluation des périodes de retour des débits de pointe est particulièrement complexe pour des événements rares, en l'absence de longues séries de données fiables. Pour les estimer, la démarche de consensus s'est appuyée sur les valeurs indiquées dans les études produites pour l'établissement des Plans de prévention des risques inondations (PPRi), disponibles sur le site de la préfecture des Alpes-Maritimes, une compilation de données de débits

« 100 ans » provenant de l’ONF/RTM ainsi que sur les résultats statistiques des modélisations effectués par l’INRAE (base de données SHYREG). L’estimation des périodes de retour dans ces gammes de débit de pointe doit être appréciée avec beaucoup de prudence et de modestie.

Sur la Roya et la Vésubie, les estimations par le consensus des débits de pointe atteints durant la tempête Alex, atteignent ou dépassent, les plus fortes valeurs de débits annoncées dans les études antérieures réalisées pour l’établissement des PPRi. Sur les autres cours d’eau étudiés (Tinée, Estéron, Var amont et aval), les estimations sont plutôt inférieures aux débits qualifiés de centennaux dans les études précitées. Ces résultats sont à analyser au cas par cas sur les affluents fortement impactés de la Tinée aval, certains affluents de la Vésubie, et les affluents en rive droite de la Roya. Ils ont fait l’objet d’un porter à connaissance auprès des acteurs locaux[4].

Ce travail de consensus établi sur les débits dans le cadre de la partie hydrologique du Retex doit être mis en parallèle de la partie torrentielle du Retex pilotée par l’ONF/RTM [5]. Le débit de pointe, facteur important et majeur ne doit pas faire oublier que l’intensité des transports solides, et des modifications morphologiques, en particulier sur les parties amont de la Vésubie et de la Roya, comme sur bon nombre de leurs affluents et de la Tinée aval, peuvent avoir des fréquences inférieures (périodes de retour plus importantes) à celle estimées pour les débits, favorisée en particulier par la durée de la crue.

5. REFERENCES

- [1] Cerema (2021), RETEX technique ALEX, Inondations des 2 et 3 octobre 2020 Expertise hydrologique– Rapport d’étape
- [2] Olivier Payrastre, Pierre Nicolle, Laurent Bonnifait, Pierre Brigode, Paul Astagneau, Amaury Baise, Arnaud Belleville, Nedjima Bouamara, François Bourgin, Pascal Breil, Pascal Brunet, Arnaud Cerbelaud, Fanny Courapied, Lise Devreux, Raphaëlle Dreyfus, Eric Gaume, Stan Nomis, Julie Poggio, Frédéric Pons, Yassine Rabab & Damien Sevrez (2022): Tempête Alex du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes : une contribution de la communauté scientifique à l’estimation des débits de pointe des crues, LHB, DOI: 10.1080/27678490.2022.2082891
- [3] Cerema, DDTM06, DREAL PACA, EauAzur, EDF, INRAE, MNCA, ONF-RTM, SMIAGE, SPC (Météo France), UCA, Univ. Eiffel (2021) RETEX technique ALEX, Inondations des 2 et 3 octobre 2020, Consensus hydrologique
- [4] Pons, F., Bonnifait, L., Criado, D., Payrastre, O., Billaud, F., Brigode, P., Fouchier, C., Gourbesville, P., Kuss, D., Le Nouveau, N., Martin, O., Nomis, S., Paquet, E., and Cardelli, B.: Towards a hydrological consensus about the 2nd – 3rd October 2020 ALEX storm event in the French “Alpes Maritimes” region, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-7913, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-7913>, 2022.
- [5] Pons, F., Bonnifait, L., Criado, D., Payrastre, O., Billaud, F., Brigode, P., Fouchier, C., Gourbesville, P., Kuss, D., Le Nouveau, N., Martin, O., Nomis, S., Paquet, E., and Cardelli, B.: Towards a hydrological consensus about the 2nd – 3rd October 2020 ALEX storm event in the French “Alpes Maritimes” region, IAHS Scientific Assembly, Montpellier, France, June 2022, <https://doi.org/10.5194/iahs2022-383>.
- [6] Préfet des Alpes-Maritimes (2021), Tempête Alex – Retour d’expérience technique – Données hydrométéorologique
- [7] Préfet des Alpes-Maritimes (2021), Tempête Alex – Retour d’expérience technique – Volet torrentiel

Apport des nouvelles méthodes automatiques de calculs hydrauliques, exemple du principe, données d’entrée et cas d’usage de Cartino2D

New automatic hydraulic calculation methods, Cartino2D example: process, input data and applications

Auteurs : Frederic Pons¹, Nabil Hocini¹, Mathieu Alquier¹

¹ Cerema, Aix-en-Provence, France

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

2/ Progrès réalisés et perspectives d’amélioration pour la prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Modélisation hydraulique – Automatisation – Zones inondables

1. Principe de Cartino2D

La méthode Cartino2D a été développée initialement dans le cadre d’une convention R&D avec Toulon Provence Métropole [1] et du projet ANR PICS [2] pour la mise en œuvre automatisée de modèles Telemac2D Pluie/Débit avec pour objectif de traiter les têtes de bassin versant pour des phénomènes dits de ruissellement ou de crues soudaines (Figure 1). Depuis, elle a été améliorée et appliquée dans divers contextes et démarches [3].

Le principe de Cartino2D cherche à se rapprocher au maximum du travail réalisé par un opérateur dans le cadre de calcul d’ingénierie classique. La méthode consiste à réaliser un pré-traitement et un post-traitement d’un modèle hydraulique classique et reconnu.

Aujourd’hui, Cartino2D peut travailler sur deux types de forçages, soit un forçage de type Pluie, soit un forçage de type débit. Bien sûr les deux approches peuvent être combinées.

Une des principales difficultés est la « sectorisation » des calculs, c’est-à-dire à trouver des frontières de calcul pertinentes pour pouvoir faire des modèles hydrauliques indépendants. Pour travailler de manière raisonnable sur de très grands territoires (centaines à milliers de km²) et avec une bonne finesse de maillage (3 mètres dans les zones inondables par exemple), il est nécessaire de sectoriser les territoires :

- pour la pluie, en secteurs s’appuyant sur un découpage en bassins versants hydrologiques, en gérant les possibles connexions hydrauliques entre bassins ;
- pour les débits, en se focalisant sur les fonds de vallée.



Figure 1: Schéma de principe de Cartino2D Pluie

Le maillage aux éléments finis proposé dans la méthode s’appuie sur un maillage déstructuré, avec par exemple une densité plus importante dans les fonds de thalwegs que sur le reste d’un bassin pour un forçage Pluie. Le maillage peut aussi être sous forme de grille (carré divisé en 2 triangles). Ces éléments sont ensuite traités par le logiciel Telemac2D pour les calculs hydrauliques.

2. La gestion de bases de données performantes ou inexistantes !

L’automatisation nécessite l’utilisation de bases de données qui peuvent avoir soit un rôle pour fournir les données d’entrées des modèles hydrauliques, soit un rôle pour contrôler et évaluer les résultats de simulations hydrauliques [4].

L’élément majeur pour la modélisation hydraulique est la mise à disposition d’une topographie de qualité. Aujourd’hui, les campagnes Lidar, en particulier le programme LidarHD¹ de l’IGN en France constitue un socle précieux. La qualité de résultats de ces méthodes automatiques va aussi dépendre de la restitution du Lidar en particulier autour des thalwegs ou cours d’eau en milieu naturel et des canaux en milieu urbain. Des éléments complémentaires de topographies de ces secteurs peuvent être intégrés sous forme de bases de données si disponibles. Le Lidar terrestre ne traversant pas les zones en eau, la bathymétrie est aussi une donnée pouvant être intégrée mais elle nécessite d’être partagée par les grands acteurs des voies d’eau ou les porteurs de projets (PAPI, PPRi...).

Les ouvrages hydrauliques majeurs peuvent aussi être intégrés comme les crêtes de digues ou les ouvrages enterrés en milieu urbain² (Figure 2). Ces éléments sont rarement disponibles sous forme de bases de données standardisées.

Concernant l’occupation du sol, pour des aspects de frottement ou de définition de coefficient de « ruissellement » (uniquement pour le forçage pluie), il est possible de proposer une spatialisation à l’échelle de la France à une résolution fine métrique à partir de bases nationales³ (Figure 2).

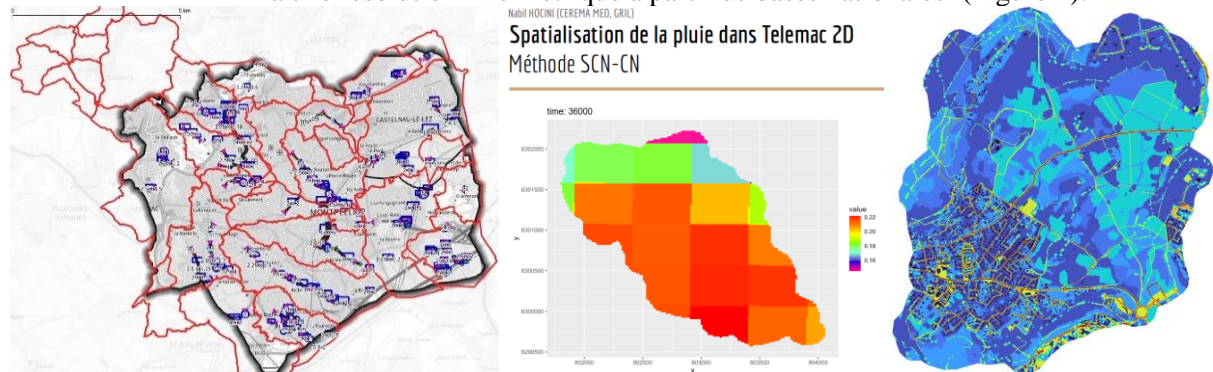


Figure 2 : Exemple de bases de données – Sectorisation et ouvrages enterrés sur le secteur de Montpellier (gauche), de lame d’eau spatialisée sur un secteur à Nîmes (milieu) ou d’occupation du sol à Grabels (Nord-Ouest Montpellier) (droite)

Concernant les forçages de Pluie, trois types sont possibles :

- soit des pluies spatialisées, par exemple de Météo France ou de collectivités locales, pour rejouer des événements⁴ (Figure 2),
- soit des pluies statistiques SHYREG [5],
- soit des scénarios de pluie locaux.

¹ <https://geoservices.ign.fr/lidarhd>

² Une amélioration de l’intégration des ouvrages enterrés est en cours dans Telemac et sera partagée à la communauté

³ BDTopo/BDFoncier/BDFoncière/OCS GE IGN, OSM, UrbanAtlas2018, MOS locaux si nécessaire.

⁴ La spatialisation de la pluie a été intégrée dans le code Telemac2D par le Cerema et fera l’objet d’un partage à la communauté et d’une valorisation au Telemac User Conference

Le pas de temps est majeur pour pouvoir permettre des rejeux efficaces, un pas de temps de 15 minutes est essentiel dès que les secteurs de calculs sont de faible superficie (<25km²).

Pour les débits, le principe est similaire, soit des débits mesurés (réseau hydrométrique de Vigicrue), soit des débits de projets. Les mesures de débits (ou de hauteurs d’eau des stations hydrométriques) peuvent aussi être utilisées comme base de contrôle des résultats.

En parallèle de ces bases de données d’entrée des modélisations, il est utile de traiter automatiquement des bases de données pour l’évaluation. Ce sujet, majeur, est cependant limité par l’accès à de type de données, soit non disponibles en base de données, soit inaccessibles.

On peut noter différents moyens directs ou indirects d’accès à une évaluation comme :

- des bases de données existantes mais non complètes
 - des capteurs de hauteurs d’eau disponibles au niveau du réseau hydrométrique Vigicrue mais couvrant assez peu les capteurs des collectivités locales pour les aspects de crues soudaines,
 - les données des Plus hautes eaux (PHE), avec la base nationale de repères de crue opérée par le Schapi⁵ qui commence à s’ouvrir aux aspects de ruissellement,
- des données non structurées en base de données comme les extensions de zones inondées, de photos, de vidéos, d’éléments disponibles sur le web ou les réseaux sociaux,
- de données disponibles en base de données mais pas forcément accessibles comme les sinistres des assureurs, les secours de la sécurité civile, les informations sur les divers réseaux d’énergie, d’eau ou d’infrastructures de transport.

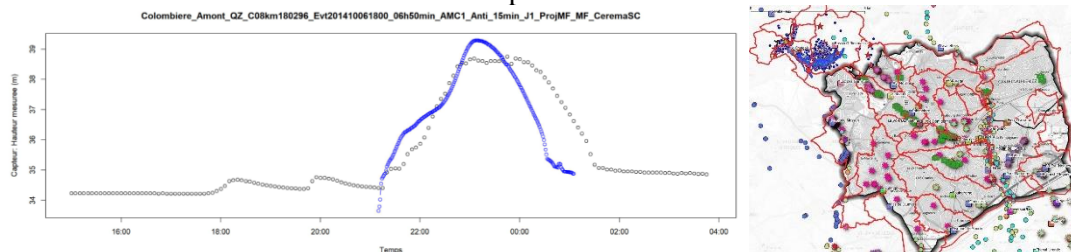


Figure 3: Exemple d’évaluation – Capteur enregistré (noir) comparé aux calculs (bleu) sur un modèle Telemac/Pluie sur un événement à Montpellier (gauche) – Base de données des PHE sur le secteur de Montpellier (droite)

3. Cas d’usage

La méthode Cartino2D a été appliquée à divers stades de son évolution et dans divers contextes :

- Le secteur de Grabels a par exemple fait l’objet de tests poussés pour le rejeu de l’évènement historique du 6 octobre 2014 en intégrant les lames d’eau de Météo France dans le cadre du projet ANR PICS (Figure 4),
- Le secteur de Montpellier a vu l’intégration de très nombreux ouvrages enterrés ainsi qu’une topographie terrestre plus fine dans les cours d’eau urbains pour la réalisation de cartographies d’aléas pour le compte de la DDTM34,
- Les vallées touchées par la tempête ALEX ont été traitées pour estimer les débits à divers endroits et permettre le dimensionnement de certains ponts de la vallée de la Roya (Figure 4).

Les prochains développements vont se faire dans le cadre de projet de recherche concernant le PAPI III sur le Vistre-Vistrenque pour établir des scénarios de zones inondables associés à des pluies types permettant d’améliorer la gestion de crise dans la région Nîmoise.

Cartino2D est aussi une des méthodes poussées dans le cadre du projet ANR MUFFINS piloté par INRAE. Dans ce cadre, elle a vocation à être déployée sur de nombreux territoires, en particulier autour

⁵ <https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr>

de la Métropole Aix-Marseille-Provence et sur les bassins versants expérimentaux du Real Collobrier (83) pour évaluer au maximum son potentiel.

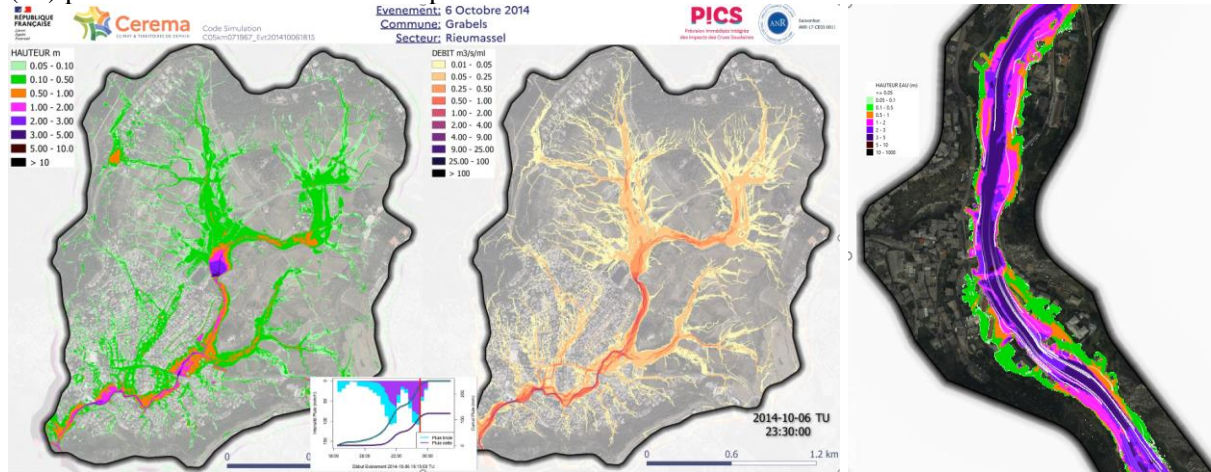


Figure 4: Exemple de résultats sur les évènements du 6 octobre 2014 à Grabels (gauche) et sur la tempête ALEX en 2020 sur le secteur de Tende (droite)

L'ANR Muffins va permettre d'utiliser en parallèle du code de calcul Telemac un autre code numérique Dassflow [6] pour optimiser les paramètres d'entrée à partir des bases de données de vérifications.

4. REFERENCES

- [1] Pons F., Alquier M., Paya E., Moulin C., Panier N. and Chollet A.E., 2021. Premiers tests de la méthode Cartino2D sur le territoire de Toulon Provence Méditerranée, LHB, 107:1, 1-13, <https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1912968>
- [2] Javelle P., Payrastre O., Boudevillain B., Bourgin F., Bouttier F., Caumont O., Charpentier-Noyer M., Ducrocq V., Fleury A., Garambois P-A, Gaume E., Hocini N., Janet B., Jay-Allemand M., Lague D., Lovat A., Moncoulon D., Naulin J-P, Nicolle P., Peredo D., Perrin C., Pons F., Ramos M-H, Ruin I., Terti G., 2021. Flash flood impacts nowcasting within the PICS project (2018-2022): End-users involvement and first results. FLOODrisk 2020 - 4th European Conference on Flood Risk Management, Jun 2021, Online, France, 10.3311/FloodRisk2020.17.3
- [3] Pons, F., Alquier, M., and Paya, E.: Automatic 2D mapping of flash floods: which possibilities and limits? An illustration based on the Cartino2D method, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-7212, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-7212>, 2022.
- [4] Hocini N., Payrastre O., Bourgin F., Gaume E., Davy P., Lague D., Poinsignon L., and Pons F., 2021. Performance of automated methods for flash flood inundation mapping: a comparison of a digital terrain model (DTM) filling and two hydrodynamic methods, Hydrol. Earth Syst. Sci., 25, 2979–2995, <https://doi.org/10.5194/hess-25-2979-2021>
- [5] Arnaud P., Lavabre J., Sol B., Desouches Ch. (2008) Regionalization of an hourly rainfall generating model over metropolitan France for flood hazard estimation. Hydrological Sciences Journal, 53 (1) 34-47

- [6] Larnier K., Monnier J., Garambois P.-A. & Verley J. (2021) River discharge and bathymetry estimation from SWOT altimetry measurements, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 29:6, 759-789, DOI: 10.1080/17415977.2020.1803858

STATISTIQUES HYDROLOGIQUES EN CRUE : DE LA BANQUE HYDRO A L'HYDROPORTAIL

Flood statistics : from Banque HYDRO to HydroPortail

Auteurs : AUDOUY Jean-Nicolas^{1*}, POLIGOT-PITSCH Stéphanie², RENARD Benjamin³, CHALEON Carine⁴

*** auteur correspondant**

¹Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations - Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires – 42 avenue Gaspard Coriolis 31057 Toulouse cedex 1, France, e-mail : jean-nicolas.audouy@developpement-durable.gouv.fr

²Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations - Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires – 42 avenue Gaspard Coriolis 31057 Toulouse cedex 1, France, e-mail : stephanie.poligot-pitsch@developpement-durable.gouv.fr

³INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur – 3275 Route de Cézanne 13182 AIX EN PROVENCE CEDEX 5, e-mail : benjamin.renard@inrae.fr

⁴Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement de l'Aménagement et des Transports d'Île de France - Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires - 21 Rue Miollis 75732 Paris Cedex 15, e-mail : carine.chaleon@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Hydroportail, débits statistiques, périodes de retour

1. Les débits statistiques de crues, une donnée capitale pré- et post-événement

Les statistiques hydrologiques participent pleinement de la connaissance des cours d'eau et de leur champ des possibles en termes de débit. C'est particulièrement vrai en crue dans les domaines de la prévention et de la préparation à la gestion de crise (fixation des débits de référence pour les Plans de Prévention des Risques d'Inondation ou des niveaux de vigilance avec un regard critique sur leur occurrence par exemple...), mais aussi post-événement, notamment pour qualifier la période de retour d'une crue sur un cours donné et répondre à la problématique du traitement des demandes de classement en état de catastrophe naturelle (CATNAT).

Le besoin de disposer de débits statistiques de la manière la plus aisée et rapide possible, sur le nombre de cours d'eau le plus large possible et avec le maximum de maîtrise et de connaissance de leur méthode de calcul et de leurs incertitudes est donc capital.

2. Calcul et mise à disposition des débits statistiques : de la Banque Hydro à l’Hydroportail et son module « statistiques »

Historiquement, la Banque Hydro permettait déjà, depuis 1998 pour les utilisateurs via son client lourd, puis depuis le milieu des années 2000 directement sur Internet, un accès aux statistiques hydrologiques, via notamment la procédure « CRUCAL » pour ce qui est des débits maxima instantanés ou journaliers de crue à l’échelle annuelle ou saisonnière.

Depuis le 25 janvier 2022, l’Hydroportail a remplacé définitivement la Banque Hydro via la même adresse Internet (<https://www.hydro.eaufrance.fr>), ce qui a marqué l’aboutissement de l’opération HYDRO3. Parmi les nombreux travaux liés à cette opération et au développement de l’Hydroportail et comme déjà évoqué par Dufeu et al. [1] en 2022, le calcul des statistiques hydrologiques a fait l’objet d’un groupe de travail associant des agents du réseau Vigicrues et d’INRAE entre 2016 et 2021, afin de refondre, moderniser et étendre les possibilités de calcul des statistiques hydrologiques, Ce travail a abouti à la création du module « statistiques » de l’Hydroportail.

Ce module statistique comprend :

- un cœur de calcul statistique sous la forme d’un code R, disponible également comme package séparé ouvert et libre d’utilisation [2], pour permettre des calculs statistiques hors ligne à l’identique de l’Hydroportail (utile dans le cadre d’études hydrologiques plus poussées ou en masse) ;
- une interface totalement repensée, avec une présentation qui permet de documenter et paramétrer de manière plus souple et rigoureuse les différentes étapes d’un calcul statistiques (choix des données pour la constitution d’un échantillon, statistiques descriptives de l’échantillon, choix de la loi statistique et résultat du calcul, cf. Figure 1 ci-après) suivant 3 grandes catégories hydrologiques : « Toutes eaux », « Basses eaux » et « Hautes eaux ».

L’hydrologue pressé comme le producteur néophyte sont en effet confrontés à de nombreux pièges lorsqu’ils cherchent à établir des ajustements statistiques ou à déterminer la période de retour d’un évènement. La refonte de l’interface fournit une première boîte à outil et propose à l’utilisateur des temps de réflexion aux étapes clés. Par ailleurs, des supports pédagogiques (aide en ligne, document d’auto formation) sont proposés à l’utilisateur.

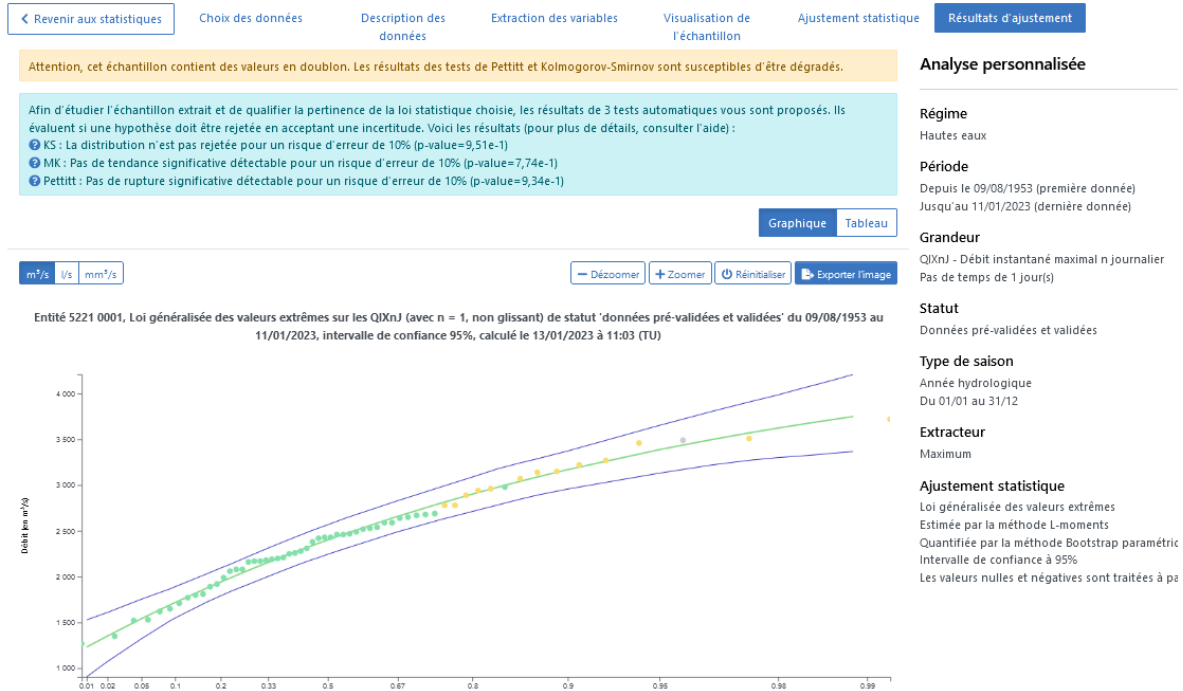


Figure 1: Module statistiques de l'Hydroportail: aperçu d'un ajustement et de ses différentes étapes de calcul

- La capacité pour l'utilisateur et comme dans la Banque Hydro, d'effectuer ses propres calculs, mais avec une gamme plus étendue en ce qui concerne à la fois :
 - les grandeurs accessibles, avec la possibilité nouvelle notamment de faire des statistiques sur des durées ou des quantiles de débit et plus seulement des moyennes ou des extrema (minimum ou maximum) de débit ;
 - le paramétrage de l'échantillon (possibilité de retirer certaines valeurs) ;
 - les lois statistiques, le choix n'étant plus limité aux seules lois de Gauss, de Galton et de Gumbel proposées par la Banque Hydro mais incluant également, en fonction du régime (basses eaux, toutes eaux ou hautes eaux) et de la grandeur étudiée, d'autres lois adaptées, telles que la loi GEV dans le cas des crues ;
 - un cadre méthodologique cohérent et documenté. Par défaut, la méthode des L-Moments (estimation des paramètres) et la technique du Bootstrap paramétrique (quantification des incertitudes) sont utilisées pour toutes les variables et toutes les distributions. D'autres méthodes sont disponibles en mode "expert" ;
 - la possibilité offerte aux producteurs de données d'enregistrer leurs propres analyses personnalisées et de les rendre ou non accessibles au public.
- L'inclusion de tests statistiques permettant de juger de la pertinence de la loi choisie ou d'alerter l'utilisateur sur l'existence d'éventuelles ruptures ou tendances dans la série de données étudiée pouvant provenir de causes diverses (incertitudes hydrométriques, aménagement(s) sur le cours d'eau ou son bassin versant, premiers effets visibles du changement climatique...);

- L’existence d’analyses dites « de référence » pour chaque point de mesure, ayant vocation à être validées par les producteurs de données et mises à disposition de tous. Parmi ces analyses de référence, figurent notamment pour le domaine des crues (« hautes eaux ») les analyses équivalentes aux 2 statistiques les plus utilisés historiquement via l’ancienne procédure « CRUCAL » concernant le maximum du débit moyen journalier et celui du débit instantané sur l’année hydrologique ;

Bien que de manière parfois notablement différente, les fonctionnalités statistiques de l’Hydroportail permettent de retrouver un équivalent pour la quasi-totalité des calculs offerts par les anciennes procédures de la Banque Hydro , même si quelques procédures ou certains calculs tels que le rapport de pointe des crues ou l’estimation interactive des périodes de retour n’ont pas encore été repris à ce jour. Pour plus de détails, une correspondance est accessible à tous sur le site de l’Hydroportail [3] entre les anciennes procédures de la Banque Hydro et les possibilités d’analyse équivalentes offertes par l’Hydroportail,

De manière connexe et également nouvelle par rapport à la Banque Hydro, des fonctionnalités cartographiques accessibles via le menu « Cartes Hydrologiques » permettent désormais de consulter et éventuellement exporter au format GeoJson ou texte (.csv) les débits statistiques de référence, ainsi que la comparaison des valeurs de débit sur une période donnée à ces statistiques pour tout ou partie des sites et stations hydrométriques présents en base. Cela peut permettre à l’utilisateur de réaliser plus aisément des analyses synthétiques à l’échelle nationale, régionale, départementale, ou encore d’un bassin versant ou d’un territoire de service de prévision des crues.

3. REFERENCES

- [1] Elodie Dufeu, Frederic Mougin, Anouck Foray, Martine Baillon, Remi Lamblin, Fabrice Hebrard, Carine Chaleon, Sebastien Romon, Laurent Cobos, Philippe Gouin, Jean-Nicolas Audouy, Renaud Martin & Stephanie Poligot-Pitsch (2022) Finalisation de l’opération HYDRO 3 de modernisation du système d’information national des données hydrométriques), LHB, DOI: 10.1080/27678490.2022.2099317
- [2] <https://github.com/benRenard/HydroPortailStats>
- [3] <https://hydro.eaufrance.fr/uploads/Publications/ProceduresVsAnalysesStatistiques.pdf>

L’INTEGRATION DES RESEAUX SOCIAUX DANS LA GESTION DES RISQUES D’INONDATION ET DE SEISME : LE PROJET RESOCIO

Integration of social networks in the crisis management of flood and earthquake risks : the RESOCIO project

Auteurs : CHAVE Sylvain^{*1}, AUCLAIR Samuel², MONTARNAL Aurélie³, GRACIANNE Cécile², Anouck ADROT⁴

* *auteur correspondant*

¹ Predict Services, Montpellier, France, sylvain.chave@predictservices.com

² BRGM, Orléans, France, s.auclair@brgm.fr

³ IMT Mines Albi, Albi, France, aurelie.montarnal@mines-albi.fr

⁴ Université Paris Dauphine, Paris, France, anouck.adrot@dauphine.psl.eu

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Inondation, séisme, gestion de crise, Twitter,

Lorsque survient le séisme en Haïti le 12 janvier 2010, les premières photos qui témoignent de la situation et de l’importance des dégâts occasionnés, sont publiées sur le réseau social Twitter (Wybo et al, 2015). De même, le 15 janvier 2009, le vol USAir 1549 a rapidement été mis en difficulté après son décollage de l’aéroport de New York, l’obligeant à amerrir sur l’Hudson River. Les témoins présents sur place publieront les photos de l’avion au milieu des eaux environ 5 minutes après l’accident. Au fur et à mesure des années, cette tendance s’est largement confirmée, amenant les réseaux sociaux à canaliser les données de millions de « citoyens capteurs » connectés, capables de restituer des « enregistrements/témoignages » de manière spontanée et rapide. Fédérant des communautés d’utilisateurs habitués à commenter en direct des événements quotidiens, les réseaux sociaux canalisent les données de millions de « citoyens capteurs » connectés, capables de restituer des « enregistrements/témoignages » de manière spontanée et rapide.

Le projet RéSoCIO (REseaux SOciaux en situation de Catastrophe naturelle : Interprétation Opérationnelle) a pour objectif général de démontrer l’apport des réseaux sociaux en appui à la gestion opérationnelle des catastrophes naturelles. Son objectif est de récolter, filtrer et mettre à disposition des gestionnaires de crise, des décideurs, des élus, les remontées d’informations captées par les citoyens depuis le terrain. Particulièrement adaptée aux phénomènes à cinétique rapide qui peuvent prendre de court les autorités, ce projet constitue un moyen d’éclairer les gestionnaires de crise avec des informations consolidées. En outre, ce complément d’information peut accompagner toute la phase de réponse, complétant, précisant, et augmentant les informations disponibles pour les décideurs. Le projet RéSoCIO porte aussi bien sur les inondations à cinétique rapide que sur le risque sismique à l’image du tremblement de terre survenu le 11 novembre 2019 sur la commune du Teil en Ardèche.

L'ensemble des dispositifs de gestion de crise a besoin d'informations sans cesse réactualisées pour comprendre, analyser, prioriser, décider, faire face à une situation qui peut présenter des conséquences tout à fait habituelles mais qui peuvent devenir particulièrement importantes avec des enjeux humains et matériels considérables. Que ce soit au niveau d'un Poste de Commandement Communal (PCC), d'un Centre Opérationnel Départemental d'Incendie et de Secours (CODIS), d'un Centre Opérationnel Départemental (COD) ou d'un centre national comme le Centre Opérationnel de Gestion Interministérielle des Crises (COGIC), les informations en provenance des réseaux sociaux participent à cette remontée d'informations et peuvent être mises à disposition des décideurs, des acteurs de la gestion de crise pour améliorer les processus de prises de décision, raccourcir les délais d'intervention et assurer une meilleure prise en compte des situations de catastrophes naturelles. Cela contribue également à une meilleure résilience des organisations.

Le projet est basé sur une analyse permanente du réseau social Twitter, utilisé au quotidien par quelques 10 millions d'utilisateurs actifs en France. Twitter présente des fonctionnalités particulièrement utiles aux signalements et à la surveillance de crises de différentes natures : publication en temps-réel de messages courts, messages “publics”, diffusion d'images ou de séquences vidéos permettant de visualiser (avec un œil expert) la situation en cours et lui donner un sens opérationnel fort. Ainsi, l'occurrence de catastrophes naturelles se traduit souvent par la diffusion massive et immédiate de tweets à l'international (Kryvasheyev et al., 2016) comme en France (plus de 110.000 tweets échangés lors des grandes inondations du printemps 2016 - *source BRGM*). Twitter constitue donc un formidable instrument pour prendre en direct le pouls du terrain, et est de fait devenu l'un des réseaux sociaux les plus utilisés par les gestionnaires de crise (Castillo C., 2016). Cela s'est vérifié notamment lors de la tempête Alex survenue au mois d'octobre 2020, avec une intensité toute particulière dans les Alpes Maritimes et des dégâts considérables dans les vallées de l'arrière-pays (Roya, Vésubie en particulier). Les analyses effectuées dans le cadre du projet montrent la très bonne corrélation des tweets émis avec les cumuls pluviométriques, illustrant ainsi la forte réactivité des utilisateurs du réseau social à l'intensité de l'évènement ainsi qu'à la perception sur place de l'importance de cet évènement.

L'approche du projet RéSoCIO est particulièrement adaptée aux phénomènes à cinétique rapide telles que les inondations rapides (crues torrentielles, ruissellements pluviaux urbains) qui se produisent aujourd'hui dans un contexte favorable à leur multiplication. En effet, les territoires doivent faire face d'une part à une évolution climatique défavorable, qui va dans le sens d'une intensification des pluies à l'origine d'une augmentation de ces situations au cours des prochaines décennies. Par conséquent, les organisations déployées pour la gestion de crise devront faire face à une fréquence accrue de ces phénomènes et se baser sur des outils et des supports transversaux de collecte des informations contribuant à la gestion de la situation. D'autre part, l'exposition des territoires à ces phénomènes de pluies intenses soudaines ne sont plus limitées aux régions méditerranéennes du sud, et ont tendance à se généraliser avec un impact croissant sur les zones urbaines.

L'objectif de l'article est de présenter les apports du projet RéSoCIO pour les différents acteurs de la gestion de crise (collectivités, SDIS, Préfecture) en montrant comment il peut favoriser l'aide à la décision de ces acteurs dans les différents temps de la gestion de l'évènement : avant, pendant et après l'évènement.

Les différentes étapes de collecte, d'analyse et d'enrichissement des tweets, seront illustrés ainsi que leur mise en sens contextuel pour favoriser l'aide à la décision des acteurs, à travers l'interactivité de

plusieurs plateformes métiers utilisées en temps réel pour le suivi des événements hydrométéorologiques, les prises de décision et les actions de sauvegarde engagées par les gestionnaires sur le terrain.

1. REFERENCES

- [1] WYBO Jean-luc, GOUTTAS Catherine, OK Éric et al., « L’impact des réseaux sociaux dans la gestion des crises et le cybercrime », *Sécurité et stratégie*, 2015/1 (18), p. 37-43. DOI : 10.3917/sestr.018.0037. URL : <https://www.cairn.info/revue-securite-et-strategie-2015-1-page-37.htm>
- [2] Kryvasheyev et al. (2016) Rapid assessment of disaster damage using social media activity DOI: 10.1126/sciadv.1500779
- [3] Castillo C. (2016): Big Crisis Data. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9781316476840

LES JUMEAUX NUMERIQUES DU FLEUVE : UNE PLATEFORME APPLICATIVE OPERATIONELLE OUVERTE POUR ACCELERER LA RESILIENCE TERRITORIALE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

The digital twins: an open operational application platform to accelerate the territorial resilience face to climate change

Auteurs : KLEIN Fabrice¹

¹ Grand Port Maritime de Bordeaux, 152 Quai de Bacalan, 33000 BORDEAUX, France Pays,
f-klein@bordeaux-port.fr

Choix du thème/session : Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Surveiller, être alerté, comprendre, simuler, prédire, partager

1. Contexte

La Région Nouvelle-Aquitaine dispose du plus vaste estuaire d'Europe. Cette voie de communication historique est également un espace remarquable par ses richesses au sein duquel de nombreuses activités cohabitent (tourisme, pêche, navigation de commerce, culture...).

Le GPMB, à l'intérieur de sa circonscription de 130 000 ha, est à la fois gestionnaire du Domaine Public et aménageur du territoire. Ainsi, les actions du port sont guidées par la nécessité de trouver l'équilibre entre préservation écologique et développement économique.

Il travaille depuis de nombreuses années à l'amélioration de la connaissance du fleuve et de son estuaire grâce à son instrumentation (réseau marégraphique, courantomètres), à ses campagnes de mesures bathymétriques, et à l'enrichissement de modèles numériques (GIRONDE XL 3D). Plus globalement, il poursuit et structure les travaux de recherche et de développement sur ces thématiques en développant des projets collaboratifs en réponse à différents appels à projets de niveau national et européen (ANR, ADEME pour le national, INTERREG, CEF et Horizon 2020 pour l'europpéen).

Ces projets ont démontré que l'urgence imposée par les enjeux du changement climatique sur les ressources en eau et le milieu implique une mobilisation encore plus forte autour de la Garonne et de l'Estuaire de la Gironde.

Alors que les premiers impacts du changement climatique sont déjà visibles, l'essor du numérique offre des solutions d'études et d'anticipation des changements à venir, de réduction de la vulnérabilité des territoires. Il apparaît désormais essentiel que les acteurs régionaux se fédèrent afin de mobiliser cette révolution numérique pour développer au sein de leur métabolisme la résilience régionale nécessaire afin de s'adapter le plus rapidement possible aux impacts climatiques de demain et chercher à en atténuer leurs effets, dans un contexte de frugalité budgétaire.

2. Originalité du projet

Ce projet a pris la forme d'un partenariat d'innovation qui a mis en compétition 4 groupements d'entreprise. Il a permis de [fédérer les acteurs de l'eau](#) qui ont pris part à au jury afin de co-concevoir un écosystème comportant :

- Une plateforme de **calcul intensif** (calculs à la demande) ;
- Des **modules métiers** avec des **représentations SIG** du passé et des prévisions ;
- Des outils **Open source** déposés sur la **forge régionale** NAOS pour être partagés ;
- L'animation d'une **communauté** afin de développer les **usages**, et **partager les enrichissements**.

Les jumeaux numériques du fleuve permettront également aux scientifiques de donner naissance à de nouveaux modèles expérimentaux, qui pourront être facilement évalués par la communauté.

Ils sont une **plateforme opérationnelle** qui facilite les **intégrations applicatives** pour de **multiples activités orientées métier**.



Figure 1 : Illustration des services proposés

3. Résumé du projet

En sachant que de nombreuses entités travaillent également sur ces thématiques avec des contraintes similaires, le GPMB a proposé aux acteurs de l'eau de mutualiser leurs efforts pour créer en 2023 une première version des jumeaux numériques du fleuve opérationnels, performants et faciles d'accès. Ceux-ci seront notamment utilisés pour la simulation du comportement de la Garonne, la Dordogne et de l'Estuaire de la Gironde afin d'explorer à travers divers scénarii les impacts des évolutions de certains paramètres, débit amont, ou encore la turbidité qui alimente le bouchon vaseux, qui menacent tant la vie aquatique que la navigation.

Les objectifs principaux de ces outils numériques sont de donner aux opérationnels des outils d'aide à la décision pour la gestion du métabolisme du territoire :

- Partager et développer les **connaissances scientifiques** et physiques du fleuve ;
- Favoriser les échanges de données et de **résultats opérationnels** avec d'autres structures ;
- Proposer des **outils d'aide à la décision** pour atténuer l'influence des activités sur le milieu ;

- favoriser la **surveillance** du littoral et du fleuve (**inondation, qualité de l’eau**, préservation de la vie aquatique, ...) et les **dispositifs d’alerte** ;
- Anticiper les effets du **changement climatique** et chercher des solutions d’atténuation, de réduction de la vulnérabilité du territoire ;
- Développer l’**économie durable** sur le fleuve et l’estuaire.

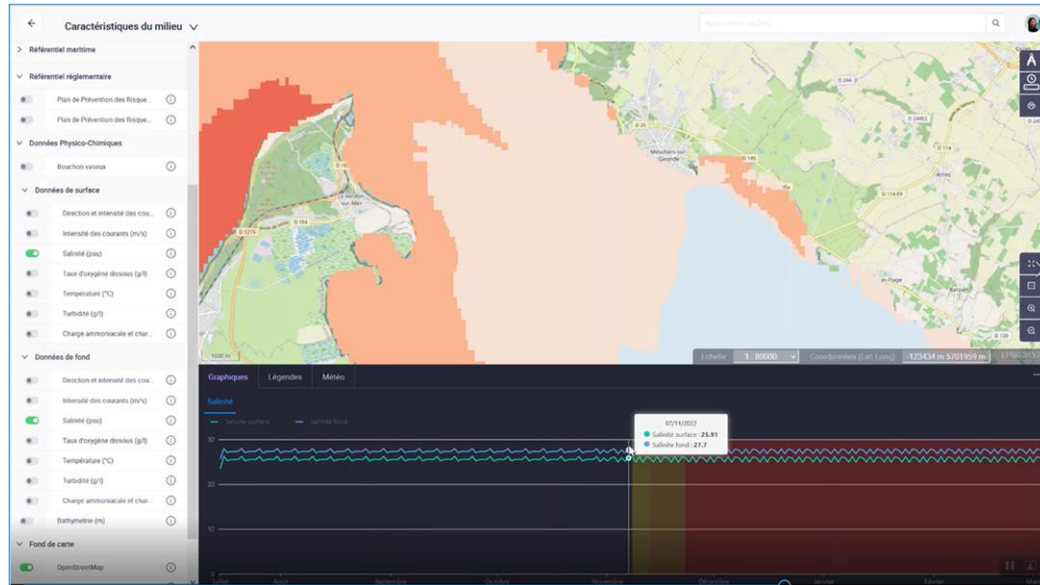


Figure 2: Ecran SIG de visualisation des résultats (prévisions et archives)

GRAND PORT MARITIME DE BORDEAUX > GIRONDE XL 3D

File Explorer

- user_fortranR45
- BATHY_ZET_nouvelle_bathy_L93.dat
- GRCGNEA.CL
- README.md
- forcage_FRLIQ_ST_20220801.dat
- forcage_atmos_OM_20220801.dat
- girgc93.ci
- girxl_GC_MOR1808tm_93V5.sif
- init_gironde_20230112.sif
- sis2gaiaTH.cas
- sources-forcages.json
- t3d_hydro_R45_waqtel2-gaia_T6_082022.dat
- waq_GXL_O2.cas

Git Integration

Repository URL: <https://forge.naos-cluster.te>

Branch: master

[webhook config](#)

Run Merge Requests:

Unlink Cancel Save

Settings

Cores: 112

Timeout: 20h0m0s

Telemac Image: v8p2r1p04-fast

History Steering File Run Job

Status	Message	Time	Details
error	[gitlab merge request] [skip ci] init file - 2023-01-12	2d ago	0
error	[gitlab merge request] [skip ci] init file - 2023-01-12	3d ago	0
passed	[gitlab merge request] chore(): add modele	4d ago	7936
passed	[gitlab merge request] chore(): add modele	4d ago	8064
error	[gitlab webhook] refactor(t3d): remove trailing whitespaces	4d ago	32
passed	[gitlab merge request] feat(forcages): add list of sources	6d ago	7776
passed	[gitlab webhook] Merge branch 'add-forcage-file' into 'master'	6d ago	8064
passed	[gitlab merge request] feat(forcages): add list of sources	11d ago	7712
passed	[gitlab merge request] feat(forcages): add list of sources	12d ago	7648
passed	[gitlab merge request] chore(): add modele	23d ago	8160

[More...](#)

Figure 3: Ecran de la plateforme de calcul de simulation connectée à la forge (GitLab) de la Région Nouvelle-Aquitaine qui héberge les modèles numériques ouverts à la communauté

GIRONDE XL 3D > [f9e51286-2b2f-4be1-926d-7261f65623c2](#)

Private

Comment: [gitlab merge request] chore[]: add modele
 Created: Thu, 12 Jan 2023 13:33:44 UTC Kill Job
 Processes: 32
 Command: telemac3d.py --ncsize 32 steering_content_en.cas --workdirectory /tmp/work
 Telemac Image: v8p2r1p04-fast
 Maximum Duration: 20h0m0s

● passed Started in 53s Ran in 4h0m Uploaded in 7m7s

Execution **Results** 7936 ↓

Downloads

[RESULT-gir2dNH_ML1_RE45_t3d-waq-gaia_20220801_15j.slf](#) Ⓡ
[RESULT-gir3dNH_ML1_RE45_t3d-waq-gaia_20220801_15j.slf](#) Ⓡ

Visualizations

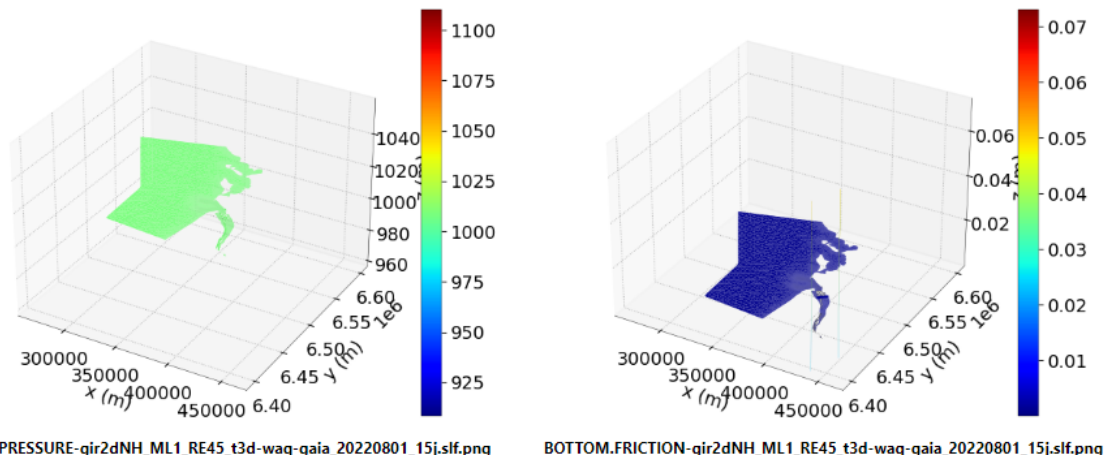


Figure 4: Résultats d'une simulation avec prévisualisation et lien de téléchargement

4. REFERENCES

- [1] <https://naos-cluster.com/projet-jumeaux-numeriques-du-fleuve> [1]
- [2] Premier modèle numérique Gironde XL 3D (2019) - <https://vimeo.com/386916769> [2]

PREVISION DES CRUES EN MILIEU MONTAGNEUX SOUS CLIMAT TROPICAL : EXEMPLE DE LA REUNION

Flood forecasting in tropical mountainous regions: example of Reunion island

Auteurs : BABY Florent^{1*}, BOUJARD Patrick¹, MARTEL Stéphane¹, ROULENQ Anthony¹, VILLANI David¹, ORGANDE Didier², JAVELLE Pierre³, TILMANT François⁴, PERRIN Charles⁴

* *auteur correspondant*

¹DEAL Réunion/SPRINR/CVH, Saint-Denis, La Réunion, France

²HYDRIS hydrologie, Montferrier-sur-Lez, France

³Université Aix-Marseille, INRAE, UR RECOVER, Aix-en-Provence, France

⁴Université Paris Saclay, INRAE, UR HYCAR, Antony, France

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations : adaptation des systèmes de prévision à des contextes particuliers (influences de la neige, contexte cyclonique, prise en compte de l'impact d'ouvrages, etc.)

Mots clés : prévision des crues, contexte tropical, GRP, SMASH.

1. Contexte hydro-météorologique de La Réunion

Le climat de l'île de La Réunion est tropical humide. Mais il se singularise surtout par de grandes variabilités liées à la géographie de l'île. L'influence du relief (le Piton des Neiges culmine à 3070 m) est tout aussi fondamentale que les effets de l'insularité [1]. Qu'elles soient d'origine advective ou d'évolution diurne, les précipitations tendent à se concentrer sur les régions directement exposées à l'humidité océane apportée par les alizés de secteur Est : régions "au vent". A l'inverse, les régions "sous le vent", qui bénéficient de l'abri du relief, sont beaucoup plus sèches et les régimes de brise y sont prédominants [1]. Le climat tropical humide associé à l'influence du relief entraîne une pluviométrie très importante (plus de 10 m par an dans certains secteurs de l'île) caractérisée par les records mondiaux de cumuls de pluies entre 12 heures et 15 jours [1].

La Réunion est une île de petite taille (2 500 km²) avec un relief marqué. Il en résulte des bassins versants avec des tailles réduites, en moyenne d'une trentaine de kilomètres carrés (213 km² pour le plus grand), avec des pentes marquées (95 % du réseau hydrographique de l'île est caractérisé par une pente supérieure à 1%). Malgré une forte capacité d'infiltration due à la pédologie et la géologie du territoire, les temps de concentration n'en demeurent pas moins très courts, avec un maximum de l'ordre de 5 heures pour les plus grands bassins versants. Ces caractéristiques couplées à des précipitations de très fortes intensités engendrent des crues rapides et violentes.

2. Stratégie de la CVH Réunion pour la prévision des crues

Actuellement, la Cellule de Veille Hydrologique (CVH) de La Réunion qui a été créée en 2010, assure la surveillance de 17 cours d'eau de l'île, avec une trentaine de stations permettant un suivi des hauteurs d'eau en quasi temps réel (pas de temps de 5 min). Du fait des spécificités hydrométéorologiques de l'île et de la jeunesse de la CVH, la cellule n'affiche pas encore pour le grand public une vigilance crues à 24 h mais émet, depuis 2015 via le site www.vigicrues-reunion.re, des vigilances "à réaction ou avec une faible anticipation" qui s'apparentent à de la surveillance sur les 17 cours d'eau du réseau Vigicrues Réunion (voir Figure 1). Une stratégie de passage à la prévision a été mise en place depuis 2020 avec des résultats opérationnels déjà présents. Toutefois le passage à une

Tableau1). Les très hauts débits sont généralement sous-estimés par le modèle qui n’arrive pas à reproduire certains évènements extrêmes. Parmi les treize bassins étudiés, les performances ont été jugées satisfaisantes pour dix bassins, moyennes pour deux bassins et mauvaises pour un bassin [3]. En ce qui concerne les valeurs de paramètres (Rout, Corr et Tb), les valeurs obtenues sont cohérentes avec les caractéristiques des bassins versants réunionnais, à savoir une capacité d’infiltration importante (Corr inférieur à 0,5 en moyenne) et des hydrogrammes marqués en terme de montée/descente de crues (Tb compris entre 2 et 3 h et un réservoir de routage inférieur à 200 mm pour la quasi-totalité des cours d’eau).

Nom Rivière	ROUT (mm)	CORR (-)	TB (h)	Eff (-)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)
Langevin	155	0,29	2	0,77	59	29	48
Marsouins	308	0,78	2,5	0,66	52	48	35
Roches	118	1	2,5	0,71	58	45	39
Mat	113	0,43	2,5	0,71	50	17	46
Grde Saint-Jean	45	0,55	2,9	0,67	44	30	37
Ptite Saint-Jean	29	0,43	2,5	0,77	38	11	36
Niagara	176	0,98	2,9	0,47	49	27	41
Pluies	17	0,34	2,5	0,62	48	22	42
Durand	23	0,31	2,2	0,47	83	44	50
Butor	40	0,65	1,9	0,82	82	10	75
Saint-Denis	190	0,49	2,5	0,71	60	56	34
Galets	109	0,33	2,5	0,68	75	20	63

Tableau 1 : valeurs des paramètres GRP pour les 12 cours d’eau retenus (sur les 13 étudiés) avec les critères de performance correspondants (efficacité et scores de contingence obtenus vis-à-vis du seuil de vigilance)

La boucle de modélisation basée sur la plateforme SMASH a été développée dans l’optique de l’ouverture à moyen terme du service VigicruesFlash à La Réunion (application de la méthode AIGA). Néanmoins celle-ci a montré des performances intéressantes dans le cadre de la prévision des crues sur le réseau surveillé de la CVH notamment pour les tronçons de cours d’eau non couverts par GRP.

La boucle tourne au pas de temps 15 minutes et au pas d’espace de 250 m : elle est alimentée par la lame d’eau observée (SMASH Anticipation) et la lame d’eau prévue par AROME-OI (SMASH Prévision). A partir d’un calage local sur 23 bassins versants de l’île, les variantes à 4 et 5 paramètres de la modélisation SMASH ont été retenues en s’appuyant sur des critères événementiels calculés sur une période de calage de 5 ans et sur une période de validation de 15 mois (voir Figure 2a). Dans l’objectif de disposer d’une paramétrisation applicable en milieu non-jaugé (utilisation dans le cadre de la méthode AIGA), il a été mis en œuvre, sur une période de 5 ans, un calage régional uniforme sur 6 "régions" de l’île (voir Figure 2b) : le critère d’optimisation NSE est calculé pour l’ensemble des bassins versants retenus pour le calage d’une "région" donnée. Les performances des différents scénarios de calage ont été évaluées sur les bassins versants ayant servi au calage mais également sur des bassins versants de validation. Une validation temporelle a également été menée sur une période de 21 mois de janvier 2020 à septembre 2021. D’une manière générale, les scores de contingences obtenus en validation spatiale, temporelle ou spatio-temporelle sont encourageants. La version opérationnelle a finalement fait l’objet d’un calage régional sur la période du 1^{er} janvier 2015 au 30 septembre 2021 en s’appuyant sur les données de débits de 27 stations hydrométriques.

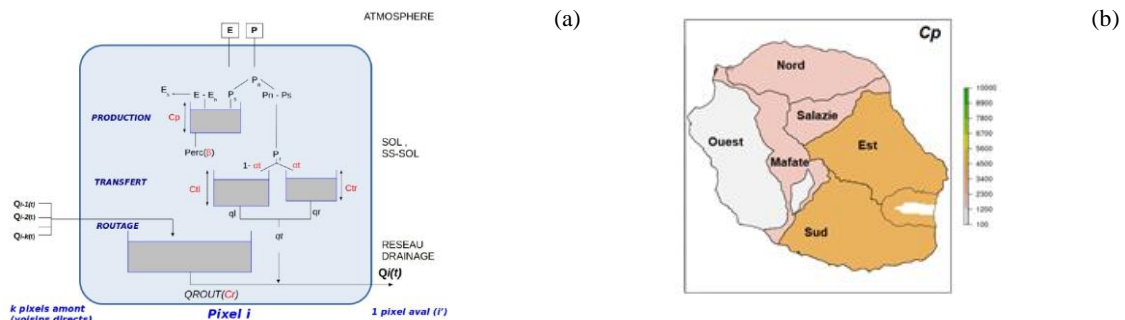


Figure 2 : (a) structure du modèle SMASH pour La Réunion, (b) exemple de régionalisation du paramètre Cp (taille du réservoir de production en mm) du modèle SMASH issu du calage uniforme pour les 6 régions définies (période 2015-2021)

4. Perspectives

Le développement des outils de prévision présentés ci-dessus permettent aujourd’hui à la CVH d’établir, pour le cadre d’astreinte de la DEAL et la préfecture, des chronologies de vigilances crues (en lien avec les chronologies de vigilances météo) lors du passage de minimums dépressionnaires à proximité de La Réunion et lors d’évènements météorologiques marqués. L’objectif est de passer à moyen terme à une vigilance à 24 h produite quotidiennement pour le grand public (à l’image de la vigilance crues métropolitaine). Pour cela, un certain nombre d’améliorations sont d’ores et déjà identifiées (en dehors des aspects organisationnels) :

- Production quotidienne d’une pluie expertisée type AP/BP (bulletin de prévision) sur 10 zones identifiées sur l’île (zonage SIPEX). L’arrivée du modèle AROME-OI (Océan indien) ensembliste en opérationnel pour la saison cyclonique 2023/24 devrait faciliter la production de cette pluie expertisée.
- En ce qui concerne la boucle de modélisation GRP, le passage à GRP 2021 est prévu en augmentant la période de calibration et en ajoutant de nouveaux bassins versants dont le recul de données hydrométriques est suffisant. Le test expérimental d’une version plus réactive aux intensités de pluie devrait également être source d’amélioration des prévisions.
- Pour la boucle de modélisation SMASH, outre l’agrandissement de la période de calibration incluant deux saisons cycloniques supplémentaires, une adaptation de la méthode de calage (approche multi-critères) et de régionalisation (« pré-régionalisation ») doit être testée afin d’améliorer la restitution des débits de pointe et des critères de contingence.

Pour l’ensemble des outils de prévision, un scénario « pluies expertisées » doit être ajouté pour affiner le champ des possibles au moment de l’établissement de la vigilance à 24 h.

5. REFERENCES

- [1] G. Jumeaux, H. Quetelard, D. Roy ; 2011 ; Atlas Climatique de La Réunion ; Météo France Sainte-Clotilde.
- [2] J. Viatgé, T. Pinna, A. Ficchi, C. Perrin, D. Dorchie, L. Garandea, F. Tilmant ; 2019 ; Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prévision des crues GRP. La Houille Blanche (2), pp. 72-80., <https://doi.org/10.1051/lhb/2019017>
- [3] F. Tilmant, C. Perrin ; 2021 ; Amélioration des capacités de prévision de la CVH Réunion. Mise en place opérationnelle du modèle de prévision des crues GRP sur des bassins réunionnais. Rapport d’étude, INRAE-HYCAR, Antony, 69 pp.
- [4] M. Jay-Allemand, P. Javelle, I. Gejadze, P. Arnaud, P.-O. Malaterre, J.-A. Fine, and D. Organde ; 2020 ; On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model: application on a Mediterranean catchment, Hydrology and Earth System Sciences, pp. 1–24, <https://doi.org/10.5194/hess-24-5519-2020>.
- [5] D. Organde, P. Javelle, P.-A. Garambois, M. Jay-Allemand, J. Demargne, J.-A. Fine ; 2021 ; Développement de la méthode AIGA sur l’île de La Réunion, Rapport d’étude, Hydris hydrologie, Montferrier-sur-Lez, 101 pp.

OUTIL D’AIDE A LA GESTION DE CRISE POUR LA MISSION RDI33 : ATLAS DE SCENARIOS DE SUBMERSION SUR LE BASSIN D’ARCACHON

*Maps of potential coastal flood zones on the Arcachon lagoon for crisis
management support*

Auteurs : LECACHEUX Sophie^{1*}, FILIPPINI Andrea G.¹, PEDREROS Rodrigo¹, ROHMER
Jeremy¹, ARPAIA Luca¹, LOUISOR Jessie¹, NICOLAE LERMA Alexandre¹, IDIER
Déborah¹, QUIQUE Robin¹, PARADIS Denis^{2*}, ROSE Françoise^{3*}

¹ BRGM, Europarc, 24 Av. Léonard de Vinci, 33600 Pessac, s.lecacheux@brgm.fr

² Météo-France, DIROP/MAR/DAS, Toulouse, denis.paradis@meteo.fr

³ DDTM Gironde, Cité Administrative de Bordeaux, françoise.rose@gironde.gouv.fr

Choix du thème/session : 1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs : submersion marine, Bassin d’Arcachon, atlas, aide à la gestion de crise, RDI

1. Contexte et objectifs

Depuis 2011, les DDTMs sont chargées d’apporter un appui technique aux préfetures sur la préparation et la gestion des crises “inondation” dans le cadre du dispositif ORSEC (en tant que Référent Départemental Inondation ou RDI). Le RDI doit notamment être en mesure d’interpréter les données de prévision de Météo-France et de les traduire en termes de conséquences attendues sur les enjeux territoriaux. Si cette mission concernait initialement les crues, elle a été étendue en 2018 aux submersions marines. Ces dernières années, plusieurs initiatives locales ont émergé pour développer des outils d’aide à la décision spécifiques aux missions RDI littorales ou aux collectivités de l’échelle d’un site, comme sur la grande plage de Biarritz [1], à l’échelle d’un département entier comme en Charente-Maritime [2]. Au niveau national, le SCHAPI est chargé d’harmoniser progressivement les pratiques pour le développement des outils d’aide aux missions RDI littorales.

Cette communication présente l’outil développé par le BRGM sur le Bassin d’Arcachon à la demande de la DDTM 33. L’objectif est de constituer un atlas cartographique de zones potentiellement inondables (ZIP) sur les 10 communes du bassin pour un ensemble de conditions météo-marines de conjonctions et d’intensités variables. Cet atlas de plusieurs centaines de scénarios fictifs mais réalistes permettra au cadre d’astreinte d’interpréter et traduire les prévisions côtières opérationnelles de Météo-France (vent, surcote et vagues) en zones submergées à terre en fonctionnant par analogie. Dans la suite, nous détaillons la construction des scénarios, le modèle de submersion et l’interface numérique de consultation de l’atlas. La conclusion décrit les nombreuses perspectives offertes par l’existence de ce type de base de données pour la préparation à la gestion de crise et la prévision des submersions.

2. Construction des scénarios

Les scénarios sont construits sur la base d’une analyse statistique tri-variée des extrêmes [3] sur les conditions de vent, de vagues et de surcotes au niveau de la bouée Cap-Ferret située à 50 m de fond à face à l’entrée du bassin (cf. figure 1). Les données de référence sont extraites sur la période 1979-2009 à partir des bases de données CFSR [4] pour le vent, ANEMOC 3 [5] pour les vagues et MARS30 [6] pour la surcote. Après avoir ajusté des lois de probabilités (dites « marginales ») pour les hauteurs significatives de vagues (Hs), les surcotes de pleine mer (SPM) et l’intensité du vent (U) à l’aide de la

loi Pareto Généralisée, les modèles de dépendance (des valeurs extrêmes) sont ajustés selon une approche semi-paramétrique [3] entre H_s et la période pic des vagues (T_p), puis selon les distributions conditionnelles empiriques entre H_s et la direction pic des vagues (D_p) et entre U et la direction du vent (D_u). Les simulations par méthode Monte-Carlo (à l’aide des lois marginales et des modèles de dépendance) permettent d’extrapoler un grand nombre de combinaisons extrêmes mais réalistes possédant les mêmes caractéristiques statistiques que les données observées (cf. figure 1). Pour constituer les scénarios de l’atlas, une sélection de 50 conditions de tempêtes modérées à fortes ($H_s > 4m$) est réalisée via un algorithme de « machine learning non supervisé » [7] visant à sélectionner un nombre limité de combinaisons tout en décrivant la diversité des combinaisons possibles. Ces 50 scénarios de tempête sont associés à 12 conditions de marée (plus précisément : des séries temporelles de 12h dont le niveau de pleine-mer varie de 0,6 à 2,4 m NM par pas de 10 à 20 cm) portant le nombre total de scénarios à 600.

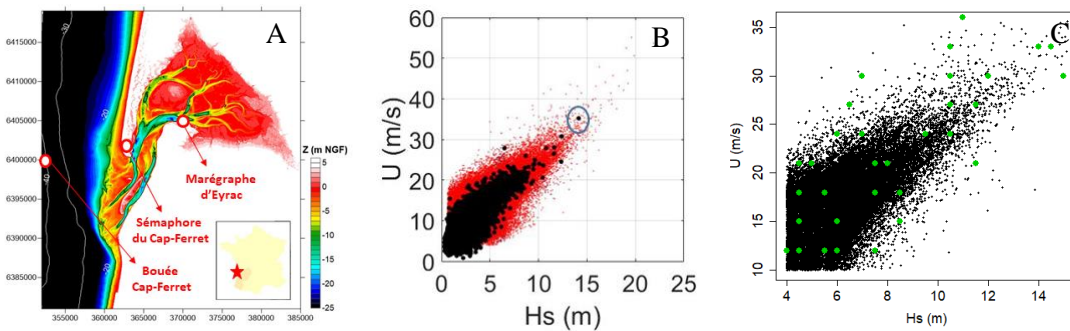


Figure 1 : (A) Bathymétrie et localisation du Bassin d’Arcachon et de la bouée Cap-Ferret (B) Exemple de combinaisons (H_s ; U) observées (points noirs) et simulées (points rouges) par méthode Monte-Carlo à l’aide des lois marginales et des lois de dépendances. (C) Exemple des combinaisons sélectionnées en vert dans l’espace (H_s ; U) pour les scénarios de l’atlas.

3. Modélisation des scénarios

Le modèle de submersion comprend un chaînage des modèles de vague WW3 [8] et d’hydrodynamique UHAINA [9] sur un maillage non structuré allant d’une résolution kilométrique au large à decamétrique à terre. Il permet de simuler la propagation des vagues et des niveaux du large jusqu’à l’intérieur du bassin, la génération du clapot et la bascule du plan d’eau induits par le vent local, le débordement et la propagation de l’eau à terre. Le modèle a été validé sur 4 tempêtes historiques : Klaus (2009), Xynthia (2010), Emma (2018) et Justine (2020). Pour ces 4 tempêtes, les forçages sont constitués des séries temporelles d’observation ou de simulation grande échelle des niveaux d’eau et des vagues à la bouée (appliquées sur le bord ouest de la grille) ainsi que de vent au sémaphore (appliquées de manière homogène sur la grille). Les résultats des simulations présentent de faibles erreurs sur les niveaux marins maximums à Eyrac. Par exemple pour la tempête Xynthia (cf. figure 2), l’erreur est inférieure à 5 cm au pic de marée haute. Les résultats en termes de surfaces inondées pour cet événement sont également très satisfaisants, les limites simulées étant proches des observations de terrain post-tempête [10].

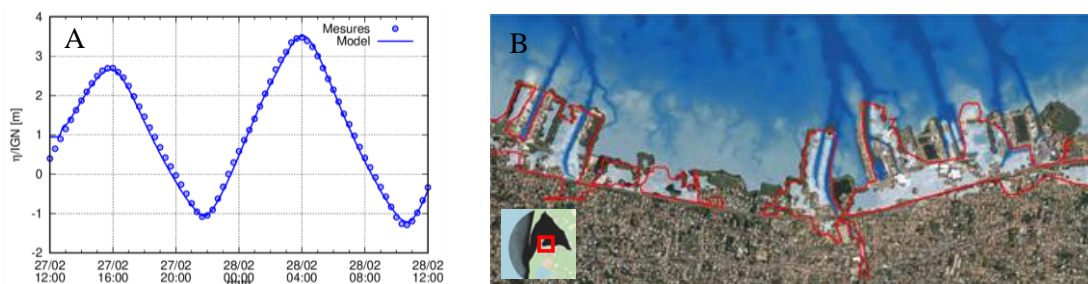


Figure 2 : Validation du modèle sur la tempête Xynthia (2010) : (A) Comparaison des niveaux marins observés et simulés au marégraphe d’Arcachon Eyrac (B) Comparaison des surfaces submergées observées et simulées à Gujan Mestras.

Pour chacun des 600 scénarios fictifs, on modélise un cycle de marée de 12h en appliquant les conditions de surcote, de vent et de vagues de manière stationnaire sur toute la simulation. Cette approche est motivée par un besoin de simplicité au moment de l’utilisation de l’atlas et par la taille restreinte du modèle (~50 km de large) qui limite les effets d’amplification liés au forçage stationnaire.

4. Interface et méthode d’utilisation de l’atlas

L’exploitation de l’atlas repose sur une application numérique installable sur un PC (cf. figure 3) :

- Un premier onglet de recherche permet de renseigner les conditions prévues au niveau de la bouée Cap-Ferret (marée théorique, surcote de pleine mer et caractéristiques du vent et des vagues au moment de la pleine mer). Les informations peuvent être rentrées manuellement en consultant l’océanogramme de la station Cap-Ferret sur [DATA.SHOM.FR](https://data.shom.fr) ou automatiquement en important le fichier de prévision dédié fourni par Météo-France à la DDTM et en sélectionnant la pleine mer concernée.
- L’application recherche alors les trois scénarios les plus proches parmi les 600 disponibles via un outil de recherche d’analogues (méthode “look-up table”). L’importance relative de chaque paramètre est calibré grâce à une analyse globale de sensibilité préalable de l’atlas.
- L’onglet de restitution affiche les 3 scénarios de l’atlas les plus proches du scénario recherché et permet de comparer les cartographies de submersion associées sur les 10 communes. L’extraction du ou des cartographies sélectionnées sous format pdf ou SIG offre la possibilité d’utiliser les données dans d’autres applications dédiées à la gestion de crise ([SYNAPSE](#), etc.).

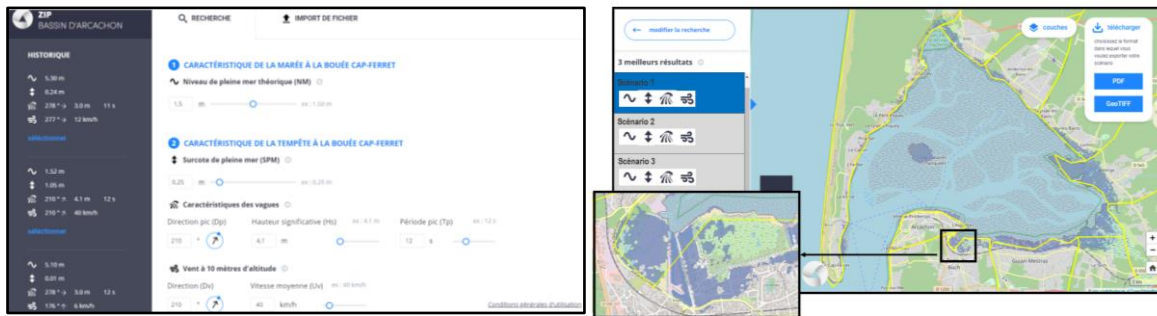


Figure 3 : Visuels préliminaires de l’application numérique : (A) Onglet de recherche (B) Onglet de restitution.

5. Conclusion et perspectives

La méthode mise en place pour cet atlas a pour objectif de s’articuler au mieux avec les prévisions océanographiques opérationnelles utilisées pour la Vigilance Vagues Submersion (VVS) et les bulletins RDI littoraux afin d’apporter des clefs d’interprétation des prévisions pour se projeter sur les conséquences à terre. L’utilisation de l’atlas pour identifier des scénarios analogues aux conditions météo-marines prévues constitue un premier niveau d’exploitation mais l’analyse approfondie de la base de données produites offre de nombreuses autres perspectives pour (1) améliorer la compréhension des processus de submersion, du rôle relatif des conditions de forçage et des effets de seuils (2) identifier des seuils d’alerte et des plans d’action pour la gestion de crise en particulier pour des événements d’intensité modérée à extrême (3) faire de l’apprentissage avec des méthodes de type machine learning pour développer des modèles de prévision très rapides (quelques secondes à minutes) capables de remplacer les modèles numériques pour réaliser des simulations en (quasi)temps réel. Cette dernière méthode, développée et testée sur le site de Gâvres dans le projet ANR [RISCOPE](#) [11], est en cours de développement sur le Bassin d’Arcachon dans la cadre du projet ANR [ORACLES](#) pour aller vers la prévision d’ensemble de la submersion marine.

Remerciements : Les auteurs remercient les membres du comité de suivi du projet, notamment Hugues Bijoux (SIBA), Olivier Piotte (SPC Gironde) et Didier Jourdan (SHOM).

6. REFERENCES

- [1] Projet MAREA – [Rapport de synthèse Rivages Pro Tech](#) – Décembre 2019
- [2] [Outil Survey 17](#)
- [3] Heffernan, J. E. and Tawn, J. A. (2004) - A conditional approach for multivariate extreme values (with discussion), *J. Roy. Stat. Soc. Ser. B*, 66, 497–546.
- [4] Saha, S., et al. (2010) - The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, 91, 1015-1057.
- [5] Raoult, C., Joly, A., Andreevsky, M., Joly-Laugel, A. (2018) - ANEMOC-3 : Amélioration de la base de données d'états de mer ANEMOC-2 par prise en compte des effets de la marée. Acte de conférence des 16èmes Journées de l'Hydrodynamique – Marseille, 2018.
- [6] Mugica, J., Bulteau, T., Paris, F., et Pedreros, R. (2014) Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon, (Gironde). BRGM/RP-61408-FR.
- [7] Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Cofiño, A. S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), 453-462.
- [8] Tolman, 2014: User manual and system documentation of WAVEWATCH- III version 4.18.
- [9] Filippini, Brie, Perrier, Marche, Ricchiuto (2018). UHAINA : A parallel high performance unstructured near-shore wave model. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, May 2018, La Rochelle, France. pp.47-56.
- [10] Mugica J., Delvallée E., Pedreros R. (2010) - Application de modèles numériques pour l'estimation de l'altitude du plan d'eau à Andernos-les-Bains. BRGM/RP-58723-FR. 92 p., 64 fig., 14 tab.
- [11] Idier, D., Aurouet, A., Bachoc, F., Baills, A., Betancourt, J., Gamboa, F., Klein, T., López-Lopera, A.F., Pedreros, R., Rohmer, J., and Thibault, A.: A User-Oriented Local Coastal Flooding Early Warning System Using Metamodelling Techniques, *J. Mar. Sci. Eng.*, 9(11):1191.

QUE PEUT-ON ATTENDRE D’UNE APPROCHE MULTI-MODÈLE SEMI-DISTRIBUÉE POUR LA PREVISION DES CRUES ? EVALUATION SUR LE BASSIN DU RHÔNE.

What can we expect from a semi-distributed multi-model approach for flood forecasting? Evaluation on the Rhône river catchment.

Auteurs : THÉBAULT Cyril^{1*}, PERRIN Charles¹, LEGRAND Sébastien², ANDRÉASSIAN Vazken¹, THIREL Guillaume¹, DELAIGUE Olivier¹

*Correspondance à: cyril.thebault@inrae.fr

¹Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR, Antony, France

²Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Multi-modèle ; semi-distribution ; prévision ; crues.

Résumé

La prévision des crues répond à de nombreux objectifs, tels que la mise en sécurité des populations lors d’inondations ou la gestion d’ouvrages hydrauliques. Cependant, les bassins versants sont des systèmes complexes dont le comportement peut être difficile à mettre en équations, et la prévision hydrologique est soumise à de nombreuses sources d’incertitude, dont celles issues des prévisions météorologiques (en particulier les précipitations) ou celles liées au modèle hydrologique utilisé pour convertir les précipitations en débit. Nous nous intéressons ici à cette dernière catégorie : les incertitudes liées à la structure du modèle choisi, sa discrétisation spatiale et temporelle ou encore l’estimation de ses paramètres.

Parmi les différentes approches de modélisation hydrologique existantes, les approches multi-modèles – qui font fonctionner différents modèles en parallèle – permettent de quantifier et potentiellement réduire l’incertitude liée au choix de la structure du modèle. Les approches semi-distribuées, pour leur part, permettent une prise en compte explicite de la variabilité spatiale des précipitations et des processus de genèse des crues, en divisant le bassin versant en sous-bassins tout en maintenant un niveau de complexité limité. Ces deux approches ont été rarement combinées et l’objectif de ce travail est de répondre à la question suivante : quels sont les apports et les limites d’une approche multi-modèle semi-distribuée pour la prévision des crues ?

L’étude porte sur le bassin du Rhône et ses affluents. Une base de données de 13 bassins versants a été assemblée sur ce territoire, avec des données de précipitations, d’évapotranspiration potentielle et de débit au pas de temps horaire sur la période 2008-2018. Une configuration simple de semi-distribution a été choisie pour les tests : à partir d’une station aval cible, on considère la station ou le groupe de stations situés à l’amont, qui permet de définir un seul bassin intermédiaire entre l’exutoire aval et les sous-bassins amont. Cela signifie que l’on ne considère pas de découpage spatial de ces sous-bassins amont. L’approche multi-modèle a été mise en œuvre avec une combinaison des sorties des modèles. Une douzaine de modèles hydrologiques horaires, chacun implémenté avec différents jeux de paramètres, ont été utilisés pour diversifier autant que possible les combinaisons de modèles. Les tests ont été réalisés pour des échéances allant jusqu’à 48h, en considérant différents scénarios de précipitations futures : (1) un scénario idéal correspondant aux précipitations passées observées rejouées dans un contexte de prévision, (2) des archives de précipitations expertisées déterministes, et (3) des prévisions d’ensemble.

La communication présentera les principaux résultats de cette étude, et discutera de l’intérêt de mettre en place des approches semi-distribuées multi-modèles pour des objectifs opérationnels. La discussion sera illustrée par des résultats sur quelques événements marquants sur le bassin du Rhône.

ASSIMILATION DE DONNEES SAR COMME DONNEES DE TYPE FRONT POUR LA PREVISION D'INONDATIONS

SAR data assimilation as front-like data for flood prediction

Auteurs : BONASSIES Quentin^{1*}, RICCI Sophie¹, PENA LUQUE Santiago², FATRAS Christophe³, NGUYEN Thanh Huy¹, PIACENTINI Andrea¹, RODRIGUEZ-SUQUET Raquel², ANDRAL Alice³

* *auteur correspondant*

¹ CECI, CNRS UMR 5318/CERFACS, 31057 Toulouse Cedex 1, France (e-mail: bonassies@cerfacs.fr; thnguyen@cerfacs.fr; ricci@cerfacs.fr; piacentini.palm@gmail.com)

² CNES, 31401 Toulouse Cedex 9, France (e-mail: raquel.rodriquezsuquet@cnes.fr; santiago.penalunque@cnes.fr)

³ CLS, 11 rue Hermès, Parc Technologique du Canal, 31520 Ramonville Saint-Agne, France (e-mail: cfatras@groupcls.com ; aandral@groupcls.com)

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots Clefs : Remote Sensing, Data Assimilation, Fluvial flood, Front, Ensemble Kalman Filter, Chan-Vese Functional, Telemac-2D

1. Introduction

Estimating and reducing the risk of flooding has received significant attention in the hydrometeorological community as well in the public and private sectors [1]. Presently, decision making and risk assessment both rely on the use of Earth observations (EO) networks and hydrodynamics software for flood forecasting. Two-dimensional (2D) hydraulic models are powerful tools for flood forecasting systems as they provide water surface elevation maps over the whole simulated domain (riverbed and floodplains) over time with a fine spatial and temporal resolution. However, uncertainties in input data (forcing), initial conditions, model parameters and model structures translate into uncertainties in the model outputs, thus limiting the reliability of the forecast.

In order to reduce these uncertainties, over the last decades, the literature on data assimilation (DA) onto hydrodynamic models mainly focused on the assimilation of in-situ or remote sensing (RS)-derived WSE observation (e.g. [2], [3]), mostly because this is a state variable in any hydraulic model, thereby rendering the DA more straightforward. Alternative methods rely on deriving WSE by combining synthetic aperture radar (SAR)-derived flood extent maps and topography data but their automation and testing still require some further research (e.g. [4]). Retrieving WSE from RS data is also a hot topic with the recent launch of the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) satellite. However, various automated flood mapping methods results in flood extents as water masks, instead of WSE maps, from available satellite images (e.g. [5], [6]) and recent studies have developed methods for directly assimilating flood extent maps in flood forecasting chains and hydraulic models, thereby paving the way for the operational applications. Flood extents may be assimilated as probabilistic flood maps (e.g. [7], [8] and [9]). The computation of wet surface ratio (WSR) derived from SAR data is another approach ([10]), that implies the use of FloodML ([11]), a machine learning algorithm for the computation of the flood extent from Copernicus EMSR flood mapping database. Here we propose a framework for the direct assimilation of flood extent location and shape, aiming at treating them as innovative interface (front-type) information type that would overcome the limitations of classical amplitude error correction, therefore allowing for the correction of flood edge position and/or deformation errors.

In multiple research fields, such as wildfire modelling ([12], [13] & [14]), tumor growth monitoring ([15], [16]) and oil spill detection studies ([17]) DA algorithms were developed to take into account 2D

observations represented as images and treated as front-like information. Such an approach was proposed in [13] for data-driven surface wildfire propagation at a regional scale, based on a fire front mapping and shape recognition. The prototype was evaluated with synthetical and controlled grassland fire experiment. However, this marker-based method was shown suboptimal for complex front geometry due to the computation of Euclidean distances between the corresponding markers positioned on the fire front interface. Indeed, to deal with complex front topology, an object-oriented approach based on the Chan-Vese (CV) contour fitting function [18] used in image processing was proposed in [12]. This front shape similarity measure was implemented and evaluated for a field-scale experiment in [14]. A similar idea can be applied for DA of SAR-derived flood extents in the context of flood modelling. In this study, we present our work as a follow-up of [10] and [19], focusing on the implementation of a parameter estimation EnKF algorithm inspired from [12] and [14] in the context of flood monitoring and forecasting, using front-like data extracted from the Sentinel-1 derived flood extents over the Garonne marmandaise area with Telemac-2D (T2D - opentelemac.org).

2. Methods

a. SAR data

Inundated area detection is achieved from the backscatter (BS) values of SAR images, except for densely vegetated areas, built environments where there are a lot of multiple-bounce effects and important speckle effect. An example of a synthetic flood extent binary map extracted from the T2D-simulated WSE map is given in Figure 1 (a) for a test-case study with a 100-meter-wide river with a partial dyke on its right and several buildings in its floodplain.

In order to compare model outputs with SAR binary map, we define the level-set function, Φ , as follow:

$$\Phi(x, y) = h(x, y) - h_{fr}$$

where h_{fr} is the threshold value for the limit between wet and dry area (here set to $h_{fr} = 5\text{cm}$) and $h(x, y)$ is the simulated WL values at (x, y) nodes of the T2D mesh. The level-set map (Figure 1 (b)) computed from an instantaneous map of water level (WL) characterizes the interface between wet/dry pixels. The red dashed line in Figure 1 delineates the contour $\Phi(x, y) = 0$ issued from the T2D simulation.

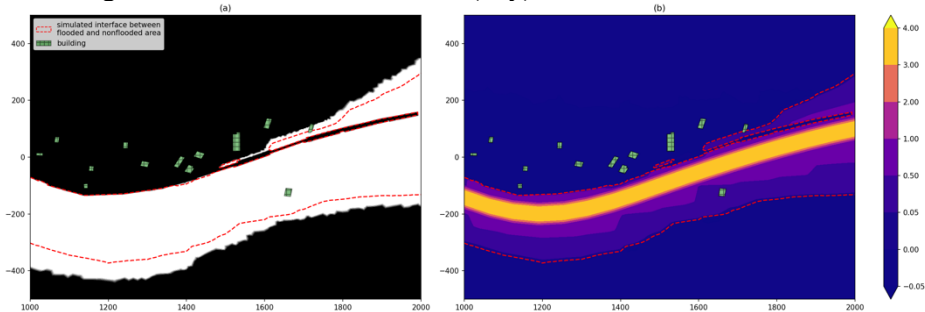


Figure 1. T2D test case to illustrate CV functional with associated synthetic SAR image. (a) Observed binary flood extent map from simulated WL. (b) Simulated level-set function computed from T2D WL.

b. The Chan-Vese contour fitting functional and derived distances

The CV contour fitting functional is considered as an adequate candidate ([12]) to compare the observed and the simulated fronts, as it measures the similarity between the two images over the entire domain. CV distances derive from the CV functional and are based on two scalars, C_0 and C_1 , which rely on the formulation of the contingency map between the observed and the simulated images. The observed image is considered as the reference and the simulation as the experiment to be assessed with respect to the reference. In the contingency map, each pixel is identified as one of the four following outcomes:

- False Negative (FN) if the pixel is flooded in the observation but the simulation is dry,
- True Negative (TN) if the pixel is non flooded in the observation and the simulation is dry,

- False Positive (FP) if the pixel is non flooded in the observation and the simulation is wet,
- True Positive (TP) if the pixel is flooded in the observation and the simulation is wet.

C_0 quantifies the mismatch between the observed and the simulated flooded area. It is the ratio between the number of flooded pixels that the simulation misses (FN) and the total of the non-flooded pixels in the simulation (TN + FN). C_1 quantifies the match between the observed and the simulated flooded area. It is the ratio between the number of flooded pixels that the simulation hits (TP) and the total of flooded pixels in the simulation (TP + FP). C_1 and C_0 are then defined as follow:

$$C_0 \approx \frac{FN}{TN+FN} \text{ and } C_1 \approx \frac{TP}{TP+FP}$$

Figure 2A represents the perfect agreement scenario, where simulated area (hatched in green) perfectly matches with the observed (hatched in blue) flooded surface ($C_0 = 0$ and $C_1 = 1$). Figure 2B represents the total inclusion scenario, where simulated area is totally included within the observed flooded surface ($0 < C_0 < 1$ and $C_1 = 1$). Figure 2C represents the no agreement scenario, where simulated area is in total discordance with the observed flooded surface ($0 < C_0 < 1$ and $C_1 = 0$). Figure 2D represents the partial agreement scenario, where the simulated area partially overlaps the observed flooded area ($0 < C_0 < 1$ and $0 < C_1 < 1$). Figure 2E represents the total containment scenario, where the observed flooded surface is fully within the simulated area ($C_0 = 0$ and $0 < C_1 < 1$).

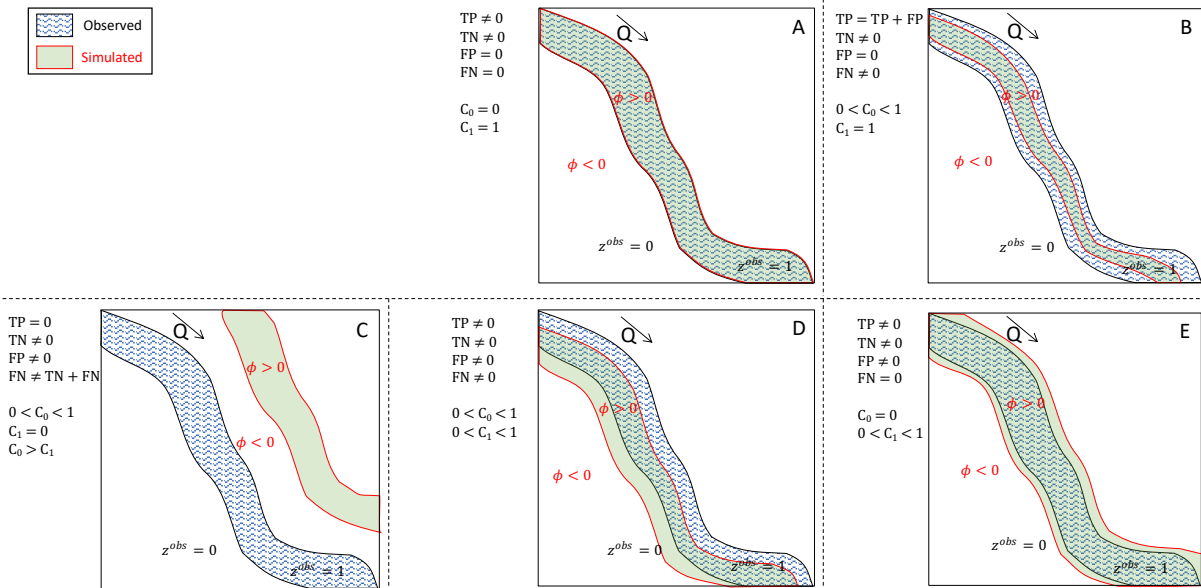


Figure 2. Scheme of C_0 and C_1 from Chan-Vese functional inspired from Rochoux et al., (2018) [12]

As explain in [12], CV functional decomposes into two functionals approximated by the least square functionals $D^{\epsilon,+}$ and $D^{\epsilon,-}$ used as the innovation vector, $D(z^{obs}, \phi) = (D^{\epsilon,+}, D^{\epsilon,-})^T$:

$$D^{\epsilon,-} = \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\phi}{\epsilon}\right)\right] [z^{obs} - C_{min}(z^{obs}, \phi)] \text{ and } D^{\epsilon,+} = \left[1 + \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\phi}{\epsilon}\right)\right] [z^{obs} - C_{max}(z^{obs}, \phi)].$$

where ϵ is a small parameter defined with respect to the contour sharpness ([20]) to smooth out the Heaviside function. z^{obs} is the binary flood extend mask from the observed SAR image and ϕ is the level-set map. C_{min} and C_{max} are scalars defined as $C_{min} = \min(C_0, C_1)$ and $C_{max} = \max(C_0, C_1)$ that both provide a metric of the over whole agreement between the observed and simulated fronts.

These two distances are illustrated in Figure 3. For each subplot, the dashed line represents the contour $\Phi(x, y) = 0$. $D^{\epsilon,-}$ are on the left subplots and $D^{\epsilon,+}$ on the right subplots. When the simulation overestimates the flooding (Figure 2E), $D^{\epsilon,+}$ and $D^{\epsilon,-}$ are formulated with respectively $C_{max} = C_1 = 0.911$ and $C_{min} = C_0 = 0$ and are shown in Figure 3 (a) and (b). When the simulation underestimates the flooding (Figure 2B), $D^{\epsilon,+}$ and $D^{\epsilon,-}$ are formulated with respectively $C_{max} = C_1 = 1$ and $C_{min} = C_0 = 0.069$ and are shown in Figure 3 (c) and (d). $D^{\epsilon,-}$ in Figure 3 (a), is similar to the observed mask (1 when flooded, 0 when non flooded)

except at pixels located along the edge of the observed front (values $\sim 0.2-0.4$, in light orange). In Figure 3 (b), $D^{+, \epsilon}$ brings light onto the FP pixels with negative values (shown in blue) as opposed to almost null values elsewhere (shown in beige), where both observation and simulation are flooding. The innovation vector mostly represents overflooded areas in the model. In Figure 3 (d), $D^{+, \epsilon}$ is strictly opposed to the observed mask (0 when flooded and 1 when non flooded) while in Figure 3 (c), $D^{-, \epsilon}$ brings light onto the FN pixels with positive values (shown in red) as opposed to almost null values elsewhere (shown in grey blue). The innovation vector mostly represents under-flooded areas in the model. It should finally be noted that the informative data is located in the neighborhood of the observed interface. Indeed, in areas where both simulation and observation do not see flood, $D^{+, \epsilon}$ and $D^{-, \epsilon}$ metrics are non-informative. Thus, a localization feature is to be added to the EnKF algorithm, thus allowing for a significant reduction of the computational time.

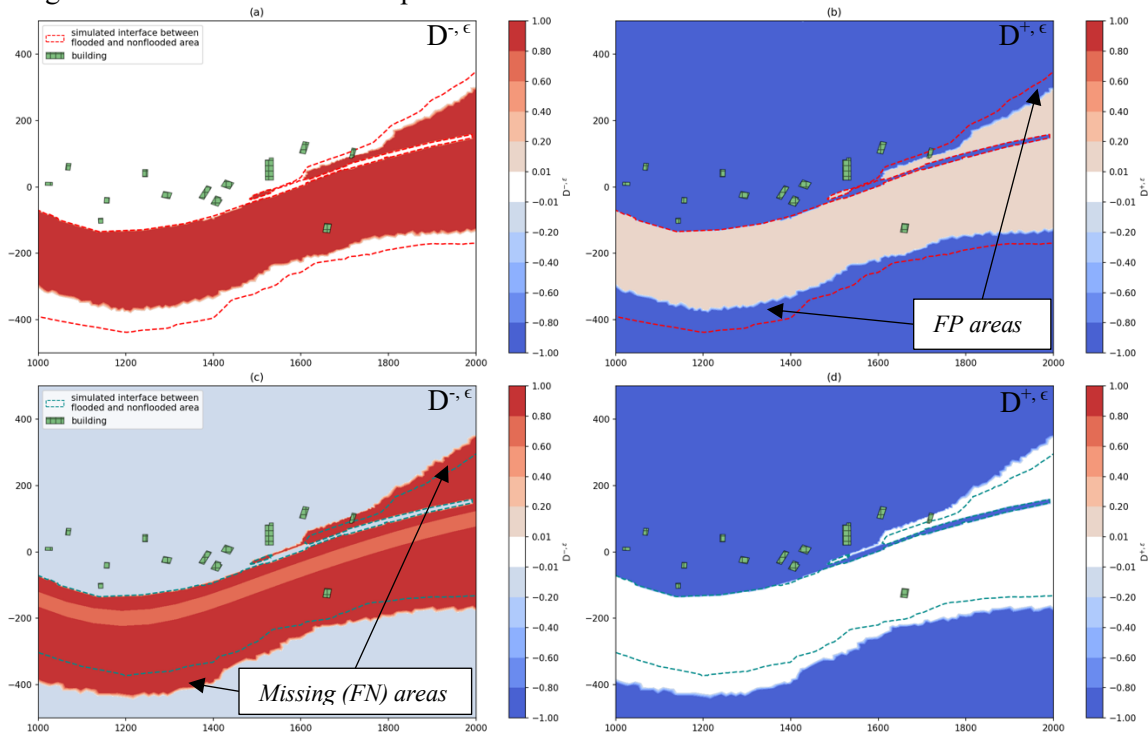


Figure 3. (a)-(b) $D^{-, \epsilon}$ and $D^{+, \epsilon}$ example if the model overestimates the flood (computed from Figure 1 (a) and (b) images).
(c)-(d) $D^{-, \epsilon}$ and $D^{+, \epsilon}$ example if model underestimates the flood

3. Perspectives: the adapted EnKF with Chan-Vese distance

The derived distance of the CV functional seem to be a promising approach for the assimilation of flood extend as front object. The innovation vector defined in §2.b is to be implemented in the analysis step by substituting $(z_t^{obs,(i)} - y_t^{b,(i)})$ with $D(z_t^{obs,(i)}, y_t^{b,(i)})$:

$$x_t^{a,(i)} = x_t^{b,(i)} + K_t [D(z_t^{obs,(i)}, y_t^{b,(i)})] \text{ with } i \in [1; N_e]$$

where N_e is the size of the ensemble and $x_t^{a,(i)}$ ($x_t^{b,(i)}$) is the analysis (background) i th-estimate of the control vector at time t . $y_t^{b,i}$ is the level-set function associated with the background (forecast) water-level and the K_t is the Kalman gain.

This strategy is yet to be implemented in the ensemble-based DA framework associated to Telemac. It will then be assessed for simple test case in a twin experiment configuration and further applied on the T2D Garonne model used in [10] and [19].

4. REFERENCES

- [1] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2018, The human Cost of Weather-related Disasters, Available from: https://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf
- [2] R. Hostache, X. Lai, J. Monnier, and C. Puech. Assimilation of spatially distributed water levels into a shallow-water flood model. Part II: Use of a remote sensing image of Mosel River. *J Hydrol*, 390(3-4):257–268, 2010.
- [3] H. Oubanas, I. Gejadze, P.-O. Malaterre, et al. Discharge estimation in ungauged basins through variational data assimilation: The potential of the swot mission. *Water Resour. Res.*, 54(3):2405–2423, 2018.
- [4] F. Cian, M. Marconcini, P. Ceccato, and C. Giupponi. Flood depth estimation by means of high-resolution SAR images and lidar data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18(11):3063–3084, 2018.
- [5] M. Chini, R. Hostache, L. Giustarini, and P. Matgen. A hierarchical split-based approach for parametric thresholding of SAR images: Flood inundation as a test case. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 55(12):6975–6988, 2017.
- [6] Sandro Martinis, Jens Kersten, and André Twele. A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 104:203–212, 2015.
- [7] B. Revilla-Romero, N. Wanders, P. Burek, P. Salamon, and A. de Roo. Integrating remotely sensed surface water extent into continental scale hydrology. *J. Hydrol.*, 543:659–670, 2016.
- [8] A. Dasgupta, R. Hostache, R. Ramsankaran, et al. A mutual information-based likelihood function for particle filter flood extent assimilation. *Water Resour. Res.*, 57(2):e2020WR027859, 2021.
- [9] C. Di Mauro, R. Hostache, P. Matgen, et al. Assimilation of probabilistic flood maps from SAR data into a coupled hydrologic/hydraulic forecasting model: a proof of concept. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25:4081–4097, 2021.
- [10] Nguyen, T. H., Ricci, S., Piacentini, A., Fatras, C., Kettig, P., Blanchet, G., et al. (2022). Dual state-parameter assimilation of SAR-derived wet surface ratio for improving fluvial flood reanalysis. *Water Resources Research*, 58, e2022WR033155. <https://doi.org/10.1029/2022WR033155>
- [11] S. Peña-Luque, S. Ferrant, M.C.R. Cordeiro, et al. Sentinel-1 & 2 multitemporal water surface detection accuracies, evaluated at regional and reservoirs level. *Remote Sens.*, 13(16), 2021.
- [12] Rochoux, M. C., Collin, A., Zhang, C., Trouvé, A., Lucor, D., and Moireau, P. (2018). Front shape similarity measure for shape-oriented sensitivity analysis and data assimilation for eikonal equation. *ESAIM: Proceedings and Surveys*, 63:258-279
- [13] Rochoux, M. C., Emery, C., Ricci, S., Cuenot, B., Trouvé, A. (2014). Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread – Part II: Ensemble Kalman Filter for the state estimation of a front-tracking simulator of wildfire spread, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, doi:0.5194/nhess-15-1721-2015

- [14] Zhang, C., Collin, A., Moireau, P., Trouvé, A., Rochoux, M. C. (2018). Front shape similarity measure for data-driven simulations of wildland fire spread based on state estimation: Application to the RxCADRE field-scale experiment. Proceedings of the Combustion Institute
- [15] Martins, M., Ferreira Jr, S., and Vilela, M. (2007). Multiscale models for the growth of avascular tumors. *Physics of Life Reviews*, 4(2):128-156.
- [16] Collin, A., Chapelle, D., and Moireau, P. (2015). A Luenberger observer for reaction-diffusion models with front position data. *J Comput Phys*, 300(C):288-307.
- [17] Li, L., Le Dimet, F.-X., Ma, J., Vidard, A. (2017). A level-set based image assimilation method: Potential applications for predicting the movement of oil spills. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi:10.1109/TGRS.2017.2726013A. Dasgupta, R. Hostache, R. Ramsankaran, et al. A mutual information-based likelihood function for particle filter flood extent assimilation. *Water Resour. Res.*, 57(2):e2020WR027859, 2021.
- [18] T. F. Chan and L. A. Vese, "Active contours without edges," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 2, pp. 266-277, Feb. 2001, doi: 10.1109/83.902291.
- [19] T. H. Nguyen, S. Ricci, C. Fatras, et al. Improvement of flood extent representation with remote sensing data and data assimilation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, pages 1–22, 2022.
- [20] B. Engquist, A.-K. Tornberg, and R. Tsai. Discretization of Dirac delta functions in level set methods. *J Comput Phys*, 207(1):28–51, 2005.

INFLUENCE DES ZONES KARSTIQUES SUR LES CRUES ET INTEGRATION AUX MODELES DE PREVISION HYDROLOGIQUES

Impact of karst areas on floods and integration to hydrological forecast models

Auteurs : LE MESNIL Martin^{1,2,3*}, CHARLIER Jean-Baptiste^{1,2}, MOUSSA Roger³

* *auteur correspondant*

¹BRGM, Univ. Montpellier, Montpellier, France

²G-eau, INRAE, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Institut Agro, BRGM, Montpellier, France

³LISAH, Univ. Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : karst, crue, descripteur, modélisation

1. Contexte et objectifs

Dans un contexte d'accroissement des risques hydroclimatiques, la prévision des crues est une question majeure de nos sociétés. Pour cela, la modélisation hydrologique nécessite une bonne connaissance du fonctionnement des bassins versants lors des crues. Les bassins à composante karstique présentent des processus hydrologiques spécifiques, difficiles à quantifier et à prévoir. En effet, le karst favorise une forte infiltration qui limite le ruissellement de surface, les interactions eaux de surface/eaux souterraines (dont des échanges souterrains interbassins, appelés IGF : *Interbasin Groundwater Flow* [1]), ainsi qu'une forte hétérogénéité spatiale. Les modèles hydrologiques utilisés en prévision n'intègrent souvent pas ces processus. L'objectif de cette étude est d'analyser à l'échelle régionale, l'influence des zones karstiques sur les crues à une fine résolution spatiale et temporelle, et de déterminer comment ces influences peuvent être prises en compte dans les modélisations hydrologiques de prévision de crue. Elle s'inscrit dans le cadre plus large d'analyses spatialisées multi-approches de la réponse hydrologique des bassins karstiques [2], [3].

2. Méthodologie

La réponse hydrologique des bassins est analysée à l'aide de 15 descripteurs, calculés à l'échelle des tronçons de rivière [4]. Un tronçon est défini comme le linéaire d'un cours d'eau entre 2 stations pour lesquelles le débit est connu. Ces descripteurs sont calculés sur les 20 événements de crue les plus importants des données disponibles sur chaque tronçon. Les tronçons sont classés en 3 groupes selon leur géologie : karstique, non karstique, et mixte (> 10 % de karst). Les descripteurs sont ensuite analysés statistiquement, selon la présence de karst sur les tronçons de rivière étudiés et selon la saisonnalité. Ils sont de 3 types :

- Les descripteurs de bilan hydrologique renseignent sur la proportion des différents flux lors des crues (précipitations, écoulements surfaciques, souterrains). Ils sont basés sur le calcul de lames d'eau, exprimées comme la différence des flux entrants et sortants.
- Les descripteurs d'hydrogrammes renseignent sur la dynamique des crues et la propagation de l'onde de crue. Ils sont basés sur les valeurs du pic de crue, des temps caractéristiques, et la célérité de l'onde de crue.
- Les descripteurs des échanges latéraux renseignent sur la dynamique des gains et pertes à l'échelle du tronçon de rivière, et sur leur influence sur la variation du pic de crue. Ils sont basés sur la simulation des flux d'échanges latéraux grâce à l'approche inverse du modèle d'onde diffusante entre 2 stations [5].

L’analyse de ces descripteurs en fonction de la présence de karst renseigne sur l’influence des zones karstiques sur la réponse des bassins versants aux événements pluvieux intenses. Afin d’étudier comment cette influence peut être prise en compte dans les modélisations hydrologiques, une analyse de corrélation est réalisée entre certains descripteurs et la valeur prise par les paramètres calibrés des modèles hydrologiques conceptuels à réservoirs Gardénia dédié aux écoulements souterrains [6] et GR5H dédié aux écoulements surfaciques [7]. La variabilité saisonnière des paramètres est également analysée. Ces deux modèles ont 5 paramètres libres et sont utilisés au pas de temps horaire. Gardénia comporte 3 réservoirs, contre 2 pour GR5H.

3. Données et sites d’étude

La zone d’étude comporte 108 tronçons de rivière répartis sur les régions des Cévennes, du Jura et de la Normandie (Figure 1). Les données exploitées sont des chroniques horaires de débit en rivière de la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>), de précipitations Comephore et Antilope de Météo France et d’évapotranspiration potentielle de Safran.

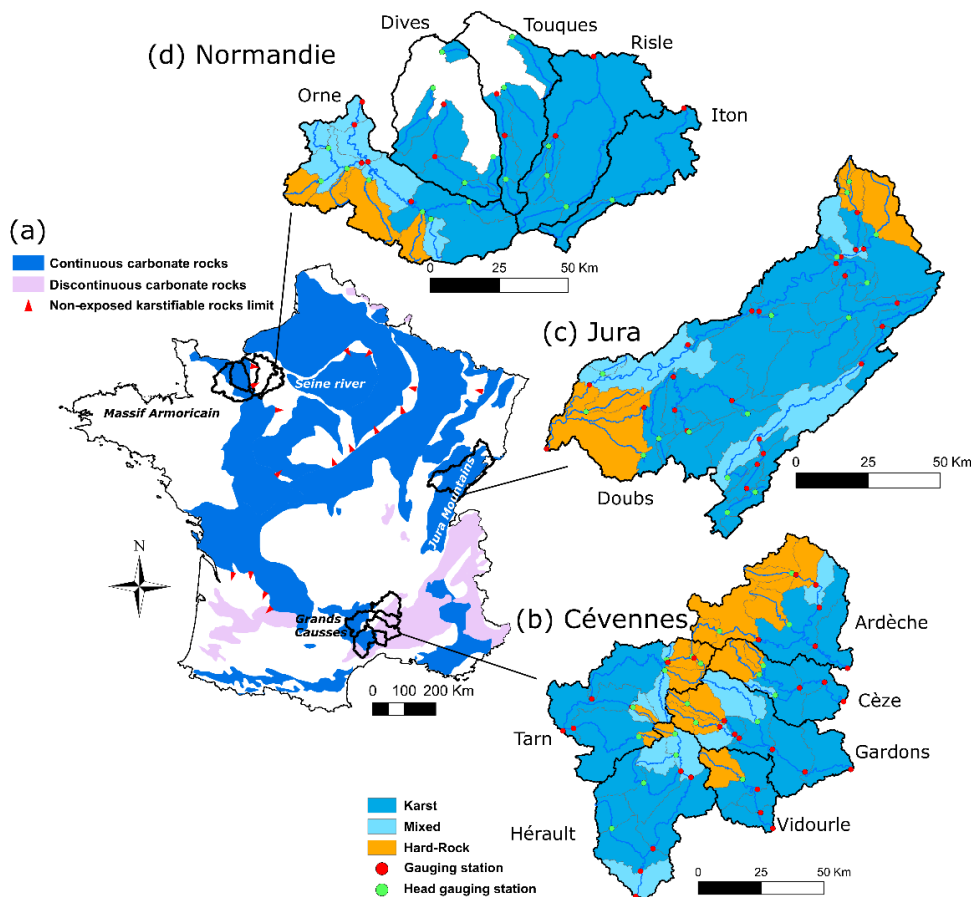


Figure 1 : a) Cartographie des aquifères carbonatés de la France [8] ; b,c,d) Emprises et type de géologie des bassins étudiés

4. Résultats

Malgré une forte variabilité liée à l’hétérogénéité spatiale des zones karstiques, les résultats, basés sur une approche statistique, montrent que la présence de karst favorise globalement (i) des pertes en rivière par infiltration, (ii) une augmentation des temps caractéristiques des événements de crue et une

atténuation des débits de pointe, et (iii) des échanges latéraux en export vers les bassins voisins. Ces effets sont les conséquences d’IGFs sortants, qui peuvent être significatifs à l’échelle de l’évènement de crue et représenter 50% du débit en rivière ou 20% des précipitations.

La saisonnalité contrôle également les processus hydrologiques à l’échelle de l’évènement de crue. La figure 2 montre ainsi que les flux d’échanges souterrains interbassin (IGF) sont globalement en export de septembre à mars, puis tendent vers zéro d’avril à août, voire s’orientent en import dans le cas du Jura. Ceci est probablement dû à l’état de saturation des aquifères karstiques qui varie au cours de l’année hydrologique.

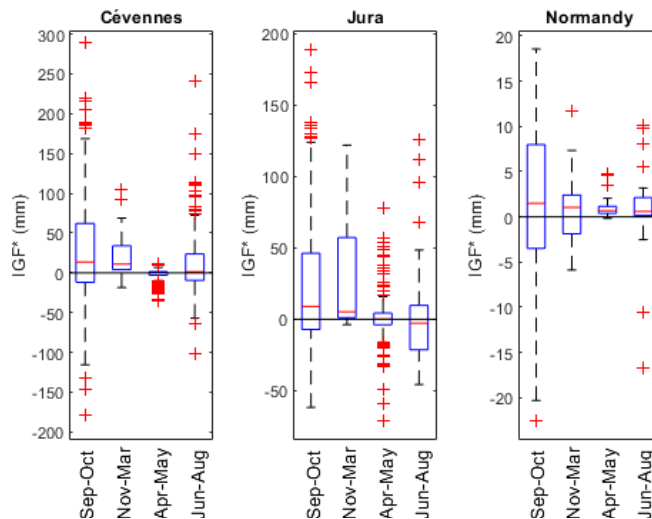


Figure 2 : lames d'eau des flux d'IGF lors des évènements de crue selon la saison

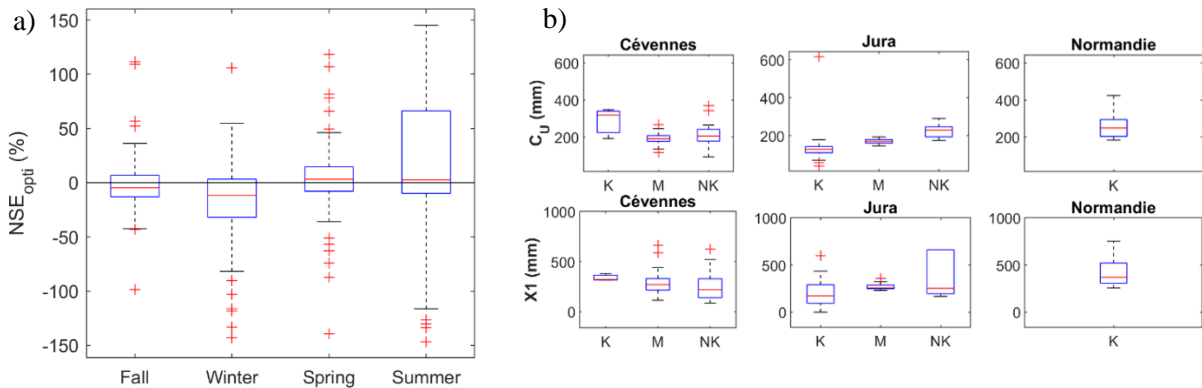


Figure 3: a) Ecart entre le meilleur NSE saisonnier et le NSE global, pour chacune des saisons hydrologiques (GR5H) ; b) variation saisonnière des paramètres optimaux C_U de Gardénia et $X1$ de GR5H pour les quatre saisons hydrologiques.

L’étude de la variabilité des descripteurs de crue selon la présence de karst montre que celle-ci influence la réponse hydrologique, avec des tendances notables, malgré une certaine variabilité. Un processus notoirement impacté par la présence de karst est l’intensité et la direction des IGFs. Or, les IGFs présentent un fort aspect saisonnier. Il semble donc important d’intégrer aux modèles hydrologiques la composante souterraine liée au contexte karstique et la saisonnalité des processus.

La calibration des paramètres du modèle GR5H selon la saison a montré qu’il est possible d’obtenir de meilleures simulations avec des jeux de paramètres spécifiques à la saisonnalité qu’avec des jeux de paramètres obtenus en calibrant sur l’ensemble des périodes disponibles. Ceci est notamment vérifié pour les saisons printemps et été. La figure 3a montre en effet une augmentation globale du critère de performance NSE sur ces saisons, lorsque des jeux de paramètres saisonniers sont utilisés.

De la même manière, le choix des paramètres optimaux peut être guidé par la présence de karst sur les bassins étudiés. En effet, certains indicateurs évènementiels qui décrivent la réponse hydrologique des bassins versants en crue sont corrélés aux paramètres optimisés des modèles Gardénia et GR5H. Or, ces indicateurs sont souvent influencés par la présence ou non de karst. Cela se traduit dans les résultats de modélisation, comme l’illustre la figure 3b qui montre une forte influence de la présence de karst sur la valeur des paramètres liés à la fonction de production des modèles.

5. Conclusion

Des descripteurs de la réponse hydrologique en crue ont été calculés sur les bassins versants de 108 tronçons de rivières. Leur analyse en fonction de la présence de karst montre que celle-ci est globalement associée à un laminage des crues causé par des pertes en rivière et par une augmentation des temps caractéristiques des crues. L’analyse des échanges latéraux – favorisés par la présence de karst – au long de l’année hydrologique montre qu’ils subissent une forte influence saisonnière. La prise en compte de la présence de karst et de la saisonnalité semble donc primordiale pour la prévision des crues en domaine karstique. L’étude de la variabilité des paramètres de modèles hydrologiques à réservoir en fonction de ces deux facteurs montre que des voies d’amélioration des modélisations prédictives sont possibles, en se basant sur des descripteurs de la réponse hydrologique des bassins. Cette analyse permet d’envisager des méthodes d’optimisation des prévisions hydrologiques en domaine karstique avec des modèles conceptuels, et ouvre la voie à la paramétrisation de modèles distribués, initialement non dimensionnés pour tenir compte des échanges surface-souterrain en zone karstique.

6. REFERENCES

- [1] Le Mesnil, M., Charlier, J.-B., Moussa, R., Caballero, Y., and Dörfliger, N., 2020. Interbasin groundwater flow: Characterization, role of karst areas, impact on annual water balance and flood processes, *J. Hydrol.*, 585, 124583
- [2] Le Mesnil, M. Signatures Hydrologiques des Bassins Karstiques. 2021. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro.
- [3] Le Mesnil, M., Charlier, J. B., Moussa, R., & Caballero, Y., 2022. Investigating flood processes in karst catchments by combining concentration-discharge relationship analysis and lateral flow simulation. *Journal of Hydrology*, 605, 127358.
- [4] Le Mesnil, M., Moussa, R., Charlier, J.-B., Caballero, Y., 2021. Impact of karst areas on runoff generation, lateral flow and interbasin groundwater flow at the storm-event timescale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 1259–1282.
- [5] Moussa, R., 1996. Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. *Hydrological Processes* 10, 1209–1227.
- [6] Thiéry, D., 2014. Logiciel GARDÉNIA, version 8.2, Guide d’utilisation, Rapport final. BRGM/RP-62797-FR, BRGM, Orléans
- [7] Ficchi, A. 2017. “An Adaptive Hydrological Model for Multiple Time-Steps: Diagnostics and Improvements Based on Fluxes Consistency.” PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.

- [8] Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Drew, D., Griger, F., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Richts, A., Stevanovic, Z., Veni, G., Goldscheider, N., 2017. The World Karst Aquifer Mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal* 25, 771–785

LE PROJET HOMONIM, EN SOUTIEN DES PRÉVISIONS D'INONDATION CÔTIÈRE

The HOMONIM project to support the flood forecasts

Auteurs : PARADIS Denis^{1*}, JOURDAN Didier², DALPHINET Alice¹, OHL Patrick¹,
AYACHE David¹, BATAILLE Christophe¹, KPOGO-NUWOLKO Komlan¹, PASQUET
Audrey², MICHAUD Héloïse², BARAILLE Rémy², CIAVALDINI Maya³, BROSSE Fabien²,
LE BELLEGUIC Roman², BISCARA Laurie²

* *auteur correspondant (denis.paradis@meteo.fr)*

¹Météo France DirOP/MAR, 42 av Coriolis 31057 Toulouse, France

²Shom-Toulouse, 42 av Coriolis 31057 Toulouse, France

³ INSA Toulouse, GMM, 135 Avenue de Rangueil, 31400 Toulouse, France

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Choix de la présentation :

Orale

Mots clefs (2 à 3 minimum) : prévision numérique ; conditions météo-marines à l'embouchure ; vagues en côtier ; niveaux marins sur le littoral

1. Contexte

Homonim - Historique, Observation, MOdélisation des Niveaux Marins - est un projet commun du Shom et de Météo-France, sous maîtrise d'ouvrage du ministère de la transition écologique et de la cohésion du territoire par l'intermédiaire de la Direction Générale de la Prévention des Risques.

Initié en 2011, il est une réponse concrète à l'action du plan submersions rapides sur *l'amélioration de la connaissance des submersions marines*, et vise également l'amélioration continue des systèmes de prévisions qui alimentent le dispositif de la vigilance vagues-submersion (VVS).

La première phase (2012-2015) a conforté les outils de prévision de la VVS en métropole, en réalisant l'extension du réseau d'observation des niveaux marins et la refonte complète des chaînes opérationnelles de modélisation des surcotes et des vagues en zone côtière (modèles Hycom [1] et WW3 [2]).

Dans la continuité, la deuxième phase (2016-2019) a permis de doter les départements d'outre-mer d'une capacité de prévision similaire à celle de la VVS métropolitaine, tout en faisant progresser l'ensemble des systèmes, d'implémenter une prévision d'ensemble des surcotes, et de tester la prévision très haute résolution couplée niveaux, courants et vagues.

Les acquis du projet *Homonim* se traduisent par des capacités de prévisions des surcotes et des états de mer de résolutions sub-kilométriques, qui s'appuient sur des noyaux de modélisation (Hycom et WW3) adaptés aux contraintes opérationnelles, et qui bénéficient du gros effort d'enrichissement des données de référence entrepris dans le projet (observations, bathymétrie [3], forçages,...).

Ces modèles fournissent une information fiable de la dangerosité d'une situation météo-océanographique à l'échelle départementale. Cette information permet le déclenchement du niveau de vigilance associé, et répond ainsi au besoin d'anticipation des responsables d'alerte et de gestion de crise, et en particulier des « missions RDI Littoral ».

Ces capacités de prévisions restent cependant insuffisantes pour anticiper les impacts à terre lors d'un épisode de tempête. Les principales limitations résident dans le réalisme des modèles à proximité

immédiate de la côte et sur les zones complexes (zones semi-fermées, pertuis, zones sous influences fluviales, ...).

2. Réalisations et perspectives

La phase 3 (2020-2024), vise à poursuivre l'amélioration du système opérationnel national de référence pour la Vigilance Vagues-Submersion de Météo-France et à préparer la transition vers la prévision des zones de submersions potentielles.

Concrètement il s'agit d'une part d'améliorer le réalisme des modèles à proximité de la côte pour fournir des prévisions des niveaux marins, surcotes et vagues plus performantes à l'échelle des portions de territoires à enjeux ou complexes (estuaires, zones semi-fermées), et de mieux appréhender et exploiter les incertitudes sur la prévision. Pour l'étape suivante, il s'agit aussi que cette capacité fournisse un « écosystème de modélisation » adapté à l'alimentation de systèmes de prévision plus locaux, et prépare les futurs outils de prévision numérique aptes à décrire les processus littoraux et compatibles avec une mise en œuvre opérationnelle.

Les orientations techniques choisies dans *Homonim-3* reposent sur le développement d'un modèle non hydrostatique vague à vague (moyenné sur la verticale), ainsi que sur la montée en résolution spatiale. Ce dernier objectif sera atteint par 1/ le développement par le SHOM et l'INSA Toulouse de la plateforme multi-modèles TOLOSA permettant de modéliser la dynamique à l'aide de grilles non-structurées et de schémas numériques innovants et performants, et son adaptation à la prévision des surcotes dans le cadre du projet HOMONIM, 2/ l'implication du modèle WW3 et 3/ le développement de fonctionnalités de descente d'échelle et de couplage garantissant une simplicité de mise en œuvre opérationnelle.

Les avancées techniques du projet seront présentées : description et résultats de la configuration de façade Tolosa-ATL prévue pour intégration dans le dispositif de la VVS en mai 2023, amélioration de la prévision d'ensemble de surcotes et mise en place de la prévision d'ensemble des vagues en côtier. Tous ces résultats sont susceptibles de servir aux modèles de prévision des inondations à proximité des estuaires ou des fleuves près de leur embouchure, en leur fournissant une condition limite réaliste sur leur frontière maritime, et cohérente avec les prévisions utilisées pour le dispositif de la VVS.

Les principaux travaux de R&D en cours seront aussi abordés, ainsi que ceux prévus pour 2024, portant sur la modélisation couplée vagues/niveaux/courants, pour le littoral Nord-Aquitain et pour l'estuaire girondin, et sur la modélisation vague à vague non hydrostatique.

3. REFERENCES

- [1] Baraille, R., Filatoff, N., 1995. Modèle shallow-water multicouches isopycnal de Miami. Tech. Rep. 003/95, SHOM/CMO
- [2] Tolman, H. L. and the WAVEWATCH III® Development Group, 2014 : User manual and system documentation of wavewatch iii® version 4.18. Technical report
- [3] Présentation de la gamme de MNT bathymétriques pour la modélisation océanographique (Projets HOMONIM et TANDEM). Laurie Biscara, Aurélie Maspataud, Thierry Schmitt et Ronan Créach. Colloque merIGéo, 24-26/11/2015, Brest (17-20).

Coupled 2D hydrologic-hydraulic catchment scale flood modeling and information feedback from multi-source variational data assimilation

Auteurs : VILLENAVE Lilian^{1*}, GARAMBOIS Pierre-André¹, MONNIER Jérôme^{2,3}

¹INRAE, Aix Marseille Université, RECOVER, 3275 Route Cézanne, Aix-en-Provence, 13182, France

² Institut de Mathématiques de Toulouse (IMT), Toulouse, France

³ INSA Toulouse, Toulouse, France

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : distributed hydrologic-hydraulic modeling ; floods ; adjoint model ; calibration ; high dimension ; variational data assimilation ; multi-site data ; multi-source data

1. Context and objectives

Faced with major socio-economic issues related to flood forecasting in a context of climate change, multi-scale modeling approaches taking advantage of the maximum amount of available information are needed to allow accurate forecasts. The processes involved are multi-physics, non-linear and multi-scale. The available data are multi-source and heterogeneous in space-time and nature. The construction of accurate numerical tools, in terms of spatio-temporal coherence and realism of the simulated states-flows, to meet operational needs in times of crisis, is a crucial issue.

The objective of this work is to advance in the development of a new integrated approach of spatialized hydrological-hydraulic modeling and data assimilation allowing the forecasting of floods at high resolution, while integrating multi-sensor data in order to reduce uncertainties. This approach must allow the transfer of information between scales, from the local generation of runoff over areas smaller than 1km² to the propagation of floods over basins of several thousands of km², as well as the feedback of information from multi-source data.

2. Methodology

For this purpose, the hydrological modeling platform SMASH (Jay-Allemand et al. 2020, Colleoni et al. 2022) and the hydraulic modeling platform DassFlow (Monnier et al. 2016, Pujol et al. 2022), each of which allowing multi-scale spatialized modeling and variational data assimilation, are coupled (weak coupling of the direct models) and a data assimilation algorithm applicable to the complete chain is implemented for the estimation of uncertain parameter-states from the available multi-source observations of hydrological response. A fully interfaced and coupled numerical chain in Python, using f90wrap library (Kermode 2020), is developed to address direct-inverse flood modeling with integration of multi-source data. The interfacing is designed to allow read/write access to all Fortran variables including state variables and model parameters as well as multi-site cost function gradients with respect to the sought model controls. The 2D hydrology-hydraulics coupling relies on a coupling algorithm adapted to (i) combine multi-scale hydrological drainage schemes (SMASH mesh) and 2D hydraulic meshes, (ii) perform lateral and vertical flux coupling for respectively inflow hydrographs on the boundary of the hydraulic domain and net rainfall within the hydraulic domain (cf. Fig. 1).

The variational data assimilation algorithm applicable to the full modeling chain is designed to infer spatially distributed unknown parameters and states from multi-source observations. It relies on the

adjoint models of the numerical hydrological and hydraulic model. This inverse algorithm enables information feedback from the hydraulic domain to the upstream hydrological domain.

The proposed approach is tested on an array of synthetic and real cases of increasing complexity. The data assimilation capabilities are investigated with twin experiments, i.e. with model generated observation data, but also with real flow observations.

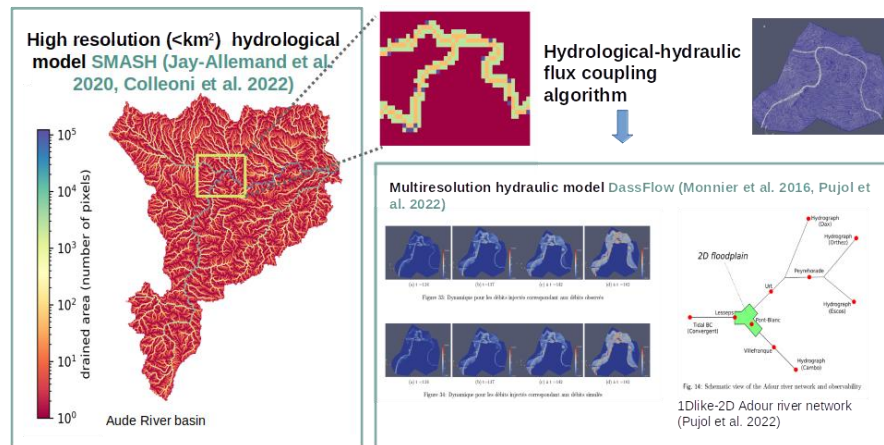


Figure 1 : Principle of the forward hydrologic-hydraulic modeling SMASH-DassFlow chain.

3. Results and perspectives

The forward hydrological-hydraulic model coupling is applied to a synthetic and a real case. Forward model consistency is studied in terms of mass conservation in the forward modeling chain as well as signal propagation. Particular attention is paid to simulated state and fluxes, especially flood signals propagation from upstream subcatchments to downstream and concomitant effects or not. This understanding of the simulated flow dynamics as well as flow observations characteristics is an important step before data assimilation.

The data assimilation approach is first tested on a synthetic hydrological-hydraulic case (Fig 2). We demonstrate the possibility of calibrating spatially distributed parameters of the whole chain, the possibility of information feedback from downstream observations on the hydraulic domain to the hydrologic domain.

The forward-inverse chain is then applied on the Aude river basin (Fig 3.). First results show relatively encouraging performances compared to the available observations, in terms of discharge hydrographs but also inundation modeling.

Further work will focus on the assimilation of rich multi-source databases of flow observations and physiographic properties (including in situ data and high resolution satellite images of soil occupation and flood extent). Hydrologic-hydraulic coupling will be reinforced with common runoff production operators in both models and state initialization from continuous hydrology to event-based zooms and assimilation windows. The forward chain will be upgraded to account for hydraulic structures and will be tested on other events and catchments. Multi-source data assimilation in reanalysis would enable to reach accurate integrated models and then be capable to prepare physical learning sets in view to train tools, such as local rating/damage laws or 2D inundation surrogates, adapted for operational use.

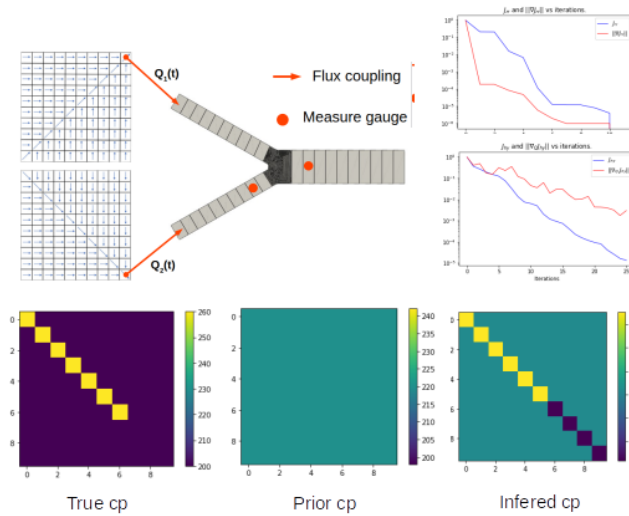


Figure 2 : Forward inverse modeling on a synthetic hydrological-hydraulic case. (Top Left) Case configuration. (Top right) Cost and gradient descent for an assimilation of two time series of water surface depth observed on the hydraulic domain. (Bottom) Inference of a spatially distributed hydrological parameter.

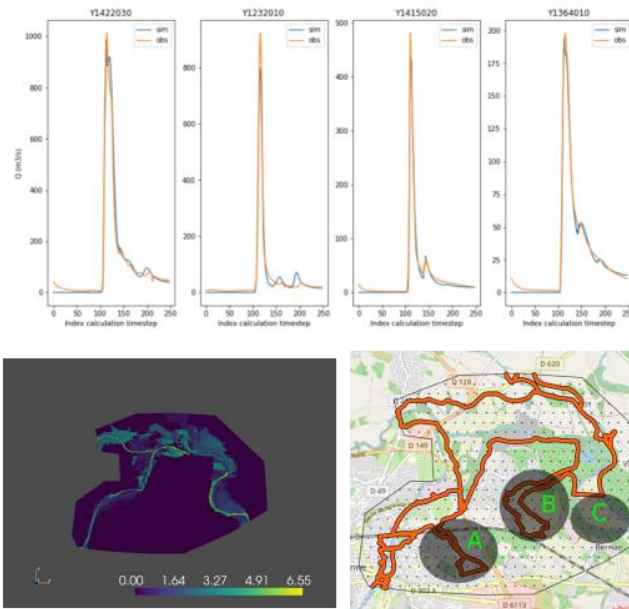


Figure 3 : Flood event of the 10-20 October on the Aude River basin. (Top) SMASH hydrographs at four gauging stations, multi-gauge calibration setup. (Bottom) (left) Maximal flood extent simulated (rough hydraulic mesh generated automatically); (right) Observed flood extent from the TOPODOC database as used in Hocini et al. (2021) ; A, B patches point zones where inundation modeling has to be improved.

4. REFERENCES

- [1] Colleoni F., Garambois P.-A., Javelle P., Jay-Allemand M., Arnaud P. (2022) Adjoint-based spatially distributed calibration of a grid GR-based parsimonious hydrological model over 312 French catchments with SMASH platform. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion, European Geosciences Union*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-506>
- [2] Hocini, N., Payrastre, O., Bourgin, F., Gaume, E., Davy, P., Lague, D., Poinsignon, L., Pons, F. (2021). “Performance of automated methods for flash flood inundation mapping: a comparison of a digital terrain model (DTM) filling and two hydrodynamic methods”. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 25.6, pp. 2979–2995. doi: 10.5194/hess-25-2979-2021. url: <https://hess.copernicus.org/articles/25/2979/2021/>
- [3] Jay-Allemand M., Javelle P., Gejadze I., Arnaud P., Malaterre P.-O., Fine J.-A., and Organde D. (2020) On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model: application on a Mediterranean catchment, *Hydrology and Earth System Sciences*, pp. 1–24, <https://doi.org/10.5194/hess-24-5519-2020>
- [4] J. R. Kermode, f90wrap: an automated tool for constructing deep Python interfaces to modern Fortran codes. *J. Phys. Condens. Matter* (2020) [doi:10.1088/1361-648X/ab82d2](https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab82d2)
- [5] Monnier, J., Couderc, F., Dartus, D., Larnier, K., Madec, R., and Vila, J.-P. (2016) Inverse algorithms for 2D shallow water equations in presence of wet dry fronts: Application to flood plain dynamics, *Adv. Water Resour.*, 97, 11–24, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.07.005>.
- [6] Pujol, L., Garambois, P.-A., Monnier, J. (2022) Multi-dimensional hydrological–hydraulic model with variational data assimilation for river networks and floodplains. (Geoscientific Model Development) <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-10>

EXPLOITATION DE MOTIFS SPATIAUX POUR LA MODÉLISATION DE CRUES ÉCLAIR AVEC UN MODÈLE HYDRAULIQUE-HYDROLOGIQUE ET ASSIMILATION VARIATIONNELLE

Pattern-aware flash flood modeling with a 2D hydraulic-hydrological model and multi-source variational assimilation

Auteurs : PUJOL Léo^{1,2*}, CHEN Shangzhi³, GARAMBOIS Pierre-André⁴, VILLENAVE Lilian⁴, MONNIER Jérôme⁵

¹ Montpellier 2 Univ., UMR HydroSciences Montpellier, France

² Toulouse Univ., IMFT, Toulouse, France

³ College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Univ., Hangzhou, China

⁴ INRAE, Aix Marseille Univ., RECOVER, Aix-en-Provence, France

⁵ INSA, Institut de Mathématiques de Toulouse, Toulouse, France

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : flash floods, hydraulic-hydrological model, multi-source data, pedotransfert function, variational data assimilation

1. Hydraulic-hydrological model

The accurate modeling of flood genesis is a crucial part of flash flood simulation and forecasting tools. Nevertheless, it is faced with serious difficulties regarding the complex non-linear physical processes at play and their uncertain and often scarce observability (see e.g. [1, 2, 3]). The aim of this study is to produce high resolution rainfall to flood simulations in the form of (h, u, v) estimations (i.e. water depth and depth-averaged flow velocity in 2D) for small to medium upstream catchments. This fine scale data could be useful for fine scale impact assessments.

The study presents a 2D full Shallow Water (SW) hydraulic-hydrological model implemented in the DassFlow platform enabling parallel computations and Variational Data Assimilation (VDA) (see [4, 5, 6]). It integrates the available multi-source observations of catchment response and the known physiographic properties. It can be applied on large scale river networks (see [7]) and is intended to capture complex hydrodynamics and the fine-scale generation of rainfall-induced runoff.

This model can account for spatially distributed rainfall forcing and represent infiltration either through the SCS-CN approach (as in Telemac, see [8]) or the Green-Ampt (GA) method (as in [9], applied at the cell scale. The former is a conceptual rain subtraction method upstream from the SW model, while the latter is a physically-based infiltration model added as source term in the 2D SW model.

2. Pattern-aware variational data assimilation

The fine-scale calibration of the event-based hydraulic-hydrological model is carried out using the VDA framework from [6], which is suited to infer large, composite control vectors especially from heterogeneous multi-source data (see [10, 11]). Sought parameters are grouped in a control vector c and model performance with regards to observations is evaluated using a cost function. The VDA method allows the resolution of the optimal problem.

Available observations of floods are generally much sparser than the real variability of soil and surface physical properties and thus than that of the underlying hydrological and hydraulic parameters. This is especially true for rainfall-runoff parameters and states, which may vary quickly over short distances and are often observed indirectly. The search for optimal high-resolution parameter fields is therefore very much an ill-posed problem. Here, the inverse problem is constrained by leveraging estimated values and spatial patterns derived from available pedologic and physiographic maps. To do so, the Green-Ampt and SCS-CN parameters are linked by a linear pedotransfer function (see [12] and more recent works [13, 14]) to distributed physiographic data (sand/clay/silt soil composition, satellite land cover). Topography/bathymetry is derived from high-resolution terrain elevation maps (LiDAR data), while friction patches can be defined from land cover maps.

In this work, we aim to show to what extent fine-scale model parameters linked to flood genesis can be inferred from sparse observations and a priori knowledge of their distribution using a VDA approach. This approach allows the simultaneous inference of a large number of different model parameters (bathymetry, friction, infiltration parameters) and initial hydrological states using a gradient-based iterative minimization algorithm. Here, we mainly seek to infer the coefficients of the linear pedotransfer functions, or semi-distributed parameters, instead of fully distributed parameters. Thus, the pattern-aware data assimilation seeks optimality for the control vector $c = (\kappa_{1,1}, \dots, \kappa_{1,m}, \kappa_{2,1}, \dots, \kappa_{9,m}, \dots, n_0, \dots, n_p)$, where n is a manning friction parameter with p is the number of friction patches and $\kappa_{1..9,m}$ are coefficients from the pedotransfert function with m the number of physiographic regions. This method should provide a better estimation of unobserved infiltration parameters at a scale where they can have a significant influence on model response. It is applied to both experimental and real cases.

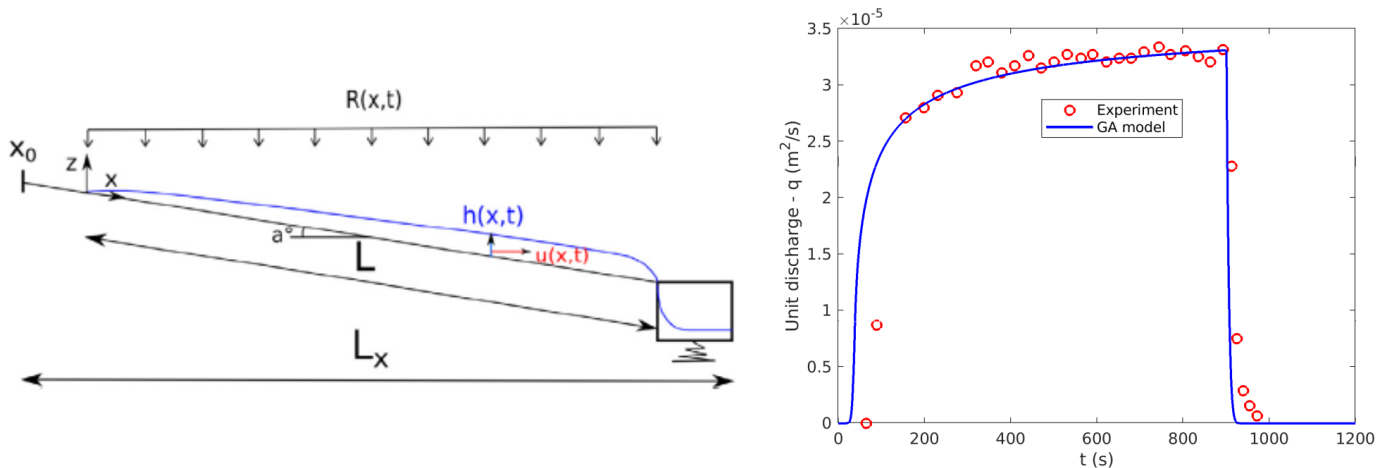


Figure 1: Rainfall-runoff experimental case. Left: Experimental setup with constant slope and homogeneous rain. Right: Comparison of experimental observations and a Green-Ampt model for one of the tested soil/rain configurations.

3. Experimental and real cases

The validation of the infiltration source terms and the inferability of their parameters from local observations with the VDA framework is presented on an experimental case based on [15] (see Fig.1). Inferences of Green-Ampt parameters are carried out using water level measurements and discharge data during a short homogeneous rain event and each parameter is inferred correctly on its own. Then, the model is applied on a real case: the Réal Collobrier experimental catchment in southern France (see Fig.2, see [16]). This upstream catchment features several sub-catchments with steep slopes that are often the site of flash floods. Local discharge, water depth, rain and soil moisture observations are available over the last decades. Rain data is given at a fine temporal (1h or 15min) and spatial (1km²) scale thanks to the ANTILOPE radar rainfall database. VDA is used to simultaneously infer spatially distributed friction patches, as well as pedotransfer function coefficients. Performance of pattern-aware models will be evaluated against simpler calibration approaches on several flooding events with diverse rain spatial patterns and observed in-river dynamics.

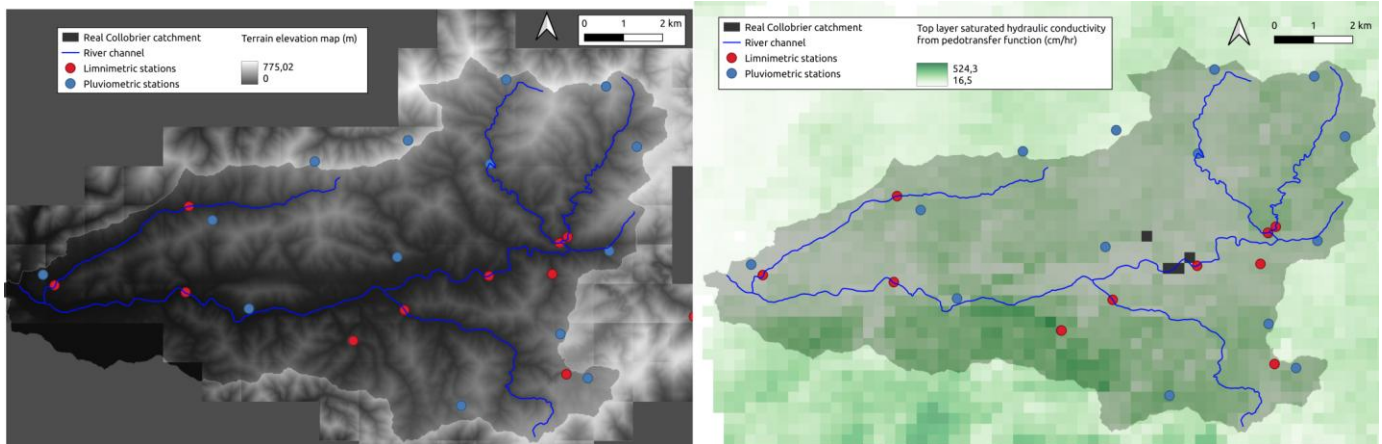


Figure 2: Maps of the Real Collobrier catchment. Left: High-resolution (1m²) LiDAR DEM. Right: Saturated hydraulic conductivity, calculated from physiographic data (following [18]).

4. Conclusion and perspectives

The DassFlow modeling platform was linked to databases through its Python wrapping and upgraded with hydrological components necessary to model accurate flood genesis. This work paves the way towards the use of in situ and remotely-sensed data cocktails that may be key to constrain hydraulic models of flash floods at fine scales and over larger basins. New satellite rainfall data products may provide forcing data for data-sparse regions. Furthermore, other emerging data collection methods may be used in this context: unmanned aerial vehicles can be used along in situ gauges to provide insights on fine spatio-temporal variation of water surfaces elevation (see [17]) or velocity fields derived from video footage and high resolution images can provide insight on flow extent. Our 2D modeling approach allows the assimilation of such observations of hydraulic states. Finally, the determination of the initial hydrological states, to which the event-based model response can be sensitive, could be tackled by leveraging remote-sensed and in situ soil moisture data, or derived from the hydrological states of large-scale continuous hydrological models.

5. REFERENCES

- [1] Hélène Roux, David Labat, P-A Garambois, M-M Maubourguet, Jacques Chorda, and Denis Dartus, “A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in mediterranean catchments,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 9, pp. 2567–2582, 2011.
- [2] P. A. Garambois, H. Roux, K. Larnier, W. Castaings, and D. Dartus, “Characterization of process-oriented hydrologic model behavior with temporal sensitivity analysis for flash floods in mediterranean catchments,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, no. 6, pp. 2305–2322, 2013.
- [3] Zhi Li, Mengye Chen, Shang Gao, Xiangyu Luo, Jonathan J Gourley, Pierre Kirstetter, Tiantian Yang, Randall Kolar, Amy McGovern, Yixin Wen, et al., “Crest-imap v1. 0: A fully coupled hydrologic-hydraulic modeling framework dedicated to flood inundation mapping and prediction,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 141, pp. 105051, 2021.
- [4] Frédéric Couderc, Ronan Madec, Jerome Monnier, and Jean-Paul Vila, “DassFow-Shallow, Variational Data Assimilation for Shallow-Water Models: Numerical Schemes, User and Developer Guides,” *Research report*, University of Toulouse, CNRS, IMT, INSA, ANR, 2013.
- [5] J. Monnier, F. Couderc, and J-P Vila, “Data assimilation for free surface flows,” *Tech. Rep.*, Mathematics Institute of Toulouse-INSA corp.CNES-CNRS, 2019.
- [6] Jérôme Monnier, Frédéric Couderc, Denis Dartus, Kévin Larnier, Ronan Madec, and J-P Vila, “Inverse algorithms for 2D shallow water equations in presence of wet dry fronts: Application to flood plain dynamics,” *Advances in Water Resources*, vol. 97, pp. 11–24, 2016.
- [7] Léo Pujol, Pierre-André Garambois, and Jérôme Monnier, “Multi-dimensional hydrological-hydraulic model with variational data assimilation for river networks and floodplains,” *EGUsphere*, pp. 1–44, 2022.
- [8] Pierre-Louis Ligier, “Implementation of a rainfall-runoff model in telemac-2d,” in *Proceedings of the XXIIIrd TELEMAC-MASCARET User Conference 2016*, 11 to 13 October 2016, Paris, France, 2016, pp. 13–19.
- [9] Yufang Ni, Zhixian Cao, Qing Liu, and Qingquan Liu, “A 2d hydrodynamic model for shallow water flows with significant infiltration losses,” *Hydrological Processes*, vol. 34, no. 10, pp. 2263–2280, 2020.
- [10] P. Brisset, J. Monnier, P-A. Garambois, and H. Roux, “On the assimilation of altimetric data in 1D Saint-Venant river flow models,” *Advances in water resources*, vol. 119, pp. 41–59, 2018.

- [11] L. Pujol, P-A. Garambois, P. Finaud-Guyot, J. Monnier, K. Larnier, R. Mosé, S. Biancamaria, H. Yesou, D. Moreira, A. Paris, and S. Calmant, “Estimation of multiple inflows and effective channel by assimilation of multi-satellite hydraulic signatures: The ungauged anabranching negro river,” *Journal of Hydrology*, vol. 591, pp. 125331, 2020.
- [12] BJ Cosby, GM Hornberger, RB Clapp, and ToR Ginn, “A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils,” *Water resources research*, vol. 20, no. 6, pp. 682–690, 1984.
- [13] Elizabeth Cooper, Eleanor Blyth, Hollie Cooper, Rich Ellis, Ewan Pinnington, and Simon J Dadson, “Using data assimilation to optimize pedotransfer functions using large-scale in-situ soil moisture observations,” *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, vol. 10, 2020.
- [14] RO Imhoff, WJ Van Verseveld, B Van Osnabrugge, and AH Weerts, “Scaling point-scale (pedo) transfer functions to seamless large-domain parameter estimates for high-resolution distributed hydrologic modeling: An example for the Rhine river,” *Water Resources Research*, vol. 56, no. 4, pp. e2019WR026807, 2020.
- [15] Geoffroy Kirstetter, Jie Hu, Olivier Delestre, Frédéric Darboux, P-Y Lagrée, Stéphane Popinet, Jose-Maria Fullana, and Christophe Josserand, “Modeling rain-driven overland flow: Empirical versus analytical friction terms in the shallow water approximation,” *Journal of Hydrology*, vol. 536, pp. 1–9, 2016.
- [16] N. Folton, E. Martin, P. Arnaud, P. L’Hermite, and M. Tolsa, “A 50-year analysis of hydrological trends and processes in a mediterranean catchment,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, no. 6, pp. 2699–2714, 2019.
- [17] Jun Liu, Liguang Jiang, Filippo Bandini, Cecile M.M. Kittel, Nicola Balbarini, Nisha G. Hansted, Henrik Grosen, and Peter Bauer-Gottwein, “Spatio-temporally varying strickler coefficient: A calibration approach applied to a danish river using in-situ water surface elevation and UAS altimetry,” *Journal of Hydrology*, vol. 613, pp. 128443, 2022.
- [18] W. J. Rawls G. R. Stephenson Brakensiek, D. L., “Modifying scs hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils,” *ASAE paper no. PNR-84203*, 1984.

DEVELOPPEMENT D’OUTILS POUR LA QUANTIFICATION DES INCERTITUDES DES DONNEES HYDROMETRIQUES

Developing tools for quantifying streamflow data uncertainty

Auteurs : LE COZ Jérôme^{1*}, RENARD Benjamin², LANG Michel¹, CALMEL Blaise¹, MENDEZ-RIOS Felipe¹, HAUET Alexandre³, DESPAX Aurélien⁴, PERRET Emeline⁴, POLIGOT-PITSCH Stéphanie⁵, JANET Bruno⁵

* *auteur correspondant*

¹INRAE, UR RiverLy, Villeurbanne, France, jerome.lecoz@inrae.fr

²INRAE, UMR RECOVER, Aix-en-Provence, France, benjamin.renard@inrae.fr

³EDF DTG, Grenoble, France, alexandre.hauet@edf.fr

⁴CNR, CACOH, Lyon, France, a.despax@cnr.tm.fr

⁵DGPR, SCHAPI, Toulouse, France, stephanie.poligot-pitsch@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Hydrométrie, Incertitudes, Débit, Crues.

1. Introduction

Le débit des cours d’eau est sans doute la donnée la plus informative en hydrologie, et une des plus utiles pour la modélisation et la prévision des crues et des inondations. En tant que résultats de mesure, les données de débit comportent des erreurs qui doivent être corrigées (si elles peuvent être détectées et quantifiées) ou estimées en tant qu’incertitudes (dans le cas contraire). Les erreurs peuvent apparaître à toutes les étapes du processus de production des données hydrométriques, des mesures sur le terrain jusqu’à la publication et la bancarisation des données. Formation, bonnes pratiques, normalisation, et assurance et contrôle qualité sont nécessaires pour éviter, détecter et corriger ces erreurs.

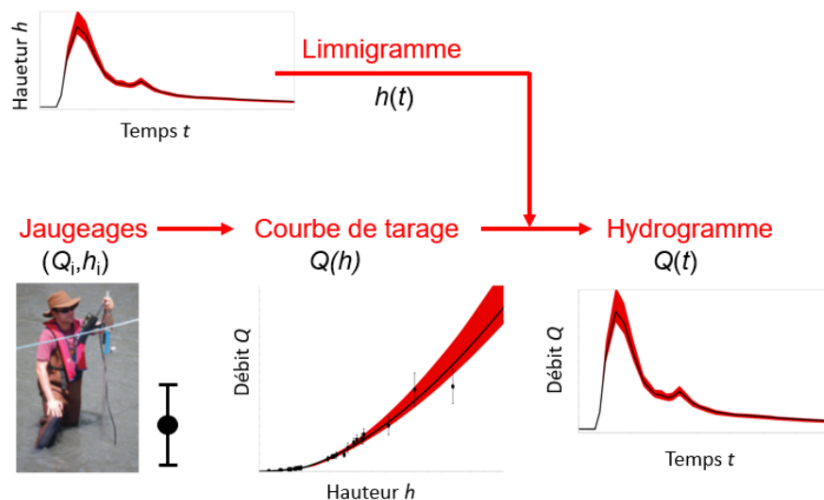


Figure 1 : Workflow le plus courant pour la production de données hydrométriques, avec incertitudes quantifiées à chaque étape (la photo de jaugeur n’est pas contractuelle)

2. Outils et méthodes pour l’incertitude hydrométriques

Au cours des dernières décennies, des efforts de recherche internationaux ont été consacrés au développement de méthodes pour quantifier l’incertitude des jaugeages (mesures ponctuelles du débit des cours d’eau) et celle des modèles hauteur-débit (ou courbes de tarage) calés avec ces jaugeages et utilisés pour établir les séries temporelles de débit (hydrogrammes) de la plupart des stations hydrométriques, selon la chaîne de traitement présentée Figure 2. Nous présentons différents outils opérationnels développés en France (via le Groupe Doppler Hydrométrie constitué en 2005, et la section Hydrométrie de la SHF) et en collaboration internationale pour estimer l’incertitude des jaugeages : méthode des essais interlaboratoire [1,2] (logiciel QRAME, cf. Figure 3), méthodes Q+ [3] et Flaure [4] pour les courantmètres (logiciels Barème et Jasmine), méthode Oursin [5] pour les jaugeages par ADCP mobile (logiciel QRevInt, cf. Figure 4), méthode SUNY [6] pour les jaugeages par dilution de traceur.

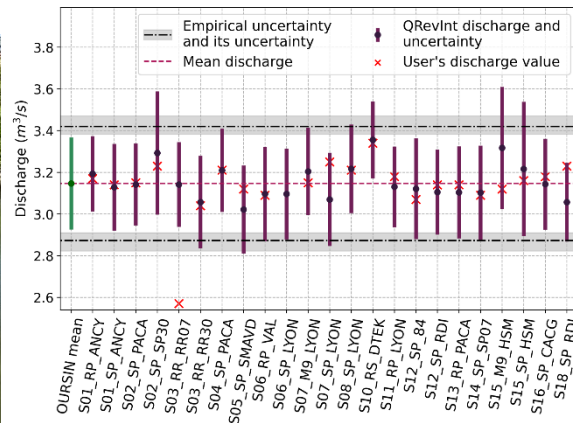


Figure 5 : Quantification empirique des incertitudes des jaugeages ADCP par essais interlaboratoire : intercomparaison organisée par le Service de Prévision des Crues Grand-Delta sur la Sorgue en avril 2022 (à gauche) et incertitudes des débits mesurés calculées empiriquement et par la méthode Oursin (à droite)

Nous présentons également l’approche bayésienne BaRatin [7] (logiciel BaRatinAGE, cf. Figure 6) pour établir des courbes de tarage et des hydrogrammes avec des incertitudes quantifiées. D’autres outils ont été proposés pour détecter [8] et estimer [9,10] les détariages, c’est-à-dire les changements dans la relation hauteur-débit dus à l’évolution du lit, à la végétation aquatique saisonnière, ou à d’autres processus.

3. Conclusion et perspectives

Ces différents outils permettent aujourd’hui aux producteurs de données hydrométriques d’être capables de quantifier l’incertitude et de la fournir aux utilisateurs de données afin qu’ils en tiennent compte dans toute la variété des post-traitements, assimilations et autres utilisations possibles. Une réflexion est à mener avec les hydrologues et les prévisionnistes en particulier pour définir la forme la plus utile pour leur communiquer ces incertitudes : ensemble de réalisations, distributions, écarts-types, intervalles de confiance, quantiles, niveaux qualitatifs, etc. Dans le contexte spécifique de la prévision des crues et des inondations, des méthodes restent à développer pour estimer l’incertitude accrue des jaugeages non intrusifs (vidéo, radar...) et des estimations post-crue (retours d’expérience), notamment pour estimer les conditions d’écoulement (coefficients de surface, résistance hydraulique, remous) et l’évolution des fonds (dont la respiration du lit) pendant l’événement. Il faut également mieux prendre

en compte les détarages qui peuvent survenir en hautes eaux et mettre à jour l’incertitude des données fournies en temps réel. En retour, les prévisions hydrologiques sont souvent utiles pour optimiser les campagnes de jaugeage en crue pour documenter au mieux le haut des courbes de tarage.

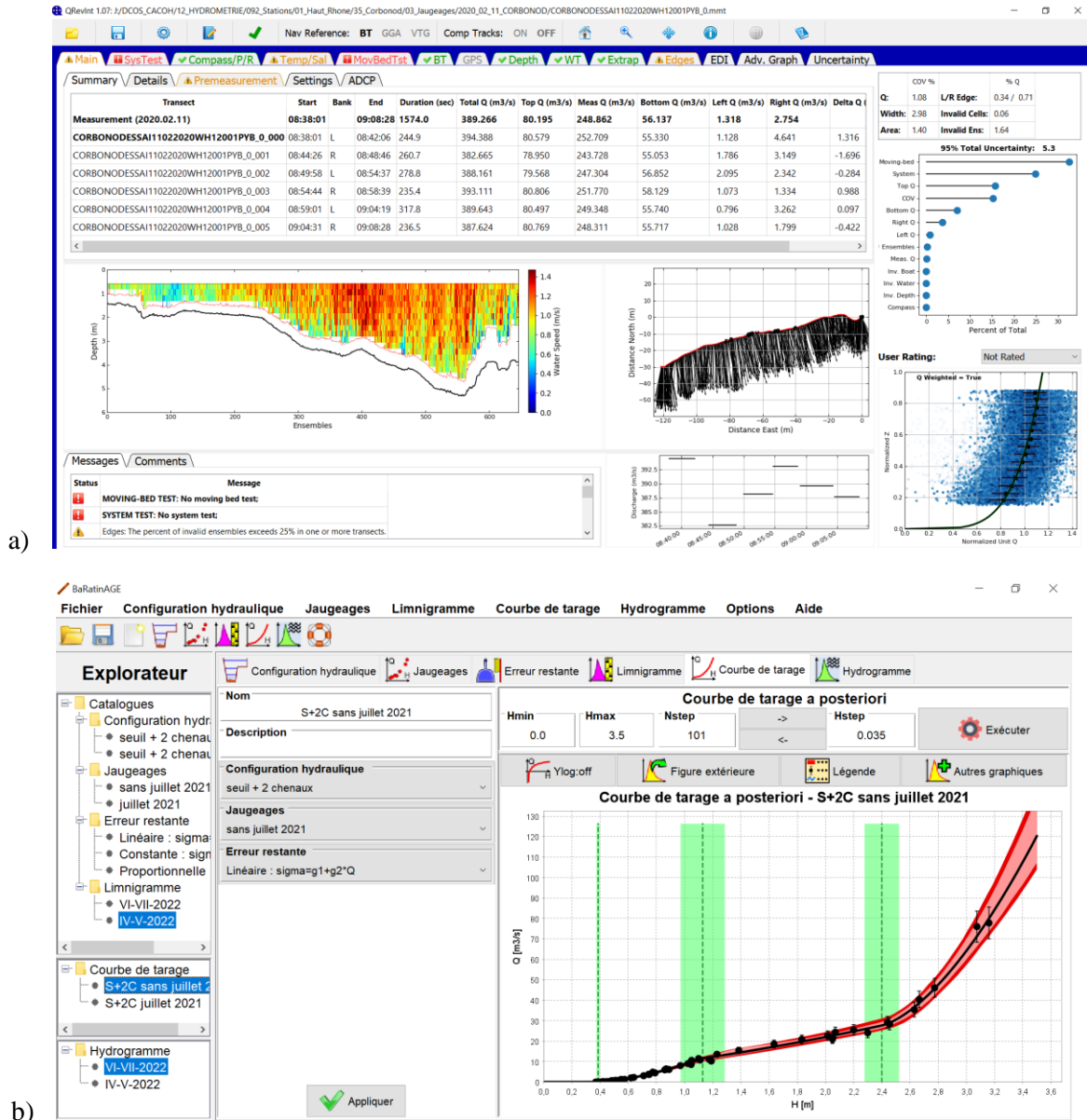


Figure 7 : Logiciels open-source pour quantifier l’incertitude des jaugeages ADCP (a, QRevInt) et des courbes de tarage et hydrogrammes (b, BaRatinAGE)

4. REFERENCES

[1] Le Coz, J., Blanquart, B., Pobanz, K., Dramais, G., Pierrefeu, G., Hauet, A., & Despax, A. (2016). Estimating the uncertainty of streamgauging techniques using in situ collaborative interlaboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 7(142), 04016011.

- [2] Despax, A., Le Coz, J., Hauet, A., Mueller, D. S., Engel, F. L., Blanquart, B., Renard, B., Oberg, K.A. (2019). Decomposition of uncertainty sources in acoustic Doppler current profiler streamflow measurements using repeated measures experiments. *Water Resources Research*, 55(9), 7520–7540.
- [3] Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., & Dramais, G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, 18–29.
- [4] Despax, A., Perret, C., Garçon, R., Hauet, A., Belleville, A., Le Coz, J., & Favre, A.-C. (2016). Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. *Journal of Hydrology*, 533, 128–140.
- [5] Despax, A., Le Coz, J., Mueller, D. S., Hauet, A., Calmel, B., Pierrefeu, G., Naudet, G., Blanquart, B., Pobanz, K. (2023). Validation of an uncertainty propagation method for moving-boat acoustic Doppler current profiler discharge measurements. *Water Resources Research*, 59, e2021WR031878.
- [6] Hauet, A.C. (2020) Uncertainty of salt discharge measurement: The SUNY Framework, NVE Rapport 29/2020, The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), 17 pages.
- [7] Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., & Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, 573–587.
- [8] Darienzo, M., Renard, B., Le Coz, J., & Lang, M. (2021). Detection of stage-discharge rating shifts using gaugings: A recursive segmentation procedure accounting for observational and model uncertainties. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028607.
- [9] Mansanarez, V., Renard, B., Coz, J. L., Lang, M., & Darienzo, M. (2019). Shift happens! Adjusting stage-discharge rating curves to morphological changes at known times. *Water Resources Research*, 55(4), 2876–2899.
- [10] Perret, E., Renard, B., & Le Coz, J. (2021). A rating curve model accounting for cyclic stage-discharge shifts due to seasonal aquatic vegetation. *Water Resources Research*, 57, e2020WR027745.

RETOUR D'EXPERIENCE DU GROUPE D'APPUI AUX SERVICES DE PREVISION DES CRUES ET AUX SERVICES D'HYDROMETRIE, DE SA CREATION EN 2005 A AUJOURD'HUI

*Feedback from the Flood Forecasting and Hydrometry Services Support Group,
from its inception in 2005 to the present*

Auteurs : PAYA Élodie^{1*}, CAVELLEC Sabine², DEVILLARD Thierry³, CHASSÉ Patrick⁴,
BONNIFAIT Laurent¹

* *auteur correspondant*

¹ Cerema DTer Méditerranée, avenue Albert Einstein, 13 290 Aix-en-Provence, France
Elodie.Paya@cerema.fr, Laurent.Bonnifait@cerema.fr

² Cerema DTec REM, 155 rue Pierre Bouguer BP 5, 29280 Plouzané, France
Sabine.Cavellec@cerema.fr

³ Cerema DterEst, 71 rue de la Grande Haie, 54510 Tomblaine, France
Thierry.Devillard@cerema.fr

⁴ Cerema DTec REM, 134 rue de Beauvais, 60280 Margny-lès-Compiègne, France
Patrick.Chasse@cerema.fr

Choix du thème/session :

~~1/ Préparation et gestion de crise~~

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : [prévision des crues](#), [hydrométrie](#), [appui technique](#)

1. La genèse : du PAS au GASP, puis GASP-RDI

En 2005, le Ministère de l'Équipement lance des « Plans d'Actions Structurantes » (PAS), dont le PAS Inondations, qui vise notamment à préparer son Réseau Scientifique et Technique (RST) à répondre aux besoins du SCHAPI¹ et des SPC², structures récemment créées au Ministère de l'Écologie.

Fin 2005 : le CETMEF (aujourd'hui direction technique Risques, Eaux et Mer du Cerema : DtecREM) procède à un recensement d'agents du RST volontaires pour suivre des formations sur la prévision des crues. Le pilotage technique et les formations sont assurés par le CETE Méditerranée.

Ce recensement conduit en novembre 2005 à la création du GASP « Groupe d'Appui aux Services de Prévision », qui regroupe le CETMEF et les CETE Normandie-Centre, Sud-Ouest, Méditerranée (aujourd'hui Directions Territoriales du Cerema). Fin 2006, le SCHAPI fait part au CETMEF de l'intérêt de nombreux SPC pour la réalisation d'études par le GASP. Pour répondre à la demande, les CETE Est, Ouest, Île de France, intègrent le GASP en 2007. Le CETE Nord-Picardie fait de même en 2009.

En 2010, le champ d'interventions du GASP s'élargit aux demandes des unités d'hydrométrie. Le SCHAPI et les SPC ont en effet pris conscience de l'importance de la qualité des courbes de tarage et de

¹ Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations

² Services de prévision des crues

leur extrapolation en hautes eaux, pour leurs modèles de prévision de crue, tant pluie-débit que débit-débit [1].

En 2018, paraît la note technique « relative à l’organisation des missions de référent départemental pour l’appui technique à la préparation et à la gestion de crises d’inondation (RDI) sur le territoire national ». Celle-ci élargit le périmètre des missions RDI au réseau fluvial non surveillé et au littoral pour le risque de submersion marine. Le GASP devient alors GASP-RDI.

Dans ce cadre, le Cerema assure alors un appui à l’animation nationale du réseau, contribue à des actions de formations et assure un appui méthodologique par la rédaction de guides et de fascicules pour aider la mission RDI à s’approprier de nouveaux phénomènes (notamment les événements météo-marins : surcote, niveaux marins, houles etc.), et à capitaliser sur les événements tempétueux (fiches tempêtes, base de données, etc.).

2. Une croissance soutenue et diversifiée des actions

Le montant des études commandées au GASP-RDI par le SCHAPI progresse rapidement, pour passer d’une moyenne annuelle de 200 k€ sur la période 2006-2008 à près de 1 000 k€ au début des années 2020.

Dans le même temps, l’appui technique et méthodologique du Cerema s’amplifie et se diversifie pour répondre aux nouveaux besoins des différents partenaires :

- SPC : construction des modèles de prévisions des inondations jusqu’à la cartographie ZIP (zone d’inondation potentielle), ... ;
- UH : réalisation et extrapolation des courbes de tarage jusqu’à des jaugeages par vidéo ;
- missions RDI : appui méthodologique, formation et animation de réseau, gestion de crise ;
- collectivités : modélisations, systèmes d’alerte locaux (SDAL),...

Aujourd’hui, l’appui technique et méthodologique du GASP-RDI s’oriente selon six axes de travail :

1. **Appuis opérationnels aux modélisations hydrauliques pour la prévision des crues :** construction et calage de modèles, extension et appui spécifique sur modèles existants. Le modèle Saône Doubs développé en 2022 pour le SPC RaS est un exemple parfait de très grand modèle (linéaire de plus de 300 km) pour lequel le Cerema a su mobiliser l’ensemble de ses directions (Dter-Dtec) pour répondre aux besoins du SPC ;
2. **Appuis opérationnels aux modélisations hydrologiques pour la prévision des crues :** calage de modèles, études hydrologiques, hydrologie statistique ;
3. **Appuis opérationnels et méthodologiques pour le recueil et à la qualification de données hydrométriques :** études pour l’implantation de stations de mesures, extrapolation de courbes de tarage, appui technique et méthodologique sur diverses techniques de jaugeages ;
4. **Appuis à l’animation de réseau et à la formation (GASP-RDI) :** réseaux GASP et RDI, club de modélisation hydraulique, consortium Telemac-Mascaret, appui pour la mise au point d’actions de formations et interventions dans les formations des cycles hydrométrie, prévision des crues et RDI ;
5. **Appuis scientifiques et à l’innovation méthodologique pour la prévision des crues et les missions RDI :** déclinaison opérationnelle de sujets de recherche liés à l’hydrométrie et à la prévision des crues, incertitudes, IA, assimilation de données, développements spécifiques sur les modèles ;
6. **Autres appuis opérationnels et méthodologiques :** Cartographie ZIP (exploitation de prises de vues satellites, aériennes, création de modèles hydrauliques pour la cartographie, etc.), retours d’expérience (REX) et données historiques (fluvial et littoral) (campagne de relevés terrains,

enquêtes, capitalisation de repères de crues et de laisses de mer, ...), exercice de gestion de crise, rédaction, mise à jour de guides, études d'enjeux et de vulnérabilité de certains territoires pour le réseau (études pour l'extension du réseau surveillé, adéquation niveaux de vigilance/enjeux), base de données repères de crue.

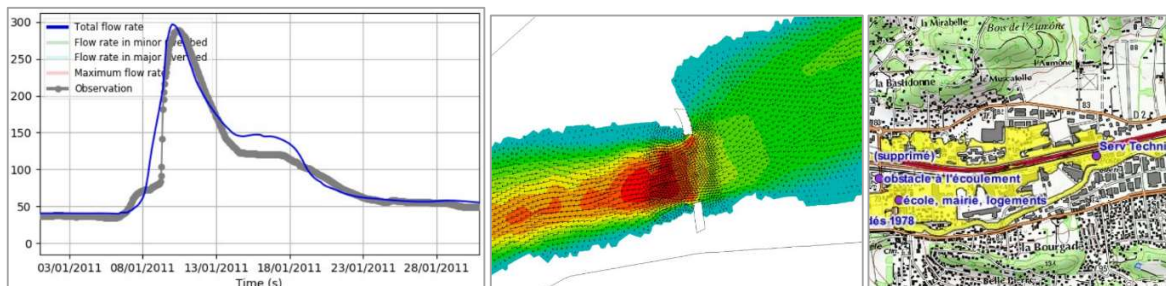


Figure 1 : exemples de travaux réalisés – de gauche à droite : résultat d'un modèle 1D de prévision des crues sur l'Oise, modélisation 2D pour une courbe de tarage sur la Vésudie, production de ZIP sur l'Huveaune

3. L'animation d'un réseau métier

Pour faire vivre ce groupe "métier" et pouvoir échanger sur les pratiques, le Cerema organise les rencontres annuelles du GASP-RDI, en étroite partenariat avec le SCHAPI. Depuis quelques années, ces rencontres associent aussi l'Irstea (devenu l'INRAE), l'Ifsttar (devenu l'UGE) et le BRGM. Ces rencontres permettent des échanges fructueux entre recherche, méthodologie, étude appliquée et terrain.

Une trentaine d'ingénieurs et techniciens se réunissent ainsi une fois par an pour :

- donner l'occasion au SCHAPI de rencontrer les membres du GASP-RDI et les informer sur les actualités du réseau prévision des crues et hydrométrie, tant sur les aspects organisationnels que techniques ;
- faire le point sur les études réalisées par les différentes directions du Cerema pour le réseau et orienter les actions à venir ;
- échanger sur des thèmes techniques, à partir de présentations de membres du GASP-RDI.

Un club « modélisation hydraulique » dont l'animation est co-gérée par la DTec REM du Cerema et le Schapi complète ce réseau métier avec une ouverture vers des partenaires à l'extérieur du ministère. Ce club permet également d'échanger de manière régulière (une fois par an, couplé aux réunions GASP-RDI) sur des questions pointues de modélisations hydrauliques (TELEMAC 2D, MASCARET).

4. L'ouverture aux collectivités territoriales

Les collectivités peuvent se doter de systèmes d'avertissement propres, adaptés à leur territoire et à leurs besoins pour leur apporter un signal d'alerte sur une crue imminente là où ils ne peuvent bénéficier des services de Vigicrues ou Vigicrues Flash. Les Services de Prévision des Crues (SPC) et/ou le Cerema peuvent accompagner les collectivités dans la mise en place de ces systèmes d'alerte locaux (SDAL).

5. REFERENCES

- [1] Patrick Fourmigué, Anne-Marie Fromental, Laurent Bonnifait, Elodie Paya, Mathieu Alquier, Séverine Lopez, Sandrine Valencia, André Martin, Jean Pansu, Sébastien Gremminger, Isabelle Rochet, Julien Bonnier : L’extrapolation des courbes de tarage pour les besoins de la prévision des crues, en Provence-Côte d’Azur, Corse et Réunion (France). Congrès SHF « Hydrométrie 2017 : mesures et incertitudes », Lyon 14-15 mars 2017, 8p.

Prévision des crues et des inondations en cas de rupture de digue :
Performance de différentes architectures de modèles hydraulique 1D
*Flood forecasting in case of dike breach : Performance of different hydraulic
model architectures*

Auteurs : BOUVARD Gabin^{1*}, HANS Pierre-Adrien², BOTTERO Mathieu³

* *auteur correspondant*

¹Service de Prévision des Crues Loire-Allier-Cher-Indre, 5 Avenue Buffon 45000 ORLÉANS, France, gabin.bouvard@developpement-durable.gouv.fr

¹Service de Prévision des Crues Loire-Allier-Cher-Indre, 5 Avenue Buffon 45000 ORLÉANS, France, pierre-adrien.hans@developpement-durable.gouv.fr

¹Service de Prévision des Crues Loire-Allier-Cher-Indre, 5 Avenue Buffon 45000 ORLÉANS, France, mathieu.bottero@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Prévision des crues, prévision des inondations, rupture de digue

1 INTRODUCTION

Le Service de Prévision des Crues (SPC) Loire-Allier-Cher-Indre réalise des prévisions aux stations hydrométriques de la Loire moyenne, dans le cadre de la vigilance aux crues. La spécificité de ce territoire est la présence de nombreux systèmes d’endiguement qui isolent une partie importante du lit majeur de la Loire. En cas de défaillance, une partie du débit de la Loire s’écoule à travers le val. Cette dérivation peut impacter sensiblement le débit dans le lit de la Loire en aval de la défaillance. À titre d’exemple, le débit transitant par la brèche de Jargeau en 1856 a été estimé à environ 30 % du débit total la crue [1].

La plupart des stations hydrométriques peuvent être court-circuitées par des vals en cas de défaillance des systèmes d’endiguement. Disposer de modèles hydrauliques à même de représenter correctement ces configurations est donc primordial pour continuer à publier des prévisions cohérentes en cas de défaillance avérée et/ou pressentie. L’objectif de cette étude est de comparer les capacités de modèles 1D à casiers – technologie actuellement utilisée par le SPC – et de modèles à couplage 1D-2D à répondre à ces besoins opérationnels. Pour chacun des modèles, plusieurs scénarios de défaillance sont modélisés afin d’identifier la sensibilité de différentes variables à la structure du modèle : l’étendue de l’inondation, sa propagation dans le val et l’impact sur le débit en aval du val.

2 SECTEUR D’ÉTUDE

Le val d’Ouzouer est un territoire protégé par un système d’endiguement, ouvert à l’aval. Ce système a un niveau de protection de l’ordre d’une crue vicennale¹(environ 3 600 m³/s)[2]. L’étude de dangers indique un risque probable de dysfonctionnement à partir de la crue cinquantennale. Quatre sites de défaillance potentielle sont identifiés (Figure 1).

1 Temps de retour au sens des études de dangers, et pas au sens des statistiques du SPC

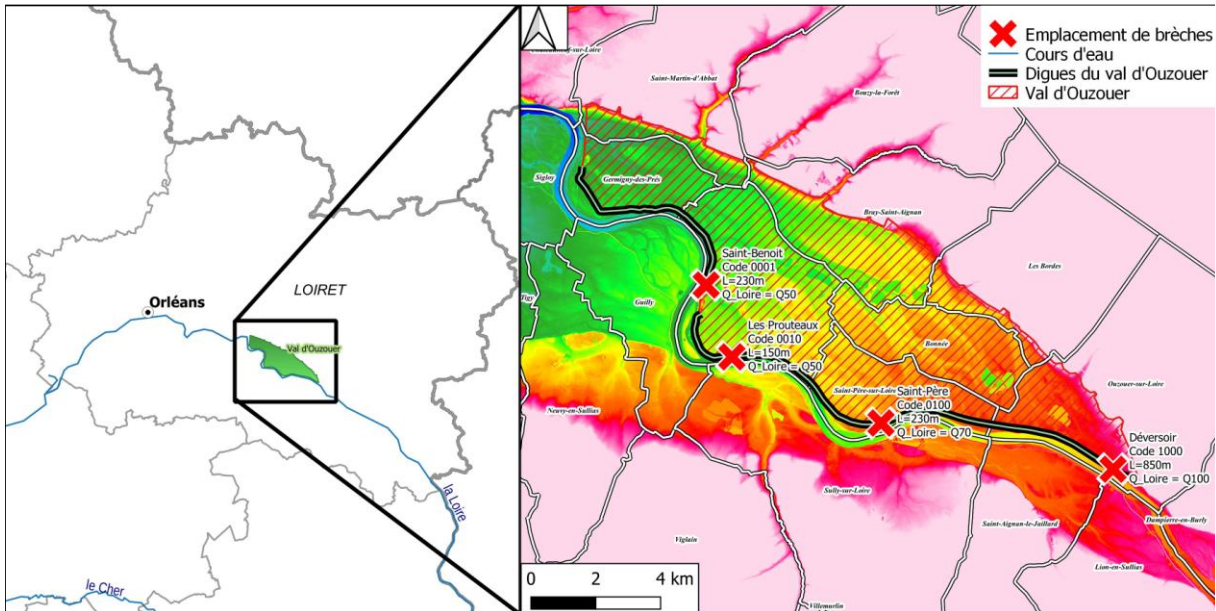


Figure 1: Zone d'étude et emplacements des brèches

3 MÉTHODE

3.a Modèles hydrauliques

- **Modèle de référence** : En l'absence de données de calage dans ce val en dehors des inondations du XIX^{ème} siècle, un modèle utilisant le cœur de calcul Telemac 2D constitue la référence. Il a été construit par extraction d'une portion du modèle Telemac2D des vals de l'Orléanais. Les coefficients de Strickler du modèle sont cohérents avec ceux de la littérature et un recoupement avec la base de donnée Corine Land Cover montre que ceux-ci tiennent compte des différentes occupations des sols [3].
- **Modèles de prévisions** : Les quatre modèles utilisent le cœur de calcul Hydra. Le lit mineur est identique pour chacun des modèles, ainsi que la représentation des brèches. Les caractéristiques de chaque représentation sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Nom du modèle	Représentation du val	Surface maille (moyenne)
EDD	casiers	200.10 ⁴ m ²
SPC	casiers	30.10 ⁴ m ²
2Dlarge	pavés 2D	10.10 ⁴ m ²
2Dfin	pavés 2D	2,5.10 ⁴ m ²

Scénarios

Pour chaque brèche, un scénario hydrologique proche du débit de rupture probable (cf) est injecté. L'ouverture de la brèche s'effectue dès que la cote de rupture identifiée dans l'étude de danger est atteinte.

Scénario	Localisation de la brèche	Caractéristiques de la brèche			Hydrologie	
		Cote de seuil (mNGF)	Cote de rupture (mNGF)	Largeur	Temps de retour	Débit de la Loire en amont de la zone d'étude (m ³ /s)
1000-Q170	Déversoir	119,75	120,38	850 m	170 ans	5500
0100-Q70	St-Père	114,94	116,88	230 m	70 ans	4300
0010-Q50	Prouteaux	112,5	113,19	150 m	50 ans	3800
0010-Q170	Prouteaux (+ déversoir)	112,5	113,19	150 m	170 ans	5500
0001-Q50	St-Benoît	109,9	111,7	230 m	50 ans	3800

3.b Critères de comparaison

L'effet de l'ouverture du val dans un modèle peut être schématiquement décrite par trois fonctions (Figure 2). Les deux fonctions qui nous intéressent dans cette étude sont :

- ② La fonction de répartition des débits entre la brèche et le lit mineur de la Loire, modélisée par deux grands critères : Le **débit de pointe** et la **forme de l'hydrogramme** en brèche.
- ③ La transformation de l'hydrogramme par l'effet du val, nommé Fonction de transfert du val, modélisé par le **temps de propagation** de l'hydrogramme et le **coefficient de laminage**.

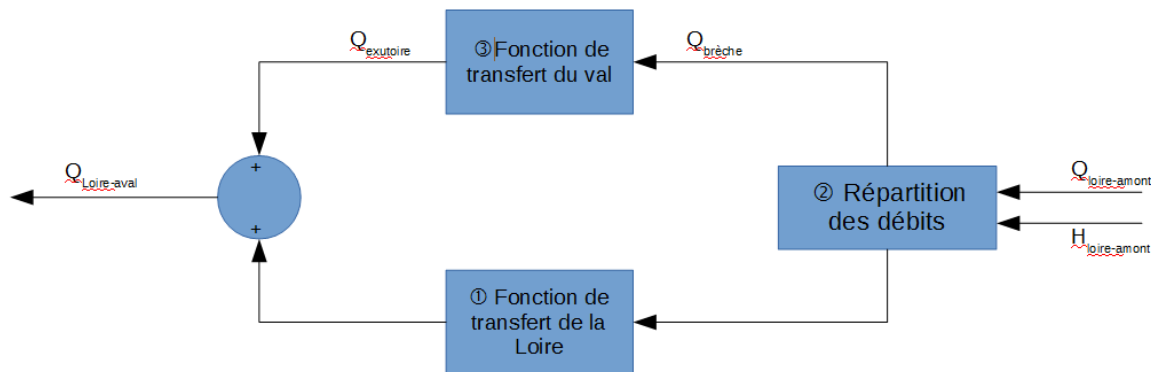


Figure 2: Schéma d'ouverture un val

La capacité de chaque modèle à produire une cartographie d'aléa pertinente sera aussi analysée, en comparant les variations de surfaces inondées par classes de hauteur d'eau.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Définir une fonction de transfert à partir d'un temps de propagation et d'un coefficient de laminage fixe est très fortement réducteur, car le temps de propagation et le laminage sont généralement des fonctions du débit. Ces variables ne sont donc comparées d'un modèle à l'autre qu'à condition que les débits transitant par la brèche soient semblables. Ainsi, certains scénarios ne sont pas pris en compte dans les résultats présentés.

La répartition des débits entre la brèche et le lit endigué s’approche davantage de la référence avec les modèles 1D/2D qu’avec les modèles 1D à casiers. Les débits calculés dans les brèches sont très similaires pour une même architecture de modèle (1D à casiers et 1D/2D) : la taille des éléments du val (casiers et pavés 2D) ne semble donc pas déterminante sur le débit de pointe.

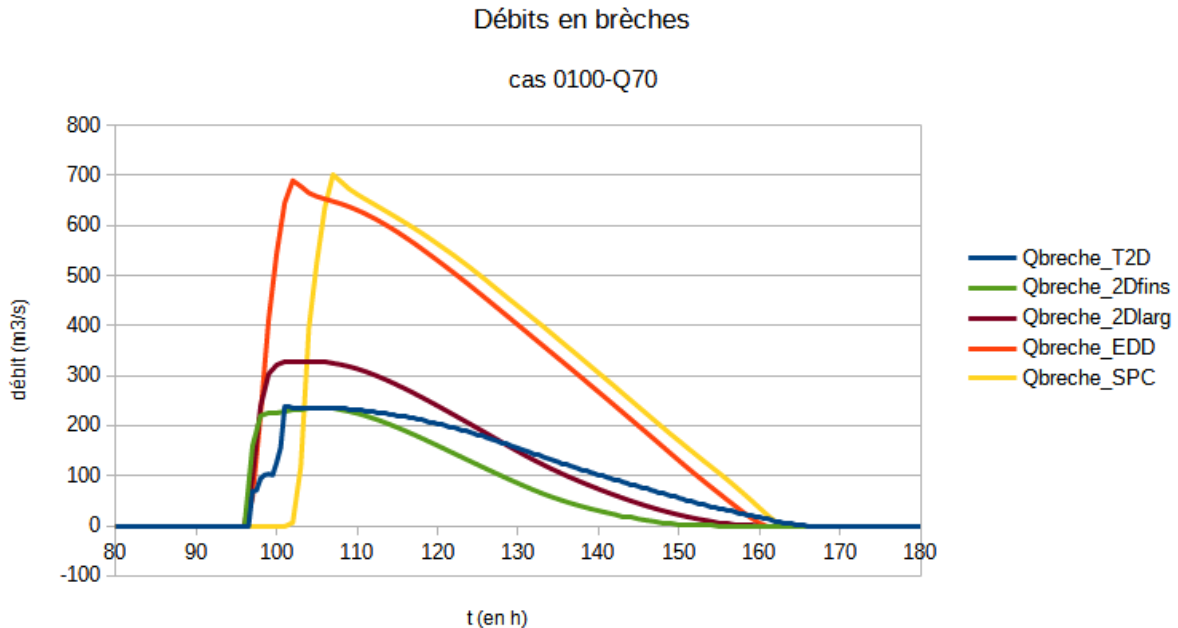


Figure 3: comparaison des débits en brèches entre les modèles pour le scénario 0100-Q70

Concernant la fonction de transfert dans le val, les modèles 1D/2D apparaissent globalement plus performants dans les configurations étudiées que les modèles 1D à casiers. Toutefois, si on ne compare que les scénarios où tous les débits en brèche proche de la référence, les scores des quatre modèles sont relativement proches.

Un seul scénario de défaillances multiples a été testé. Les répartitions des débits entre ces brèches et le lit mineur sont médiocres dans cette configuration, quelle que soit l’architecture du modèle (1D à casiers ou 1D/2D). Ce résultat pourrait être lié à la présence d’un déversoir parmi les sites de défaillance testé, puisque l’arasement ne s’y fait pas jusqu’au sol contrairement à une brèche classique. La somme des débits dérivés dans les deux entrées d’eau est plus proche de la référence avec les modèles 1D à casiers qu’avec les modèles 1D/2D.

La représentation de l’aléa dans le val est nettement améliorée par l’utilisation de pavés 2D, et plus le nombre de pavés utilisé est grand, meilleure est cette représentation. La figure ci-dessous présente différences d’emprises entre le modèle testé et le modèle Telemac ainsi que les scores S1 (erreur cumulative) [4] de chaque modèle en comparant les hauteurs d’eau modélisées. Les modèles à couplages 1D/2D ont un score nettement plus bas, ils s’écartent donc moins de la prévision de Telemac2D que les modèles à casiers. Il s’agit vraisemblablement de la plus grande plus-value des modèles 1D/2D par rapport aux modèles à casiers.

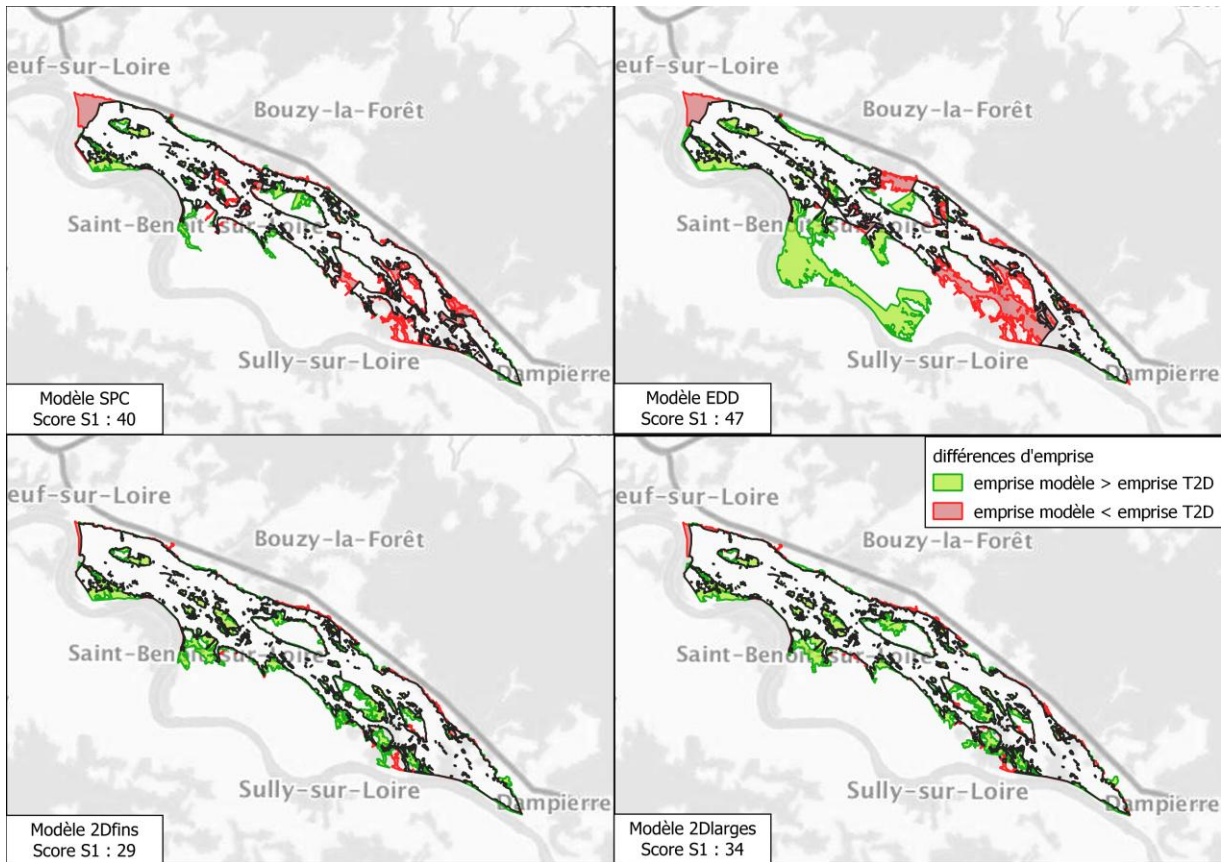


Figure 4 Différences d'emprises entre les modèles et score S1 sur les hauteurs d'eau modélisées

D'une manière générale, les performances des modèles 1D/2D apparaissent légèrement supérieures à celles des modèles à casiers. Toutefois, le gain apporté par l'utilisation des modèles 1D/2D pour la prévision de crues reste assez faible par rapport aux modèles 1D à casiers actuels, car les ordres de grandeur des débits calculés en brèche avec les deux architectures sont proches. Au regard des fortes incertitudes qui entourent le mécanisme d'ouverture des brèches [5], l'impact de l'architecture d'un modèle hydraulique sur la prévision en aval d'un site d'une défaillance ne semble pas déterminant. Par ailleurs, les temps d'exécution constatés avec les modèles 1D/2D sont déjà sensiblement plus importants avec un unique val modélisé en 2D, ce qui laisse craindre des temps d'exécution de plusieurs heures avec la représentation de la plupart des vals de cette manière.

Pour répondre aux objectifs de prévisions des débits aux stations hydrométriques de la Loire moyenne et de prévision de l'aléa en cas de défaillance du système d'endiguement, il ne semble donc pas indispensable d'utiliser un couplage 1D/2D et l'utilisation des modèles 1D à casiers actuels ressort suffisant. L'utilisation de ces modèles en cas de défaillance d'un ouvrage devra être encadrée par une procédure opérationnelle à définir.

5 RÉFÉRENCES

- 1 J. Maurin, A. Boulay, S. Piney, E. Le Barbu, R. Tourment. Les brèches des levées de la Loire : brèche de Jargeau 1856. *Congrès SHF Événements extrêmes fluviaux et maritimes*, Feb 2012, Paris, France. 8 p. [hal-00731293](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00731293)
- 2 BRL INGENIERIE. *Étude de dangers du système de protection du val de Ouzouer-sur-Loire contre les inondations de la Loire*, 2014

- 3 Chow V.T. *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1959
- 4 Teweles S., Wobus H. (1954). Verification of Prognostic charts. *Bulletin of American Meteorological Society*, 35(10), pp. 455-463
- 5 Paquier, A. Modélisations du développement d'une brèche par surverse et du transport sédimentaire associé. 3^{ème} colloque sur les *Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Inondations (Digues 2019)*. Irstea, 2019. p. 8, hal-02609869

LE DISPOSITIF VIGILANCE VAGUES-SUBMERSION EN ACCOMPAGNEMENT DES PRÉVISIONS D'INONDATION CÔTIÈRE

Auteurs : CAILLAUD Eric¹, BOUGEON Marjorie¹, BESSON Florence¹, PARADIS Denis¹
auteurs correspondants (eric.caillaud@meteo.fr, marjorie.bougeon@meteo.fr)

¹MÉTÉO FRANCE DIROP/MAR, 42 AV CORIOLIS 31057 TOULOUSE, FRANCE

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Choix de la présentation : Orale

Mots clefs (2 à 3 minimum) : vigilance, conditions météo-marines, vagues en côtier, niveaux marins sur le littoral, submersion, interactions prévision marine/prévision des crues.

1. Résumé

Plusieurs événements dramatiques dont la tempête Xynthia en février 2010 ont montré la vulnérabilité du littoral métropolitain au risque de submersion. Météo-France, en partenariat avec le Shom (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) a mis en place en octobre 2011 la vigilance vagues-submersion. Depuis, ce dispositif n'a cessé d'évoluer pour aller jusqu'à l'accompagnement de la mission RDI (Réfèrent Départemental Inondation) littoral.

En introduction, un historique sur la mise en place de la vigilance vagues-submersion sera présenté.

Dans une première partie, l'aléa vagues-submersion sera défini. Les conditions météorologiques et océaniques nécessaires à ce phénomène seront rappelées (cf. figure 1), avec une déclinaison régionale qui est fortement corrélée aux caractéristiques locales du trait de côte et de la bathymétrie. Des études de cas illustreront ce phénomène sur le littoral de la Manche et de l'Atlantique. Le littoral méditerranéen où le phénomène est souvent associé à des épisodes méditerranéens sera également traité.



Figure 1: Le phénomène vagues-submersion croise les conditions météorologiques et océaniques

Dans une deuxième partie, les activités opérationnelles liées à la production de la Vigilance Vagues-Submersion (VVS) seront présentées. Un focus sera réalisé sur les dernières évolutions de cette production spécifique. En particulier, depuis l’automne dernier, la vigilance vagues-submersion est établie à l’échelle infra-départementale avec une extension de l’échéance à la totalité du lendemain (J+1) avec la production de deux cartes de vigilance distinctes pour le jour et le lendemain (cf. figure 2).

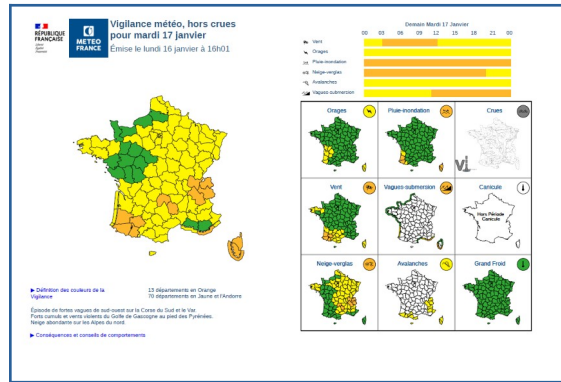


Figure 2: Exemple de production de carte de vigilance pour J+1, émise le 16 janvier pour un épisode de vigilance vagues-submersion débutant le 17.

Pour les échéances plus lointaines (J+2/J+3), une anticipation du phénomène « vagues-submersion » est également possible dans le cadre des phénomènes dangereux produit quotidiennement par Météo-France. En complément de la production vigilance vagues-submersion destinée à tous, un bulletin spécifique est produit pour les missions RDI littoral des DDTM (Direction Départementale des Territoires et de la Mer) dès le niveau jaune, en appui des services préfectoraux en charge de la gestion de crise. Dans ce bulletin (cf. figure 3), en plus des données chiffrées expertisées de niveaux marins et d’état de la mer, une expertise des conditions météorologiques-océaniques près du littoral est fournie par le chef prévisionniste marine en charge du dispositif VVS, les conditions météo-marines à la côte jouant un rôle important dans les crues au niveau des estuaires ou des parties les plus aval des fleuves.

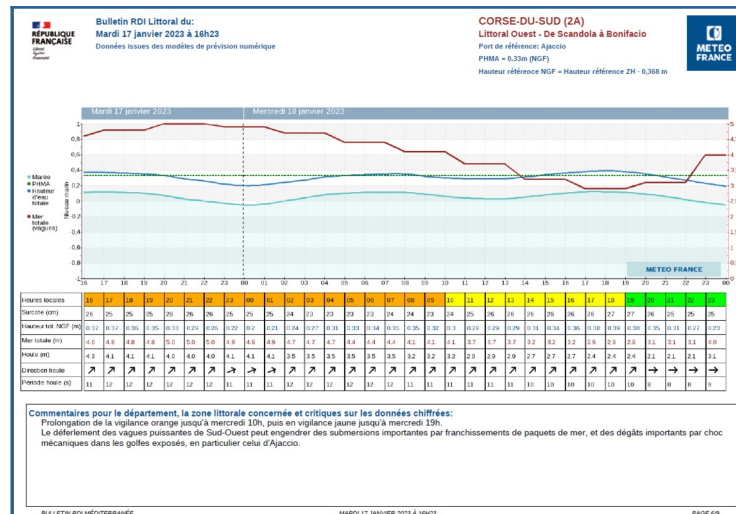


Figure 3: Exemple de bulletin RDI pour la Corse-du-sud

Enfin, l’extension de la vigilance vagues-submersion à l’Outre-mer est en cours. Elle est déjà opérationnelle dans l’océan indien (Réunion et Mayotte), aux Antilles et en Guyane.

Dans une dernière partie, l’état actuel des échanges d’information et de paramètres entre la prévision marine et la prévision des crues sera présenté avec les améliorations possibles.

En conclusion, les perspectives et les évolutions envisagées seront présentées.

STRUCTURATION DE LA MISSION DE REFERENT DEPARTEMENTAL INONDATION BILAN 2018-2023

Implementation of the Departmental Flood Referent units Review 2018-2023

Auteurs : PUECHEBRTY Rachel^{1*}, PIOTTE Olivier², ESCUDIER Aurélie³

* *auteur correspondant*

¹SCHAPI/SRNH/DGPR/MTECT, 42 av Gaspard Coriolis, France,

rachel.puechberty@developpement-durable.gouv.fr

²DREAL Nouvelle-Aquitaine, Cité administrative, rue Jules Ferry, 33090 Bordeaux Cedex, France, e-mail : olivier.piotte@developpement-durable.gouv.fr

³DREAL Occitanie, 1 rue de la Cité administrative, 31074 Toulouse Cedex 9, France, e-mail : aurelie.escudier@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : RDI, anticipation, gestion de crise, capitalisation, structuration

La mission de Référent Départemental Inondation (RDI) a été introduite au sein des Directions Départementales des Territoires (et de la Mer) - DDT(M) par circulaire du 28 avril 2011. Portant à l’origine sur les risques de débordements des cours d’eau surveillés par le réseau Vigicrues (SPC - services de prévision des crues), le cadre d’exercice de cette mission a été précisé dans l’instruction du 29 octobre 2018, avec notamment l’élargissement du domaine d’intervention des missions RDI sur le réseau fluvial non surveillé, sur le littoral, pour les risques de submersions marines et dans les départements et régions d’outre-mer. Intégrée en crise dans la mission Sécurité-Défense, la mission RDI a vocation à assurer un conseil technique auprès du préfet de département en cas de crise inondation, au plus près du terrain et en mobilisant une connaissance locale. L’instruction insiste sur la notion de collectif pour la mission RDI, rappelant ainsi qu’elle n’a pas vocation à être portée par un unique référent. Elle rappelle les fonctions de cette mission dans la préparation, la gestion de crise et la capitalisation des données post-crise et décrit les différents types de données et les outils qu’elle pourra utiliser pour traduire le risque inondation en termes de conséquences à attendre et d’enjeux impactés. L’instruction précise que l’aide apportée est fonction des données disponibles, notamment sur le réseau non surveillé et sur le littoral. La nature du conseil apporté n’est ainsi pas uniforme sur l’ensemble du périmètre de la mission RDI.

Une animation nationale des missions RDI a été confiée au Schapi (Service central d’hydrométéorologie et d’appui à la prévision des inondations) depuis 2014, dans une logique d’appui et d’accompagnement des services et de partage des bonnes pratiques. Cet accompagnement se traduit par un apport essentiellement méthodologique. Il s’agit ainsi de développer des outils et méthodes permettant à la mission RDI d’assumer son rôle dans toute sa diversité. Cette animation nationale s’appuie depuis 2019 sur des référents régionaux inondation (RRI) en DREAL, qui assure une animation régionale – relai de l’animation nationale - en lien étroit avec les SPC et les missions de Zone de défense et de sécurité. Une stratégie d’animation nationale triennale a été établie en 2019, et renouvelée en 2023 par le Schapi avec les RRI, selon trois axes :

- Axe 1 : Consolider la structuration des missions RDI et leurs interactions avec les partenaires externes
- Axe 2 : Faciliter l’utilisation des outils développés pour le réseau des missions RDI pour gagner en efficience
- Axe 3 : Renforcer l’expertise des missions RDI en préparation et en gestion de crise

Dans le cadre de la mise en œuvre de la nouvelle feuille de route pour l’animation nationale des missions RDI 2023-2025, il est prévu de réaliser une enquête auprès des missions RDI début 2023, pour :

- dresser un panorama de l’état de la structuration de la mission 5 ans après l’instruction de 2018 qui encadre l’activité des missions RDI ;
- analyser les évolutions par rapport aux trois précédentes enquêtes (2014 - 2016 - 2019);
- analyser les forces et fragilités de l’écosystème national en place et identifier les axes de progrès pour l’animation nationale ;
- permettre aux DDT(M) d’identifier et d’exprimer leurs besoins afin d’ajuster si besoin la feuille de route 2023-2025.

Ainsi, après l’analyse des résultats de l’enquête, l’article pourra rendre compte de l’évolution de la structuration des missions RDI depuis 2018, faire un état des lieux en terme d’outillage et de professionnalisation, mettre en avant les apports de cette mission pour la préparation et la gestion de crise inondation en lien avec les autres acteurs (préfecture, SPC, collectivités gémapiennes, etc...) et si possible identifier les pistes d’amélioration pour les prochaines années.

PREVISIONS DES CRUES A EDF : VERS DES OUTILS PERMETTANT UNE MEILLEURE PRISE DE DECISION

Flood forecasting at EDF: tools for better decision making

Auteurs : PUYGRENIER Damien^{1*}, CORON Laurent², MOULIN Laetitia³,
MAGRY Eric⁴, COURBIER Arnaud⁵

* *auteur correspondant*

¹EDF-CIH, 4 allée du lac de Tignes, 73290 LA MOTTE-SERVOLEX, France,

damien.puygrenier@edf.fr

²EDF-DTG, 4 rue Claude Marie Perroud, 31096 TOULOUSE, France, laurent.coron@edf.fr

³EDF-DTG, 134 rue de l'étang, 38950 SAINT-MARTIN LE VINOUX, France,

laetitia.moulin@edf.fr

⁴EDF-DOAAT, 106 boulevard Vivier-Merle 69003 LYON, eric.magry@edf.fr

⁵EDF-Hydro Vallée de la Dordogne, Rue du Docteur Valette 19000 Tulle,

arnaud.courbier@edf.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Préférence : communication orale

Mots clefs : Prévision probabiliste, utilisation opérationnelle, conduite en crue, gestion d'aménagements hydroélectriques

Résumé :

Depuis 15 ans, les progrès sur la prévision des débits au sein d'EDF ont été fulgurants sur de nombreux aspects : portée de prévisions, pas de temps horaire, vision probabiliste, fréquence de réactualisation des prévisions, nombre de bassins concernés [1], ... Les méthodes de prévisions de débits sont encore en constante évolution et sont progressivement mise en œuvre, mais l'utilisation opérationnelle de ces prévisions et de leur richesse informative n'a pas toujours évolué au même rythme. La difficulté de l'utilisation des prévisions probabilistes avait d'ailleurs été mise en exergue durant le colloque SHF de 2018, rappelant la nécessité de mise en place d'« outils d'aide à la décision utilisant la richesse informative de ces prévisions » [2].

En parallèle de ces avancées dans le domaine de la prévision hydrométéorologique, EDF a développé depuis quelques années des méthodes innovantes de gestion des aménagements en crues, dont l'algorithme « Trajectoire Linéaire » [3] permettant une mise en œuvre plus fiable, plus efficace et simplifiée de la conduite des aménagements hydroélectriques en crue. La compatibilité de cet algorithme avec une conduite automatique ainsi que la possibilité de traitements probabilistes en nombre ont encouragé une analyse plus globale de l'impact des crues. Une attention particulière a été portée sur l'anticipation grâce à une préparation des plans d'eau avant les crues. Cette démarche a abouti à plusieurs concepts innovants destinés à être mis en œuvre, permettant notamment d'optimiser les contraintes d'exploitation liées à la gestion des crues.

De plus, les aspects opérationnels en temps réel ont été analysés de façon à proposer une démarche concrète, favorisant un processus de stratégie et de décision adapté, argumenté et partagé par les utilisateurs finaux. Cette démarche se base sur des données structurelles du barrage, des prévisions de

programmes de débits turbinés, des lois de conduites existantes et bien entendu des prévisions probabilistes de débits entrants.

L’un des objectifs est ainsi une valorisation complète par les utilisateurs finaux de l’information probabiliste portée par la prévision – sans restriction, souvent prématurée faute de moyen d’analyse, à un seul scénario déterministe –, tout en leur garantissant une utilisation simple et opérationnelle de cette information.

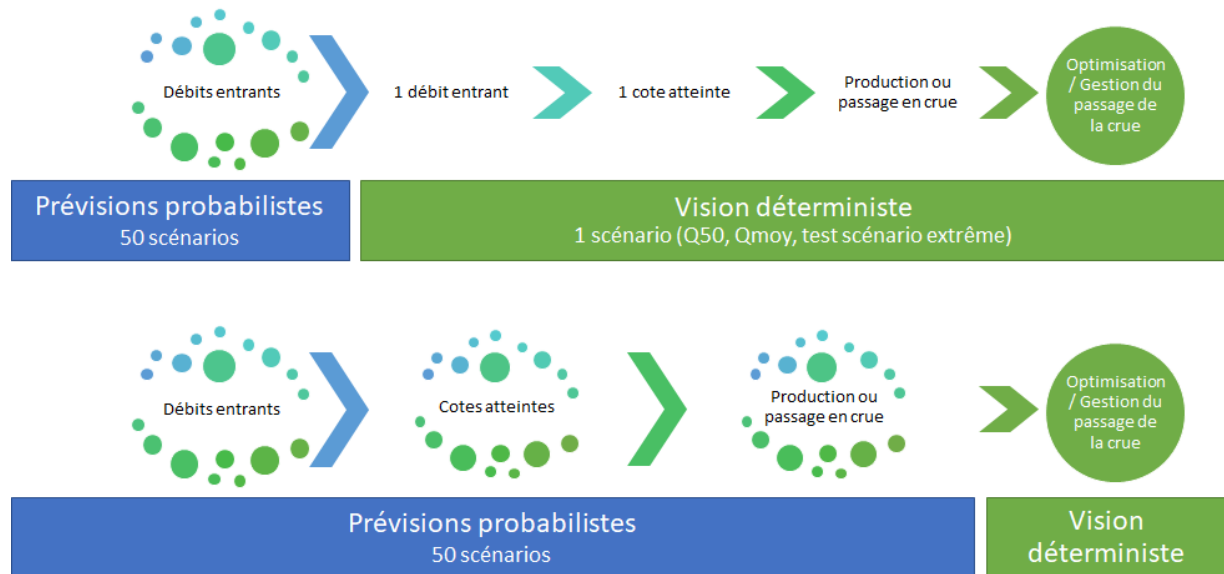


Figure 1. Visions historique (en haut) et future (en bas) du processus d’utilisation des prévisions probabilistes

Ces méthodes vont finalement être implémentées dans un véritable outil opérationnel de décision multi-acteur qui fournit la probabilité de passage en état de crue de l’aménagement, comparée à une probabilité acceptable *a priori*, issue d’une analyse amont multicritère : hydrologique, économique, socio-environnementale,...

L’outil doit permettre ainsi de réaliser des gains économiques (meilleur placement de la production hydraulique, souvent avant l’épisode de crue) et organisationnels (limitation des mises sous astreinte du personnel) lors du passage d’une exploitation normale à une exploitation en crue du barrage.

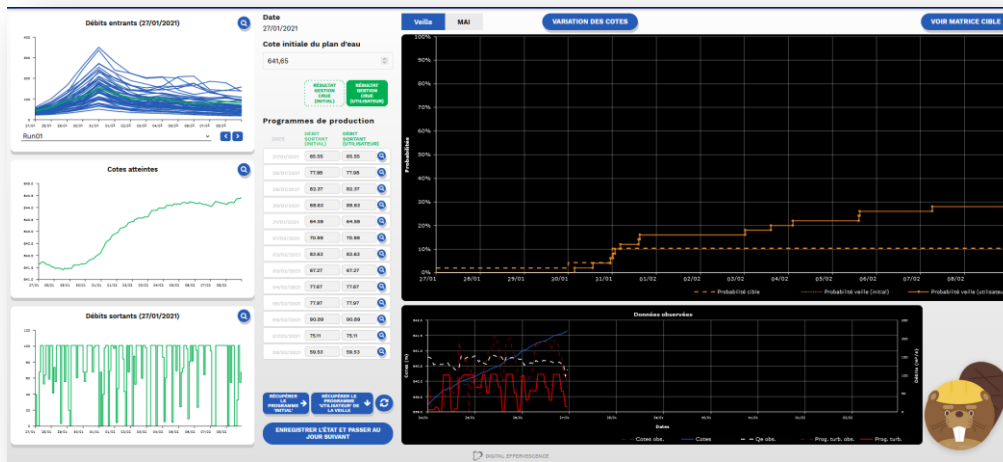


Figure 2. Outil de prise de décision sur la base des prévisions probabilistes

Par ailleurs, l’outil va permettre à l’exploitant de s’appropriier les types de gestion du passage la crue qui pourront être mis en œuvre en fonction des scénarios de crue possibles.

La perspective est aujourd’hui le déploiement de ces méthodes et outils sur l’ensemble du parc hydro-électrique EDF pour une meilleure gestion des retenues aux abords des épisodes de crues.

1. REFERENCES

- [1] MOULIN Laetitia et al., « Prévision hydrométéorologique opérationnelle à EDF-DTG Progrès récents et états des lieux en 2018 », SHF 2018
- [2] BERTHET Lionel et al., « Cohérence des prévisions et place de l’expertise : les nouveaux défis pour la prévision des crues », SHF 2018
- [3] ANTUNES-VALLEREY Manuel, « Sûreté en crue des grands barrages d’EDF : retour d’expérience et nouveaux développements », CFBR 2016, DOI : 10.24346/cfbr_colloque2016_d05

Crue de septembre 2020 sur le Gardon : illustration du phénomène souvent insaisissable de vague de crue

September 2020 flood on the Gardon: illustration of the often elusive flood wave phenomenon

Auteurs : LABORDA Yann^{1*}, VALANTIN Pierre-Yves¹, MANNESSIEZ Fabrice¹,
DUSSUCHALE Antoine¹

* *auteur correspondant*

¹Pôle Hydrométrie et Prévision des Crues Grand Delta, DREAL Auvergne-Rhône Alpes, 89 rue Weber, 30907 Nimes Cedex02

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Crue rapide, vague, vidéo, vigilance, célérité

Les crues subites ou vagues de crues dans les rivières sont principalement observées lors de fortes précipitations et l'origine d'un tel phénomène a souvent été cherché dans la formation et la rupture d'embâcle principalement au niveau des ponts enjambant la rivière. Ce phénomène est resté longtemps insaisissable alimentant toute sorte de fantasme ou de théorie.

La mesure hydrologique infra-horaire développée depuis bientôt 20 ans au service de prévision des crues Grand Delta (SPC GD), a permis d'enregistrer des montées brutales des eaux (quelques mètres en quelques minutes). Bien que les hydrogrammes parlaient pour eux-mêmes, les prévisionnistes restaient circonspects face à de telle dynamique et remettaient parfois en doute la fiabilité des systèmes de mesure durant les crues les plus extrêmes. Par ailleurs, à défaut d'images, les crues subites ou vagues de crues ont été longtemps considérées comme des phénomènes décrits de manière exagérée lors des enquêtes terrain auprès des témoins les ayant observés. Bien que la dynamique de l'hydrogramme puisse étayer les propos, lorsque les témoins évoquaient l'arrivée d'une vague, il était toujours difficile d'imaginer un tel phénomène.

Malgré tout, depuis plusieurs années, le SPC GD a bien pris conscience que des phénomènes de crues rapides (montée de quelques dizaines de cm en moins d'1 heure) pouvaient être observées sur son territoire lors d'orages localisés et de très forte intensité. Il propose d'ailleurs de prévenir de ce risque lorsqu'il passe en vigilance jaune pour risque de crue rapide, généralement sur des situations d'été où un régime d'étiage favorise la fréquentation en rivière et rend la population plus vulnérable aux montées subites des eaux. Ce n'est que le 17 juillet 2013 sur le Toulourenc que le phénomène de crue subite est filmée (Igor Petrowski - Youtube) sur le territoire du SPC GD et le conforte donc dans sa démarche de vigilance face aux montées rapides mais non-débordantes des eaux.



Prise de vue de la crue du Toulourenc espacées de 5 secondes

Toutefois les exemples filmés restent assez rares et le phénomène demeure plus qu'insaisissable. Ce n'est qu'en septembre 2020 lors de la crue du Gardon qu'une vague de crue est observée de manière plus qu'intéressante et mérite d'être mis en avant auprès de la communauté scientifique. A l'ère des smartphones et du partage sur les réseaux sociaux, le SPCGD a pu récupérer 5 vidéos de le phénomène filmé à des endroits différents de la rivière (d'amont en aval) permettant ainsi de voir que sous l'impulsion de fortes précipitations, la vague qui déferle en rivière revêt une puissance et une cinétique assez incroyable car elle fut observée sur un linéaire de plus de 50 km.

La compréhension du phénomène reste encore assez marginale et les cas d'étude se sont concentrés plus sur la problématique en canyon (cf. travaux de Guiseppa Viggiani et Johan Berthet¹). On y apprend que ces vagues de crues ne sont pas, contrairement aux hypothèses souvent formulées, systématiquement liées à une rupture d'embâcles mais bien à une différence entre la vitesse de l'écoulement en basses eaux et la célérité de l'onde de crue.

En effet, la célérité des ondes de crue est une fonction directe du débit et, par conséquent, les débits plus importants se déplacent plus rapidement que les débits plus petits (notamment en étiage). Cela se traduit par une tendance nette à la pente ascendante de l'hydrogramme, conduisant finalement au développement d'un choc. Ainsi, la montée très rapide des eaux lors d'une crue éclair s'apparente à l'arrivée d'une "vague"².

Une des conclusions des travaux de Johan Berthet¹ est que ce phénomène se produit donc seulement en début de crue sur des débits de base assez faibles.

Au cours de la dernière décennie, la multiplication des smartphones a permis de filmer plus souvent ce phénomène sur le territoire du Grand Delta. Ces témoignages sont venus d'une part confirmer l'absence de défaillance dans la mesure automatique ainsi que la pertinence d'une mesure infra-horaire et d'autre part la nécessité de la vigilance jaune pour risque de crue rapide.

L'exemple de la crue du 19 septembre 2020, dont quelques prises de vues sont présentées ci-après, semble confirmer ce constat et l'ensemble des hypothèses énoncées par ailleurs.

Après une description de l'épisode météorologique, l'article présentera les caractéristiques de l'onde de crue et les mettra en relation avec les enregistrements des stations limnimétriques. Ainsi un lien sera fait avec des enregistrements passés pour voir si de telles configurations sont récurrentes lors des premiers épisodes d'automne.



Figure 1: Position des différentes prises de vues lors de la crue du 19 septembre 2020



Figure 2 : Site 3 - Corbès (source : Loic Puech)



Figure 3 : Site 4 - Pont routier d'Anduze (source : compte FB Météo-Languedoc utilisateur à déterminer)



Figure 4: Site 1 - Pont Camboneral monté de la crue au travers d'images espacées d'une minute - Source youtube Emilie Clavet



Figure 5 : Linnigramme d'Anduze le 19/09/2020

1 REFERENCES

- 1 Rainfall-Induced surge waves in canyon streams : from legend to awareness, Johan Berthet, Guisepe Viggiani
- 2 Viggiani, Giuseppe. (2020). The elusive topic of rainfall-induced surge waves in rivers: lessons from canyon accidents. International Journal of River Basin Management. 20. 1-15.

ESTIMATION DES INCERTITUDES ASSOCIÉES AUX PRÉVISIONS DE PLUIE EXPERTISÉES ET INTÉGRATION DANS LA CHAÎNE DE PRÉVISION DES CRUES

Assessing the uncertainties related to expertised rainfall forecasts within the flood forecasting chain

Auteurs : GENIN Sanda^{1*} DOURDET Vincent¹, DANNE Alexandre¹, PIOTTE Olivier¹, TILMANT Francois², LACAZE Yan¹

¹ Direction Régionale de l’Environnement de l’Aménagement et du Logement de Nouvelle-Aquitaine, Cité administrative, rue Jules Ferry, 33090 Bordeaux Cedex, France, email : sanda.genin@developpement-durable.gouv.fr, vincent.dourdet@developpement-durable.gouv.fr, alexandre.danne@developpement-durable.gouv.fr, olivier.piotte@developpement-durable.gouv.fr, yan.lacaze@developpement-durable.gouv.fr

² Université Paris Saclay, INRAE, UR HYCAR, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex, France, email : francois.tilmant@inrae.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : incertitudes, prévisions météorologiques, modélisation, GRP, prévision des crues

1. INTRODUCTION

Le sujet de l'estimation des incertitudes en prévision des crues n'est pas nouveau. Les différents maillons de la chaîne opérationnelle introduisent des incertitudes : observations et prévisions météorologiques, données hydrométriques, modélisation hydrologique et hydraulique, etc. Afin de fournir sur Vigicrues des prévisions expertisées de hauteur d'eau (ou de débit) fiables avec leur intervalle de couverture à 80 %, les services de prévision des crues (SPC) s'attachent à estimer ces incertitudes dans les différents maillons de la chaîne de prévision.

En prévision des crues, on décompose généralement l'incertitude totale de la chaîne de prévision en deux composantes principales : l'incertitude portant sur les forçages d'entrée (les prévisions météorologiques et hydrologiques) d'un côté, et l'incertitude portant sur la modélisation, qu'elle soit hydrologique ou hydraulique, de l'autre (Krzysztofowicz[1]). De nombreux travaux portant sur les méthodes et outils d'estimation des incertitudes ont été réalisés ces dernières années.

Parmi les nombreuses approches possibles pour estimer les incertitudes de modélisation, les SPC utilisent majoritairement la méthode QUOIQUE (Bourgin [2]) via l'outil de post-traitement OTAMIN (Viatgé [3]), qui propose une approche empirique et non paramétrique. Cette approche allie simplicité et robustesse, y compris dans un contexte d'extrapolation (Berthet et al [4]).

Concernant l’incertitude liée aux forçages météorologiques, l’utilisation de prévisions d’ensemble (voire de multi-ensembles), associées à des post-traitements bien placés au sein de la chaîne de prévision visant à parfaire leur fiabilité, est une approche couramment proposée (Bellier [5], entre autres).

Toutefois, les SPC n’ont à ce stade accès aux prévisions d’ensemble météorologiques qu’à titre expérimental et utilisent en routine une autre source de données : les prévisions de pluies expertisées par Météo-France, contenues dans le bulletin précipitations (BP) qui leur est destiné. Ces prévisions comportent un indice de confiance sous forme d’intervalle non probabilisé, ce qui complique leur exploitation mathématique dans la chaîne de prévision.

L’objectif de cet article est de présenter un travail expérimental, mené par le SPC Gironde-Adour-Dordogne (GAD) sur deux sous-bassins versants de la Dordogne (période 2014-2022) et de l’Adour (période 2017-2022), visant à proposer une quantification de l’incertitude météorologique à partir de prévisions de pluie expertisées et son intégration dans la chaîne opérationnelle de prévision. Ce travail s’inscrit dans le cadre plus large de l’amélioration de la prise en compte et de l’estimation des incertitudes par les prévisionnistes du SPC GAD, qui va de pair avec une amélioration de leur outillage opérationnel.

2. LES BULLETINS DE PRÉCIPITATIONS

Les directions régionales de Météo-France sont responsables de la prévision météorologique à destination des SPC [6], produite et diffusée deux fois par jour sous la forme de bulletins précipitations (BP). Ceux-ci contiennent principalement des valeurs de pluie prévue sur un zonage prédéfini, pour la journée en cours J, et les jours J+1 et J+2. Ils sont communiqués sous forme d’intervalle (valeur min – valeur max), éventuellement complétés par une valeur traduisant le maximum possible localement au sein de la zone concernée. Les valeurs du BP sont issues de l’expertise du prévisionniste météo à partir des résultats des modèles AROME, ARPEGE et CEP.

Ces intervalles de prévision de pluie normés constituent la donnée d’entrée de référence pour la prévision hydrologique réalisée par les SPC.

Un paragraphe de commentaire complète ces valeurs de façon qualitative avec des informations sur tout phénomène pouvant influencer sur l’écoulement et le niveau des cours d’eau (la limite pluie/neige, la fonte nivale, les intensités horaires de pluie, les surcotes marines, etc.), ainsi que le modèle météorologique retenu par le prévisionniste météo et le degré de confiance dans la prévision.

3. PROBABILISER L’INCERTITUDE MÉTÉOROLOGIQUE

Le travail expérimental que nous avons mené s’effectue sur les bassins versants de deux stations réglementaires de prévision des crues qui disposent d’un modèle hydrologique GRP ([7] et [8]) calé et de bonne qualité : Cambo-les-Bains sur la Nive (bassin de l’Adour) et Cherveix-Cubas sur l’Auvézère (bassin de la Dordogne).

La première étape de la méthode consiste à extraire les valeurs minimales et maximales de prévision de pluie issues des bulletins de prévision météorologique et classer les intervalles de prévision météo normalisés tels qu’ils apparaissent systématiquement dans les BP : 7-15mm, 10-20 mm, 15-30 mm, 20-40 mm et 30-50 mm. A ce stade, nous nous sommes uniquement intéressé aux prévisions contenues dans le BP du matin pour le jour J.

Pour chacun de ces intervalles type, la distribution des valeurs de pluie réellement observées permet de calculer des probabilités de non-dépassement et de déterminer les quantiles Q_{10} , Q_{20} ..., Q_{90} . Ils sont nommés par la suite Q_{10-90}^{BP} . Un exemple de Q_{10-90}^{BP} pour l’intervalle de prévision météorologique 7-15 mm sur le bassin de la station de Cambo-les-Bains sur la Nive est présenté en Figure 1.

Cette analyse fournit déjà une précieuse indication de la sensibilité des prévisions météorologiques introduites comme forçage en entrée des modèles hydrologiques. En outre, elle permet de disposer des quantiles par bassin versant, là où les prévisions dans les BP sont fournis à une échelle plus large pouvant potentiellement couvrir plusieurs bassins.

Nous détaillerons plus avant les conclusions que permet de tirer cette analyse factuelle statistique, à ce stade,

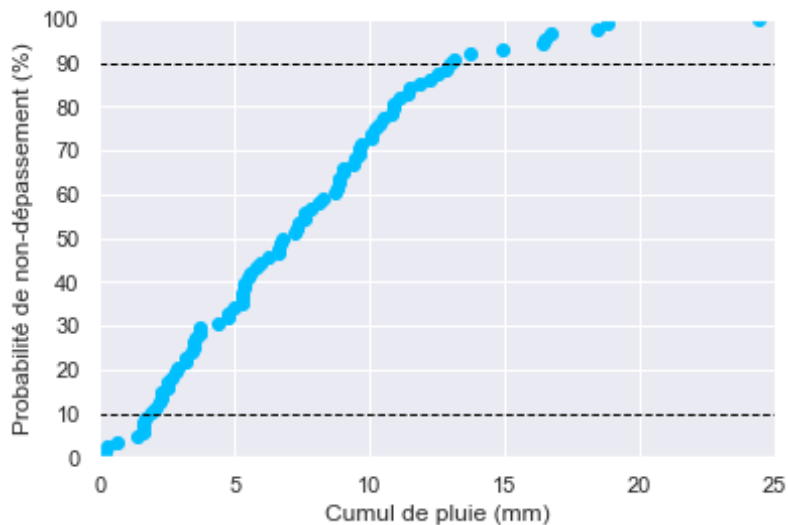


Figure 1 : Quantiles de pluie observée pour l’intervalle de prévision météorologique 7-15 mm à la station de Cambo les Bains

4. PROBABILISER L’INCERTITUDE HYDROLOGIQUE

La deuxième étape de la méthodologie consiste à alimenter le modèle hydrologique GRP ([7] et [8]) avec les 9 scénarios de pluies probabilisées issues du Q_{10-90}^{BP} et le scénario de pluie observée, sur une longue chronique de données (2014-2022 pour la station de Cherveix-Cubas sur l’Auvézère et 2017-2022 pour la station de Cambo-les-Bains sur la Nive). Les données d’entrée du modèle hydrologique GRP étant au pas de temps horaire, les Q_{10-90}^{BP} disponibles au pas de temps 24h sont redistribués selon la pluie observée.

Lors de la troisième étape de la méthode, les dix prévisions issues du modèle hydrologique GRP font l’objet d’un post-traitement OTAMIN [3] (calé au préalable pour le modèle GRP) qui produit pour chaque prévision, 9 séries de débits probabilisés nommées Q_{10-90}^{GRP} , soit un total de 90 prévisions de débits, 81 pour chaque couple Q_{10-90}^{BP} - Q_{10-90}^{GRP} et 9 issus de la prévision GRP en pluies observées. Ces séries pourront être obtenues pour différents horizons de prévision du modèle GRP.

L’étape finale de la méthode vise à comparer les sorties de modélisation probabilisées et l’observation afin de déterminer les combinaisons Q_{xx}^{BP} - Q_{xx}^{GRP} qui répondent au mieux à l’objectif cible de fiabilité des prévisions à 80 %, soit Q_{10-90}^{cible} tout en assurant une finesse aussi réduite que possible.

La figure 2 schématise la méthodologie décrite ci-dessus.

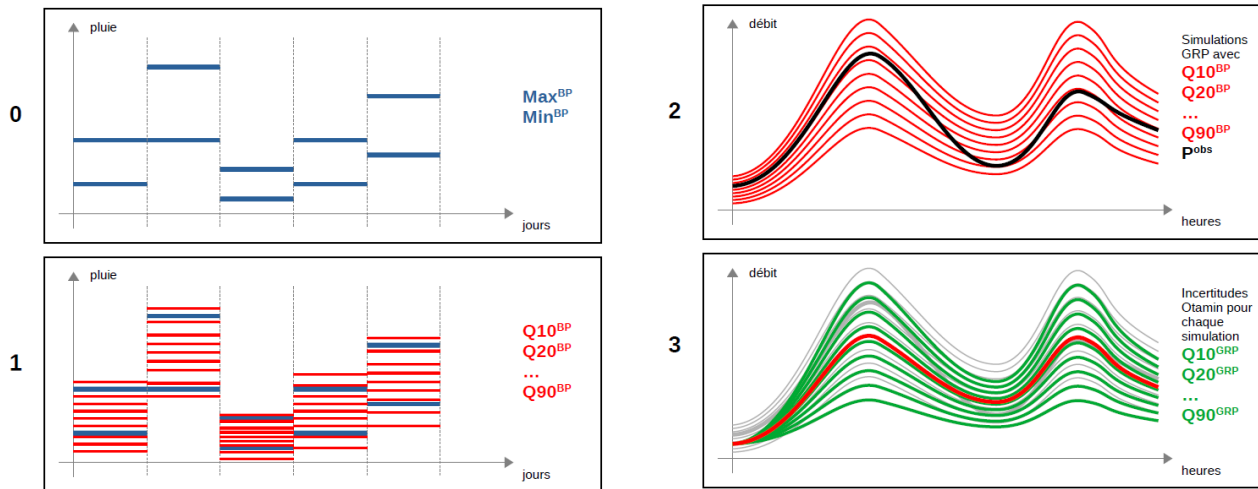


Figure 2 : Schéma de la méthodologie employée. Etape 0 : extraction des valeurs minimales et maximales de prévision de pluie issues des BP ; Etape 1 : création des chroniques de pluies probabilisées Q_{10}^{BP} - Q_{90}^{BP} ; Etape 2 : prévision en rejeu avec le modèle GRP ; Etape 3 : estimation des incertitudes à l'aide d'OTAMIN pour produire les séries de débits probabilisés Q_{10}^{GRP} - Q_{90}^{GRP}

En perspective de cette expérimentation, une généralisation à l'ensemble des stations réglementaires de prévision des crues ainsi que le développement d'un outil d'aide à la décision à destination des prévisionnistes sont envisagés.

5. RÉFÉRENCES

- [1] Krzysztofowicz, R. (1999). *Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model*, Water Resources Research, 35, p. 2739–2750.
- [2] Bourgin, F. (2014). *Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique?* Thèse de doctorat, AgroParisTech/ENGREF, Paris, 208 pp.
- [3] Viatgé J., Berthet L., Marty R., Bourgin F., Piotte O., Ramos MH., Perrin C (2019). *Vers une production en temps réel d'intervalles prédictifs associés aux prévisions de crue dans Vigicrues en France*, La Houille Blanche, vol. 105.
- [4] Berthet L., Bourgin F., Perrin C., Viatgé J., Marty R., Piotte O. (2019). *A crash-testing framework for predictive uncertainty assessment when forecasting high flows in an extrapolation context*, EGU.
- [5] Bellier, J. (2018). *Prévisions hydrologiques probabilistes dans un cadre multivarié : quels outils pour assurer fiabilité et cohérence spatio-temporelle ?* Thèse de doctorat, Université Grenoble – Alpes.
- [6] Tangara, M. (2005). *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de Doctorat, Cemagref Antony, EPHE, Paris, 374 pp.
- [7] Berthet, L. (2010). *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique*. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech, Paris, 603 pp.



« Prédiction des crues et des inondations –
Avancées, valorisation et perspectives », Titre, Auteur,
Toulouse, Automne 2023

NICOLAS Matthieu
matthieu.nicolas@developpement-durable.gouv.fr

**PREVISIONS GRAPHIQUES : ANALYSE ET APPORT DE
L'EXPERTISE. APPLICATION AUX STATIONS DE LA LOIRE.**

**CHART FORECASTS: ANALYSIS AND EXPERTISE CONTRIBUTION.
APPLICATION TO THE LOIRE STATIONS**

Auteurs : NICOLAS Matthieu¹, MARTY Renaud², FAUCARD Yoann², MARLETTE
Stéphane¹

¹DREAL Pays de la Loire , Nantes, France, e-mail: matthieu.nicolas@developpement-durable.gouv.fr

²DREAL Pays de la Loire , Nantes, France, e-mail: renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr

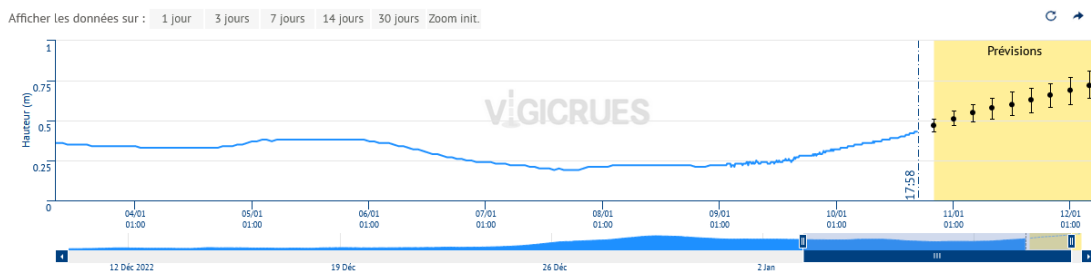
Choix du thème/session : Progrès réalisés et perspectives d'amélioration pour la prédiction des crues et des inondations

Mots clefs: Prédiction graphique, expertise, fiabilité, finesse,

Orateur: NICOLAS Matthieu / matthieu.nicolas@developpement-durable.gouv.fr

Les Services de Prédiction des Crues Loire-Allier-Cher-Indre (SPC LACI) et Maine-Loire Aval (SPC MLA) réalisent des prévisions tous les jours sur les stations de la Loire depuis la confluence de la Loire et de l'Allier jusqu'à Nantes. Cette expertise quotidienne permet de développer et maintenir les compétences des prévisionnistes, comme le souligne Berthet et al. (2016)¹. Depuis 2017, elles sont publiées sur le site Vigicrues sous forme graphique avec trois tendances (basse, centrale et haute). La publication de prévisions sur un site unique toute l'année est un atout de communication auprès des riverains et un engagement de la part des Services de Prédiction des crues. La vérification de la qualité de ces prévisions est donc un enjeu essentiel pour s'assurer de la pertinence de l'information délivrée et ainsi permettre aux gestionnaires de crise et au grand public de les utiliser pour leurs propres usages. L'objectif de cette étude est d'analyser l'ensemble de ces prévisions sur la Loire et de cibler les éventuels leviers d'amélioration. La large gamme de débits étudiés (de 100 à 4200 m³/s à Montjean-sur-Loire) permet d'obtenir un échantillon plus important que les seules prévisions durant les événements de crue ou de surcote. Les hautes eaux restent la finalité principale de l'étude et seront étudiées plus finement que les moyennes et basses eaux.

Saumur (Loire) - Hauteurs - 10/01/2023 17:58



Le système de prévision du SPC LACI repose sur une modélisation transformant les observations et prévision météorologique en prévision hydrologique, puis sur une modélisation simple ou hydraulique (1D) propageant les ondes de crue. Celle-ci couvre l'ensemble du territoire. Dans le cas des prévisions émises quotidiennement, i.e. hors crue, la modélisation n'intègre pas la Loire en amont de Villerest, du fait de débits plus anthropiques que naturels en sortie de cet ouvrage.

Au sein du SPC MLA, les prévisions sont basées sur deux modèles principaux de la plateforme Mascaret (modélisation en 1D). Le premier couvre la Loire depuis Langeais jusqu'à Montjean en remontant sur les affluents majeurs que sont la Vienne et les affluents de la Maine. Le second commence à Montjean et s'étend jusqu'à Saint-Nazaire en remontant sur la Sèvre Nantaise. Il englobe ainsi tout le linéaire influencé par la marée.

Les prévisions publiées couvrent le futur jusqu'à 72 heures en fonction du contexte de chaque station et doivent tenir compte des prévisions de précipitations pour respecter cet horizon de prévision. Elles doivent tenir compte également des prévisions de surcote pour la partie estuarienne. Les prévisions sont expertisées en cascade, d'amont en aval, depuis les points d'entrée du premier modèle jusqu'à la dernière station expertisée située à Nantes. L'expertise permet un recalage et une correction des biais inhérents aux modèles et aux prévisions météorologiques. Elle facilite le portage des prévisions auprès des gestionnaires de crise. Ces

1 BERTHET L., GAUME E., PIOTTE O. et les groupes de travail du Conseil scientifique et technique du SCHAPI et du chantier d'intérêt commun SCHAPI – SPC Estimation des incertitudes de prévision. (2016) - Evaluer et communiquer les incertitudes associées aux prévisions hydrologiques pour mieux partager l'information. *La Houille Blanche*. DOI 10.1051/lhb/2016035

prévisions expertisées prennent la forme de tendances basses, centrales et hautes correspondant, a priori, aux probabilités au non-dépassement de 10 %, 50 % et 90 %.

Une analyse est menée, station par station, pour évaluer l'apport de cette expertise par rapport à la prévision brute du modèle, en les confrontant aux observations. L'évaluation concerne les deux principales qualités recherchées par les SPC :

- la fiabilité : les probabilités ciblées sont-elles vérifiées ?
- la précision : les prévisions sont-elles proches de l'observation obtenues a posteriori ?

Elle est complétée par une analyse de la finesse qui caractérise l'étendue des valeurs possibles.

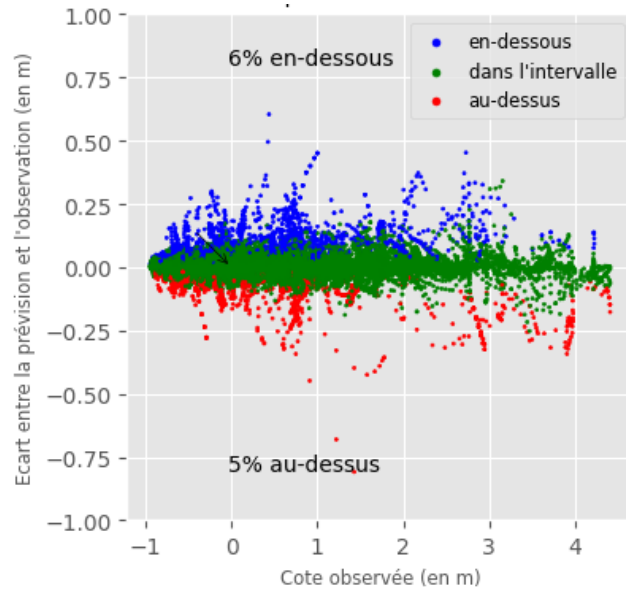


Figure 1: Ecart entre la prévision et l'observation à la station de Saumur et positionnement par rapport à l'intervalle d'incertitude

Cette évaluation est nécessaire pour comprendre et quantifier les origines des erreurs commises (modèle, données d'entrée, expertise) en vue de proposer des pistes d'amélioration (outils, organisation, formation). Elle pourrait conduire à la conclusion, par exemple, d'un besoin de renforcer la formation des prévisionnistes ou bien de porter les efforts sur la modélisation en fonction des résultats obtenus.

Le travail mené lors de cette étude permettra d'établir une méthodologie d'analyse des prévisions graphiques sur les stations de la Loire. Cette méthodologie pourra servir de base de travail pour l'analyse de l'ensemble des prévisions réalisées sur les stations de vigilance, étape essentielle pour améliorer la prévision des crues.

Le résumé doit comporter un titre en français et en anglais.

LA LONGUEUR TOTALE DU RESUME DOIT ETRE ENTRE 2 ET 4 PAGES.

Des figures peuvent être ajoutées, mais l'ensemble ne doit pas dépasser 6 pages.

Les coordonnées de l'auteur correspondant doivent être indiquées clairement.

Intérêt des prévisions d’ensemble des impacts des crues éclair pour un service de secours : évaluation menée sur les inondations d’octobre 2018 dans le bassin de l’Aude (France)

Relevance of ensemble flash-flood impacts forecasts for an emergency service: an evaluation for the October 2018 flood event in the Aude River basin (France)

Auteurs : CHARPENTIER- -NOYER Maryse^{1*}, NICOLLE Pierre¹, PAYRASTRE Olivier¹ et GAUME Eric¹

* *auteur correspondant*

¹GERS/LEE, Univ Gustave Eiffel, Nantes, 44344, Nantes, e-mail: maryse.charpentier-noyer@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

2/ **Prévision des crues et des inondations**

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Crue soudaine, prévision d’ensemble, impacts, modèle multi-agents

Les crues soudaines représentent une part importante des dommages et des décès liés aux inondations^[1,2,3]. Aujourd’hui, les systèmes opérationnels de prévisions des crues soudaines et les systèmes d’avertissement sont souvent basés sur l’utilisation des observations de pluie par radar, ce qui offre une anticipation limitée. Par ailleurs, ces systèmes ne rendent pas encore compte de l’intensité de l’inondation et de sa sévérité en termes d’impacts, ce qui limite leur caractère informatif pour des services de secours. Ce travail présente une première évaluation de l’intérêt d’une chaîne de prévision ensembliste des impacts des crues soudaines, du point de vue d’un service de secours, dans le cas de l’Aude en octobre 2018 qui ont provoqué 15 décès et près de 200 millions d’euros de dommages matériels^[4].

1. Mise en œuvre de la chaîne de prévision pluie-débit-impacts

La chaîne de modélisation appliquée a été alimentée par trois produits de prévision d’ensemble des pluies à courte échéance (6h) : AROME-EPS^[5] (produit de prévision d’ensemble déjà opérationnel), pepi (obtenu à partir du produit AROME-EPS et du produit de prévision déterministe AROME-PI), et pertDpepi (obtenu à partir de pepi et d’une perturbation spatiale dans les quatre directions cardinales). Les prévisions d’ensemble de pluie ont servi de données d’entrée à une modélisation hydrologique distribuée permettant de simuler la dynamique des crues soudaines à l’échelle régionale, en intégrant les bassins non instrumentés (modèle Cinécar^[6]). Afin de s’affranchir d’une modélisation hydraulique souvent lourde à mettre en place, une chaîne de prévision pluie-débit-impact a été mise en place en se basant sur un catalogue d’emprises inondées de périodes de retour de 2 à 1000 ans^[7,8]. A partir de ce catalogue, il a été possible de construire une courbe débit-impacts par tronçon de cours d’eau modélisé. Les impacts retenus ici sont les bâtiments à visée résidentielle et commerciale, extraits de la BD TOPO de l’IGN.

Au total, cette chaîne de modélisation a été alimentée par cinq scénarios pluviométriques : un scénario correspondant à la pluie de référence observée (donc supposée parfaitement connue) et quatre scénarios de pluies prévues (trois correspondant aux produits de prévision et un quatrième à une prévision naïve de pluie future nulle).

2. Principes du modèle multi-agent mis en place pour l'évaluation

Afin d'évaluer l'apport des prévisions d'ensemble des impacts du point de vue d'un utilisateur potentiel, une modélisation multi-agents a été mise en œuvre pour représenter les interventions d'un service de secours (SDIS de l'Aude), avec une prise de décision basée sur les prévisions d'impacts (nombre de bâtiments inondés par tronçon). A l'aide des éléments connus sur la gestion réelle de l'événement (communiqués par le SDIS de l'Aude), les principes généraux retenus pour la modélisation multi-agents sont les suivants :

- 92 équipes d'intervention réparties sur 42 centres de secours
- Un seuil d'intervention correspond au nombre de bâtiments inondés prévu déclenchant l'envoi d'une équipe de secours sur un tronçon
- Une capacité d'intervention correspond au nombre de bâtiments pouvant être secourus par une équipe d'intervention
- Une matrice de déplacement (à une vitesse constante de 30 km/h) permet de représenter les temps de trajet des équipes d'intervention depuis les centres de secours vers les tronçons impactés.

La modélisation permet finalement de comparer à un pas de temps fin (15 min) la localisation des impacts et la position des équipes de secours. La mesure de l'efficacité des décisions se fait via une fonction de coût représentant le nombre cumulé de bâtiments inondés pour lesquels aucune équipe de secours n'est intervenue à temps.

3. Résultats de l'évaluation

Une première modélisation a été réalisée en faisant l'hypothèse d'un nombre d'équipes d'intervention illimité (correspondant à un cas idéal). Cette première approche, bien que peu réaliste, permet de mettre en évidence l'effet positif de l'utilisation des prévisions d'ensemble de pluie en entrée de la chaîne de prévision. Celles-ci permettent de secourir quasiment l'ensemble des bâtiments inondés, ce qui n'est pas possible avec un scénario de pluie future nulle. Cependant ce résultat est à nuancer, car l'utilisation des prévisions de pluie conduit dans ce cas à envoyer de nombreuses équipes sur des tronçons ne nécessitant pas d'intervention (fausses alarmes). Cet effet s'avère fortement pénalisant en cas de moyens restreints, comme le montrent les simulations suivantes effectuées avec un nombre d'équipes d'intervention plus proche de la réalité. Dans le cas de 92 équipes d'intervention, le nombre de bâtiments effectivement secourus à temps diminue nettement, et les performances obtenues se rapprochent entre les prévisions d'ensemble de pluie et le scénario de pluie future nulle (du fait du poids des fausses alarmes).

Les produits de prévision AROME-EPS et pertDpepi restent néanmoins plus efficaces que le scénario de pluie future nulle. Finalement la modélisation multi-agents des interventions d'un service de secours, permet d'évaluer le coût-bénéfice de l'anticipation supérieure apportée par les prévisions d'ensemble, et de l'impact des fausses alarmes, sur l'efficacité des prises de décision.

4. REFERENCES

- [1] Les catastrophes naturelles en France - Bilan 1982-2019, Caisse Centrale de Réassurance (CCR) (2020)
- [2] Major flood disasters in Europe: 1950-2005, Barredo J, *Natural Hazards* (2006) 42(1) 125-148
- [3] MEFF: The database of MEditerranean Flood Fatalities (1980 to 2015), Petrucci O, Papagiannaki K, Vinet F, *Journal of Flood Risk Management* (2019) 12(2) 1-17
- [4] Les inondations du 14 et 15 octobre 2018 dans le Languedoc, Caisse Centrale de Réassurance, (2018) 1-5
- [5] Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale, Raynaud L, Bouttier F, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (2016) 142(695) 854-866
- [6] Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France, Naulin J, Payrastre O, Gaume E, *Journal of Hydrology* (2013) 486 88-99
- [7] Production d'un catalogue d'emprises inondées mono-fréquence sur les petits cours d'eau de l'arc méditerranéen, Nicolle P, Université Gustave Eiffel, (2021) 1-14
- [8] Performance of automated methods for flash flood inundation mapping : a comparison of a digital terrain model (DTM) filling and two hydrodynamic methods, Hocini N, Payrastre O, Pons F, *Hydrology and Earth System Sciences* (2021) 25(6) 2979-2995

MODÉLISATION HYDRAULIQUE UNI-DIMENSIONNELLE DE LA PROPAGATION DES CRUES SUR LA SAÔNE ET LE DOUBS

*One-dimensional hydraulic modeling of flood propagation on the Saône and
Doubs rivers*

Auteurs : SIGAUD Jean-Michel^{1*}, PAYA Elodie¹, TIBERI-WADIER Anne-Laure¹,
CORSIEZ Kevin¹, BERNARD Alexis¹, LAGANIER Elsa²

* *auteur correspondant*

¹Cerema, 25 avenue François Mitterrand, Cité des mobilités, 69500 BRON CEDEX

²DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, Service de Prévision des Crues Rhône-amont-Saône,
5 place Jules Ferry, 69006 LYON

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : modélisation, hydraulique, unidimensionnel, propagation, crues, Saône, Doubs

1. Un modèle hydraulique pour améliorer la prévision des crues sur la Saône et le Doubs

Le Service de Prévision des Crues Rhône-amont-Saône (SPC RaS) est en charge de la surveillance et de la prévision des crues sur 22 tronçons surveillés Vigicrues, dont la majorité sur les bassins versants de la Saône et du Doubs.

Pour assurer ses missions, le SPC RaS s’appuie jusqu’à présent sur plusieurs outils numériques pour la prévision des crues (modèle hydraulique sur le Rhône, modèles hydrologiques de type GRP pour les stations situées à l’amont, réglottes de Bachet, modèles de propagation statistiques de type relations linéaires ou relations linéaires avec accroissement pour les stations plus à l’aval), sans toutefois disposer de modèle hydraulique sur les axes Saône et Doubs.

Par l’intermédiaire du SCHAPI (Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations), le SPC RaS a sollicité le Cerema pour l’élaboration d’un modèle hydraulique de propagation des crues de la Saône et du Doubs, permettant d’harmoniser les outils et d’améliorer la prévision des crues. Il s’agit à la fois d’augmenter les échéances de prévision (actuellement comprises entre 4h et 12h) et de mieux estimer les incertitudes associées.

Le modèle hydraulique développé par le Cerema couvre la Saône et le Doubs (hors affluents) sur un linéaire total d’environ 800 km, répartis comme suit :

- Axe Saône : 480 km de linéaire jusqu’à la confluence avec le Rhône,
- Axe Doubs : 320 km de linéaire jusqu’à la confluence avec la Saône.

Le modèle hydraulique, de type unidimensionnel (1D), fonctionnant en régime transitoire, est développé sous *Mascaret*¹, logiciel libre basé sur les équations de Barré de Saint-Venant. L’interface historique développée sous Fudaa a été remplacée il y a quelques années par un plugin QGIS.

1 Présentation de Mascaret disponible sur le site :

<http://www.opentelemac.org/index.php/modules-list/138-mascaret-1-dimensionnal-free-surface-flow-modelling>

2. Une vaste équipe projet pour un linéaire de modèle ambitieux

Devant ce linéaire important, le parti pris a consisté à segmenter le modèle en une dizaine de sous-modèles, délimités à l'amont et à l'aval par une station hydrométrique de référence issue du réseau Vigicrues. L'enchaînement des sous-modèles sous la Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation (POM), outil du SCHAPI pour le pilotage des modèles de prévision de crues, permettra ensuite de simuler la propagation des crues sur les tronçons souhaités en opérationnel.

Cette solution modulaire a permis de confier le développement des sous-modèles à 7 équipes différentes du Cerema, mobilisant au total 13 modélisateurs. Le fonctionnement en équipe projet, ainsi que l'implication d'un nombre conséquent d'intervenants, ont été déterminants en :

- Favorisant les échanges techniques et les partages de pratiques, notamment dans le domaine du pré et post-traitement, des techniques de modélisation, ainsi que dans l'utilisation des bases de données hydrométriques et topographiques ;
- Impulsant une accélération du déploiement de l'utilisation de *Mascaret*® dans les différents services.

Cette utilisation collective des outils de développement a permis de mettre en évidence les points techniques problématiques du plugin *Mascaret*® de manière efficace, conduisant au fur et à mesure de l'avancée du projet à en améliorer très significativement les performances.

3. Les défis techniques à relever

Les principales difficultés rencontrées lors de l'élaboration des sous-modèles ont consisté à prendre en compte un fonctionnement hydraulique complexe, tout en répondant à la fois aux impératifs liés à la modélisation 1D (notamment la problématique de la représentation des écoulements en lit majeur) et au fonctionnement opérationnel (temps de calcul réduit, stabilité des calculs, impossibilité d'utiliser le module « barrages mobiles » non disponible pour l'instant dans la plateforme de pilotage des modèles du SCHAPI – POM, voir ci-après).

La représentation des ouvrages hydrauliques

La Saône et le Doubs comportent de nombreux seuils hydrauliques et barrages mobiles qui permettent la navigation fluviale l'essentiel de l'année (hors épisodes de crue). L'intégration de ces ouvrages et autres singularités hydrauliques dans le modèle est essentielle pour reconstituer correctement les lignes d'eau en régime fluvial, et s'assurer que le modèle hydraulique reste stable lors des simulations de crues.



Figure 1 : exemple de barrage mobile sur la Saône – le barrage de Couzon (Source VNF)

À ce stade d'avancement, la régulation hydraulique par les barrages mobiles n'a pas pu être intégrée, la POM ne prenant pas en charge pour l'instant cette fonctionnalité. Ils ont donc été intégrés en tant que seuils fixes abaissés comme en conditions de crues. Cette fonctionnalité devrait pouvoir être prise en compte lors des futures versions de la POM. Ce choix technique contraint, au même titre que la non-prise en compte des casiers agricoles, ne remet néanmoins pas en cause l'efficacité du modèle pour les gammes de crues qui intéressent le SPC en opérationnel, pour lesquelles ces barrages se comportent comme des seuils fixes.

Un phénomène d'hystérésis marqué au droit de certaines stations hydrométriques

Parmi les difficultés techniques rencontrées, le phénomène d'hystérésis affecte la qualité des données hydrométriques injectées dans les sous-modèles, ainsi que celles utilisées pour le calage.

La relation entre le débit Q et la hauteur d'eau h (courbe de tarage) peut alors être affectée en cas de crue, c'est-à-dire devenir non-univoque et prendre une forme de boucle (voir figure 2). Pour une même hauteur d'eau, le débit sera alors plus fort lors de la montée de crue que lors de la décrue. Le maximum de débit Q_{max} sera atteint avant le maximum de hauteur d'eau h_{max} [1].

L'effet d'hystérésis marqué sur ce linéaire entraîne plusieurs conséquences majeures sur les sous-modèles et leur calage :

- Pour les crues importantes, le débit injecté dans le modèle est potentiellement biaisé par l'effet d'hystérésis puisqu'une relation univoque entre les hauteurs et les débits est appliquée pour l'estimation des débits. Par conséquent, il est techniquement impossible pour un modèle d'être "calé" sur les limnigrammes observés sur l'ensemble de l'événement.
- Le calage sur les valeurs de débit des stations amont et intermédiaires n'est pas envisageable.
- Le calage en temps sur la station aval, dont la relation hauteur / débit imposée est univoque, est également problématique, tant sur le limnigramme que sur l'hydrogramme.

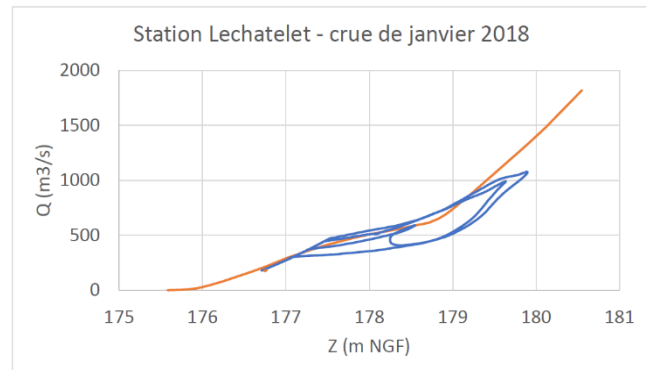


Figure 2: courbe de tarage utilisée par l'unité hydrométrie (en orange) et résultat de calcul (en bleu) à la station de Lechâtelet sur la Saône

Une incertitude forte sur les données hydrologiques

Sur les tronçons amont du Doubs et de la Saône, les problèmes de sous-estimation des débits aux stations aval des modèles ont donné lieu à l'application de coefficients multiplicateurs significatifs sur certaines stations d'apport associées aux affluents. Il s'agit de compenser des débits insuffisants en entrée de modèle, soit parce que les stations disponibles pour les affluents ne jaugent pas l'ensemble des bassins-versants alimentant significativement le tronçon, soit parce que ces stations sous-estiment directement les débits en raison de courbes de tarage de mauvaise qualité dans leur partie haute, faute de jaugeages.

4. Des premiers résultats encourageants et des améliorations envisageables

Les premiers résultats de calage des sous-modèles montrent globalement une bonne reconstitution des limnigrammes observés aux stations hydrométriques, tant pour les valeurs maximales de cote à l'échelle (écarts généralement limités à quelques dizaines de cms) que pour les décalages temporels (décalages généralement limités à 24h, ces écarts étant à relativiser compte-tenu de la durée importante de la crue) lors des pics de crue.

Les calages des modèles se concentrant en particulier sur les valeurs associées aux pics de crue, les résultats des simulations avec des débits faibles à modérés peuvent par conséquent présenter des divergences importantes avec les observations (figure 3). Par ailleurs, puisqu'il n'est pas possible pour l'instant d'intégrer les barrages mobiles dans les modèles, les barrages sont modélisés à leur cote minimale (position normale en crue). Ainsi, lorsque les barrages ne sont pas complètement abaissés

(hors crue ou événements modérés), la modélisation des barrages dans le modèle n'est pas fidèle à la réalité.

Il est à noter également que le sous-modèle le plus à l'aval (intégrant la confluence de la Saône avec le Rhône) présente un biais important, car l'influence du Rhône n'a pas été prise en compte à ce stade du développement.

Les performances du modèle en opérationnel et notamment l'échéance de prévision pouvant être atteinte en conditions réelles (avec injection de prévisions aux entrées du modèle) avec un niveau d'incertitude acceptable restent à évaluer après un temps de prise en main par le SPC.

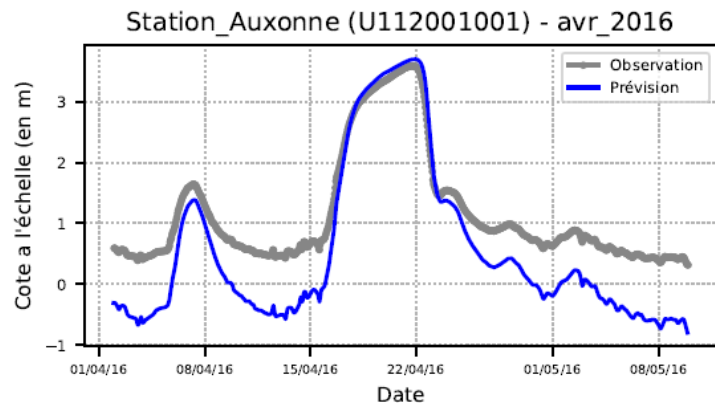


Figure 3: Linnigramme observé (en gris) et calculé (en bleu) à la station d'Auxonne - crue sur la Saône d'avril 2016

Perspectives d'amélioration

Une meilleure performance de la chaîne globale de prévision obtenue par les différents modèles doit passer par une réflexion sur l'hydrologie générale. Pour disposer d'un modèle simulant parfaitement les linnigrammes au droit des stations hydrométriques, il faudrait injecter un hydrogramme prenant en compte l'effet d'hystérésis, et donc non issu d'une courbe de tarage univoque.

Dans le cas d'une hystérésis au sens de Jones [1], c'est-à-dire due à la propagation d'une onde de crue, la formule de Jones fournit une estimation du coefficient multiplicatif permettant de passer du débit permanent au débit réel.

Par ailleurs, l'intégration des barrages mobiles dans les sous-modèles pourrait permettre une meilleure reconstitution des linnigrammes pour les débits intermédiaires, les pics de crue étant modélisés avec un barrage abaissé, ce qui est fidèle à la réalité.

Enfin, le prolongement du modèle à l'aval, intégrant le Rhône, permettrait de valider les résultats sur les stations situées à l'amont immédiat de l'agglomération lyonnaise.

5. REFERENCES

- [1] E. Perret, M. Lang, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard. HYDROM A1 : Analyse exploratoire des stations hydrométriques susceptibles d'être concernées par un effet d'hystérésis sur la courbe de tarage. [Rapport de recherche] irstea. 2018, pp.27. hal-02608481

RÉGIONALISATION SANS COUTURE DES PARAMÈTRES D’UN MODÈLE HYDROLOGIQUE DISTRIBUÉ À PARTIR DE DONNÉES MULTI-SITES PAR ASSIMILATION VARIATIONNELLE ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

Seamless regionalization of distributed hydrologic model parameters from multi-site data with variational assimilation and machine learning

Auteurs : HUYNH Ngo Nghi Truyen¹, COLLEONI François¹, GARAMBOIS Pierre-André^{1*}, JAY-ALLEMAND Maxime², RENARD Benjamin¹, ROUX Hélène³, DEMARGNE Julie², JAVELLE Pierre¹

* *auteur correspondant*

¹INRAE, Aix Marseille Université, RECOVER, 3275 Route Cézanne, Aix-en-Provence, 13182, France

²Hydris Hydrologie corp., Montpellier, France

³Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, CNRS, 31400 Toulouse, France

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Keywords: distributed hydrological modeling, pre-regionalization, adjoint model, calibration, high dimension, variational data assimilation, large sample, multi-site data, multi-source data, artificial neural network

1. Context and objectives

Every year, flash floods occurring in small unmonitored watersheds cause considerable damage in France and around the world. A better anticipation of these events is a major issue, especially in the context of global warming with potential increase of occurrence and amount of intense precipitation events. It is therefore crucial to develop effective early warning systems, including accurate numerical representation of flooding in terms of timing and amplitude over a whole catchment or region. A key component of such a chain is a spatially distributed hydrological model enabling consistent state-flux estimates in space and time. Nevertheless, hydrological modeling remains a hard task, affected by large uncertainties and faced with relatively sparse constraining flow data. Tackling the difficult problem of estimating spatially distributed hydrological parameters especially for floods on ungauged water courses, this contribution presents new effective regionalization algorithms.

2. Methodology

The proposed regionalization approaches are based on the following ingredients: (i) the SMASH platform for Spatially distributed Modelling and ASSimilation for Hydrology (Jay-Allemand, 2020; Colleoni et al., in prep.) underlying the French national flash flood forecasting system Vigicrues Flash; (ii) a pre-regionalization operator included into the forward model (following the Multiscale Parameter Regionalization approach proposed in Samaniego et al. 2010), consisting either in a polynomial regression, with bound constraints imposed through a sigmoid transform (case 1) or a neural network (case 2), capable of exploiting the information from physiographic maps (e.g., land cover, terrain slope, soil type, etc.); (iii) the variational data assimilation algorithm from (Jay-Allemand et al., 2020) used

here with a LBFGS optimizer (in case 1), or an Adam optimizer (in case 2), both using the adjoint of the forward model and both suited for high dimensional inverse problems; (iv) multi-site global optimization, capable of accounting for multi-site flow observations. A flowchart of the forward-inverse algorithm is presented in Fig 1.

These algorithms enable the simultaneous optimization of spatially distributed parameter maps of the distributed hydrological model over entire regions, inside and outside the gauged domain. This regional calibration problem is tackled with adapted algorithms taking advantage of accurate cost gradient computation thanks to the adjoint model. Note that the adjoint of SMASH forward model operators, including the polynomial mapping when used, is obtained by automatic differentiation of the Fortran source code with the TAPENADE engine (Hascoet and Pascual 2013). In case of use of the artificial neural network (ANN), the total cost gradient used in the optimization algorithm is obtained by analytical derivation, using the chain rule and the adjoint of SMASH hydrological operators.

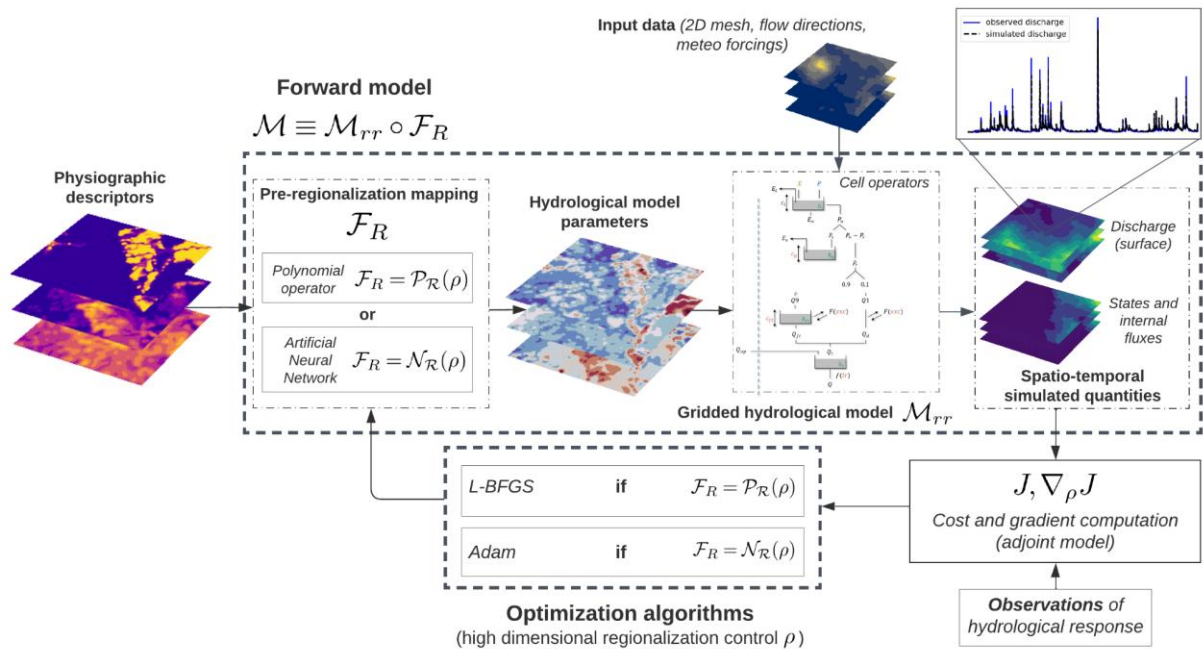


Figure 1 : Flowchart of the forward-inverse algorithm. The forward hydrological model is a gridded model (spatio-temporal regular grid at 1km and 1h) using GR operators (cf. Jay-Allemand et al. 2020, Colleoni et al. in prep.); the four calibration parameters are respectively the capacities c_p and c_{tr} of the production and transfer reservoirs, the non-conservative exchange parameter exc , and lr a leakage parameter of the routing reservoir.

The study zone for testing algorithms consists of an area containing 32 gauged flash flood prone catchments in the South East of France (Fig 2). Considering some catchments as ungauged and keeping them for spatial validation experiments, several optimization setups are studied.

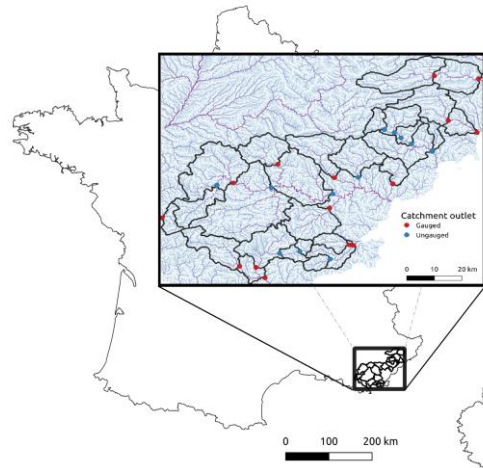


Figure 2 : Study area in the French Mediterranean region: permanent river network, catchment boundaries and calibration (red)/validation (blue) discharge gauges.

3. Results and perspectives

First calibration results, using polynomial or neural network pre-regionalisation, show encouraging performances in terms of discharge modeling at gauged and ungauged sites, along with consistent regional parameter maps (Fig 3). Note that this is a simplified regional calibration setup performed with a limited number of descriptors (see Fig 3) and with only 2 years of hydrometeorological data. Results are analyzed in terms of classical efficiency metrics and flood signatures along with the study of spatial parameters patterns, spatio-temporal parametric sensitivities, and information selection from calibration data and physiographic descriptors.

Further work will aim to test the proposed method with more data but also to search for improving the learning capabilities of the whole chain. More flexible and versatile forward hydrological model structures, potentially varying in space and time, could be sought for example with neural ordinary differential equations (Höge et al. 2022) which implementation and optimization seem possible in our forward-inverse gradient-based approach. Information extraction, from multi-source hydrological signatures (cf. Huynh et al., 2022) for the SMASH assimilation platform, as well as from physiographic descriptors, could be improved by leveraging images and signal processing techniques into the forward-inverse algorithms.

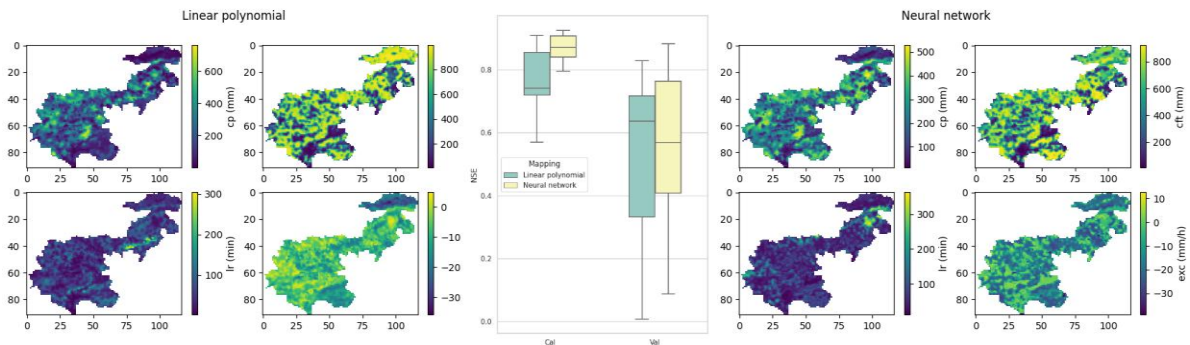


Figure 3 : Maps of model parameters estimated with linear regionalization algorithm (left), neural network (right), and the corresponding NSE in calibration/spatial-validation on the period 08/2014-08/2016 over studied catchments (middle). The spatially distributed descriptors tested are: terrain slope, drainage density, soil water capacity, urbanization index, karst index, forest index.

4. REFERENCES

- [1] Colleoni F., Garambois P.-A., Javelle P., Jay-Allemand M., Arnaud P. Variational calibration of a spatially distributed hydrological model over 312 French catchments with SMASH platform. (in prep.)
- [2] Hascoët, L., Pascual, V., 2013. The Tapenade Automatic Differentiation tool: Principles, Model, and Specification. *ACM Transactions On Mathematical Software* 39 (3).
doi:10.1145/2450153.2450158
- [3] Höge, M., Scheidegger, A., Baity-Jesi, M., Albert, C., and Fenicia, F.: Improving hydrologic models for predictions and process understanding using neural ODEs, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 5085–5102, <https://doi.org/10.5194/hess-26-5085-2022>, 2022.
- [4] Huynh, N.N.T., Garambois, P.A., Javelle, P. and Colleoni, F., 2022. Signatures-and-sensitivity-based multi-criteria variational calibration for distributed hydrological modeling applied to Mediterranean floods. Submitted, <https://hal.inrae.fr/hal-03781526>
- [5] Jay-Allemand M., Javelle P., Gejadze I., Arnaud P., Malaterre P.-O., Fine J.-A., and Organde D., 2020. On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model: application on a Mediterranean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, pp. 1–24, <https://doi.org/10.5194/hess-24-5519-2020>
- [6] Samaniego, L., Kumar, R. and Attinger, S., 2010. Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research* 46(5), <https://doi.org/10.1029/2008WR007327>

PRÉVISIONS D'ENSEMBLE HYDROLOGIQUES AU SEIN DU RÉSEAU NATIONAL DE PRÉVISION DES CRUES EN FRANCE « VIGICRUES » : EXPÉRIMENTATIONS AVEC LE POST-TRAITEMENT DES PRÉVISIONS DANS LE BASSIN DE L'ODET

Hydrologic ensemble forecasts at the French National Service for Flood Forecasting « Vigicrues »: experiments with forecast post-processing in the Odet catchment

Auteurs : TIBERI-WADIER Anne-Laure^{1*}, BELLEUDY Anne², LE PAPE Etienne³, RAMOS Maria-Helena⁴, RICCI Sophie⁵, GOUTAL Nicole⁶

* *auteur correspondant*

¹Cerema Risques, Eaux et Mer, 155 rue Pierre Bouguer, 29280 PLOUZANE, France, anne-laure.tiberi-wadier@cerema.fr

²SCHAPI (MTES/DGPR/SRNH), 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 TOULOUSE, France, anne.belleudy@developpement-durable.gouv.fr

³SCHAPI (MTES/DGPR/SRNH), 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 TOULOUSE, France, Etienne.LEPAPE@developpement-durable.gouv.fr

⁴Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, 92160 ANTONY, France, maria-helena.ramos@inrae.fr

⁵CECI, CERFACS/CNRS, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 TOULOUSE, France, ricci@cerfacs.fr

⁶EDF/LNHE/Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, 6 quai Watier, 78401 CHATOU, France, nicole.goutal@edf.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : hydrologie, GRP, prévision d'ensemble, calibration statistique, Quantile Regression Forests, bassin de l'Odet

Consignes à appliquer:

1. Renommer le fichier en respectant le format:
ColloqueSHF_Previ2023_NOMauteurcorrespondant
2. Le résumé doit être concis et présenter le but du travail, les résultats essentiels et la conclusion ;
3. Respecter impérativement les styles et les polices de la trame type, notamment si vous devez importer du texte ou des figures ;
4. La longueur totale du résumé doit être entre 2 et 4 pages (figures éventuelles incluses);
5. Paragraphe « justifié ».

1. Introduction

L'étude des incertitudes de prévision est aujourd'hui largement développée pour les modèles météorologiques et hydrologiques. Les principales incertitudes des prévisions hydrologiques ont deux origines : (i) les incertitudes sur le forçage et (ii) les incertitudes hydrologiques qui regroupent les conditions initiales, la structure du modèle et ses paramètres. La réalisation de prévisions probabilistes fiables permet d'intégrer et de quantifier les incertitudes de prévision. La construction de prévisions d'ensemble (une prévision avec plusieurs membres qui décrivent les évolutions futures possibles de la variable à prévoir) est une manière parmi d'autres de générer des prévisions probabilistes. L'étude présentée porte sur la mise en place et l'évaluation de prévisions d'ensemble hydrologiques sur trois sous-bassins du bassin versant de l'Odet situé dans le Finistère, dont les exutoires se situent à Tréodet, Kerjean et Ty-Planche ([3], [4], voir figure 1). Dans un souci de concision, seuls les résultats obtenus à la station de Tréodet sont présentés ici. L'objectif général est de contribuer aux travaux actuels ou passés visant à mieux comprendre et mettre en place des prévisions d'ensemble hydrologiques au sein du réseau national de prévision de crues « Vigicrues ».

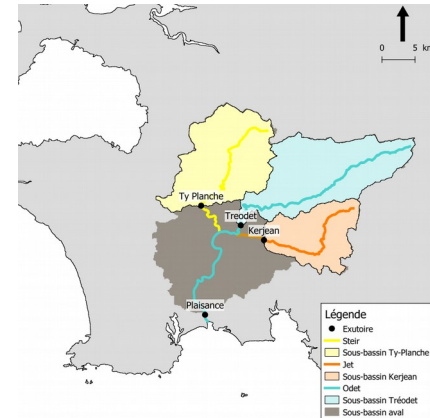


Figure 1: Bassin versant de l'Odet

La section 2 présente le principe de la vérification (évaluation de la qualité) des prévisions d'ensemble et les scores utilisés pour évaluer les performances des ensembles construits. La section 3 présente les caractéristiques du modèle hydrologique GRP utilisé dans l'étude. La section 4 s'attache à la description de la méthode de calibration statistique utilisée (*Quantile Regression Forests*). La section 5 présente les six configurations d'expériences mises en œuvre. La section 6 décrit les performances des ensembles hydrologiques bruts, et la section 7 présente celles des ensembles calibrés. Quelques recommandations pour la mise en place opérationnelle des méthodes développées sont également proposées dans cette section.

2. La vérification des ensembles

Les deux caractéristiques souvent considérées comme étant les plus importantes d'une prévision probabiliste sont la fiabilité et la résolution ([1]). Plusieurs critères numériques (ou scores) existent dans la littérature pour mesurer ces attributs de qualité. Dans cette étude, la qualité des prévisions d'ensemble est évaluée par l'utilisation des scores suivants ([3], [5]) :

- Le CRPS (*Continuous Ranked Probability Score*) permet de juger conjointement de la fiabilité et de la résolution de l'ensemble. C'est un score positif que l'on cherche à minimiser.
- Le calcul de la norme des histogrammes de rang permet d'évaluer la fiabilité des ensembles. La valeur de la norme doit être la plus petite possible.
- La courbe ROC (*Relative Operating Characteristic*) permet d'analyser la capacité d'un système à discriminer entre l'occurrence ou la non-occurrence d'un événement donné. Ici, l'événement est le dépassement du quantile 90 de débit (valeur où 90 % des débits se situent en dessous). L'aire sous la courbe ROC (AUC) doit être proche de 1 pour une bonne prévision.

3. Modèle hydrologique GRP et données

Le modèle hydrologique utilisé est le modèle GRP ([6], [7]), largement utilisé par les services de prévision des crues au sein du réseau national de vigilance « Vigicrues », avec trois paramètres de

calage. Le modèle opérationnel inclut une étape d’assimilation du dernier débit observé ainsi qu’une exploitation de l’erreur du modèle. Ces deux étapes sont résumées sous le nom d’« assimilation de données » par la suite. Dans l’étude conduite ici, le modèle GRP est utilisé selon deux configurations : avec cette assimilation de données (modèle utilisé en PRÉVISION) et sans (modèle utilisé en SIMULATION).

Le modèle a été préalablement calé sur les bassins de l’Odet ([3]). Les données utilisées pour l’étude sont de natures diverses :

- la pluie ANTILOPE : lame d’eau qui combine la pluie radar et relevée par les pluviomètres ;
- les prévisions de pluie RR3 : prévisions déterministe expertisées au pas de temps tri-horaire ;
- les débits observés issus de l’hydroportail aux stations Tréodet, Kerjean et Ty-Planche.

4. La calibration statistique par « *Quantile Regression Forests* »

Les approches de prévision d’ensemble ont pour objectif de représenter les incertitudes de prévision. Cependant, celles-ci sont nombreuses et de ce fait rarement complètement couvertes par les modèles et techniques mises en place pour générer une prévision d’ensemble. Le post-traitement des ensembles générés (ensembles « bruts »), appelé encore « calibration statistique », est donc souvent indispensable avant une utilisation opérationnelle d’une prévision d’ensemble.

Dans cette étude, le post-traitement des prévisions est réalisé grâce à la méthode *Quantile Regression Forests*, appelée encore méthode QRF. C’est une méthode d’apprentissage statistique. Elle est détaillée dans Taillardat et al. [2], Zamo et al. [8]. Le principe de la méthode QRF est l’agrégation des observations selon leur prévision, cette dernière étant résumée par différents prédicteurs. Elle consiste en la construction d’une forêt aléatoire constituée d’un ensemble d’arbres de décisions binaires, chacun de ces arbres étant construit à partir d’un ensemble de prédicteurs. Les prédicteurs peuvent être naturellement des statistiques relatives à l’ensemble brut à calibrer (ici, les débits horaires), mais peuvent également être indépendants des caractéristiques de l’ensemble brut. Dans cette étude, les prédicteurs utilisés sont la moyenne et l’écart-type de l’ensemble brut, le mois et le moment de la journée de la prévision à calibrer, le débit et le gradient du débit mesurés au temps de base, la pluie mesurée sur le bassin versant avant le temps de base et la pluie prévue.

La période sur laquelle est optimisée la forêt aléatoire est appelée période d’apprentissage. Dans un second temps, il est nécessaire d’évaluer la performance de cette forêt dans un contexte opérationnel : on travaille alors sur une période de validation. Dans cette étude, les périodes d’apprentissage et de validation sont définies comme suit :

- Les mois d’été (juillet, août et septembre) sont exclus dus à la faible occurrence de pluies/crués pendant cette période en France.
- L’apprentissage est réalisé sur une période de 3 ans, du 1^{er} octobre 2011 au 30 juin 2014.
- La validation est réalisée sur une période de 7 ans, du 1^{er} janvier 2010 au 30 juin 2011 et du 1^{er} octobre 2014 au 31 décembre 2019.

5. Six expériences différentes

Trois configurations pour l’apprentissage et la validation sont étudiées :

- **Configuration $A_{ANT}V_{ANT}$** : le modèle GRP est forcé par la pluie ANTILOPE sur les périodes d’apprentissage et de validation. Cette configuration, non opérationnelle, est testée pour évaluer quels sont les scores de référence avec une pluie « parfaite ».
- **Configuration $A_{RR3}V_{RR3}$** : le modèle GRP est forcé par la pluie prévue RR3 sur les périodes d’apprentissage et de validation. C’est la meilleure configuration opérationnelle que l’on peut mettre en place, la nature de l’erreur reste la même entre apprentissage et validation.

- **Configuration $A_{ANT}V_{RR3}$** : le modèle GRP est forcé par la pluie ANTILOPE sur la période d’apprentissage, et par la pluie prévue RR3 sur la période de validation. Ici, la nature de l’erreur n’est pas la même sur la période d’apprentissage et sur la période opérationnelle. L’intérêt est d’évaluer si cela induit une dégradation importante par rapport à la configuration opérationnelle $A_{RR3}V_{RR3}$, plus complexe à mettre en œuvre en opérationnel.

Pour chacune de ces trois configurations, le code GRP est utilisé en PREVISION et en SIMULATION, ce qui fait en tout six expériences différentes.

6. Caractéristiques des ensembles hydrologiques bruts

Les ensembles hydrologiques bruts sont générés par perturbation des trois paramètres de calage du modèle GRP. Les bornes de variation des paramètres sont définies par un ensemble de calages successifs du modèle sur des périodes de 2 et 3 ans entre 2007 et 2020. Sur chaque sous-bassin versant, l’ensemble brut est constitué de 100 membres. Quatre ensembles bruts sont générés à chaque station :

- **raw-PRE-ANT** : code GRP en PREVISION, forçage ANTILOPE après le temps de base ;
- **raw-SIM-ANT** : code GRP en SIMULATION, forçage ANTILOPE après le temps de base ;
- **raw-PRE-RR3** : code GRP en PREVISION, forçage prévisions RR3 après le temps de base ;
- **raw-SIM-RR3** : code GRP en SIMULATION, forçage prévisions RR3 après le temps de base.

On notera que seuls les ensembles **raw-PRE-RR3** et **raw-SIM-RR3** reproduisent des conditions retrouvées en opérationnel. Les ensembles **raw-PRE-ANT** et **raw-SIM-ANT** servent de référence. La figure 2 présente les scores par échéance de prévision des quatre ensembles hydrologiques bruts générés à Tréodet sur la période 2010-2019.

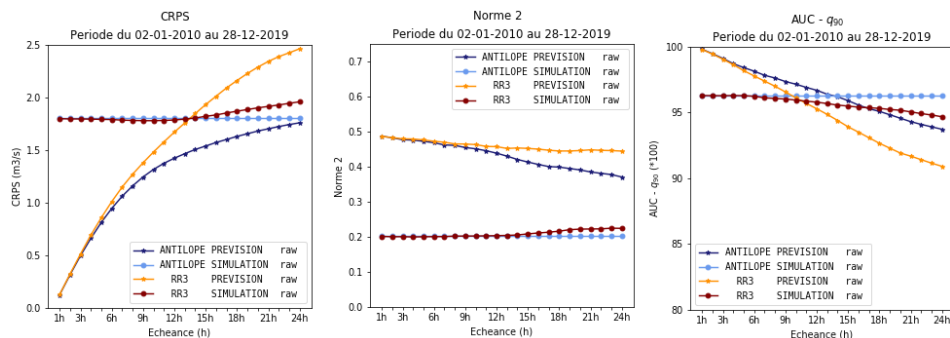


Figure 2: CRPS, norme 2 et aire AUC pour l’ensemble brut généré à Tréodet

L’analyse de ces graphiques met en évidence les éléments suivants :

- Pour chaque score étudié, deux groupes d’ensembles présentent des scores d’évolution semblable avec les échéances selon que le code GRP est utilisé en PREVISION ou en SIMULATION.
- Pour chacun de ces deux types d’utilisation du modèle GRP, les scores sont analogues aux courtes échéances de prévision avec ANTILOPE et RR3 comme forçage. Cela est lié au temps de réponse du bassin versant. À partir d’une certaine échéance, les scores sont dégradés avec RR3 par rapport à ANTILOPE.
- Aux courtes échéances, l’utilisation du modèle en PREVISION fournit les meilleurs scores CRPS et AUC. À longue échéance en revanche, l’utilisation du modèle en SIMULATION est préférable pour ces scores.
- Pour toutes les échéances de prévision, la fiabilité est toujours significativement meilleure lorsqu’on utilise le modèle GRP en SIMULATION.

Ces deux derniers points confirment l’intérêt d’appliquer la calibration QRF aux deux types d’utilisation du code afin de mettre en évidence la meilleure stratégie globale à retenir.

7. Caractéristiques des ensembles calibrés et recommandations

La figure 3 présente les scores des ensembles bruts et calibrés à Tréodet pour les expériences opérationnelles $A_{RR3}V_{RR3}$ et $A_{ANT}V_{RR3}$. Les ensembles sont les suivants :

- **qrf-PRE-RR3** est obtenu par calibration statistique de **raw-PRE-RR3** ;
- **qrf-SIM-RR3** est obtenu par calibration statistique de **raw-SIM-RR3** ;
- **qrf-PRE-ANT/RR3** est construit par calibration de **raw-PRE-RR3** (forçage RR3) par la forêt aléatoire optimisée pour l’ensemble brut **raw-PRE-ANT** (apprentissage ANTILOPE) ;
- **qrf-SIM-ANT/RR3** est construit par calibration de **raw-SIM-RR3** (forçage RR3) par la forêt aléatoire optimisée pour l’ensemble brut **raw-SIM-ANT** (apprentissage ANTILOPE).

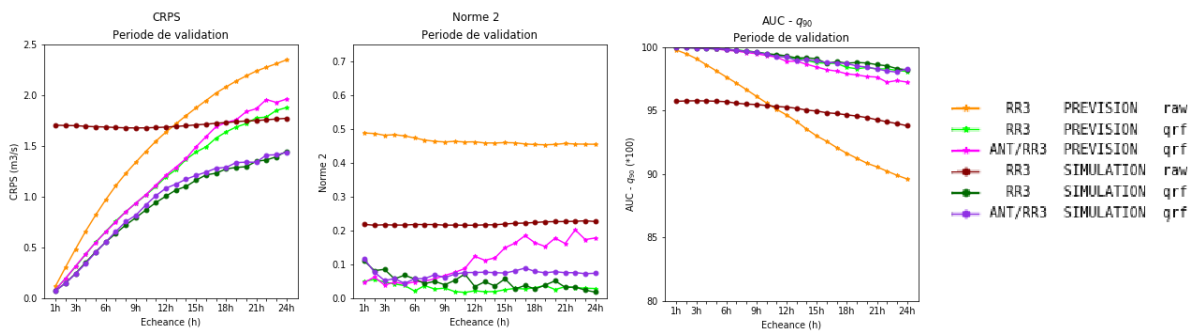


Figure 3: CRPS, norme 2 et aire AUC pour les ensembles bruts et calibrés à Tréodet

Les conclusions concernant l’expérience $A_{RR3}V_{RR3}$ sont les suivantes :

- la calibration statistique QRF améliore toujours les scores des ensembles bruts ;
- l’ensemble **qrf-SIM-RR3** présente les meilleurs CRPS parmi tous les ensembles calibrés ;
- la fiabilité et la discrimination des ensembles **qrf-SIM-RR3** et **qrf-PRE-RR3** sont analogues.

Ainsi, pour le bassin versant étudié ici, il est recommandé de construire **un ensemble brut avec le code GRP utilisé en SIMULATION**.

En ce qui concerne l’expérience $A_{ANT}V_{RR3}$, nous pouvons émettre les conclusions suivantes :

- les performances des ensembles calibrés **qrf-PRE-RR3** et **qrf-PRE-ANT/RR3** (respectivement des ensembles **qrf-SIM-RR3** et **qrf-SIM-ANT/RR3**) sont proches pour le CRPS et AUC ;
- la fiabilité est un peu dégradée dans l’expérience $A_{ANT}V_{RR3}$ (ensembles **qrf-PRE-ANT/RR3** et **qrf-SIM-ANT/RR3**).

Ainsi, l’utilisation d’une forêt aléatoire construite avec un apprentissage avec ANTILOPE dégrade surtout la fiabilité des ensembles ainsi calibrés en période opérationnelle. Les autres scores sont légèrement impactés mais pas de manière notable. **Il semble envisageable d’utiliser cette stratégie pour une application opérationnelle.**

8. REFERENCES

- [1] Jolliffe, Ian T., et David B. Stephenson. *Forecast Verification: A Practitioner’s Guide in Atmospheric Science*. Chichester: Wiley, 2003.

- [2] Taillardat, Maxime, Anne-Laure Fougères, Philippe Naveau, et Olivier Mestre. « Forest-Based and Semiparametric Methods for the Postprocessing of Rainfall Ensemble Forecasting ». *Weather and Forecasting* 34, n° 3 (juin 2019): 617-34. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0149.1>.
- [3] Tiberi-Wadier, Anne-Laure. « Prévisions d'ensemble hydrologiques et hydrauliques pour la vigilance crues », 2021.
- [4] Tiberi-Wadier, Anne-Laure, Nicole Goutal, Sophie Ricci, Philippe Sergent, Maxime Taillardat, François Bouttier, et Céline Monteil. « Strategies for Hydrologic Ensemble Generation and Calibration: On the Merits of Using Model-Based Predictors ». *Journal of Hydrology* 599 (août 2021): 126233. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126233>.
- [5] Tiberi-Wadier, Anne-Laure, Maxime Taillardat, Nicole Goutal, Sophie Ricci, Philippe Sergent, François Bouttier, et Etienne Le Pape. « Vers une approche ensembliste de la prévision des crues ». In *De la prévision des crues à la gestion de crise*. Avignon, France: SHF, 2018. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03250002>.
- [6] Viatgé, Julie, Lionel Berthet, Renaud Marty, François Bourgin, Olivier Piotte, Maria-Helena Ramos, et Charles Perrin. « Vers une production en temps réel d'intervalles prédictifs associés aux prévisions de crue dans Vigicrues en France ». *La Houille Blanche* 105, n° 2 (1 avril 2019): 63-71. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019016>.
- [7] Viatgé, Julie, Thomas Pinna, Andrea Ficchi, Charles Perrin, David Dorchies, Léa Garandeau, et François Tilmant. « Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prévision des crues GRP ». *La Houille Blanche* 105, n° 2 (1 avril 2019): 72-80. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019017>.
- [8] Zamo, M., O. Mestre, P. Arbogast, et O. Pannekoucke. « A benchmark of statistical regression methods for short-term forecasting of photovoltaic electricity production. Part II: Probabilistic forecast of daily production ». *Solar Energy* 105 (2014): 804-16. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.026>.

ESTIMATION BAYESIENNE D’UN MODELE HYDRODYNAMIQUE 1D D’UNE RIVIERE INFLUENCEE PAR LA MAREE : APPLICATION A LA SEINE AVAL, FRANCE

*Bayesian estimation of a 1D hydrodynamic model in a tidal river: Application to
the Lower Seine River, France*

Auteurs : MENDEZ RIOS Felipe¹, LE COZ Jérôme², RENARD Benjamin³, TERRAZ
Théophile⁴

¹ INRAE, UR RiverLy, centre Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, 5 rue de la Doua CS
20244, 69625 Villeurbanne, France, e-mail: felipe-alberto.mendez-rios@inrae.fr

² INRAE, UR RiverLy, centre Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, 5 rue de la Doua CS
20244, 69625 Villeurbanne, France, e-mail: jerome.lecoz@inrae.fr

³ INRAE, UMR RECOVER, centre Provence-Alpes-Côte d’Azur, 3275 Route de Cézanne,
CS40061, 13182 Aix en Provence, France, e-mail: benjamin.renard@inrae.fr

⁴ INRAE, UR RiverLy, centre Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, 5 rue de la Doua CS
20244, 69625 Villeurbanne, France, e-mail: theophile.terraz@inrae.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clés:

Calage, modèle hydrodynamique 1D, niveau d’eau, débit, incertitude, coefficient de rugosité, marée.

1. RÉSUMÉ

La surveillance du niveau d’eau ainsi que du débit au niveau des stations hydrométriques est essentielle pour la détection et la prévision des crues et des inondations. La mesure en continu est possible pour le niveau d’eau, alors que le débit doit être calculé et non mesuré directement. C’est pourquoi plusieurs méthodes ont été développées comme la mesure de vitesse en surface [1] ou les courbes de tarages [2][3]. Néanmoins, les stations hydrométriques peuvent être influencées par la marée, ce qui provoque un remous variable en régime transitoire. En régime quasi-permanent, le remous variable est gérable par une relation hauteur-dénivelée-débit [4] basée sur la formule de Manning-Strickler et des mesures du niveau d’eau et de la pente de la ligne d’eau. Mais en régime fortement transitoire lorsque l’effet de la marée est prononcé, ce type de relation ainsi que des variantes se sont avérées peu performantes [5]. Pour modéliser la dynamique complexe de l’écoulement, y compris lors de l’inversion du flux, une approche via l’estimation bayésienne d’un modèle hydrodynamique 1D est proposée. Ici, l’estimation d’un modèle s’entend comme l’estimation de la distribution a posteriori des paramètres et du modèle d’erreur structurelle.

Afin d’établir le modèle hydrodynamique 1D, la géométrie des sections en travers, le coefficient de résistance hydraulique par tronçon, le ou les débits en amont et le niveau d’eau en aval sont nécessaires. Dans la modélisation hydrodynamique, la résistance hydraulique (via un jeu de coefficients de Strickler) est le principal paramètre à caler [6], mais le calage manuel est rendu difficile par les changements spatiaux de la rugosité, et par la nature transitoire de l’écoulement. En outre, la compréhension et la quantification des incertitudes associées aux données et au modèle constituent une étape importante du processus de calage. Par conséquent, un calage automatique des coefficients de rugosité est proposé via l’inférence bayésienne.

En termes d’outils numériques, le code hydrodynamique 1D utilisé ici est Mage [7], développé par INRAE, qui résout les équations 1D de Saint-Venant pour les écoulements fluviaux et transitoires. Toutefois, la méthode proposée n’est pas spécifique d’un code de simulation donné : elle peut s’appliquer à tout code hydrodynamique 1D usuel. Le calage bayésien se réalise via le logiciel *BaM!* [8] (*Bayesian modeling* : <https://github.com/BaM-tools>) qui permet de spécifier des informations a priori sur les paramètres d’un modèle (ici les coefficients de résistance hydraulique) pour ensuite les estimer avec leur incertitude associée, en utilisant des observations elles-mêmes munies de leur incertitude (ici non seulement des niveaux d’eau, mais aussi les campagnes de jaugeages).

2. APPLICATION

La Seine aval en France est prise comme cas d’application, car il s’agit d’un modèle hydraulique simple (un unique tronçon sans débordement ni casier hydraulique) avec un fort effet de marée, et des campagnes de jaugeage sur plusieurs cycles de marée et des limnigrammes disponibles [9] [10]. Quinze marégraphes sont présents sur le domaine de simulation du modèle d’une longueur totale de 138 kilomètres entre la station de Poses (amont) et l’aval de celle de Saint-Léonard [11].

Un seul coefficient de résistance hydraulique est défini sur le bief en amont de la confluence avec l’Eure alors que différents coefficients constants sur 11 tronçons sont définis en aval de la confluence. Les séries temporelles de débit de la Seine à Poses et de l’Eure, le seul affluent significatif, sont spécifiées comme conditions aux limites amont. La condition limite aval est la série temporelle des hauteurs d’eau de la Seine à l’aval de Saint-Léonard près de la partie orientale de la Baie de Seine (environ à 3 km), reflétant le signal de la marée. Le calage se réalise à partir d’observations du niveau d’eau à Elbeuf, Rouen et Saint-Léonard, ainsi que la campagne de jaugeages ADCP faite par l’Université de Rouen [10] en mars à Rouen pendant un cycle de marée. Les mesures de niveau d’eau sont plus fréquentes que celles de débit, il faut donc les sous-échantillonner pour éviter qu’elles aient trop de poids dans l’inférence bayésienne pour le calage.

La distribution a priori de chaque coefficient de Strickler par tronçon est définie comme log-normale avec un intervalle de probabilité à 95% égal à [33 ; 49] (paramètres $\ln(40.5)$ et 0.1), pour couvrir les valeurs typiquement attendues pour ce type de cours d’eau. L’erreur structurelle du modèle est supposée indépendante d’une observation (niveau d’eau ou jaugeage) à l’autre, gaussienne, de moyenne nulle et d’écart-type inconnu. Cet écart-type sera estimé en même temps que les coefficients de Strickler.

L’estimation bayésienne fournit alors les distributions a posteriori des 12 coefficients de Strickler du modèle, représentées par un grand nombre d’échantillons générés via un algorithme de Monte Carlo par Chaînes de Markov (MCMC). Ces échantillons sont utilisés pour non seulement identifier les coefficients "maxpost" (maximisant la densité a posteriori) considérés comme optimaux, mais aussi quantifier et propager leur incertitude. Par la suite, une propagation s’effectue afin d’estimer les séries temporelles du niveau d’eau et du débit de toutes les sections en travers du modèle avec l’incertitude associée.

3. RÉSULTATS

L’étape de calage permet d’estimer la distribution de probabilité jointe, ainsi que le vecteur de paramètres optimal. Il faut remarquer que lors le cadre de l’inférence bayésienne, le but est plutôt d’identifier la distribution au lieu d’une valeur optimale. Dans la Figure 1, on constate que certaines distributions a posteriori restent très similaires à l’a priori, notamment les tronçons 1, 4, 5, 6, 9 et 10, ce

qui veut dire que les observations ne fournissent pas plus d’information que les connaissances a priori. En revanche, la plupart des distributions des tronçons qui disposent d’observations pour le calage ont tendance à être mieux identifiées.

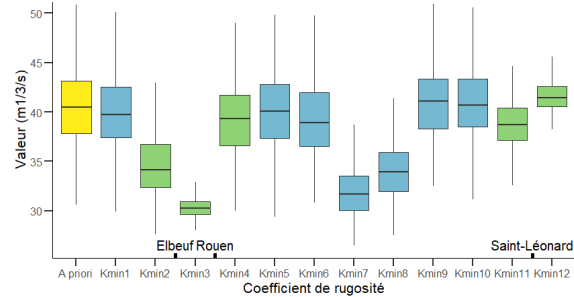


Figure 1. Boîtes à moustaches des distributions a priori (en jaune) et a posteriori (en bleu, ou en vert si le tronçon disposait d’observations pour le calage) des coefficients de Strickler des 12 tronçons du modèle hydrodynamique 1D de la Seine aval.

L’étape de prédiction consiste à utiliser le modèle après calage pour réaliser des calculs de hauteur et de débit avec leurs incertitudes sur toutes les sections transversales définies dans le modèle. La Figure 2 permet de comparer les simulations aux observations utilisées pour le calage avec l’incertitude calculée à 8% pour un intervalle de confiance de 95%.

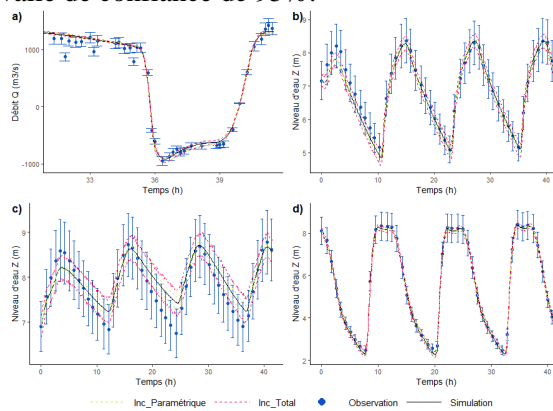


Figure 2 : Résultats du calage du modèle 1D de la Seine aval : a) Hydrogramme à Rouen et limnigrammes à b) Rouen, c) Elbeuf et d) Saint-Léonard simulés avec leurs incertitudes à 95%

L’incertitude des débits, exprimée comme l’écart-type moyen de la distribution sous-jacente (quelle que soit cette distribution), est de l’ordre de $13 \text{ m}^3/\text{s}$, pour une amplitude totale de variation des débits de -1000 à $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ environ, mais on observe des écarts plus importants pour certains jaugeages. En termes de niveau d’eau, ce même écart-type varie d’environ 0.06 m à Saint-Léonard jusqu’à 0.12 m à Elbeuf, où le modèle semble sous-estimer l’amplitude du signal de marée. Les observations avec leurs incertitudes ont tendance à rester à l’intérieur des enveloppes d’incertitude de la simulation, ce qui suggère une bonne performance des résultats de la modélisation pour enregistrer la dynamique de la marée.

4. CONCLUSIONS

La méthode de calage bayésienne se présente comme une solution avec un potentiel intéressant pour le calage automatique d’un modèle hydrodynamique 1D en écoulement transitoire prenant comme données de calage des mesures de niveau d’eau et de débit avec leurs incertitudes. De plus, cette approche permet de réaliser des prédictions avec incertitudes (dues au calage) quantifiées, notamment en contexte de prévision puisque l’information dont le modèle a besoin (débits amont, niveau aval) peut être prévue. Le cas d’application de la méthode a été les stations influencées par la marée,

toutefois la méthode pourra être étendue à d’autres secteurs, tout tronçon surveillé en prévision des crues, et même tout secteur modélisé en 1D. En conclusion, cette étude a pour but de contribuer à l’amélioration de la prévision des inondations et des systèmes d’alerte, et à la prise en compte des incertitudes associées.

5. PERSPECTIVES

Nous prévoyons d’étudier la performance de la méthode en testant d’autres configurations de calage, avec d’autres campagnes de jaugeages ADCP à d’autres stations hydrométriques, notamment réaliser le calage en utilisant seulement des mesures du niveau d’eau pour mettre en évidence l’importance des jaugeages pour le calage du modèle en hauteur et en débit. L’incertitude des débits mesurés par ADCP sera précisée en appliquant le logiciel QRevInt à chaque jaugeage. Enfin, le temps de calcul de l’étape de calage reste encore à optimiser, notamment en simplifiant le modèle utilisé à cette étape : à ce stade, le calage prend de l’ordre d’un jour; par contre, la prédiction de séries pendant la période d’analyse (d’environ deux jours) ne prend que quelques minutes. Un plan d’expérience numérique est envisagé pour évaluer et optimiser la performance de la méthode, en vue de son application opérationnelle.

6. REFERENCES

- [1] DRAMAIS, D. (2011). Utilisation des mesures sans contact pour quantifier le débit des rivières torrentielles. Colloque de la Société Hydrotechnique de France, “Eaux en montagne”. France
- [2] RANTZ, S. et al. (1982). Measurement of Stage and Discharge. Paper 2175. Measurement and Computation of Streamflow : USGS, Water Supply, 1, 373 p.
- [3] LE COZ, J. et al. (2013). Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin, La Houille Blanche, n°6, 31-41.
- [4] MANSANAREZ, V. et al. (2017). BaRatin-SFD, analyse bayésienne des courbes de tarage à double échelle et de leurs incertitudes. La Houille Blanche, n°5, 22-28.
- [5] PERRET, E. et al. (2021). Courbes de tarage dynamiques – végétation aquatique et influence de la marée (Action HYDROM A1 – INRAE 2021). Rapport technique convention SCHAPI/INRAE, 43 pages.
- [6] MARA, D. et al. (2021). Calibration of river hydrodynamic models: Analysis from the dynamic component in roughness coefficients. Journal of Hydrology 598.
- [7] FAURE, J. (2022). MAGE : Résolution des équations de Barré de Saint-Venant 1D en réseaux complexes. Documentation théorique et notice d’emploi. INRAE, France.
- [8] RENARD, B. (2017). BaM ! (Bayesian Modeling) : Un code de calcul pour l’estimation d’un modèle quelconque et son utilisation en prédiction. irstea. pp.90.
- [9] PINEY, S. et al. (2018). Mesures de débit en estuaire : l’exemple de la Seine Résultats et enseignements. La houille Blanche, n°5-6, 43-51.
- [10] DRUINE, F. (2018). Flux sédimentaire en estuaire de Seine : quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesure de turbidité (réseau SYNAPSES), Thèse de doctorat, Normandie Université.
- [11] BARGOT, P. (2016). Calage de modèle hydraulique 1D d’un estuaire: étude de la stabilité numérique de la solution : Application au modèle Seine aval, Rapport technique du CEREMA.

7. REMERCIEMENTS

Un remerciement pour les campagnes de jaugeage réalisées par l’université de Rouen (Flavie Druine, Julien Deloffre) et l’Unité d’Hydrométrie Seine aval-Côtiers Normands (DREAL Normandie), le modèle 1D de la Seine aval fourni par le Service de Prévision des Crues Seine aval-Côtiers Normands (DREAL Normandie, Stéphane Piney, Marie Morin), et les travaux précédents réalisés par Emeline Perret sur les courbes de tarage en rivière influencée par la marée, dans le cadre de la convention annuelle DGPR-INRAE SRNH, Prévision des inondations, volet Hydrométrie.

Evolution de l’outil d’aide à la vigilance BHYCHOCO pour répondre aux besoins de l’appui à la VPI de Météo-France et future vigilance crue surfacique

Evolution of the BHYCHOCO vigilance tool to improve the rain-flood vigilance indicator of Meteo-France

Auteurs : DUSSUCHALE Antoine^{1*}, LABORDA Yann¹, MANNESSIEZ Fabrice¹, VALANTIN Pierre-Yves¹

* *auteur correspondant*

¹Pôle Hydrométrie et Prévision des Crues Grand Delta, DREAL Auvergne-Rhône Alpes, 89 rue Weber, 30907 Nimes Cedex02 ;

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Vigilance, Abaques, Pluies, Prévision,

1. Résumé

Afin d’estimer la vigilance sur les bassins présentant une réponse pluie/débit simple sur son territoire, le Service de Prévision des Crues Grand Delta (SPC GD) utilise et consolide depuis des années la logique d’abaque pluie-vigilance. Ces abaques sont construits empiriquement en mettant en relation la quantité de pluies observée au niveau du bassin versant et le niveau de vigilance observé aux stations de ce bassin. Chaque nouvel épisode de crue vient enrichir la loi mise en place, la confirmant ou la faisant évoluer. Ces lois permettent d’envisager un niveau de vigilance probable pour les 24 prochaines heures en fonction d’une quantité de pluies prévues et du type de précipitations : orageuses (concentrées sur 6h environ) ou stratiformes (étalées sur 24h), changeant ainsi la sensibilité de l’abaque.

Au fur et à mesure de son exploitation opérationnelle, cette logique d’abaque a été améliorée. Dans un premier temps, un indice des pluies antérieures est venu moduler les sorties des abaques afin de traduire la différence de réaction attendue pour une même quantité de pluies entre un sol humide et un sol sec. Ce paramètre a peu à peu été remplacé par le paramètre d’humidité (HU) correspondant à l’humidité de la couche racinaire de chaîne SIM de Météo France. Cette adaptation aux nouveaux paramètres a pu faire émerger une relation entre le HU et la lame d’eau à l’origine d’une crue ayant atteint un certain niveau de vigilance. Ainsi, il est possible au regard de la valeur de ce HU quotidien et des seuils de l’abaque, de déterminer une quantité de pluies nécessaires à l’échelle d’un bassin versant surveillé et jaugé pour qu’il atteigne tel ou tel niveau de vigilance.

Fort de cet outil développé sur ses bassins jaugés, le SPC GD a travaillé à une régionalisation de ces abaques et en a tiré des données utiles notamment pour assister Météo-France dans une meilleure détermination de leur vigilance pluie-inondation. Le principe étant que toutes choses égales par ailleurs, les abaques s’appliquant à des secteurs jaugés de faible surface de bassin versant (de l’ordre de 100 km² pour les plus petits), on considère qu’il reste applicable aux bassins voisins non jaugés de même nature hydromorphologique et de même régime pluvial. En enlevant les bassins à composante karstique, ceux n’ayant pas une réponse pluie/débit directe et ceux avec une influence nivale, c’est tout de même plus de la moitié voire 3/4 du territoire du SPC GD sur lequel cette logique est applicable.

A l'instar de ce que peut proposer le NWS américain avec la méthode de « Flash-Flood Guidance » qui modélise quotidiennement divers scénarios météo afin d'envisager l'ampleur des réactions hydrologiques attendues, cette méthodologie permet de par son concept simplifié, une mise en œuvre et une régionalisation facilitée.

Il est désormais possible quotidiennement, à partir des valeurs de HU, de connaître bassin par bassin, la quantité de pluies nécessaire pour que des désordres hydrologiques (de type Jaune ou Orange) soit possiblement observés. Depuis l'automne 2020, le SPC GD comme ces voisins méditerranéens (ME et MO), envoient à Météo-France leurs cartes de sensibilité hydrologique, afin que l'institution affine sa vigilance pluie inondation sur les départements couverts par la DIRSE en modulant les seuils de pluies classiques lorsque ceux expertisés par le SPC s'en éloignent fortement.

L'ensemble de ces travaux permet de consolider la base technique pour une réflexion d'une vigilance crue qui pourraient s'élargir sous forme surfacique à des ensembles de sous bassins et cours d'eau actuellement non couverts par le système de la vigilance crue.

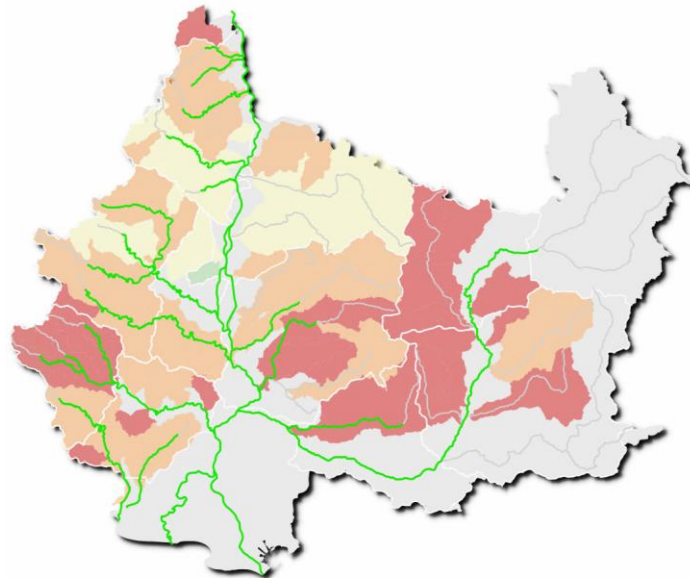


Figure 1: Carte des bassins couverts par la méthodologie

2. Cas exemples

ndlr : il est prévu pour la publication complète d'interroger la DIRSE de Météo France afin de recueillir des exemples concrets d'utilisation de ce produit de leur part

Automne 2019 sur l'Ouvèze Provençale

Au cours de l'automne 2019, l'enchaînement de plusieurs évènements de moyenne ampleur a conduit les bassins de la rive gauche du Rhône à un niveau de saturation très marqué. Sur l'Ouvèze Provençale, impactée six fois au cours de cette période, l'évolution de l'humidité du sol a engendré, pour un cumul pluviométrique très proche, trois crues d'ampleurs bien différentes, atteignant des niveaux de vigilance s'étalant du niveau vert pour la première jusqu'à s'approcher des niveaux orange pour la dernière. On note que le cumul observé pour les 3 épisodes correspond au seuil de mise en AP par la DIRSE Météo

France pour la zone concernée. L'article reviendra donc sur l'intérêt du partage de ce type d'informations entre hydrologue et météorologue afin d'ajuster au mieux les vigilances émises.

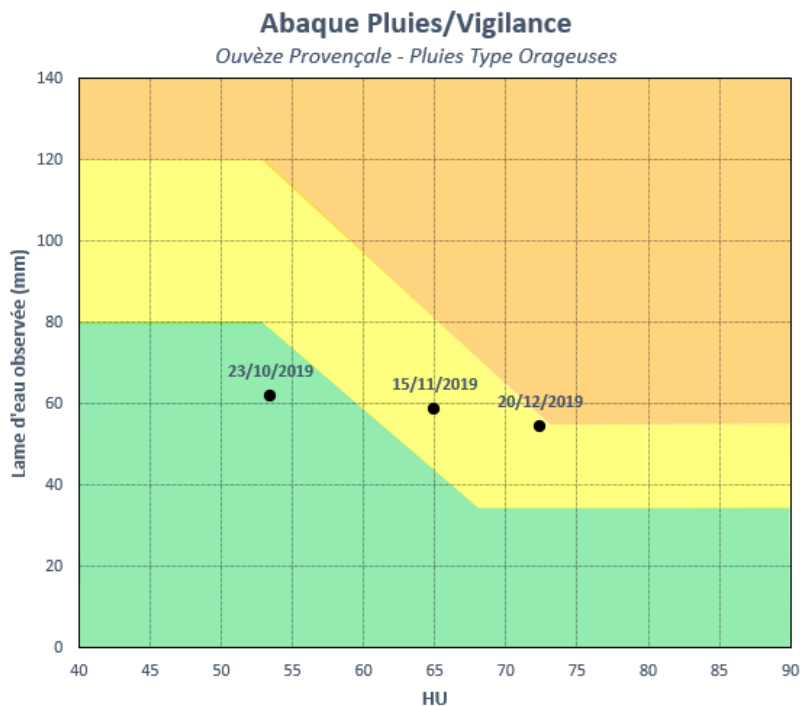


Figure 2 - Evolution de la sensibilité hydrologique au cours de l'automne 2019 –
Ouvèze Provençale

3. REFERENCES

- [1] Amélioration des outils de vigilance hydrologique opérationnelle – 2019 (Thébault Cyril, rapport de stage d'alternance au SPCGD, DREAL ARA / Polytech Nice Sophia Antipolis)
- [2] Bilan et synthèse méthodologique de l'expérimentation sur l'Arc-Med – 20210321 (Laborda Yann, & all, publication interne réseau SCHAPI/SPC)

UN OUTIL DE PILOTAGE DES PRÉVISIONS EXPERTISÉES POUR LE PRÉVISIONNISTE DE CRUES

A management tool for expert flood forecasts

Auteurs : OLLIVIER Dominique^{1*}, HAFKAMP Axèl²

¹²DREAL Nouvelle Aquitaine, cité administrative, rue Jules Ferry, BP55 33090 Bordeaux Cedex, France

¹e-mail: dominique.ollivier@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session : 1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs : géomatique, système d'information, base de données, développement informatique, webmapping, prévision des crues

1. Contexte et objectifs

Le Service de Prévision des Crues Gironde – Adour – Dordogne (SPC GAD) assure une mission de vigilance et de prévision des crues sur l'ensemble de ses tronçons réglementaires.

Cette mission se matérialise par la publication sur Vigicrues (www.vigicrues.gouv.fr), à minima biquotidienne et pour chaque tronçon, d'un niveau de risque de crues (vert – jaune – orange – rouge) sur les prochaines 24h. Au-delà du risque de premiers débordements, des prévisions expertisées sont aussi produites aux stations réglementaires et affichées sur Vigicrues, sous forme textuelle dans le bulletin ou graphiquement sur les stations sous influence maritime.

Les prévisionnistes du SPC GAD élaborent leurs prévisions graphiques grâce à l'outil national EAO. En parallèle, ils peuvent suivre la situation hydrométéorologique sur un superviseur national.

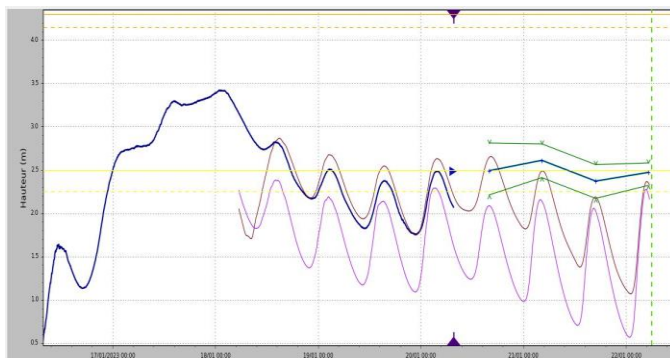


Figure 1 : outil EAO (Expertise Assistée par Ordinateur)

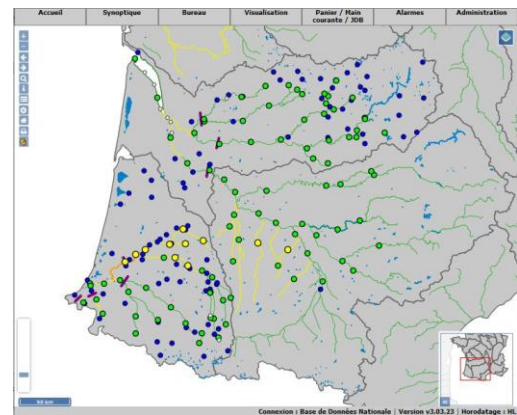


Figure 2 : superviseur national

Dans l'optique de généralisation de la publication graphique à toutes les stations, une réflexion dans le service a mis en évidence le besoin d'un moyen de pilotage des prévisions publiées, en particulier lors de situations de crues généralisées. En effet, les horizons de publication résultant des expertises varient selon les stations, ce qui induit des fréquences d'actualisation diverses entre deux bulletins. À cela s'ajoute, à des fins de mise à jour, la nécessité d'une détection en temps réel des écarts éventuels entre observations et prévisions.

Cet article présente la construction de ce nouvel outil de suivi intégré à la chaîne opérationnelle.

Son périmètre concerne :

- Le fonctionnement temps réel, considérant les prévisions déjà produites, en particulier celles s’écartant des observations, et les prévisions restant à produire
- Les informations ayant permis de construire l’expertise : modèles et leurs paramètres d’entrées
- L’envoi de mails aux services départementaux de gestion de crise après nouvelles publications
- L’évaluation des prévisions après chaque événement

2. Travaux mis en oeuvre

La solution technique retenue exploite différents champs de la géomatique. Elle repose sur la conception d’une base de données relationnelle avec extension spatiale, sur laquelle s’interface un site web ainsi qu’une carte dynamique. Ces deux derniers éléments traitent en continu les données en base pour fournir au prévisionniste une information en temps réel. En complément, une autre application client de la base permet la fourniture d’indicateurs de qualité sous forme graphique.

Base de données

Au cœur de ce nouvel outil, est conçue une nouvelle structure de données matérialisée par une base PostgreSQL avec extension spatiale PostGIS. Celle-ci est alimentée par des scripts en programme python, puisant en permanence dans :

- Les fichiers de sortie d’EAO contenant les prévisions et leurs métadonnées
- Les fichiers de modèles disponibles au moment de l’expertise avec leurs données d’entrées
- Les flux Vigicrues référençant en temps réel les couleurs de vigilance des tronçons
- Les webservice Hub’Eau fournissant les observations et correspondant aux prévisions

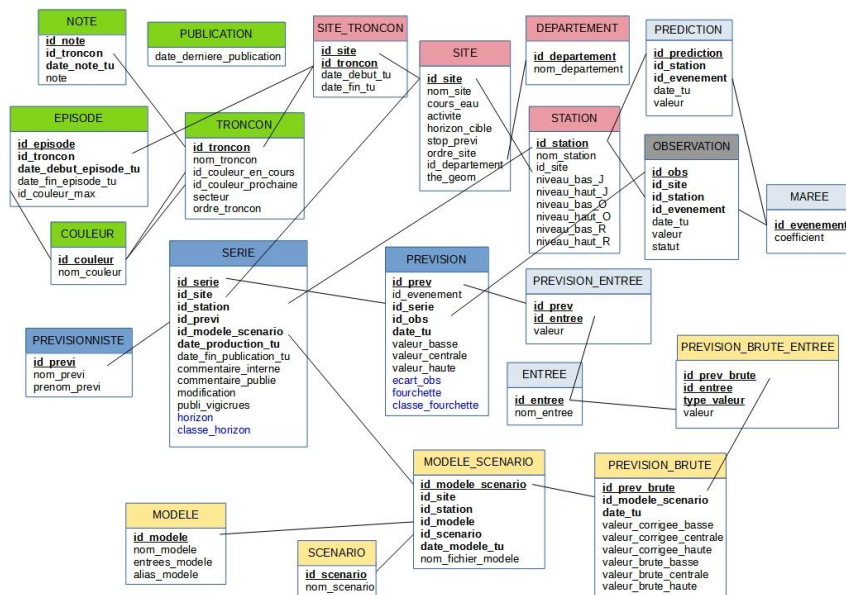


Figure 3 : modèle conceptuel de données de la base de données de prévisions expertisées du SPC GAD

En parallèle de l’alimentation de la base, un script programmé aussi en python interroge les données en permanence pour envoyer un mail d’information aux services départementaux de gestion de crise concernés par une nouvelle publication.

Tableau de bord de pilotage des productions

Ensuite, un site web dynamique, programmé en PHP, exploite les informations de la base via des requêtes SQL. Ce tableau de pilotage des expertises présente en temps réel, sur chacune des stations :

- Les couleurs de vigilance passée et à venir sur le tronçon concerné
- Un indicateur d’absence de prévisions publiées au-delà de la vigilance jaune sur le tronçon
- Un indicateur d’écart de l’observation hors de la fourchette de prévisions
- Un indicateur d’horizon restant sur les prévisions encore publiées, par pas de 6h
- L’âge des prévisions depuis leur moment de production
- La prévision maximale encore publiée (ou simplement expertisée) et sa fourchette d’incertitude
- Les métadonnées associées à la série de prévisions (modèle et scénario source, commentaire)

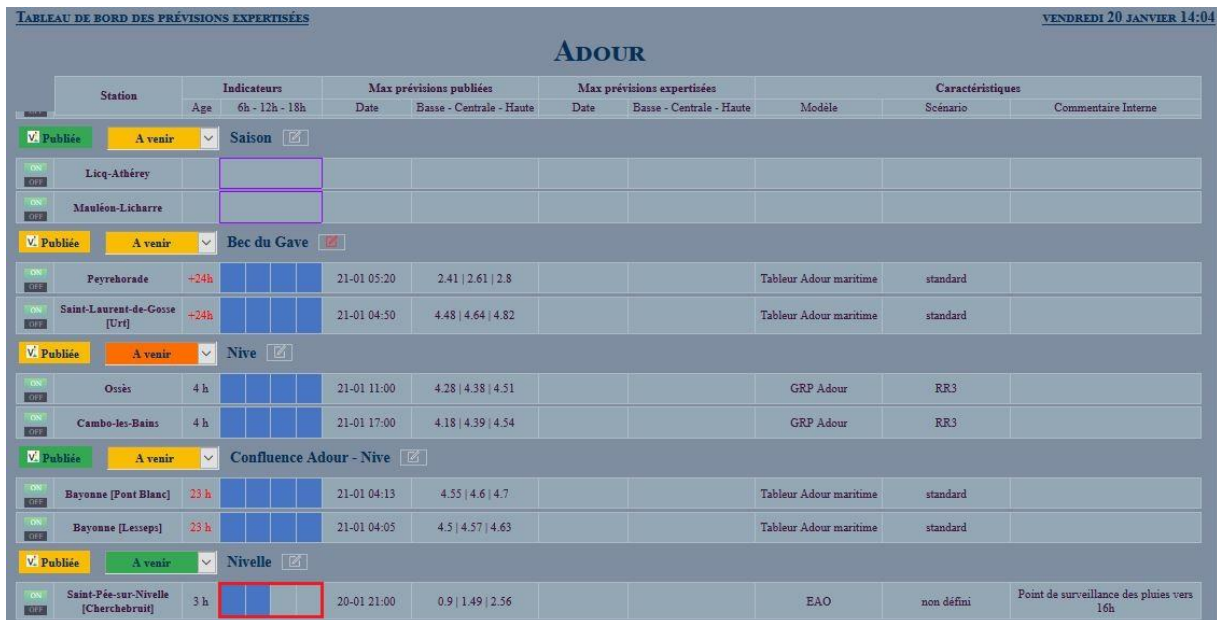


TABLEAU DE BORD DES PRÉVISIONS EXPERTISÉES											VENDREDI 20 JANVIER 14:04	
ADOUR												
Station	Indicateurs			Max prévisions publiées			Max prévisions expertisées			Caractéristiques		
	Age	6h - 12h - 18h		Date	Basse - Centrale - Haute		Date	Basse - Centrale - Haute		Modèle	Scénario	Commentaire Interne
Publiée A venir Saison												
Licq-Athérey												
Mauléon-Licharre												
Publiée A venir Bec du Gave												
Peyrehorade	+24h			21-01 05:20	2.41 2.61 2.8				Tableur Adour maritime	standard		
Saint-Laurent-de-Gosse [Urt]	+24h			21-01 04:50	4.48 4.64 4.82				Tableur Adour maritime	standard		
Publiée A venir Nive												
Ossès	4 h			21-01 11:00	4.28 4.38 4.51				GRP Adour	RR3		
Cambo-les-Bains	4 h			21-01 17:00	4.18 4.39 4.54				GRP Adour	RR3		
Publiée A venir Confluence Adour - Nive												
Bayonne [Pont Blanc]	23 h			21-01 04:13	4.55 4.6 4.7				Tableur Adour maritime	standard		
Bayonne [Lessep]	23 h			21-01 04:05	4.5 4.57 4.63				Tableur Adour maritime	standard		
Publiée A venir Nivelle												
Saint-Pée-sur-Nivelle [Cherchebruit]	3 h			20-01 21:00	0.9 1.49 2.56				EAO	non défini	Point de surveillance des pluies vers 16h	

Figure 4: Tableau de bord des prévisions expertisées

Cartographie dynamique de suivi en temps réel des prévisions

En complément du tableau de bord, une vue cartographique dynamique met en évidence, de façon plus synthétique, les indicateurs d’absence de prévision ou d’écart aux observations ainsi que les indicateurs de classes d’horizon.

Le Superviseur national, dont la carte web est générée à partir du logiciel Mapserver, autorise l’ajout de nouvelles couches par le biais d’un fichier Mapfile dédié. Grâce à la géométrie des stations intégrée à la base de données, on ajoute donc au Superviseur cinq nouvelles couches dynamiques, basées sur des requêtes SQL similaires à celles du tableau de bord, agrémentées des symbologies associées.

L’interopérabilité entre les logiciels Mapserver et PostGIS permet ici l’économie d’un nouvel outil pour le prévisionniste. Aussi, tout comme la technologie web précédente (PostgreSQL, PHP), le recours au webmapping fournit un accès sans installation sur tout poste de travail.

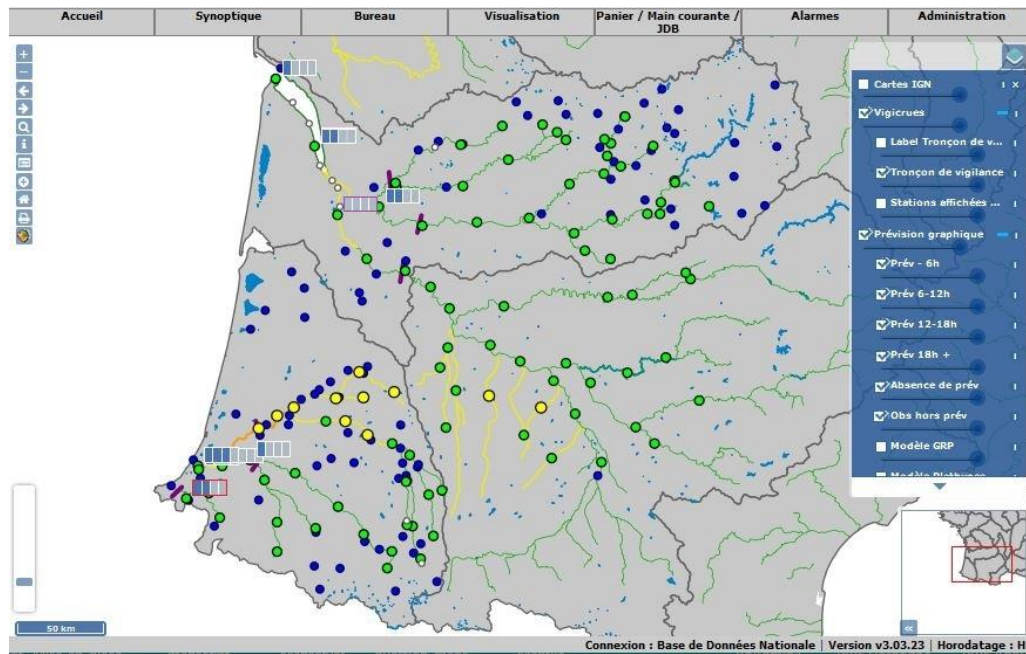


Figure 5: Cartographie dynamique du pilotage des prévisions intégrée au Superviseur

Services dédiés à l'évaluation des prévisions

Enfin, un projet créé dans l'application Microsoft PowerBI connectée à notre base de données offre une fourniture à la demande de statistiques graphiques de prévisions calculées sur une période choisie par l'utilisateur. Les 4 indicateurs qualité proposés concernent la quantité, l'anticipation, la fiabilité et la précision.

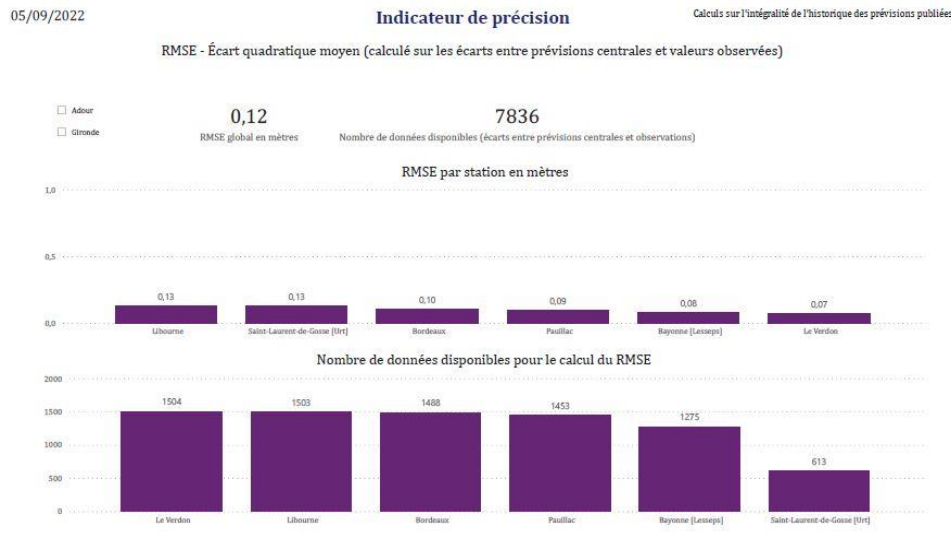


Figure 6: graphique de l'indicateur de précision

Au-delà de la capitalisation en continu des données d'expertise, ce système peut s'enrichir de nouvelles fonctionnalités pour le prévisionniste du SPC GAD. Il peut aussi être adapté à d'autres services de prévision des crues, voire d'autres thématiques. La performance des technologies précédemment citées s'avère particulièrement adaptée aux services de gestion de crise.

3. REFERENCES

- [1] Mapserver : <https://mapserver.org/>
- [2] PostgreSQL : <https://www.postgresql.org/>
- [3] Microsoft PowerBI : <https://powerbi.microsoft.com/fr-fr/>
- [4] Python : <https://www.python.org/>

VERS LA GENERALISATION DE PREVISION HYDROLOGIQUE PROBABILISTE AU SEIN DU RESEAU VIGICRUES : ESTIMATION, EVALUATION ET COMMUNICATION

*Towards the spread of probabilistic flood forecasts in France : assessment,
verification and communication*

Auteurs : BELLEUDY Anne^{1*}, MARTY Renaud², LE PAPE Etienne¹, NARBAIS-
JAUREGUY Didier¹, ZUBER Félicien¹

* *auteur correspondant*

¹SCHAPI, 42 avenue Gaspard Coriolis, France, anne.belleudy@developpement-durable.gouv.fr, etienne.lepape@developpement-durable.gouv.fr, didier.narbais-jaureguy@developpement-durable.gouv.fr, felicien.zuber@developpement-durable.gouv.fr

²DREAL Centre-Val de Loire, 5 avenue Buffon, CS 96407, 45065 Orléans, France, renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : [prévision des crues](#), [incertitudes](#), [prévision expertisée](#)

En 2012, le Schapi a engagé une évolution du réseau Vigicrues en initiant la production de prévision hydrologique accompagnée de leur incertitude. Pour assurer la réussite de cette évolution, Berthet *et al.* [1] recommandent notamment:

1. la dissociation de la production de la prévision hydrologique de son usage par les gestionnaires de crise;
2. la production de prévision expertisée sous la forme de trois tendances, correspondant à des probabilités au non-dépassement de 10, 50 et 90%;
3. l'intégration de l'information probabiliste dans les outils des gestionnaires de crise;
4. la construction d'outils d'estimation des incertitudes, la production de prévision, même hors périodes de crues et leur évaluation systématique.

Dans un premier temps, le réseau Vigicrues s'est concentré sur l'estimation de l'incertitude relative à la modélisation hydrologique, ainsi que sur l'expression facilitée de l'expertise des prévisionnistes, comme annoncé par Berthet *et al.* [1].

Le premier outil, OTAMIN, est conçu pour décrire les statistiques des écarts entre valeurs prévues et valeurs observées pour différentes échéances de prévision (Viatgé *et al.*, [2]). Sa mise en œuvre opérationnelle a mis évidence le besoin de mieux spécifier l'échantillon de calage en ciblant les fortes valeurs, et de compléter la méthodologie en proposant des conditionnements supplémentaires pour améliorer la détermination de l'incertitude de modélisation: saisonnalité, distinction montée de crue/décru.

Le second outil, EAO/EXPRESSO, est dédié à l'expression de l'expertise par le prévisionniste qui peut ainsi apporter une plus-value par rapport aux sorties automatisées, facilitant par ailleurs le portage de la prévision auprès des gestionnaires de crise. L'utilisation opérationnelle par les services de prévision des crues (SPC) leur permet de diffuser des prévisions hydrologiques sur le site Vigicrues depuis l'automne 2017. Les fonctionnalités initiales sont complétées pour améliorer la contextualisation de la prévision, le passage de l'ébauche de l'expertise à sa version diffusable, le suivi des actions des prévisionnistes. En particulier, ceux-ci ont souhaité disposer des scénarios météorologiques utilisées en entrée de la modélisation hydrologique, de fonctionnalités de reprise des prévisions brutes (recalage à

l’observation, lissage) et des incertitudes (OTAMIN ou incertitude hydrométrique), et également de la possibilité de créer des prévisions manuellement (appréciable notamment pour tenir compte des manœuvres des grands ouvrages hydrauliques).

Cette suite d’outils est complétée par le logiciel Scores destiné à évaluer les prévisions probabilistes. Sa version initiale cible les prévisions déterministes dont la performance est qualifiée au travers de critères classiquement utilisés, en proposant également le décalage temporel et la stratification selon la montée de crue/décru, par gamme de débit... Sa dernière version intègre des critères numériques d’évaluation spécifiques aux prévisions ensemblistes et probabilistes (diagramme de rang, score de Brier et leurs dérivés), et la prise en compte de référence pour déterminer le gain éventuel de la prévision hydrologique par rapport à celle-ci.

Dans le cadre de son projet stratégique portant sur les dix prochaines années, le Schapi poursuit cette transformation du dispositif de la prévision de crues, en aidant les SPC à publier systématiquement des prévisions lors d’événement de crues, par l’homogénéisation des pratiques et des outils, par la sollicitation des experts du réseau Vigicrues. Elles doivent couvrir a minima les 24 prochaines heures. Cela nécessite de mettre à disposition des SPC, des prévisions météorologiques probabilistes, en complément des prévisions expertisées par Météo-France, des incertitudes associées aux surcotes prévues, de méthodes et d’outils conçus pour pré-traiter les données météorologiques et construire ainsi des scénarios météorologiques fiables et précis, comme le proposent Bellier *et al.* [3]. Il est également nécessaire de prendre en compte l’incertitude liée à la mesure hydrométrique, d’apporter des évolutions méthodologiques en vue d’améliorer la construction de prévisions expertisées à partir de prévision multi-scénarios et/ou multi-modèles. Au regard de la généralisation de la production de prévision hydrologique, une attention particulière sera à porter sur la cohérence des prévisions, que ce soit d’un site géographique à un autre (amont-aval, bassins voisins), ou entre plusieurs prévisions successives, comme le soulignent Berthet *et al.* [4]. Enfin, le besoin d’amélioration continue de la production de prévision et l’appropriation des prévisions avec incertitude par les gestionnaire de crise nécessitent de mieux communiquer autour des prévisions par un formalisme adapté à leur caractère probabiliste au sein des bulletins de vigilance, mieux connaître les besoins des utilisateurs, de disposer d’évaluation objective des prévisions. Il convient alors de définir des critères jugeant la qualité des prévisions, adaptés au contexte de la prévision de crue où les échantillons sont, par nature, statistiquement insuffisants.

- [1] Lionel Berthet, Éric Gaume, Olivier Piotte, les groupes de travail du Conseil scientifique et technique du SCHAPI & du chantier d’intérêt commun SCHAPI – SPC Estimation des incertitudes de prévision (2016) Estimation and communication of uncertainties related to hydrological forecasts for a better information sharing, La Houille Blanche, 102:4, 18-24, <https://doi.org/10.1051/lhb/2016035>
- [2] Julie Viatgé, Lionel Berthet, Renaud Marty, François Bourgin, Olivier Piotte, Maria-Helena Ramos & Charles Perrin (2019) Towards the real-time production of predictive intervals around streamflow forecasts in Vigicrues in France, La Houille Blanche, 105:2, 63-71, <https://doi.org/0.1051/lhb/2019016>
- [3] Bellier, J., Zin, I., & Bontron, G. (2018). Generating coherent ensemble forecasts after hydrological postprocessing: Adaptations of ECC-based methods. Water Resources Research, 54(8), 5741–5762. <https://doi.org/10.1029/2018WR022601>

- [4] Lionel Berthet, Audrey Valéry, Rémy Garçon, Renaud Marty, Lætitia Moulin, Damien Puygrenier, Olivier Piotte, Matthieu Le Lay, Bruno Janet & François Duquesne (2019) Forecasts consistency and human assessment: what are the next challenges for operational flood forecasting?, *La Houille Blanche*, 105:1, 5-12, <https://doi.org/10.1051/lhb/2019001>

UTILISATION OPERATIONNELLE DE TELEMAC – HERAULT AVAL

Real time use of TELEMAC – Hérault aval

Auteurs : GUIN Mathias^{1*}

* *auteur correspondant*

¹ DREAL Occitanie/DPCHMO, 105 Boulevard Barbès 11000 Carcassonne, France, e-mail: mathias.guin@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

1. Présentation de l’Hérault aval

Le fleuve Hérault est un cours d’eau côtier Méditerranéen qui prend sa source dans les Cévennes au Mont Aigoual, parcourt près de 148 km et traverse 2 départements (Gard et Hérault), jusqu’à son embouchure dans la Mer Méditerranée à Agde. Si dans sa partie amont le fleuve est encaissé, lorsqu’il sort des gorges au niveau de Gignac il s’étend dans un lit majeur assez large.

Les crues sur ce bassin versant sont issues essentiellement des précipitations intenses et abondantes sur les reliefs. Les volumes ainsi générés sont propagés vers l’aval avec des débordements en lit majeur. A noter que dans la partie aval les écoulements sont fortement contraints par de nombreux ouvrages hydrauliques ou routiers et que des chenaux secondaires peuvent se former.

La zone choisie pour l’étude est située dans la basse vallée de l’Hérault, sur la plaine littorale du fleuve. La longueur du bief sur la zone d’étude est de 30 km, soit 20 % de la longueur totale. Le bassin versant additionnel alimentant le bief est de 430 km² et représente 16 % du bassin versant total.



Figure 1: Bassin versant de l’Hérault

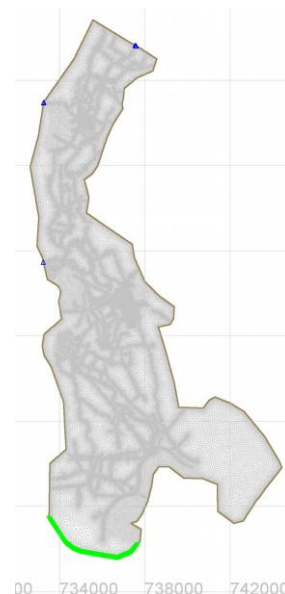


Figure 2: modèle TELEMATC Hérault aval

2. Calage du modèle

Au cours de l'année 2017 un stage encadré par le SCHAPI a été mené sur la modélisation du fonctionnement hydraulique de l'Hérault aval. L'objectif de ce stage était de mettre en place un modèle de prévision qui représente fidèlement la propagation des crues dans une zone où l'expansion en lit majeur est conditionnée par des ouvrages latéraux ou orthogonaux. Le choix s'est donc orienté vers un modèle 2D pour appréhender le fonctionnement complexe des débordements en lit majeur. Pour respecter les prescriptions du SCHAPI d'utiliser un modèle open-source et gratuit le code utilisé est celui de TELEMAC.

Afin d'intégrer les contraintes prévisibles d'une intégration en opérationnel, dès la construction du modèle un travail a été mené pour conserver un nombre d'éléments raisonnable et les apports latéraux ont été modélisés par des apports de débits injectés.

La limite amont du modèle est située sur la commune de Montagnac, matérialisée quelques kilomètres au nord du pont de la N113 (D613). En amont de cet exutoire, la superficie du bassin versant amont est de 2200 km². Le choix de cette limite a été conditionné par la présence d'une station hydrométrique pour laquelle les données de hauteurs/débits sont disponibles, ce qui est indispensable pour le calage du modèle. Ainsi pour une surface de 121km² et un linéaire de cours d'eau de 25km le maillage final contient 227 252 éléments avec un échantillonnage assez lâche en lit majeur.

La gamme des événements disponibles, assez large sur ce secteur, a permis de caler le modèle sur 8 événements (3 verts, 3 jaunes, 1 orange et 1 rouge). D'autres épisodes de crues plus anciens ont été utilisés en validation. Le calage s'est effectué sur la station aval, de Agde, avec modification du coefficient de Strickler (Ks) sur 5 types de zones. Un des premiers enseignements de ce travail a été d'adapter la courbe de tarage de la station amont, de Montagnac.

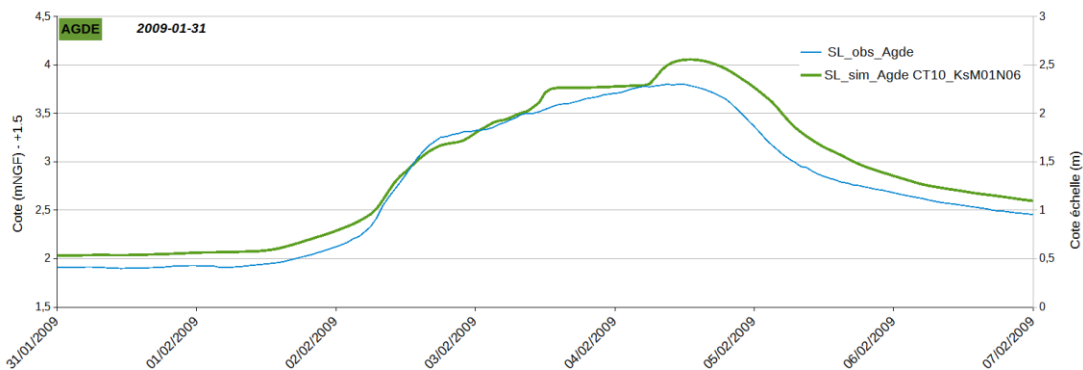


Figure 3: Résultat de calage de la crue du 31 janvier 2009

Sur ces bases, les simulations obtenues représentent globalement bien la propagation des crues avec toutefois une légère surestimation pour les événements jaunes pour lesquels les écoulements en rive gauche dans le lit majeur provoquent un « ressaut » qui ne se produit pas systématiquement dans la réalité.

3. Mise en opérationnel

Le modèle ainsi calé a été implémenté dans la POM (Plateforme Opérationnelle de Modélisation). Pour alimenter le modèle en temps réel les données suivantes ont été utilisées dans un premier temps :

- débits observés à la station hydrométrique de Montagnac,
- débits simulés sur la Thongue, non jaugée,

- débits simulés sur la Peyne, disposant d’une station située un peu haut sur le bassin versant,
- surcote marine au marégraphe de Sète SHOM pour la limite aval.

Pour effectuer son run le modèle utilise les résultats du run précédent.

Une fois cette configuration réalisée le modèle a été mis en test pendant plusieurs mois. Les premiers événements ont permis :

- d’ajuster la profondeur des ressources d’entrée et de sortie,
- d’augmenter l’échéance de prévision,
- de corriger certains comportements du modèle dus à la configuration POM/PIT (Programme d’Interface TELEMAC).

En parallèle, une évaluation du modèle a été menée via SCORES (outil permettant de calculer toute une panoplie de scores de performance de modèles) afin de déterminer les performances du modèle sur l’ensemble des crues de calage et de validation. Cette analyse confirme la tendance du modèle à la surestimation et fait apparaître de bons résultats notamment en vigilance.

	Jaune	Orange	Rouge	Global
1 - Scores d’erreur simples				
Erreur quadratique moyenne (RMSE)				0.38 m
Biais				6 %
Distribution des erreurs [P10;P90] (P90 abs)				-0.1 ; 0.6 (0.7) m
2- 3- Scores de persistance				
Persistance à échéance RIC				0.64
Efficience/Nash				0.75
5- Scores d’erreur sur les pointes				
Erreur commise sur la pointe abs (rel)				0.23 m
Décalage temporel de la pointe				482 min
7- Scores de franchissement de seuils				
Taux de détection (POD)	100%	97%	-	
Taux de fausse alarme (FAR)	14%	12%	-	
Indice de succès critique (CSI)	86%	86%	-	

Figure 4: SCORES du modèle TELEMAC

Puis les résultats des simulations ont été exploités via OTAMIN (OuTil Automatique d’estiMation de l’INcertitude prédictive) afin de déterminer l’incertitude prédictive du modèle. L’abaque OTAMIN a permis d’alimenter un traitement en POM et de disposer en opérationnel de la valeur médiane de hauteur calculée par le modèle ainsi que des quantiles 10 et 90, permettant d’encadrer les prévisions du modèle avec une probabilité de 80%.



Figure 5: Incertitude prédictive du modèle TELEMAC

En intégrant toutes ces évolutions, on aboutit à un modèle disponible en opérationnel qui tourne en continu avec comme caractéristiques :

- Une plage de simulation de 16 heures (-6 heures à + 10 heures),
- Une fréquence de 3 heures en mode nominal et 1 heure en turbo (~40 min de calcul),
- Une surcote marine en condition aval,
- Un débit de la Thongue simulé via un modèle SCS-LR,
- Un débit à Montagnac constitué de l’observation et prolongé de prévisions via un modèle de propagation ;
- Un débit de la Peyne à Pézenas constitué de l’observation et prolongé avec la dernière valeur observée comme constante.

En sortie :

- Un débit et une hauteur simulés à Agde avec une échéance de 10 heures,
- Des incertitudes p10 et p90 sur les hauteurs.

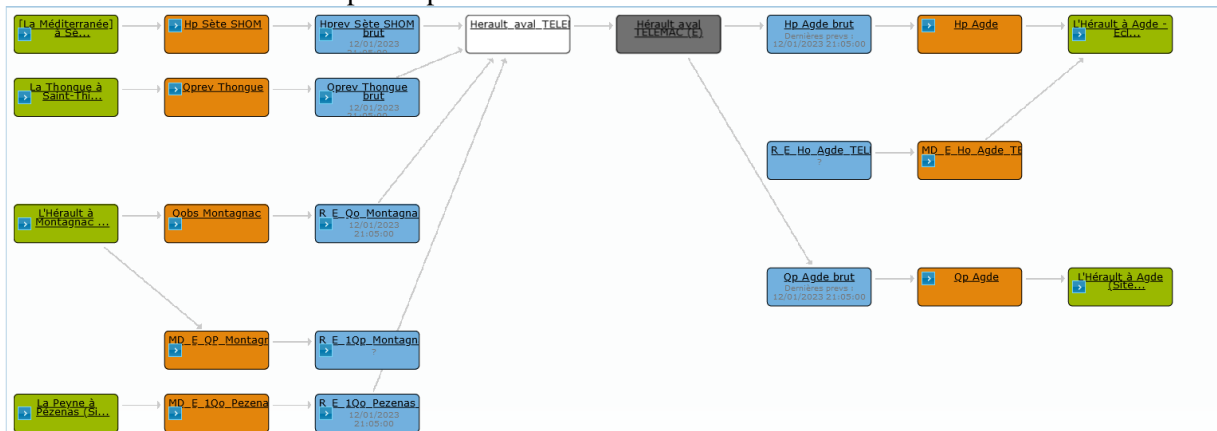


Figure 6: Configuration du modèle dans la POM

4. Limites et perspectives

Afin de constituer une série de Zones Inondées Potentielles (ZIP) le SPCMO a travaillé sur les crues simulées et sur des hydrogrammes fictifs. Le modèle TELEMAC a permis d’obtenir des emprises de zones inondables pour différentes classes de hauteurs aux stations étudiées. Malheureusement,

l’analyse de ces sorties avec les informations collectées sur le terrain a permis de mettre en évidence des incohérences dans la détermination des zones impactées. Il semble que la simplification de la géométrie amène à la simplification de certains ouvrages et engendre des écoulements non observés dans certains secteurs. Cela signifie que ce modèle, bien que bien adapté à la propagation des crues ne permet pas une autre utilisation.

Les pistes de progrès sur ce modèle portent sur :

- Le recalage du modèle Thongue pour les débits simulés,
- Le calage d’un modèle Payne pour prolonger la ressource observée,
- L’insertion en entrée d’une prévision expertisée,
- La propagation des incertitudes des données amont (problème de ressource).

**PRODUCTION ET MISE À DISPOSITION D’INFORMATIONS SUR
LES CRUES :**
**FOCUS SUR UNE DÉCENNIE DE DÉVELOPPEMENTS AU SERVICE
DE PRÉVISION DES CRUES LOIRE-ALLIER-CHER-INDRE**

Production of flood informations :
focus on decade at regional flood forecasting center Loire-Allier-Cher-Indre

Auteurs : FAUCARD Yoann^{1*}, MARTY Renaud¹, HANS Pierre-Adrien¹

* *auteur correspondant*

¹Service de prévision des crues Loire-Allier-Cher-Indre (SPC LACI) – DREAL Centre-Val de Loire, 5 avenue Buffon - Orléans, France,

E-mail: yoann.faucard@developpement-durable.gouv.fr, renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr, pierre-adrien.hans@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

2/ Progrès réalisés et perspectives d’amélioration pour la prévision des crues et des inondations.

Mots clefs : [estimation des incertitudes](#), [expertise des prévisions](#), [prévision opérationnelle](#), [cartographie des zones inondables](#), [partage de l’information](#).

Dès 2012, le SPC LACI s’est doté d’un plan stratégique visant à améliorer ses productions et leur diffusion auprès des gestionnaires de crise d’une part et du grand public d’autre part.

1. Développement des capacités de production de prévisions

Dans une première phase, le SPC a développé sa capacité à produire des prévisions, se traduisant par le développement de nombreux modèles: les têtes de bassins sont couvertes par des modèles pluies débits, les grandes vallées alluviales par des modèles hydrauliques, et les secteurs intermédiaires par des modèles simples de propagation à fonctions de transfert.

Le développement de modèles a permis d’enrichir sensiblement l’information transmise aux gestionnaires de crise. En complément du bulletin de vigilance publié sur le site national *VIGICRUES*, le SPC a rapidement diffusé des prévisions quantitatives, d’abord sous forme de tableau puis graphiquement à partir de 2014.

En parallèle du développement de la modélisation, le SPC a commencé à produire des cartographies de l’aléa inondation pour des débits inférieurs aux événements de référence des Plans de Prévention du Risque Inondation (PPRi). Ces cartographies étaient destinées aux gestionnaires de crises institutionnels, afin qu’ils disposent d’une information pour les crues faibles à modérées les aidant à identifier les enjeux impactés pour ces gammes des crues. Les premiers scénarios ont été produits en

régie dès 2013, inscrivant ainsi le SPC dans le projet de prévision des inondations (*Escudier et al, 2016 [1]*).

2. Quantification des incertitudes

Dans une deuxième phase, le SPC s’est attaché à quantifier les différentes sources d’incertitudes (*Berthet et al, 2016 [2]*), afin d’afficher clairement et objectivement le degré de confiance à accorder aux prévisions. Les prévisions diffusées sont ainsi présentées depuis 2015 sous la forme d’un fuseau d’incertitudes.

D’abord forfaitaires, les incertitudes ont ensuite pu être quantifiées grâce au déploiement de l’outil national OTAMIN, qui a offert aux modélisateurs la possibilité de déterminer à l’issue de leurs calages les incertitudes inhérentes aux modèles (*Viatgé et al, 2019 [3]*). Cette étape est désormais obligatoire avant toute implémentation opérationnelle d’un modèle, peu importe sa typologie (pluie-débit, propagation simple, hydraulique). En 2017 une méthode simplifiée de propagation des incertitudes a été développée en parallèle par le SPC, afin de profiter des expertises réalisées aux stations amont lors de l’expertise à la station aval.

Au milieu de toutes ces sources de données et incertitudes, le prévisionniste assure alors, non sans mal, une mission d’expertise et de synthèse possible grâce au développement d’outils graphiques (EAO/EXPRESSO, outil décrit par *Berthet et al, 2016 [2]*). Placé au cœur du système de prévision opérationnel, son rôle est d’analyser et expertiser les multiples sorties produites : de nombreuses formations sont organisées tout au long de l’année pour garantir leur maintien en conditions opérationnelles (*Marty et al, 2019 [4]*). La chaîne opérationnelle du SPC est en constante évolution pour intégrer ces nouveautés technologiques et méthodologiques, en cherchant toujours le juste équilibre entre traitements automatiques et expertises humaines pour optimiser l’efficacité des actions en gestion de crise.

Indispensables en complément des informations produites dans les bulletins nationaux et territoriaux de vigilance, les prévisions sous forme graphiques assorties d’incertitudes sont publiées en crue sur *VIGICRUES* directement à la suite des données observées aux stations depuis la mi-2017. 94 stations sont ainsi diffusées à ce jour. Les délais des prévisions diffusés au grand public correspondent généralement aux temps de réponse des bassins versants. Toutefois, certains territoires à forts enjeux nécessitent une anticipation de plusieurs jours afin de mener à bien l’évacuation préventive des populations. Des prévisions à plus longue échéance, jusqu’à près de 3 jours sur la Loire moyenne où sont localisés les secteurs les plus à risque, sont diffusées en complément par courriel aux gestionnaires de crise.

En parallèle des prévisions de crues, les cartographies d’inondation ont été également mises à disposition du grand public en 2020 toujours à partir du site *VIGICRUES*. 324 scénarios d’inondation sont à ce jour intégrés dans la base nationale *VIGINOND* (*Escudier et al, 2016 [5]*), dont 273 sont accessibles au grand public, couvrant près de 1600 km soit 60 % des 2700 km surveillés. S’appuyant sur leurs prévisions, les prévisionnistes diffusent aux DDT et préfetures lors des crues un bulletin spécifique indiquant les scénarios d’inondation les plus pertinents à utiliser.

3. Contrôle de la qualité des informations diffusées

Une troisième phase est amorcée depuis début 2020, visant davantage à contrôler la qualité des informations mises à disposition. L'évaluation des prévisions expertisées et de leurs incertitudes fait à présent partie intégrante des retours d'expérience et des débriefings post-crues des prévisionnistes. Des réflexions sont en cours dans le processus qualité mis en place au sein de la DREAL Centre-Val de Loire portant spécifiquement sur la prévision des crues.

D'autres axes restent également à développer comme des méthodes de combinaison de différentes sources d'incertitudes, de reconstruction de scénario à partir des expertises ou de cohérence dans les prévisions (Berthet *et al*, 2019 [6]) tant à l'amont vers l'aval que dans des simulations successives au cours d'un épisode de crue.

L'arrivée des prévisions ensemblistes dans l'écosystème du prévisionniste est l'occasion de disposer de manière objective de l'estimation de l'incertitude météorologique, aujourd'hui seulement prise en compte au travers de scénarios déterministes. Cela pourrait également bousculer les habitudes prises jusqu'ici.

Quant à l'aléa inondation, les reconnaissances terrain pendant ou après l'inondation sont plus nombreuses et commencent à se structurer avec les partenaires du SPC, mais ne sont pas encore systématisées pour valider les données produites ou, au contraire, identifier des incohérences.

4. REFERENCES

- [1] Aurélie Escudier, Pierre-Adrien Hans, Christophe Astier & Jean-Luc Souldadié (2016) From high waters forecasts to flooded areas forecasts, 3rd European Conference on Flood Risk Management
- [2] Lionel Berthet, Éric Gaume, Olivier Piotte (2016). Evaluer et communiquer les incertitudes associées aux prévisions hydrologiques pour mieux partager l'information
- [3] Julie Viatgé, Lionel Berthet, Renaud Marty, François Bourgin, Olivier Piotte, Maria-Helena Ramos & Charles Perrin (2019) Towards the real-time production of predictive intervals around streamflow forecasts in VIGICRUES in France, La Houille Blanche, 105:2, 63-71, <https://doi.org/0.1051/lhb/2019016>
- [4] Renaud Marty, Yoann Faucard, Pierre-Adrien Hans, Didier Reinbold & Lionel Berthet (2019) Preparation, a necessary condition for a better anticipation of flood crisis, La Houille Blanche, 105:1, 26-32, DOI: 10.1051/lhb/2019004
- [5] Aurélie Escudier, Pierre-Adrien Hans, Christophe Astier and Jean-Luc Souldadié (2016). Prévision des inondations : gestion de crise et partage de l'information des zones inondées. La Houille Blanche, 5 (2016) 5-10, DOI: 10.1051/lhb/2016053

- [6] Berthet,L ;Valéry,A ;Garçon.R ;Marty,R ;Moulin,L ;Puygrenier,D ;Piotte,O ;Le Lay,M ;Janet,B ;Duquesne,F (2019). Cohérence des prévisions et place de l’expertise : les nouveaux défis pour la prévision des crues

Utilisation du modèle hydrodynamique 1D Mascaret pour la prévision des crues

Auteurs : Etienne Le Pape¹, Matthieu Nicolas², Alexis Bernard³, Matthieu De Linares⁴, Mehdi Pierre Daou⁴

¹ Service central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (MTECT/DGPR/SRNH), 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse, France
etienne.lepape@developpement-durable.gouv.fr

² DREAL Pays de la Loire, 5 rue Françoise Giroud 44200 Nantes, France
matthieu.nicolas@developpement-durable.gouv.fr

³ Cerema Ouest : 5 rue Jules Vallès, 22015 Saint-Brieuc, France
alexis.bernard@cerema.fr

⁴ Artelia, 6 rue de Lorraine, 38130 Echirolles, France

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Préférence : communication orale

Mots clefs : prévision des crues, modèle hydraulique

1. Le code Mascaret

Le code de calcul Mascaret est hérité de l'expérience d'EDF et du Cerema en modélisation hydraulique. Il est libre et gratuit et géré dans le cadre du Consortium TELEMAC-MASCARET. Depuis de nombreuses années, les noyaux de calcul permettent d'aborder une variété importante de contextes. Le code qui offre de belles possibilités : composition des lits, pas de limites sur les profils en travers, les débordements progressifs...

2. Plugin QGis Mascaret

Avant 2017, la construction des modèles Mascaret était faite grâce à l’interface Fudaa-Mascaret avec une visualisation schématique des branches du modèle, des profils en travers non géolocalisés et un fonctionnement événement par événement en temps relatif.

A partir de 2017, un plugin QGis Mascaret a été développé (en python avec utilisation d’une base sql) en repartant des travaux effectués en 2016 par Matthieu Nicolas (DREAL Pays de Loire).

L’interface du plugin Mascaret permet de s’appuyer des fonctionnalités de SIG avec une géolocalisation des différents éléments du modèle et permet de travailler avec un jeu d’événements (particulièrement utile pour la construction de modèles de prévision des crues).

Le plugin Mascaret s’est progressivement enrichi avec une amélioration progressive de l’ergonomie et de la robustesse et les fonctionnalités majeures suivantes :

- casiers
- ouvrages
- calcul de scores

Il dispose d’une documentation en ligne.

Les différents travaux sur le plugin QGis ont été menés par les prestataires retenus dans le cadre des accords cadres pilotés par le Schapi. Artelia gère la maintenance du code Mascaret dans le cadre du Consortium TELEMAT-MASCARET et intègre les développements des contributeurs. De son côté, le Cerema a effectué des développements en particulier sur les fonctionnalités liées aux « casiers » et participe aux retours utilisateurs qui permettent ensuite de consolider le plugin Mascaret.

3. Construction de modèles Mascaret

Dès 2006, un modèle Mascaret a été construit sur un secteur influencé par la marée : l'Adour maritime. Petit à petit de nouveaux modèles de prévision des crues ont été construits Laïta, Seine aval, Loire aval, Marne, Aube...

A partir de 2017, la construction de modèles Mascaret a progressivement augmenté (d'une petite dizaine à maintenant une cinquantaine). De nombreux utilisateurs du plugin ont été formés dans le réseau Vigicrues (Schapi, SPC et Cerema). De nombreux modèles ont été construits pour le compte du réseau par le Cerema et par les SPC en régie (en Bretagne, sur la Moselle, la Saône et le Doubs...). Au-delà de l'ergonomie offerte par le plugin, les résultats très probants et les qualités des modèles ont contribué à convaincre de nouveaux SPC et modélisateurs à concevoir de nouveaux modèles Mascaret. La plupart des 17 SPC sont désormais dotés de modèles Mascaret et pour certains SPC tous les secteurs à propagation en sont couverts. De nombreux modélisateurs du ministère sont désormais formés à l'utilisation de Mascaret (une 20aine au Cerema, 20aine dans le réseau Vigicrues et 10aine dans d'autres services de DREAL et DDT).

La construction de modèles Mascaret à vocation à se poursuivre notamment sur les secteurs à forts enjeux surveillés par Vigicrues.

Le réseau Vigicrues et le CIH d'EDF restent pour l'instant les principaux maîtres d'ouvrage de modèles Mascaret. Ceci s'explique en partie par le fait que la modélisation 2D est désormais devenu la norme. Pourtant l'approche 1D reste particulièrement adaptée à la prévision de crues. En outre, la fonctionnalité de composition des lits (lit mineur, lit majeur, zones de stockage) permet de ne pas systématiser le recours à des casiers.

4. Utilisation opérationnelle de Mascaret pour la prévision des crues

Mascaret rentre dans la chaîne de modélisation temps réel permettant au réseau Vigicrues d'élaborer la vigilance crues et de diffuser des prévisions quantitatives à certaines stations. Les différentes simulations nécessitent des techniques de reprises de calcul pour partir d'un état réaliste et éviter des problèmes de stabilité.

Les entrées de Mascaret sont constituées des observations de débit et de hauteurs des sites et stations hydrométriques ainsi que des prévisions des modèles hydrologiques situés en amont. L'outil national d'alimentation temps réel des modèles Mascaret est la Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation (POM). Cette plateforme permet de piloter et d'enchaîner les modèles d'amont en aval d'un bassin versant. Le modélisateur et le prévisionniste peuvent choisir les scénarios d'entrée de ces différents modèles. Plusieurs centaines de kilomètres de cours d'eau ont été modélisés sous le plugin Mascaret et sont en cours d'intégration dans la POM.

Il est également possible de recourir à des techniques d'assimilation de données pour améliorer la précision des simulations et les faire « coller » aux observations sur le domaine modélisé.

Ces simulations permettent in fine d'élaborer des prévisions expertisées et de les diffuser sur le site Vigicrues en prenant en compte les incertitudes liées à la modélisation et à l'événement en cours.

Hydrologic-hydraulic modeling of river networks and floodplains with spatially distributed parameters patterns inferred from multi-satellite and in situ variational data assimilation

Auteurs : LARNIER Kevin¹, PUJOL Léo^{2,3}, GARAMBOIS Pierre-André^{4*}, MONNIER Jérôme^{5,6}

¹CS GROUP-France, Toulouse, France

²Montpellier 2 Univ., UMR HydroSciences Montpellier, France

³Toulouse Univ., IMFT, Toulouse, France

⁴INRAE, Aix Marseille Université, RECOVER, Aix-en-Provence, France

⁵ Institut de Mathématiques de Toulouse (IMT), Toulouse, France

⁶ INSA Toulouse, Toulouse, France

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : distributed hydrologic-hydraulic modeling; floods; satellite; altimetry; adjoint model; calibration; high dimension; variational data assimilation; multi-source data

1. CONTEXT AND OBJECTIVES

A variety of satellites and sensors allows to observe, with increasing spatio-temporal resolution, the variability of continental water surfaces and hydrological components over catchments. In particular, satellite altimetry and images bring interesting hydraulic visibility [1], i.e. “the potential to depict a hydrological response and hydraulic variabilities within a river section or network via remote sensing”. Observations at an unprecedented spatial resolution with interesting temporal revisits of worldwide rivers wider than 100m will be provided by the SWOT wide swath and nadir altimetry mission launched in December 2022 (cf. [2]). Satellite observations, combined with in situ measurements, represent a very interesting source of information for hydrological and hydraulic modeling. Nevertheless, the exploitation of such data requires integrated models of adapted complexity as well as adequate data assimilation methods. These forward-inverse approaches must be capable of ingesting multi-source heterogeneous data while solving high dimensional ill-posed inverse problems as encountered with non-linear and dynamic flow models involving spatio-temporal state-fluxes and parameters. We focus here on the use of flow observables over river networks.

The estimation of uncertain or unknown spatialized bathymetry-friction and inflows from heterogeneous satellite observations of rivers surface deformations remains a difficult inverse problem. The main issues encountered arise from:

(i) The spatio-temporal sparsity of altimetric observations regarding real flow controls and dynamics. This is analyzed in [3] for inferable inflow hydrograph frequencies with the introduction of identifiability maps considering flood propagation signatures and in [4] for inferable channel parameters patterns and single inflow and in [5] with spatially distributed inflows.

(ii) The sensitivity of inferences to prior guesses on the sought parameters, in an equifinality context, as highlighted with synthetic SWOT data in [6,7,8 and references therein].

Putting in coherence catchment river-network models and flow observables, somehow pertains to a double regionalization problem regarding the estimation of (1) hydraulic channels parameters influencing flow dynamics and of (2) the hydrological parameters influencing discharge signals production and mass inflows into the river network hydraulic model.

The combined use of dynamic flow models of river systems and variational data assimilation methods enables to solve hydrologic-hydraulic inverse problems involving high dimensional spatio-temporal unknown parameters and heterogeneous in situ and satellite observations. This contribution presents multi-dimensional river networks hydrologic-hydraulic modeling approaches based on recent multi-satellite data cocktails, used both for model geometry construction and for spatially distributed calibration performed by variational data assimilation with the DassFlow platform (2D [10,11], 1D hydraulic model [3,8,5,9], multi-D with hydrology [12]).

2. METHODOLOGY AND DATA

This work is based on recent multi-satellite datasets over two relatively large catchment river networks with contrasted and complex hydrological variabilities and flow features (anabranching reaches, confluences, tidal effects) : the Maroni River basin in French Guyana (SWOT Cal/val site) and the Adour River basin in metropolitan France (Fig 1). The datasets contain the following data: multi-mission nadir altimetric data (Jason 3, Sentinel 3, ICESat 2), dynamic water masks extents from optical images (Sentinel 2), DEM (MERIT-DEM, Lidar on metropolitan France), in situ data (limnimetric data and rating curves, ADCP profiles, bathymetric surveys, GPS water surface profiles), synthetic SWOT data generated from model outputs with the HR Instrument Simulator. The altimetric dataset is splitted into calibration and validation datasets.

The forward modeling approach consists in dynamic shallow water flow models of river networks, in 1D following [3,8,5,9] or multi-D following [12], inflowed by catchment scale hydrological models. The hydrological inflow points into the hydraulic model are determined using a coupling algorithm. The inverse modeling approach uses variational data assimilation to optimize spatially distributed bathymetry-friction patterns to reduce the misfit to in-situ and satellite observables. Stage-Fall Discharge relationships are derived from the calibrated river network flow models following [9].

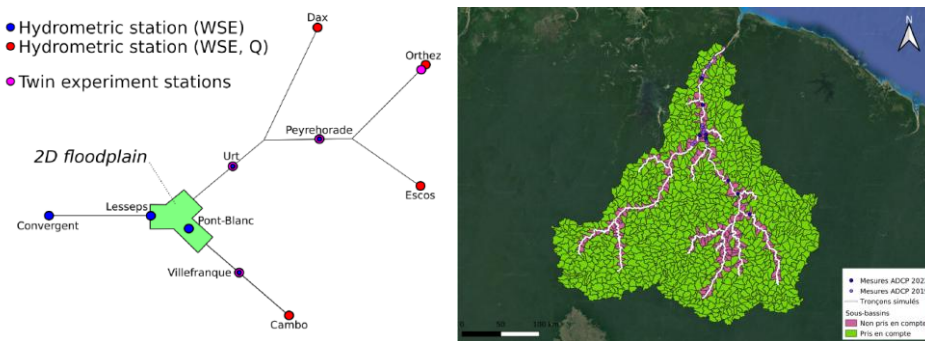


Figure 1 : Modeling domains and meshing. (Left) 4 main reaches of the downstream Adour river network in multi-D with 1D-like reaches and a 2D zoom on Bayonne city [12]; hydrological modeling of lateral and upstream sub-basins with SMASH or GR4H. (Right) Maroni river network in 1D [13], hydrological modeling of lateral and upstream sub-basins with MGB or SMASH.

3. RESULTS AND PERSPECTIVES

The modeling approach is applied to the Maroni and Adour basins. A priori channel geometries are obtained using DEM (including bathymetric surveys or not) but also with flow extent images vertically referenced using altimetric data. Then the hydrological-hydraulic coupling algorithm is applied. The forward river network hydraulic model, inflowed by hydrological model outputs, is then calibrated with in-situ and altimetric water surface elevations (WSE) and discharge timeseries using the variational data assimilation algorithm. The spatialization of channel parameters and inflows is defined in function of the spatial pattern of the flow observables used in calibration to avoid under/over parameterization issues. Results are analyzed in terms of fit between the calibrated hydraulic model and observed water surface elevation and discharge, on calibration and validation datasets. The calibration leads to effective bathymetry-friction parameters fields which are analyzed in terms of spatial variability, hydraulic geometry and local stage-fall-discharge relationships consistency. Assimilation experiments are then performed using synthetic SWOT data to test the capability to constrain refined spatializations of network bathymetry-friction as well as inflow flood hydrographs correction/estimation. Analyses are proposed regarding identifiability maps, equifinality issues and sensitivity to prior hypothesis definition.

The calibrated river network models, especially on the Maroni River basin, should be used to analyze real SWOT data, starting with the daily data from the SWOT Cal/Val phase. The modeling approach is transposable to other basins and datasets including other flow observables.

4. REFERENCES

- [1] Garambois, P.-A., Calmant, S., Roux, H., Paris, A., Monnier, J., Finaud-Guyot, P., Montazem, A.S., da Silva, J.S., 2017. Hydraulic visibility: Using satellite altimetry to parameterize a hydraulic model of an ungauged reach of a braided river. *Hydrological Processes*, <https://doi.org/10.1002/hyp.11033>
- [2] Rodríguez, E., 2012. SWOT Science requirements document. JPL document, JPL, 2012. URL https://swot.jpl.nasa.gov/system/documents/files/2176_2176_D-61923_SRD_Rev_B_20181113.pdf.
- [3] Brisset, P., Monnier, J., Garambois, P.-A., Roux, H., 2018. On the assimilation of alti-metric data in 1D Saint-Venant river flow models. *Advances in Water Resources* 119, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.06.004>
- [4] Garambois, P.-A., Larnier, K., Monnier, J., Finaud-Guyot, P., Verley, J., Montazem, A. S., Calmant, S. (2020). « Variational estimation of effective channel and ungauged anabranching river discharge from multi-satellite water heights of different spatial sparsity ». *Journal of Hydrology*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124409>
- [5] Pujol, L, Garambois, P.-A., Finaud-Guyot, P., Monnier, J., Larnier, K., Mosé, R., Biancamaria, S., Yésou, H., Moreira, D., Paris, A., Calmant, S. (2020). « Estimation of Multiple Inflows and Effective Channel by Assimilation of Multi-satellite Hydraulic Signatures: Case of the Ungauged Anabranching Negro River ». *Journal of Hydrology*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125331>
- [6] Garambois, P. -A, Monnier, J. (2015). « Inference of effective river properties from remotely sensed observations of water surface ». *Advances in Water Ressources*. (79) 103-120. <https://doi:10.1016/j.advwatres.2015.02.007>

- [7] Durand, M., Gleason, C. J., Garambois, et al. (2016). « An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope ». *Water Resources Research*. (52-6) 4527–4549. <https://doi:10.1002/2015WR018434>
- [8] Larnier, K., Monnier, J., Garambois, P.-A., Verley, J. (2020) « River discharge and bathymetry estimation from SWOT altimetry measurements ». *Inverse Problems in Science and Engineering (IPSE)*. <https://doi.org/10.1080/17415977.2020.1803858>
- [9] Malou T., P.-A. Garambois, A. Paris, J. Monnier, K. Larnier. (2021) Generation and analysis of stage-fall-discharge laws from coupled hydrological-hydraulic river network model integrating sparse multi-satellite data. *Journal of Hydrology*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126993>
- [10] Monnier, J., Couderc, F., Dartus, D., Larnier, K., Madec, R., Vila, J.-P., 2016. Inverse algorithms for 2D shallow water equations in presence of wet dry fronts. application to flood plain dynamics. *Advances in Water Resources* 97, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.07.005>
- [11] Hostache, R., Lai, X., Monnier, J., Puech, C., 2010. Assimilation of spatially distributed water levels into a shallow-water flood model. Part II: Use of a remote sensing image of Mosel River. *Journal of Hydrology* 390, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.003>
- [12] Pujol, L., Garambois, P.-A., Monnier, J. (2022) Multi-dimensional hydrological-hydraulic model with variational data assimilation for river networks and floodplains. (*Geoscientific Model Development*) <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-10>
- [13] Angenent E. (2022) « Modélisation hydrologique-hydraulique du réseau hydrographique du Maroni à partir de données multi-satellites ». Stage de Master 1, (Univ. Pau, CVH-DEAL Guyane, INRAE).

ÉLABORATION D’UNE CHAÎNE DE PRÉVISIONS PROBABILISTES HORAIRES DE DÉBITS POUR UN USAGE OPÉRATIONNEL QUOTIDIEN

Development of a Probabilistic Hourly Forecasting Chain for Daily Operational Use

Auteurs : CORON Laurent^{1*}, RINALDI Fabien², MOULIN Laetitia², PUYGRENIER Damien³
* *auteur correspondant*

¹EDF-DTG, 4 rue Claude Marie Perroud, 31096 TOULOUSE, France

²EDF-DTG, 134 rue de l’étang, 38950 SAINT-MARTIN LE VINOUX, France

³EDF-CIH, 4 allée du lac de Tignes, 73290 LA MOTTE-SERVOLEX, France

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Préférence : communication orale

Mots clefs : Prévision probabiliste, utilisation opérationnelle

Orateur : Laurent CORON¹

Contexte opérationnel des prévisions hydrologiques à EDF Hydro DTG

Depuis les années 80, EDF dispose de centres opérationnels dans lesquels sont réalisées toutes les prévisions hydrométéorologiques pour l’entreprise. Ces prévisions ont pour objectifs d’aider à la sûreté, notamment en crue, et à la gestion de la ressource en eau pour la production hydroélectrique et la gestion des étiages. Dès leur création, ces centres intègrent un service temps réel (7j/7, 24h/24) de surveillance, d’alerte et d’accompagnement à destination de l’exploitant pour l’aider à anticiper l’évolution des débits. Ce service facilite la mobilisation d’équipes en amont de l’évènement et la mise en œuvre des consignes de crues pendant celui-ci [1]. En 2008, l’organisation des centres évolue pour répondre à un second service continu (6j/7, avant 9h) de production de prévisions numériques de débits journaliers pour l’optimisation quotidienne des programmes de production d’hydroélectricité pour les jours qui suivent. Ce besoin étant centré sur la gestion volumique de l’eau, la modélisation déployée pour ce nouveau service est au pas de temps journalier.

Au fil des années, les progrès sont nombreux sur la prévision météorologique, la collecte en temps réel des données ou les compétences des prévisionnistes sur l’analyse des phénomènes. La prévision journalière pour l’optimisation consiste d’abord en prévisions déterministes à 6 jours, puis probabilistes à 14 jours et désormais à 28 jours, sur un nombre de bassins versant en croissance. La prévision de crue s’étouffe également au rythme des progrès des méthodes et des outils à disposition des prévisionnistes. Un cap majeur est franchi au milieu de la décennie 2010 avec l’émergence massive de modèles

hydrologiques horaires. En quelques années, des modélisations pluie-débit horaires sont élaborées sur de nombreux bassins versants et valorisées dans des chaînes de prévisions déterministes à échéance de 4 jours.

Les formats de diffusion s'enrichissent également. Initialement sous forme de tableaux de valeurs, les prévisions sont ensuite présentées sous forme de graphiques (cf. Figure 1). Ils sont diffusés par mail ou mis en ligne sur des portails web et mobile de consultation à la demande. Ces rendus graphiques permettent simultanément un meilleur processus de contrôle entre prévisionnistes avant envoi, un meilleur suivi en temps réel de l'obsolescence d'une prévision, une compréhension plus claire et directe des alertes crue par les exploitants.

L'ensemble des progrès réalisés sur les méthodes, outils et livrables depuis 2008 firent l'objet d'une présentation lors de la dernière session de la SHF consacrée aux crues et inondations [2]. À ce jour, les centres de prévision modélisent 400 bassins versants et produisent environ 17 000 prévisions probabilistes journalières par an pour l'optimisation et 1 800 prévisions déterministes horaires par an pour la gestion de crue (moyennes calculées sur la période 2020-2022).

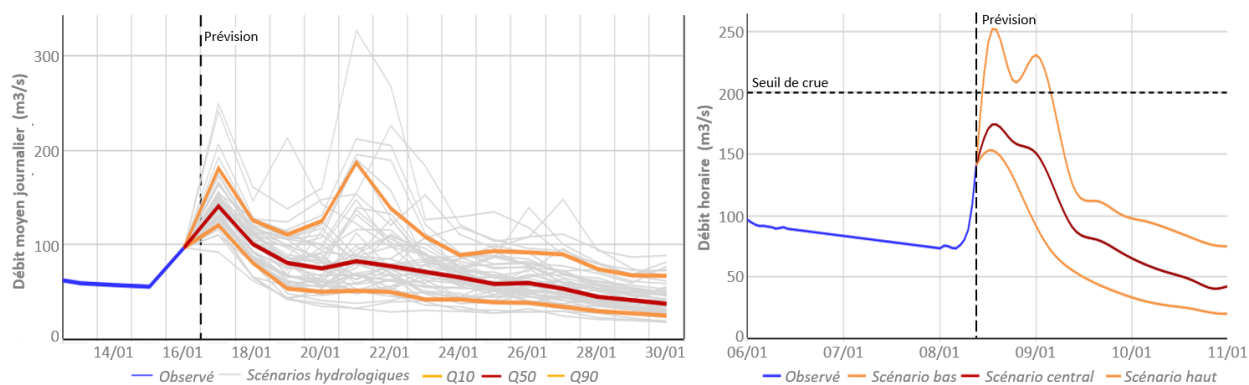


Figure 1 : Exemples de rendus graphiques de prévisions opérationnelles

À gauche : prévision journalière pour l'optimisation avec 50 scénarios probabilistes, résumés via des quantiles 10%-50%-90%
 À droite : prévision horaire pour l'alerte crue avec 3 scénarios déterministes envisagés (bas-central-haut)

Élaboration d'une nouvelle chaîne opérationnelle probabiliste horaire

Les chaînes de production précédemment décrites conduisent à une situation de cohabitation de modèles, d'outils d'expertise et de livrables différents, en fonction des objectifs recherchés. Chacun des process a ses avantages mais aussi ses limites, parmi lesquels on peut lister : approche journalière vs horaire, approche probabiliste vs déterministe, stratégies d'expertise des données d'entrée du modèle pouvant dépendre du pas de temps, etc. Cette cohabitation induit donc un travail supplémentaire pour les prévisionnistes qui doivent ainsi valoriser le meilleur de chacune des approches et assurer la cohérence entre des livrables issus d'outils différents. En situation de crue, ce travail est d'autant plus crucial mais aussi d'autant plus délicat.

Face à cette situation, EDF Hydro DTG mène actuellement un projet de refonte de tout son processus de prévision pour répondre aux besoins conjoints d'alerte crue et d'optimisation de la production à l'horizon mensuel. Ce projet vise simultanément à des gains sur la qualité des prévisions mais aussi sur l'efficacité globale du processus quotidien de production des prévisions.

Cette communication vise à présenter le travail d'élaboration de cette nouvelle chaîne opérationnelle. Nous détaillerons l'architecture finale retenue (cf. Figure 2) et les différents cheminements qui ont conduit à élaborer celle-ci.

Parmi les difficultés à surmonter, seront discutés les besoins de :

- Repenser la manière de critiquer/retoucher les données observées pour garantir la qualité des données d'entrée qui alimentent les modèles tout en conservant l'intérêt d'une chaîne dynamique qui tourne chaque heure ;
- Revisiter la manière de choisir/construire des scénarios futurs en fonction de l'analyse météorologique menée par les prévisionnistes ;
- Réadapter les gestes d'expertise au niveau du modèle hydrologique en lui-même pour assurer la production de prévisions de débits pertinentes pour le double usage crue + optimisation ;
- Assurer une cohérence à l'échelle d'un territoire maillés par différents modèles hydrologiques emboîtés ;
- Réfléchir à la manière de valoriser pleinement dans les livrables de sortie toute l'information permise par une approche probabiliste horaire ;
- Combiner toutes ces contraintes dans une architecture globale du processus qui fonctionne à la fois du point de vue informatique et organisationnel.

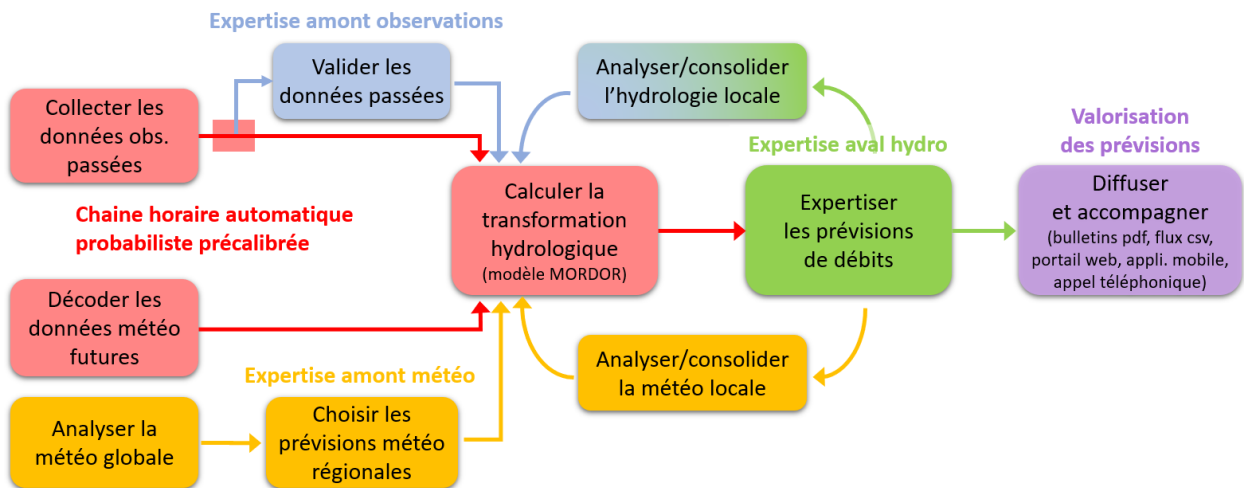


Figure 2 : Schéma final d'architecture de la nouvelle chaîne opérationnelle

REFERENCES

[1] PUYGRENIER et al., 2023 ; « Prévisions des crues à EDF : vers des outils permettant une meilleure prise de décision » ; Communication orale SHF 2023

[2] MOULIN et al., 2018 ; « Prédiction hydrométéorologique opérationnelle à EDF-DTG, Progrès récents et états des lieux » ; Communication orale SHF 2018

PRINCIPALES AVANCÉES DU RÉSEAU VIGICRUES DEPUIS SA CRÉATION DANS LE DOMAINE DE LA PRÉVISION DES INONDATIONS

Auteurs : ZUBER Félicien^{1*}, Aurélie ESCUDIER², Anne-Marie FROMENTAL¹, Mathias DAUBAS¹

* *auteur correspondant*

¹Service central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (MTECT/DGPR/SRNH), avenue Gaspard Coriolis, Toulouse, France,

felicien.zuber@developpement-durable.gouv.fr ; marie.fromental@developpement-durable.gouv.fr ; mathias.daubas@developpement-durable.gouv.fr

²DREAL Occitanie, 1 rue de la Cité administrative, 31074 Toulouse Cedex 9, France, aurelie.escudier@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

inondation, prévision des inondations, réseau Vigicrues, Viginond

1 Contexte et objectifs de la prévision des inondations

La prévision des hauteurs d’eau et des débits à une station hydrométrique, appelé « prévision des crues », ne permet pas d’appréhender facilement les conséquences terrain d’une crue débordante. La « prévision des inondations » vise à compléter cette information avec une traduction en termes de zones géographiques inondées.

À sa création en 2003, l’ambition de travailler sur les inondations était déjà présente et affichée dans le nom même du Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI). Les travaux sur cette thématique ont véritablement débuté à partir de 2008 et se poursuivent encore aujourd’hui en lien avec les Services de Prévision des Crues (SPC) dans le cadre du réseau « Vigicrues ».

2 Les principales avancées de la prévision des inondations depuis 2008

Le réseau Vigicrues s’est donné pour objectif de produire et diffuser un catalogue de zones inondables allant de la crue des premiers débordements à une crue plus rare (aléa de référence considéré dans les Plans de Prévention des Risques d’Inondation ou aléa moyen au sens de la Directive Inondation). Ces scénarios devant être référencés par rapport à des stations Vigicrues, c’est-à-dire des stations pour lesquelles le réseau Vigicrues diffuse des hauteurs d’eau et des débits en temps réel et en continu. Des travaux variés ont été mis en œuvre pour atteindre cet objectif depuis le début de l’opération en 2008. Dans cette communication, on se propose de mettre en perspectives ces différentes réalisations.

Le réseau Vigicrues s’est organisé pour collecter et archiver des informations sur les zones inondées réellement observées lors des événements de crues. Ces informations sont précieuses pour améliorer le calage et la validation des modèles permettant la production de ces zones inondées. Elles peuvent

également être exploitées directement pour cartographier sans modélisation la zone inondée d'un événement. Cette collecte d'informations prend principalement deux formes :

- la mise en place de campagnes de relevés de laisses et repères de crues généralement coordonnée par les SPC et leur versement dans la base de données nationale des repères de crues (<https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr/>) [2] ;
- l'acquisition de prises de vues aériennes en crue, principalement par le biais d'une convention entre l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et la Direction Général de la Prévention des Risques (DGPR) et pilotée par le SCHAPI.

Comme le présentaient déjà *Escudier et al.* [1] en 2016, le réseau Vigicruces a travaillé à la mise en place d'un référentiel national de zones inondées s'appuyant sur un système d'information baptisé Viginond. Une doctrine de production des zones inondables a été construite et a introduit principalement trois objets :

- la Zone Inondée Potentielle (ZIP) qui représente l'emprise surfacique de l'inondation,
- les Zones Inondées par Classes de Hauteurs d'eau (ZICH) qui représentent les hauteurs de submersion par rapport au terrain naturel par pas de 50 cm,
- les Lignes Iso-Cotes (LIC) qui sont les courbes de niveaux représentant les altitudes dans un repère unique (NGF IGN69) atteintes par les eaux lors d'une inondation.

Au-delà de leur méthodologie de production, ces objets utilisent un format de données unique permettant de faciliter leur collecte dans une base de données unifiée et leur diffusion et réutilisation.

Début 2023, plus de 3200 ZIP et plus de 2600 ZICH ont été produites et sont disponibles dans Viginond. Et plus de 500 stations hydrométriques ont au moins une zone inondable rattachée.

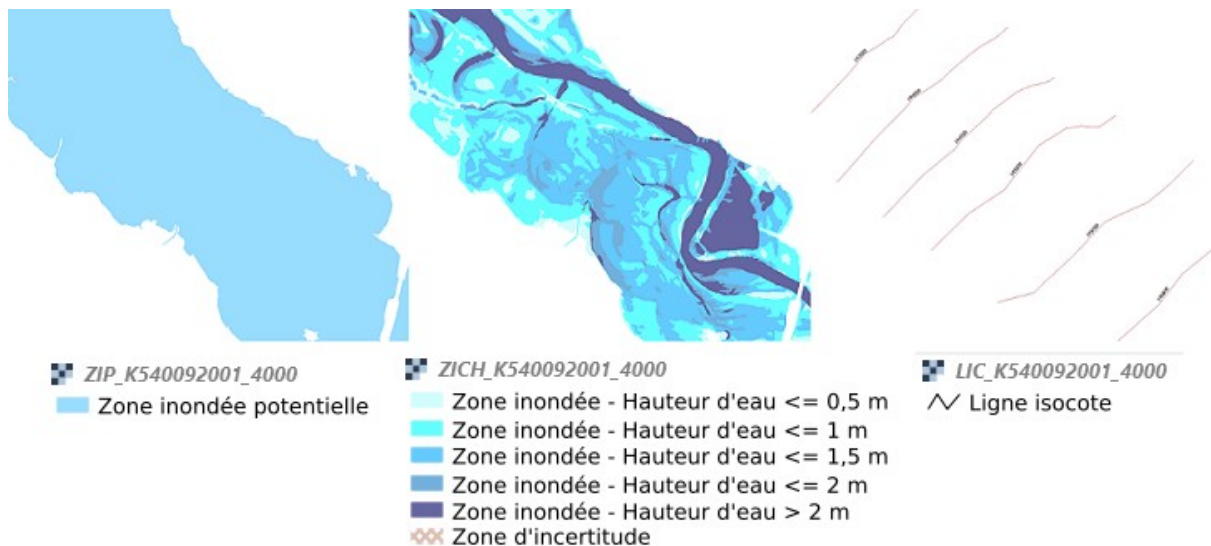


Figure 1: Exemples de ZIP, ZICH et LIC pour une hauteur de 4,00 m à la station de Saint-Amand-Montrond (détails)

La diffusion des données de zones inondables a dans un premier temps été disponible uniquement pour les services de l'État : services risques en DREAL, missions Référents Départementaux Inondations (RDI) en DDT(M), services du Ministère de l'Intérieur en charge de la gestion de crise. Le périmètre a progressivement été élargi, d'abord aux collectivités territoriales, puis au grand public.

3 Perspectives

La doctrine actuelle de production des scénarios de zones inondables nécessite encore des évolutions et des précisions sur certains types de secteurs. Une réflexion sur les secteurs endigués est par exemple engagée, mais des questions se posent également sur d’autres types de cas particuliers, par exemple les estuaires.

La diffusion des données au grand public au format SIG devrait être effective et s’appuiera notamment sur un module de cartographique dynamique proposé dans le portail Vigicrues.

Par ailleurs, le réseau Vigicrues travaille actuellement à la redéfinition de son réseau réglementaire pour la prévision et la vigilance crue. Cette évolution, vers une couverture totale du territoire, introduit notamment la notion de niveaux de service. Les niveaux un et deux s’appliqueront à des tronçons, de manière similaire au réseau réglementaire actuel. Le niveau trois concernera tous les autres petits cours d’eau. Dans le cadre de cette opération, il sera utile de faire évoluer les objectifs actuels du réseau Vigicrues en matière de prévision des inondations selon les différents niveaux de service. Les travaux à ce sujet débuteront début 2023 et pourront alimenter la communication.

4 REFERENCES

- 1 Prévision des inondations : gestion de crise et partage de l'information des zones inondées, Aurélie Escudier, Pierre-Adrien Hans, Christophe Astier and Jean-Luc Souldadié, La Houille Blanche, 5 (2016) 5-10
- 2 Vers une gestion collaborative des recensements de repères de crues, Piotte et al., Congrès SHF/AFEPTB : « Gestion des risques d’inondation », Paris, 27-28 mai 2015

HYDROMÉTRIE EN CRUE : LES DEFIS ET LES SOLUTIONS

Measuring flood discharge : challenges and solutions

Auteurs : HAUET Alexandre^{1,2*}, LE COZ Jérôme³, BONNIFAIT Laurent⁴

* *auteur correspondant*

¹EDF-DTG, St Martin le Vinoux, France, alexandre.hauet@edf.fr

²Univ. Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l’Environnement (IGE), UMR 5001, Grenoble, France

³INRAE, UR RiverLy, Villeurbanne, France, jerome.lecoz@inrae.fr

⁴Cerema, DTerMed/DRN/RIL, Aix en Provence, France, laurent.bonnifait@cerema.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Hydrométrie, Jaugeages non-intrusifs, Débit, REX post-crue

1. Limitation de l’hydrométrie traditionnelle en crue

Les crues sont des évènements extrêmes, à la dynamique temporelle rapide. Les fortes vitesses d’écoulement, ainsi que les nombreux débris flottants rendent l’accès à la rivière dangereux pour tous matériels ou opérateurs. Les techniques d’hydrométrie pour la mesure des débits ne sont pas adaptées à ces situations. Les méthodes de jaugeage par dilution sont rendues inapplicables par les fortes concentrations en matières en suspension qui interagissent avec les traceurs utilisés et biaisent les résultats [1]. L’exploration du champ de vitesse avec des courantomètres ou des ADCP est impossible vu les conditions de dangerosité. De plus, la durée typique d’un jaugeage, de l’ordre de 30 minutes, est trop longue pour considérer que le débit reste permanent. Les conditions d’accès aux sites de mesures sont difficiles pendant les épisodes de crues, quand les routes sont fermées, et les berges de rivières sont instables à cause de l’érosion. Enfin, les épisodes de crues sont souvent généralisés sur de grandes régions géographiques, et les équipes d’hydromètres, aux ressources limitées, ne peuvent pas être partout en même temps...

En conséquence, la gamme jaugée des courbes de tarage est limitée, et les relations hauteur / débit doivent être largement extrapolées aux hautes eaux, avec des incertitudes associées importantes [2].

2. Des solutions !

La communauté des hydromètres travaille activement pour trouver des solutions permettant d’améliorer la qualité des données de débit en crue. On présente ici des avancées récentes concernant les méthodes de jaugeage non intrusives, l’utilisation de la modélisation hydraulique pour améliorer l’extrapolation des courbes de tarage, et les estimations de débit par retour d’expérience post-crue.

Les méthodes de jaugeages non-intrusives, par analyse Doppler d’écho radar, ou par imagerie, se sont fortement développées et démocratisées depuis une dizaine d’années. Les matériels sont faciles d’utilisation (comme les « pistolets » radar portable [3]), les logiciels de traitement sont performants et intuitifs [4], des bureaux d’études proposent des solutions non-intrusives clés-en-main [5,6], et la communauté s’est organisée avec des cycles de formation. On brosse un rapide panorama des outils et méthodes opérationnels et des dernières avancées scientifiques, ainsi que l’état de l’art du calcul des incertitudes associées.

La modélisation hydraulique numérique est un outil permettant à l’hydromètre une compréhension des contrôles hydrauliques affectant un site pour différentes gammes de débit. Elle offre une vision plus large que celle centrée sur la station de mesure, et permet une extrapolation objectivée et robuste des courbes de tarage en hautes eaux. On illustrera les apports de la modélisation numérique 1D (que l’hydromètre peut facilement prendre en main) pour l’extrapolation des relations hauteur débit avec des contrôles aval complexes [5].

L’apport des retours d’expérience post événements, basés sur l’analyse de laisses de crues avec des modélisations hydrauliques simples, est primordial (et souvent la seule source d’information) lors d’épisodes extrêmes [6]. On détaillera comment des informations captées par des témoins des crues (constat visuel, photos, vidéos) peuvent être valorisées dans un calcul quantitatif de débit.

3. REFERENCES

- [1] Lallement, C., Belleville, A., Hauet, A. & Perret, C. (2022). La mesure de débit par dilution—Quel avenir pour cette technique ? LHB-Hydroscience Journal. doi.org/10.1080/27678490.2022.2083992
- [2] Ministère de l’Environnement, de l’Energie et de la Mer. (2017). Charte Qualité de l’Hydrométrie. Guide de bonnes pratiques.
- [3] Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A. & Salvaro, M. (2016). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). WRR (52-2). doi.org/10.1002/2015WR017906.
- [4] Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B., Le Boursicaud, R. (2014) Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software. River Flow 2014, Lausanne, Switzerland. 7 p.
- [5] Hauet, A. et al. (2017) Topographic data and hydraulic modeling for the extrapolation of rating curves: application on the hydrometric network of EDF-DTG. La Houille Blanche. Volume 6, 73-78. doi.org/10.1051/lhb/2017061.
- [6] Payrastre, O. et al. (2022). The 2 October 2020 Alex storm in south-eastern France: a contribution of the scientific community to the flood peak discharges estimation. LHB – Hydroscience Journal. doi.org/10.1080/27678490.2022.2082891

PLATHYNES : UNE PLATEFORME DE MODELISATION HYDROLOGIQUE DEVELOPPEE POUR LES BESOINS DE LA PREVISION DES CRUES

PLATHYNES : A SPECIFIC MODELING PLATFORM FOR FLOOD FORECASTING

Auteurs : NARBAIS-JAUREGUY Didier¹, LE PAPE Etienne¹, MARCHANDISE Arthur²,
LABORDA Yann³, DUSSUCHALE Antoine³, HORGUE Pierre⁴, ROUX Hélène⁴, LARNIER
Kévin⁵, MARTY Renaud⁶, BILDSTEIN Audrey⁶.

¹Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI),
Toulouse, France, didier.narbais-jaureguy@developpement-durable.gouv.fr,
etienne.lepape@developpement-durable.gouv.fr.

²Direction Régionale de l’Environnement Occitanie (DREAL), Toulouse, France,
arthur.marchandise@developpement-durable.gouv.fr

³DREAL Auvergne Rhône-Alpes, Nîmes, France, yann.laborda@developpement-durable.gouv.fr,
antoine.dussuchale@developpement-durable.gouv.fr

⁴Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Université de Toulouse, CNRS,
Toulouse, France, helene.roux@imft.fr, pierre.horgue@imft.fr

⁵CS Group, Toulouse, France, kevin.larnier@c-s.fr

⁶DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France, renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr,
audrey.bildstein@developpement-durable.gouv.fr.

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs: Modélisation, Pluie-débit, Prévision de crues, Inondations.

1. Les premiers pas de la modélisation pluie-débit distribuée dans le réseau Vigicrues

Afin de pouvoir anticiper les risques de crues sur les cours d’eau méditerranéens le réseau Vigicrues et notamment les SPC du sud-est s’intéressent dans les années 2000 à la modélisation pluie-débit distribuée. Dans le cadre de l’expérimentation Bassin Versant Numérique Expérimental (BVNE), les modèles distribués ALHTAÏR [2], MARINE [3][4][7][8] et SCS/Lag and Route [5] ont été expérimentés avec l’appui de nos partenaires scientifiques l’Ecole des Mines d’Alès, l’Institut de mécanique des fluides de Toulouse, le laboratoire Hydrosiences Montpellier et le Service de Prévision des Crues Grand Delta.

Les défis à surmonter sont nombreux: mise en œuvre et calage de ces différentes approches sur des bassins aux caractéristiques très différentes, intégration de ces nouveaux outils dans une chaîne opéra-

tionnelle qui permette d’intégrer des données spatialisées avec un pas de temps infra-horaire et avec des temps de calculs qui soient compatibles avec les contraintes de la production de prévisions en crues.

2. Le développement de la plateforme PLATHYNES

En 2013 un partenariat est mis en place entre le SCHAPI et l’IMFT pour développer sur la base du noyau de calcul MARINE une plateforme modulaire proposant différentes lois de production et de transfert ainsi qu’une interface graphique pour faciliter la construction, le calage et l’évaluation des modèles. La conceptualisation de cette plateforme s’est inspirée de la plateforme ATHYS [1] développée à Hydrosciences Montpellier, dont certains modèles pluie-débit distribués ont par ailleurs été repris directement.

Dès les premières versions de PLATHYNES, les utilisateurs bénéficient des fonctionnalités suivantes :

- Pré traitement automatisé des données spatialisées, dont les Modèles Numériques de Terrain en particulier (calcul des pentes, aires drainées, positionnement du réseau hydrographique et des stations de mesures ...) ;
- Positionnement automatique des sorties du modèle sur le réseau de drainage calculé ;
- Configuration de modèles événementiels à l’aide de différentes lois de production et de transfert ;
- Calibration automatique des paramètres ;
- Affichage des résultats des simulations, calculs de scores et export des résultats.

En outre les contraintes opérationnelles de la prévision des crues sont prises en compte par la mise en place d’un système de fichiers relais qui permet de transmettre d’une simulation à l’autre les états du modèle afin de diminuer très sensiblement la profondeur des données nécessaires à un calcul. Cela a nécessité la réécriture de certains codes de calcul pour les faire passer d’une formulation globale adaptée à un fonctionnement en simulation à une formulation différentielle.

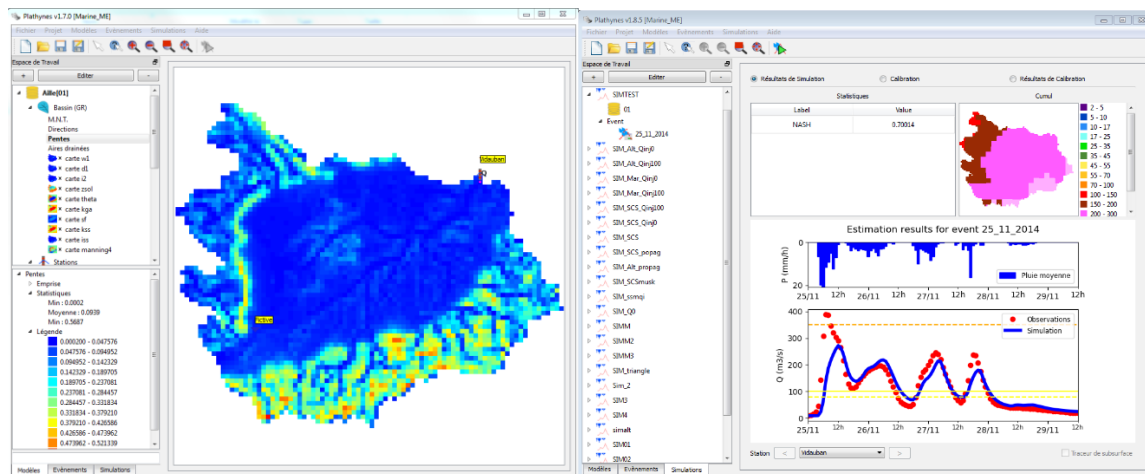


Figure 1 : Interface graphique de PLATHYNES, carte des pentes et visualisation des simulations

Depuis les dix années d'utilisation de la plateforme, le nombre de bassins versants couverts par un modèle PLATHYNES a considérablement augmenté. Les approches de modélisations distribuées ont été mises en œuvre avec succès sur de nombreux bassins versants méditerranéens mais également sur des bassins dont les caractéristiques hydro-climatiques sont très différentes (Forez, Sologne, Touraine, Normandie ...).

Dans le même temps les développements se poursuivent sur la plateforme dans deux directions principales :

1. La consolidation des fonctionnalités qui permettent d'exploiter pleinement les possibilités de la modélisation distribuée. Il s'agit en particulier de la définition de points de sorties du modèle sur des sous-bassins non jaugés, de la mise en place de points d'injection en débits lorsque nous disposons d'une station jaugée en amont du point de prévision et en fonction des approches de modélisations choisies, le choix d'avoir un paramétrage du modèle qui soit global, semi-distribué ou totalement distribué.

Cette souplesse de paramétrisation améliore sensiblement la qualité de la modélisation, même s'il faut garder à l'esprit que la spatialisation des forçages météorologiques a un impact supérieur [6].

La mise en œuvre de ces fonctionnalités particulièrement intéressantes pour la production de prévisions de crues sera détaillée à travers plusieurs exemples sur des bassins versants de la Garonne et des Cévennes.

2. La mise en place d'un mode global semi-distribué qui permet de construire des modèles conceptuels basés sur le chaînage d'objets « biefs » et « sous-bassins » associés respectivement à des lois de transfert et de production.

Les lois de transferts utilisées permettent de mettre en œuvre des approches simples de propagation débit-débit qui en complément des modèles hydrauliques 1D et 2D fournissent des éléments d'aide à la décision pour les prévisionnistes du réseau Vigicrues chargés de produire de prévisions expertisées.

Grâce aux nombreuses possibilités de configurations et à la simplification des tâches permises par l'interface graphique, la plateforme PLATHYNES facilite le déploiement de nombreux modèles (semi-)distribués au sein du réseau Vigicrues. Une formation annuelle de quatre jours, la mise en place d'un groupe des utilisateurs ont permis également de partager méthodes et bonnes pratiques pour le calage de modèle distribués.

3. Des perspectives de développements pour la consolidation de l'outil

Au cours de l'année 2023, deux nouvelles évolutions viendront encore enrichir la plateforme : un nouveau modèle de transfert par hydrogrammes unitaires paramétriques permettant notamment le lissage le long du réseau hydrographique des éclusés des grands ouvrages hydrauliques et un modèle permettant de simuler le fonctionnement des barrages capacitifs.

Le réseau Vigicrues disposera ainsi de solutions de modélisations pour répondre aux défis posés par les nouvelles orientations stratégiques du réseau Vigicrues dans un contexte de changement climatique.

4. REFERENCES

- [1] Bouvier, C., Delclaux, F. (1996): ATHYS: A Hydrological environment for spatial modelling and complig with a GIS. Proceedings of the HydroGIS 96, Vienna, Austria, pp. 19-28. AIHS publication no 235
- [2] Bressand F., 2002, Le projet ALHTAÏR du service d’annonce des crues du Gard. La Houille Blanche n°2, 64-68
- [3] Douinot, A., H. Roux, P.-A. Garambois, and D. Dartus. Using a Multi-Hypothesis Framework to Improve the Understanding of Flow Dynamics during Flash Floods. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(10): 5317-40. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5317-2018>, 2018.
- [4] Garambois, P.A., H. Roux, K. Larnier, D. Labat, and D. Dartus. Characterization of Catchment Behaviour and Rainfall Selection for Flash Flood Hydrological Model Calibration: Catchments of the Eastern Pyrenees. *Hydrological Sciences Journal* 60(3): 424-47. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.909596>, 2015.
- [5] Marchandise A., 2007. Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d’Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l’extrême et tests d’hypothèses sur les processus hydrologiques. Thèse, Université Montpellier II sciences et techniques du Languedoc.
- [6] Rouhier, L., Régionalisation d'un modèle hydrologique distribué pour la modélisation de bassins non jaugés. Application aux vallées de la Loire et de la Durance. *Sciences de la Terre*. Sorbonne Université, 2018. Français. (NNT : 2018SORUS316).
- [7] H. Roux, D. Labat, P.-A. Garambois, M.-M. Maubourguet, J. Chorda, D. Dartus. A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments. *Nat. Hazards Earth System Sciences*, 11, 2567–2582, 2011.
- [8] Roux, H., A. Amengual, R. Romero, E. Bladé, and M. Sanz-Ramos. Evaluation of Two Hydrometeorological Ensemble Strategies for Flash-Flood Forecasting over a Catchment of the Eastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20(2): 425-50. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-425-2020>, 2020.

Vigicrues : 20 ans de progrès pour la prévision des crues, et perspectives

Auteurs : Bruno Janet¹, Laurence Pujo¹, Rachel Puechberty¹

¹ Service central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (MTES/DGPR/SRNH), avenue Gaspard Coriolis, Toulouse, France,

bruno.janet@developpement-durable.gouv.fr, laurence.pujo@developpement-durable.gouv.fr,
rachel.puechberty@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

- 1/ Préparation et gestion de crise
- 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Crue, inondation, prévision, avertissement

1. Contexte

L’organisation de la prévision des crues en France est réformée en 2003 avec la création d’un service central, le Schapi, et de services de prévisions des crues. Cette nouvelle organisation permet de passer de l’annonce à la prévision des crues.

En 20 ans, le service rendu aux gestionnaires de crise et au public ont progressé, et cet article en retrace les principales étapes.

2. La vigilance crues en 2006...

L’organisation mise en place permet l’ouverture en 2006 de la vigilance sur les crues.

Il s’agit d’une vigilance dans les 24h à venir, basée sur le même code couleur que la vigilance météo, et concentrée sur les réactions des principaux cours d’eau de la France métropolitaine. Un site spécifique est développé, ww.vigicrues.gouv.fr, accessible à tout public.

En parallèle le Schapi prend la compétence sur l’hydrométrie, permettant la constitution du réseau Vigicrues, composé du Schapi, des SPC et des UH.

Outre la vigilance, le réseau Vigicrues publie dès le niveau jaune un bulletin d’information, et souvent des prévisions, travail élaboré par les SPC.

3. ...Et en 2023

Le service rendu a fortement évolué, et comporte plusieurs outils :

- Le site Vigicrues fournit toujours des informations de vigilance avec un bulletin. Ces informations sont complétées pour certaines stations de cartes de zones d’inondation potentielles, et de prévisions graphiques assorties d’une incertitude. Les usagers peuvent s’abonner à des avertissements sur des franchissements de seuils ou des changements de couleurs, et une application smartphone a été développée. Vigicrues tweet également lors en situation de crise.

- Vigicrues Flash, service d'avertissement sur les crues soudaines est proposé sur abonnement aux gestionnaires de crise, et en visualisation à tout public, ouvert sur 30 000 km de cours d'eau et plus de 10 000 communes
- Le site Repères de crues, site collaboratif donne accès à tout public à plus de 70 000 relevés de repères et de laisses de crues
- La banque Hydro a été remplacée par l'Hydroportail qui donne accès plus facilement à l'ensemble des informations hydrométriques en conservant les statuts progressifs des données, de brutes à validées. Actuellement plus de 2100 stations fournissent des données en temps réel, visibles sur l'hydroportail et Vigicrues.

4. Les progrès qui nous ont permis d'arriver à ce résultat en 20 ans

Cette évolution a été possible grâce à de nombreuses évolutions, et des partenariats avec des opérateurs et des laboratoires :

- Evolution des données d'entrée :
 - Observations pluviométriques : autrefois basées uniquement sur des données au sol de pluviomètres, elles bénéficient maintenant de données issues de la fusion de données (mesures par radar et au sol) fournies par Météo-France (données Antilope)
 - Prévision de précipitations : utilisation de sorties brutes de modèles déterministes qui se sont raffinés, de produits expertisés sur des zones définies conjointement entre les SPC et MF, et depuis peu, de prévisions d'ensemble
- Données d'observation hydrométriques. Le réseau de station a fortement évolué, avec un nombre croissant de stations automatiques (plus de 2000 stations actuellement).

- Evolution des modèles

En fonction du type de cours d'eau, besoin d'utiliser des modèles hydrologiques ou hydrauliques :

- Modèle hydrologique :
 - fort partenariat avec l'INRAE pour le développement et l'amélioration d'un modèle continu conceptuel global à réservoirs, GR, utilisé actuellement par la plupart des SPC. Parler de l'évolution du modèle et de la prise en compte de l'assimilation de données.
 - Développement d'une plateforme de modèles hydrologiques distribués événementiels, avec l'aide de laboratoires universitaires. Celle-ci est utilisée maintenant sur les cours d'eau les plus réactifs.
- Modèles hydrauliques : De nombreux modèles étaient utilisés dans le réseau, Le Schapi préconise l'utilisation de plateformes de modèles dits modèles « nationaux » Il est demandé à chaque SPC d'utiliser à terme ces modèles qui sont maintenus et régulièrement améliorés. Il s'agit des modèles Mascaret (1D) et Télémac (2D), maintenus par un consortium international.

Le changement dans l'utilisation des données d'entrée et des modèles s'est effectué progressivement et a permis de rendre un service de meilleure qualité, avec plus d'anticipation et de précision.

- Pour cela, une collaboration importante a été mise en place avec des opérateurs (INRAE, BRGM, IGN, UGE, Cerema, ...), pour développer des modèles ou les caler, et s'aventurer sur des territoires plus difficile, comme les zones karstiques ou soumise à de la fonte nivale.

5. Les perspectives

De nombreuses évolutions sont pour autant envisagées

- la diffusion en cartographie dynamique des ZIP pour permettre des croisements de données.

- l’augmentation de la couverture de Vigicrues Flash avec une meilleure prise en compte des zones karstiques et de fonte nivale, et le souhait de plus d’anticipation en utilisant les prévisions météorologiques.

- Mais surtout la volonté de proposer une couverture totale du territoire par la vigilance crues. L’information ne sera pas la même sur l’ensemble du territoire en fonction des enjeux et des capacités technique d’effectuer des prévisions. Trois catégories de cours d’eau seront proposées.

Pour tous les cours d’eau, seront assurées une couleur de vigilance et une information qualitative dans le bulletin

En fonction des enjeux et des capacités techniques de prévision, ces éléments seront fournis de façon différenciée :

- niveau 3 : par regroupement de cours d’eau ; uniquement couleur + bulletin
- niveau 2 : par tronçon individuel ; avec couleur + bulletin + des hydrogrammes aux stations, permettant de suivre les hauteurs et débits en temps réel (même service que le niveau de base offert aujourd’hui sur Vigicrues)
- niveau 1 : par tronçon individuel ; avec couleur + bulletin + hydrogrammes + un jeu de ZIP et, à partir de la vigilance jaune, des prévisions sous forme graphique à 24h

Revue d'ensemble des modèles de prévision d'inondation. Forces et faiblesses des méthodes par automates cellulaires.

Focus sur le modèle MICA.

*Strength and weaknesses of cellular-automata based flood models.
Focus on the MICA model*

Auteurs : CAMBONIE Tristan^{1*}, BREDIMAS Alexandre²,

* *auteur correspondant*

¹Bluemapping (Strane-Innovation), 2 route de la Noue – 91190 Gif Sur Yvette, France,
e-mail: tcambonie@bluemapping.com

² Bluemapping (Strane-Innovation), e-mail: abredimas@bluemapping.com

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Modélisation des inondations, Automates cellulaires, MICA, prévision temps réel, calcul haute performance, Cloud

1. Revue des solutions de simulation et de modélisation d'inondations

Le risque d'inondations tend à croître depuis 30 ans, potentiellement aggravé à l'avenir avec le changement climatique. [1] Leur prévision couvre des enjeux variés : cartographie des risques [2], évaluation des dommages occasionnés [3], prévision temps réel [4] [5], gestion de crise, gestion des ressources aquifères, érosion des lits de rivières, transport de sédiments et de polluants, et gestion hydrologique des rivières et des bassins versants. De nombreuses solutions académiques et commerciales existent pour modéliser cette variété de phénomènes et d'usage.

Un premier objectif de ce papier sera de proposer une revue d'ensemble récente des modèles existants (empirique, probabilistes, conceptuels simplifiés et hydrodynamiques), et de comparer leur typologie, forces et faiblesses. Les modèles empiriques se basent sur un historique d'évènements et mesures passés, sur des campagnes de mesures *in situ* et sur une approche probabiliste pour prédire des évènements à venir [6] Les modèles conceptuels simplifiés utilisent des hypothèses physiques minimales permettant de calculer très rapidement des surfaces très étendues (plusieurs centaines à plusieurs milliers de km²), comme les modèles Rapid Flood Spreading Model [7], ou HAND [8]. Les modèles hydrodynamiques se différencient par leur degré d'approximation des équations de Navier-Stokes en 1D (ex. MIKE11 [9] et HEC-RAS [10]), 2D (comme les *kinematic model* [11] , et *diffusive wave model* [12], LISFLOOD-FP [13], JFLOOD [14] et UIM[15]) et 3D.

Parmi les modèles 2D, une nouvelle approche gagne en popularité depuis une dizaine d'année : les modèles basés sur les automates cellulaires (Abréviations AC, ou CA pour Cellular Automata).

Les *automates cellulaires* sont composés de 4 éléments [16] : un réseau de cellules, des états de cellules (valeurs discrètes ou continues), un voisinage de cellules, et un ensemble de règles de transition déterminant l'évolution de l'état d'une cellule d'un pas de temps à un autre en fonction de son état passé et de celui des cellules de son voisinage.

2. Modèles de prévision d'inondation par automates cellulaires

L'objectif de cette partie est de proposer une revue d'ensemble dédiée aux modèles 2D par automates cellulaires et de présenter les avancées récentes dans le domaine. Les spécificités des différents modèles par automates cellulaires seront discutées afin d'identifier leur intérêt et valeur ajoutée spécifiques pour les acteurs de la gestion d'inondations parmi l'éventail des solutions disponibles.

Les premiers travaux utilisant les CA pour la prévision de crues et d'inondation datent du début des années 2000 ([17], CAESAR [18], RuiCells [19], [20]). L'essor de l'usage d'AC pour la prévision des inondations coïncide avec la *Directive européenne de 2007 sur la Prévision du risque inondation*, avec des travaux sur le mouillage en plaine [21], le séchage [22], l'érosion [23], sur la stabilité des modèles par AC [24], [25], [26], sur l'adaptation des pas de temps de simulation [27]. Depuis les années 2010, les principaux modèles développés sont CA2D [27], RunCA [28], WCA2D [29], 2CAFDYM [30], Ca-ffé [31], CAMC [4], HIMCA [32], RRCA [33].

Les avancées récentes dans le domaine se focalisent sur les problématiques de simulation en milieu urbain [34], [33], [35] sur le couplage entre écoulements de surface et réseau d'égouts [36] ou nappes aquifères [30], sur le couplage entre automates cellulaires et modèles conceptuels simplifiés [32] [31], sur une meilleure prise en compte des caractéristiques du terrain [33], sur le couplage avec la biosphère [37].

Lorsque les conditions d'applicabilité sont respectées, les modèles par automates cellulaires sont en mesure de simuler les processus d'inondation avec une précision similaire (ou très légèrement inférieure) aux autres modèles hydrodynamiques 2D [38] [29] tout en gagnant un à deux ordres de grandeur en temps de calcul [29] [31] [32].

Parmi les avancées récentes, le modèle MICA développé par Bluemapping, inspiré du modèle WCA2D [29], a été adapté à une architecture cloud de calcul parallèle haute performance grâce à un financement de 150 k\$ d'Amazon Web Services. Cela permet d'offrir un outil en ligne flexible de prévision du risque d'inondation en temps réel à partir des prévisions Météo France à l'échelle du bassin versant. Les simulations prennent en compte la typologie et usage des sols et les spécificités urbaines (drainage et réseaux d'assainissement). Les performances de notre modèle et ses cas d'usage seront présentés et discutés dans une section à part.

3. REFERENCES

- [1] J. Freer, K. Beven, J. Neal, G. Schumann, J. Hall, et P. Bates, « Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards: Flood Risk and Uncertainty », 2011, doi: 10.1017/CBO9781139047562.
- [2] D. Dutta, S. Herath, et K. Musiak, « An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin », *Hydrological Processes: An International Journal*, vol. 20, n° 6, p. 1365- 1384, 2006, doi: 10.1002/hyp.6092.
- [3] B. Merz, H. Kreibich, R. Schwarze, et A. Thielen, « Review article" Assessment of economic flood damage" », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, n° 8, p. 1697- 1724, 2010, doi: 10.5194/nhess-10-1697-2010.

- [4] M. Issermann, F.-J. Chang, F.-J. Chang, H. Jia, et H. Jia, « Efficient urban inundation model for live flood forecasting with cellular automata and motion cost fields », *Water*, 2020, doi: 10.3390/w12071997.
- [5] A. Domeneghetti, G. J.-P. Schumann, et A. Tarpanelli, « Preface: Remote sensing for flood mapping and monitoring of flood dynamics », *Remote Sensing*, vol. 11, n° 8. MDPI, p. 943, 2019.
- [6] G. Schumann, P. D. Bates, M. S. Horritt, P. Matgen, et F. Pappenberger, « Progress in integration of remote sensing–derived flood extent and stage data and hydraulic models », *Reviews of Geophysics*, vol. 47, n° 4, 2009, doi: 10.1029/2008RG000274.
- [7] J. Lhomme, P. Sayers, B. Gouldby, P. Samuels, M. Wills, et J. Mulet-Marti, « Recent development and application of a rapid flood spreading method », 2008.
- [8] A. D. Nobre *et al.*, « Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model », *Journal of Hydrology*, vol. 404, n° 1- 2, p. 13- 29, 2011.
- [9] D. (Danish H. Institute), « MIKE 11: A modelling system for rivers and channels ». Danish Hydraulic Institute Denmark, 2003.
- [10] G. W. Brunner, « HEC-RAS river analysis system user’s manual version 5.0 », *US Army Corps of Engineers*, p. 962, 2016.
- [11] M. Chaudhry, « 1993, Open-channel flow, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. ».
- [12] V. Chow, D. Maidment, et L. Mays, « Applied Hydrology, MacGraw-Hill », *Inc., New York*, p. 572, 1988.
- [13] P. D. Bates, M. S. Horritt, et T. J. Fewtrell, « A Simple Inertial Formulation of the Shallow Water Equations for Efficient Two-Dimensional Flood Inundation Modelling », *Journal of Hydrology*, vol. 387, n° 1- 2, p. 33- 45, juin 2010, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.027.
- [14] K. Bradbrook, S. Lane, S. Waller, et P. Bates, « Two dimensional diffusion wave modelling of flood inundation using a simplified channel representation », *International Journal of River Basin Management*, vol. 2, n° 3, p. 211- 223, 2004.
- [15] A. S. Chen, S. Djordjevic, J. Leandro, et D. Savic, « The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks », in *Novatech 2007-6ème Conférence sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie/Sixth International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, 2007.
- [16] S. Di Gregorio et R. Serra, « An empirical method for modelling and simulating some complex macroscopic phenomena by cellular automata », *Future generation computer systems*, vol. 16, n° 2- 3, p. 259- 271, 1999.
- [17] R. Thomas et A. Nicholas, « Simulation of braided river flow using a new cellular routing scheme », *Geomorphology*, vol. 43, n° 3- 4, p. 179- 195, 2002.
- [18] T. Coulthard, M. Macklin, et M. Kirkby, « A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 27, n° 3, p. 269- 288, 2002.
- [19] P. Langlois et D. Delahaye, « RuiCells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. », *Rev. Int. Géomatique*, vol. 12, n° 4, p. 461- 487, 2002.
- [20] J. DOUVINET, C. FLEURANT, D. DELAHAYE, S. CAILLAULT, V. VIEL, et P. ELLERKAMP, « Cellular automata (CA) and Multi-Agent Systems (MAS) to better assess complex environmental problems: a review on French research over the last ten years ».
- [21] P. R. Rinaldi, D. D. Dalponte, M. J. Vénere, et A. Clausse, « Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains », *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 15, n° 3, p. 315- 327, 2007.
- [22] M. Krupka, G. Pender, S. Wallis, P. Sayers, et J. Mulet-Marti, « A rapid flood inundation model », in *Proceedings of the congress-international association for hydraulic research*, 2007, vol. 32, n° 1, p. 28.

- [23] M. Ting, Z. Cheng-Hu, et C. Qiang-Guo, « Modeling of hillslope runoff and soil erosion at rainfall events using cellular automata approach », *Pedosphere*, vol. 19, n° 6, p. 711- 718, 2009.
- [24] N. M. Hunter, M. S. Horritt, P. D. Bates, M. D. Wilson, et M. G. F. Werner, « An Adaptive Time Step Solution for Raster-Based Storage Cell Modelling of Floodplain Inundation », *Advances in Water Resources*, vol. 28, n° 9, p. 975- 991, sept. 2005, doi: 10.1016/j.advwatres.2005.03.007.
- [25] N. M. Hunter *et al.*, « Benchmarking 2D Hydraulic Models for Urban Flooding », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, vol. 161, n° 1, p. 13- 30, févr. 2008, doi: 10.1680/wama.2008.161.1.13.
- [26] F. Dottori, E. Todini, et E. Todini, « Developments of a flood inundation model based on the cellular automata approach: Testing different methods to improve model performance », *Physics and Chemistry of The Earth*, 2011, doi: 10.1016/j.pce.2011.02.004.
- [27] B. Ghimire, A. S. Chen, M. Guidolin, E. C. Keedwell, S. Djordjević, et D. A. Savić, « Formulation of a Fast 2D Urban Pluvial Flood Model Using a Cellular Automata Approach », *Journal of Hydroinformatics*, vol. 15, n° 3, p. 676- 686, juill. 2013, doi: 10.2166/hydro.2012.245.
- [28] Q. Shao, D. Weatherley, L. Huang, et T. Baumgartl, « RunCA: A cellular automata model for simulating surface runoff at different scales », *Journal of Hydrology*, vol. 529, p. 816- 829, oct. 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.003.
- [29] M. Guidolin, A. S. Chen, B. Ghimire, E. C. Keedwell, S. Djordjević, et D. A. Savić, « A Weighted Cellular Automata 2D Inundation Model for Rapid Flood Analysis », *Environmental Modelling & Software*, vol. 84, p. 378- 394, oct. 2016, doi: 10.1016/j.envsoft.2016.07.008.
- [30] H. Kassogué, A. Bernoussi, M. Maâtouk, et M. Amharref, « A two scale cellular automaton for flow dynamics modeling (2CAFDYM) », *Applied Mathematical Modelling*, vol. 43, p. 61- 77, 2017, doi: 10.1016/j.apm.2016.10.034.
- [31] B. Jamali, P. M. Bach, L. Cunningham, et A. Deletic, « A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA-ffé) Model », *Water Resources Research*, vol. 55, n° 6, p. 4936- 4953, juin 2019, doi: 10.1029/2018WR023679.
- [32] O. T. Wijaya, O. T. Wijaya, et T.-H. Yang, « A Novel Hybrid Approach Based on Cellular Automata and a Digital Elevation Model for Rapid Flood Assessment », *Water*, 2021, doi: 10.3390/w13091311.
- [33] S. Yao, N. Chen, W. Du, C. Wang, et C. Chen, « A cellular automata based rainfall-runoff model for urban inundation analysis under different land uses », *Water Resources Management*, 2021, doi: 10.1007/s11269-021-02826-2.
- [34] S. Armal, S. Armal, R. Al-Suhili, et R. A. Suhili, « An urban flood inundation model based on cellular automata », *International Journal of Water*, 2019, doi: 10.1504/ijw.2019.10022793.
- [35] Y. Wang, A. S. Chen, G. Fu, S. Djordjević, C. Zhang, et D. Savic, « An Integrated Framework for High-Resolution Urban Flood Modelling Considering Multiple Information Sources and Urban Features », *Environmental Modelling and Software*, 2018, doi: 10.1016/j.envsoft.2018.06.010.
- [36] H. Tavakolifar, H. Abbasizadeh, S. Nazif, et E. Shahghasemi, « Development of 1D–2D urban flood simulation model based on modified cellular automata approach », *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, doi: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0002036.
- [37] G. Mendicino, J. Pedace, et A. Senatore, « Stability of an Overland Flow Scheme in the Framework of a Fully Coupled Eco-Hydrological Model Based on the Macroscopic Cellular Automata Approach », *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2015, doi: 10.1016/j.cnsns.2014.08.021.
- [38] S. Manfreda et C. Samela, « A digital elevation model based method for a rapid estimation of flood inundation depth », *Journal of Flood Risk Management*, vol. 12, p. e12541, 2019.

EVOLUTION DE LA STRATEGIE DE MODELISATION AU SEIN DU SPC VCB ET CONSEQUENCES SUR LA PRODUCTION DE LA VIGILANCE

*Evolution of the modelling strategy within the SPC VCB and consequences on
the flood alert production*

Auteurs : TREILLES Robin^{1*}, BERNARD Alexis², RIVAT Antonin¹, TIBERI-WADIER
Anne-Laure³, BRUNET Frédéric², LE PAPE Etienne⁴, LE FALHER Laurent¹, BELIN
Thomas¹

* *auteur correspondant*

^{1*} Service Prévision des Crues Vilaine et Côtiers Bretons, DREAL Bretagne 10 rue Maurice Fabre 35065 Rennes Cedex, France, robin.treilles@developpement-durable.gouv.fr

² Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement Ouest, 5 rue Jules Vallès – 22015, France, alexis.bernard@cerema.fr

³ Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement Technopôle Brest Iroise, 155 rue Pierre Bouguer 29280 Plouzané, France, anne-laure.tiberi-wadier@cerema.fr

⁴ Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, 42 avenue Gaspard-Coriolis 31057 Toulouse Cedex 1, France, etienne.lepape@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : modélisation hydrologique, modélisation hydraulique, stratégie de déploiement, vigilance crue

1. Introduction

Le Service Prévision des Crues Vilaine et Côtiers Bretons (SPC VCB) est chargé, depuis 2005, de la production d'une vigilance crue sur les principaux cours d'eau de la région Bretagne. Il est administrativement rattaché à la DREAL Bretagne et constitue l'un des 19 SPC du réseau de surveillance Vigicrues. Conformément au Règlement de surveillance et de transmission de l'Information sur les Crues 2019 [1], la vigilance crue « donne une indication la plus fiable possible à l'échelle du tronçon sur les risques engendrés par une crue ou une montée rapide des eaux sur les cours d'eau du périmètre surveillé dans les 24 heures à venir ». Le choix de la couleur de vigilance (verte, jaune, orange ou rouge en fonction de l'intensité du phénomène, de sa période de retour et des enjeux exposés) ainsi que des hauteurs d'eau sur les stations de vigilance et de prévision, sont réalisés par une équipe de prévisionnistes dont le dimensionnement et le fonctionnement sont fonction de l'importance de l'évènement. Cette proposition est transmise au Service Centrale d'Hydrométéorologie et d'Appui à

la Prévision des Inondations (SCHAPI), chargé de l’accepter ou de la modifier, puis aux différents gestionnaires de crise concernés, ainsi qu’au grand public via le site www.vigicrues.gouv.fr.

Pour un évènement donné, le choix de la couleur de vigilance est issu d’une analyse multicritères faisant intervenir de très nombreux paramètres : (i) les données transmises par Météo France ; (ii) les caractéristiques des bassins versants surveillés ; (iii) la quantité, le type et la performance des modèles disponibles sur le territoire ; (iv) les enjeux théoriquement atteints aux hauteurs observées ou prévues ; etc. La présence ou l’absence de modèles de prévision peut grandement impacter la production de la vigilance crues et l’anticipation des évènements. Du fait de l’évolution des outils informatiques, les modèles de prévision disponibles au sein du SPC VCB ainsi que les pratiques liés à la production de la vigilance crues ont évolué au fil du temps. Comment le SPC VCB a adapté sa stratégie de modélisation afin d’optimiser la prévision des crues sur son territoire ? Cette étude s’intéresse à l’apport des différents types de modèles sur la production de la vigilance crues dans un service opérationnel.

2. Stratégie de déploiement des modèles statistiques, hydrologiques et hydrauliques

Dans les années 90 sur la région Bretagne, le SPC VCB a été précédé par les Services d’Annonce des Crues (le SAC 29 et 35). Les SAC fonctionnaient principalement en annonçant les crues sur la base de hauteurs observées. En pratique, les stations de mesure étaient souvent au droit des enjeux, et la hauteur d’annonce de crue correspondait au niveau d’exposition des enjeux avec une marge suffisante. Avec l’évolution et le gain de performance des outils informatiques, un changement de stratégie s’est mis en place à partir de 2004 avec la création du réseau SCHAPI-SPCs. L’annonce de crues (hauteurs observées) a laissé place à la prévision des crues. Le SPC VCB est créé le 1er juin 2005. Les premiers outils développés consistaient en des abaques et tableurs permettant la corrélation entre différents paramètres (hauteur station A/hauteur station B par exemple). L’approche était donc plutôt statistique ou historique, sans représentation des phénomènes physiques à l’œuvre. A cette période, les modèles de prévision répondaient principalement à deux enjeux :

1. Proposer une couleur de vigilance ainsi qu’une hauteur maximale probable sur les bassins surveillés, avec une échéance maximale de prévision de 24h (échéance de la vigilance crues, mais pas toujours cohérente avec le temps de réponse du bassin concerné).
2. Disposer d’outils rapides, simples d’utilisation et efficaces pour la prévision des crues.

Cependant, les abaques et modèles statistiques ne répondent pas à d’autres critères importants qui sont : (i) la représentation physique du phénomène, permettant de modéliser un évènement au-delà de l’historique connu ; (ii) l’étude de la dynamique de la crue ; (iii) la cartographie des zones inondables.

Les importantes inondations qu’a connues la région Bretagne de 2013 à 2014 ainsi que l’évolution de l’ambition de service du réseau Vigicrues (affichage des prévisions graphiques sur VIGICrues, cartographie des inondations...), ont nécessité un virage quant à la stratégie de modélisation. A partir de 2014, un regroupement des abaques ainsi qu’une simplification de leur utilisation via leur interfaçage sont effectués par la création de l’outil « Ahlis » (Application Hydrométéorologique Libre du Service de prévision des crues « Vilaine & côtiers Bretons »). En parallèle, un modèle hydraulique 2D du tronçon de la Vilaine, développé sur le logiciel « Mike », est financé conjointement par le SPC VCB et l’EPTB Vilaine. D’autres modèles hydrauliques sous Mike sont réalisés pour la création de cartes d’inondations. Les temps de calcul s’avèrent trop longs pour être utilisés en opérationnel mais le modèle permet d’obtenir des résultats de cartographie des zones inondables potentielles. A partir de 2015, le développement à grande échelle des modèles hydrologiques de type GRP est lancé sur toute la

région Bretagne. Pour permettre la pérennité des modèles de prévision, le SPC VCB prend la décision d’incorporer un maximum de modèles sur la chaîne nationale développée par le SCHAPI, via la Plateforme Opérationnelle de Modélisation (POM), créée en 2016, à l’exception des modèles Mike qui ne sont pas compatibles avec la POM. En parallèle aux modèles hydrologiques, des modèles hydrauliques 1D sont peu à peu développés à partir du logiciel Mascaret. En 2017 et en 2018, les travaux conjoints du Centre d’Etudes et d’Expertise sur les Risques, l’Environnement, la Mobilité et l’Aménagement (CEREMA), du SPC VCB et du SCHAPI permettent l’intégration successive dans la POM de deux modèles Mascaret 1D du tronçon de l’Odet et de la Laïta (Figure 1). Les résultats de simulation de ces deux modèles permettent en particulier d’améliorer la prise en compte de l’interaction entre le signal de marée et les flux en provenance de l’amont pour ces deux tronçons finistériens. En octobre 2019, le SPC VCB dispose de suffisamment de modèles de prévision pour permettre une publication graphique des stations de vigilance et de prévision. En 2020, la stratégie de modélisation se diversifie : les premiers calages de modèles hydrologiques Plathynes sont effectués et un nouveau modèle de prévision à base physique intitulé Phylou est mis en place. Le SPC VCB dispose à ce jour de 48 modèles de prévisions sur l’ensemble de son territoire dont 2 modèles statistiques (Ahlis et Phylou), 37 GRP, 4 Plathynes et 5 Mascarets (trois en phase de test et deux en opérationnel).

3. Engagement dans la modélisation hydraulique et implications sur la prévision des inondations

Point de bascule dans la stratégie de modélisation, la reprise en main du code de calcul Mascaret répondait à plusieurs impératifs :

- la réacquisition de compétence en régie suite au départ du modélisateur Mike ;
- la reprise en main des capacités de mise à jour des cartes d’inondation issues de Mike ;
- la compatibilité avec le socle national de modélisation temps réel ;
- la nécessité de passer par du 1D et non du 2D, pour les contraintes du calcul en temps réel ;
- la possibilité de modéliser, sur des bases physiques, les secteurs pour lesquels la relation hauteur/débit n’est pas univoque, et où les outils de modélisation transformant la pluie en débit puis en hauteur sont inopérants.

Ce dernier cas est extrêmement fréquent en Bretagne, avec des points de mesure, et de prévision, voire de vigilance, qui sont soumis à des influences aval variable: secteurs sous influence maritime, ouvrages utilisés pour la navigation. Pour réduire, aussi rapidement que possible le manque en couverture par des modèles hydrauliques, deux démarches parallèles ont été lancées, avec en premier lieu l’établissement d’un programme de travail conséquent et pluri-annuel avec le CEREMA. En second lieu, le recrutement dès que possible (avril 2021) d’un agent dédié au sein du SPC VCB à la modélisation hydraulique, sa formation et la réalisation d’un premier modèle, implémenté dans la chaîne temps réel. La Figure 1 présente le programme de déploiement de modélisation hydraulique sur le territoire du SPC VCB.

La stratégie de modélisation mise en place a eu deux principales conséquences sur la production de la vigilance crues : (i) une amélioration du panel d’outils disponibles pour le prévisionniste ; (ii) un développement de la prise en compte des incertitudes rattachés aux modèles et aux événements, avec d’une part le calcul des incertitudes, et d’autre part une démarche contradictoire permise par le multi-modèles.

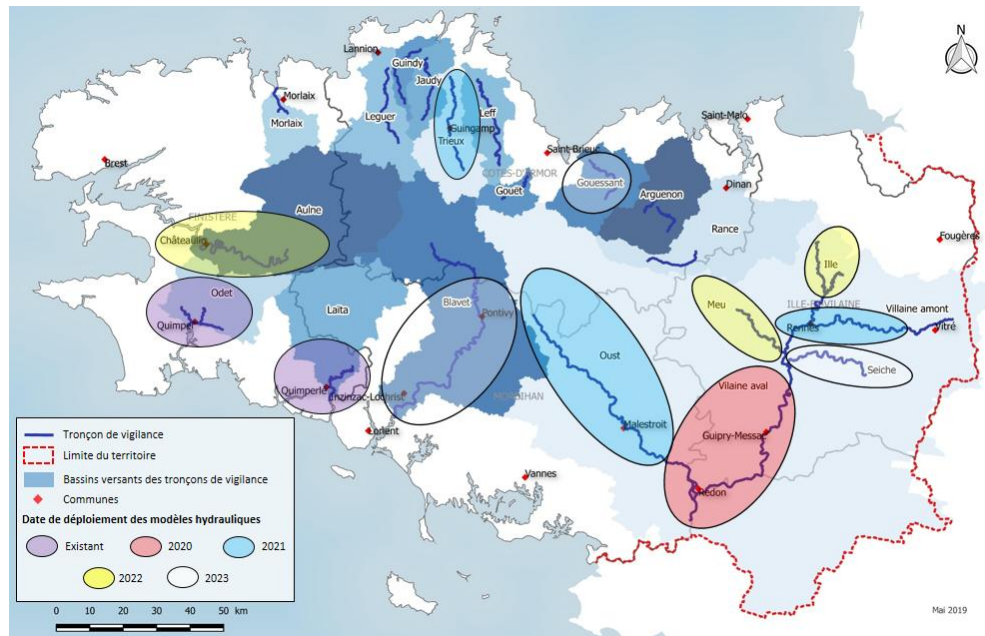


Figure 1 : RIC 2019 du SPC VCB et stratégie de déploiement en interne/externe (CEREMA) des modèles hydrauliques

4. Perspectives futures

La couverture complète du réseau surveillé par les modèles Mascaret est en cours, avec actuellement 5 tronçons modélisés en 4 ans, soit 33 % des tronçons surveillés actuellement. A la suite de ces réalisations, les cartographies sont à créer (sur les Côtes d’Armor principalement) ou à remettre à jour pour les modèles historiquement développés sous Mike. Au-delà de la représentation cartographique qui en découlera, la couverture du territoire ouvre de grandes perspectives en termes d’extrapolation des relations hauteur/débit au-delà des plus forts débits connus.

En outre, le SPC devra poursuivre la prise en compte de l’incertitude dans ses modèles, que ce soit dans l’intégration des données en entrée (données météorologiques) mais également sur la diffusion de ces incertitudes au niveau des interfaces entre modèles hydrologiques et hydrauliques. Des travaux ont été menés sur le sujet [2] et il convient d’exploiter ces résultats en vue de mieux communiquer auprès des acteurs de la gestion de crises sur la réalité de l’information qui leur est transmise. Enfin, avec l’évolution de la vigilance crues, les SPC devront également étendre la production de la vigilance à l’ensemble du territoire. Dès lors, de nouveaux modèles devront être développés; ces derniers devront s’adapter : (i) à la disponibilité des données, (ii) à la zone d’étude bien plus étendue qu’auparavant, (iii) aux contraintes de temps qu’impose la production de la vigilance.

5. REFERENCES

- [1] Règlement de surveillance, de prévision et de transmission de l’Information sur les Crues, SPC Vilaine et Côtiers Bretons, Novembre 2019, https://www.vigicrues.gouv.fr/ftp/RIC/RIC_SPC_VCB.pdf
- [2] Prévisions d'ensemble hydrologiques et hydrauliques pour la vigilance crues, Thèse Anne-Laure Tiberi, CEREMA, EDF R&D, CERFACS et SCHAPI. Septembre 2021

Les Analogues, une approche statistique adaptée pour la prévision opérationnelle des crues et étendue à l’ensemble de la France

Analog sorting of meteorological patterns, a statistical approach adapted to operational flood forecast and extended to the whole of France

Auteurs : MARTY Renaud^{1*}, GAUTHERON Alain², EDOUARD Simon², HORTON Pascal³, OBLED Charles⁴

* *auteur correspondant*

¹ DREAL Centre-Val de Loire, 5 avenue Buffon, CS 96407, 45065 Orléans, France, renaud.marty@developpement-durable.gouv.fr

² DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, 17 boulevard Joseph Vallier, 38030 Grenoble Cedex 2, France, alain.gautheron@developpement-durable.gouv.fr, simon.edouard@developpement-durable.gouv.fr

³ Terranum, rue de l’Industrie 35b, 1030 Bussigny, Suisse, pascal.horton@terranum.ch

⁴ Université Grenoble-Alpes – Institut des Géosciences de l’Environnement, CS 40700, 38058 Grenoble Cedex 9, charles.obled@univ-grenoble-alpes.fr

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : Adaptation statistique, prévision probabiliste de précipitations, prévision hydrologique opérationnelle

La méthode des Analogues est une approche assez simple d'adaptation statistique de prévision numérique du temps [1, 2]. Elle repose sur le constat que la grandeur ‘précipitation’ est l'une des plus difficiles à prévoir, et sur l'hypothèse que celle-ci peut être expliquée en partie par des grandeurs dynamiques ou physiques (ex : géopotentiel, humidité). Elle propose des prévisions probabilistes de précipitations en confrontant une situation synoptique prévue (cible) à une archive de situations candidates déduite des observations passées, et en retenant les plus similaires selon un critère d'analogie. A partir des dates associées à ces situations analogues, les valeurs de précipitations correspondantes permettent de proposer une distribution empirique des valeurs possibles. Elle offre donc aussi la possibilité au prévisionniste de se référer à des situations passées historiques proches de celle qui est prévue par la prévision numérique du temps.

Cette approche d'adaptation statistique est testée (dès les années 1970...) puis intégrée dans les systèmes opérationnels d'organisations produisant des prévisions hydrologiques probabilistes : producteurs d'hydro-électricité (EDF, CNR, HydroQuébec...), services de prévisions des crues en France, en Suisse... Cette approche a bénéficié d'une part de l'apparition de fichiers de champs météorologiques réanalysés, avec des résolutions spatiales et temporelles de plus en plus fines, et d'autre part de l'accroissement des puissances de calcul qui ont permis des optimisations conséquentes de cette méthode d'exploration des données. En France, aujourd'hui, les services de prévision des crues (SPC) Alpes-du-Nord (AN) et Loire-Allier-Cher-Indre (LACI) disposent d'outils produisant des prévisions de précipitations selon la méthode des Analogues aux pas de temps journaliers et infra-journaliers. La qualité des prévisions émises et leur caractère probabiliste conduisent le réseau Vigicrues à étendre la méthode à l'ensemble du territoire et à recommander un seul outil opérationnel.

Le choix de l'outil opérationnel s'est porté sur la suite logiciel AtmoSwing [3] en raison de :

- sa capacité à manipuler les données (réanalyses et prévisions météorologiques) des configurations déjà implémentées dans les SPC AN et LACI et également de nouvelles sources de données (réanalyses ERA5, prévision météorologique du CEPMMT, de Météo-France) ;
- l'implémentation facilitée des configurations actuelles ;
- la présence de sous-modules dédiés à l'optimisation de la méthode, à la production et à la visualisation des prévisions ;
- l'utilisation possible à un pas de temps-infra-journalier ;
- son cadre de développement open-source.

L'intégration de cet outil s'accompagne de développements ajoutant des fonctionnalités existantes dans les anciens outils (affichage des champs météorologiques, définition d'une valeur déterministe à partir d'une prévision probabiliste), conçues pour faciliter l'usage au sein des systèmes opérationnels du réseau Vigicrues (formats d'exports, échange par SFTP) et valider son utilisation d'un pas de temps infra-journalier.

L'extension de la méthode nécessite l'usage d'une archive unique de précipitations: la réanalyse: SAFRAN [4]. La fenêtre temporelle sur laquelle est déterminé le cumul journalier est adapté aux prévisions expertisées fournies par Météo-France, à savoir 0h TU – 0hTU (au lieu de 6h-6h dans les études précédentes). Par ailleurs, il n'est pas nécessaire de définir une configuration d'analogie en chaque pixel de la modélisation SAFRAN, en raison de la transférabilité spatiale mise en évidence par Chardon *et al.* [5]. Le territoire métropolitain est découpé en 30 zones par des méthodes de clustering jugeant la similarité des chroniques pluviométriques des pixels de la modélisation SAFRAN, en considérant une normalisation préalable des précipitations (racine carrée du rapport à la valeur décennale) et un seuil pour cibler les situations météorologiques pouvant générer des crues [6].

Le calage de la méthode des Analogues sur la France est réalisé par des algorithmes génétiques développés par Horton *et al.* [7] reposant sur les réanalyses météorologiques ERA5. Les prévisions de précipitations produites par la suite logicielle sont ensuite intégrées parmi les outils mis à disposition des prévisionnistes, que ce soit pour l’analyse de la situation hydro-météorologique pouvant conduire à des crues, ou pour alimenter les systèmes numériques des SPC. Des évolutions sont toutefois indispensables pour se conformer aux besoins de la modélisation hydrologique, notamment le pas de temps infra-journalier selon les conseils d’Obled *et al.* [8], et pour construire des scénarios hydrologiques avec cohérence spatio-temporelle (Bellier *et al.*, [9]) à l’issue du traitement statistique des prévisions météorologiques.

1. REFERENCES

- [1] Bontron, Guillaume, Abdelatif Djerboua et Charles Obled. Sélection de situations météorologiques analogues : applications en prévision opérationnelle de précipitations et en évolution climatique. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*. 8 (2002), 46-51, <https://doi.org/10.1051/lhb/2002106>
- [2] Marty, Renaud, Isabella Zin, Charles Obled, Guillaume Bontron, et Abdelatif Djerboua. Toward Real-Time Daily PQQF by an Analog Sorting Approach: Application to Flash-Flood Catchments, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51, 3 (2012): 505-520, accessed Jan 18, 2023, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-011.1>
- [3] Horton, Pascal : AtmoSwing: Analog Technique Model for Statistical Weather forecastING and downscaling (v2.1.0), *Geoscientific Model Development*, 12, 2915–2940, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2915-2019>, 2019.
- [4] Vidal, Jean-Philippe, Eric Martin, Laurent Franchistéguy, Martin Baillon, M. et Jean-Michel Soubeyroux. (2010), A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.*, 30: 1627-1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- [5] Chardon, Jeremy, Benoit Hingray, Anne-Catherine Favre, Philemon Autin, Joël Gailhard, Isabella Zin, et Charles Obled. Spatial Similarity and Transferability of Analog Dates for Precipitation Downscaling over France, *Journal of Climate* 27, 13 (2014): 5056-5074, accessed Jan 18, 2023, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00464.1>
- [6] ARTELYS, Dreal Centre-Val de Loire. Classification de séries temporelles de précipitations pour le zonage du territoire français métropolitain (2021), 1-63
- [7] Horton, Pascal, Michel Jaboyedoff et Charles Obled. Using genetic algorithms to optimize the analogue method for precipitation prediction in the Swiss Alps, *Journal of Hydrology*, 556 (2018), 1220-1231, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.017>
- [8] Obled, Charles, Isabella Zin, et Benoît Hingray. Choix des pas de temps et d'espace pour des modélisations parcimonieuses en hydrologie des crues, *La Houille Blanche*, 5 (2009), 81-87, <https://doi.org/10.1051/lhb/2009059>

- [9] Bellier, Joseph, Isabella Zin et Guillaume Bontron. Generating coherent ensemble forecasts after hydrological postprocessing: Adaptations of ECC-based methods. *Water Resources Research*, 54 (2018), 5741– 5762. <https://doi.org/10.1029/2018WR022601>

Assimilation d’observations de débit dans un modèle semi-distribué de prévision des crues : jusqu’où les observations amont peuvent-elles améliorer les prévisions aval ?

Streamflow data assimilation in a semi-distributed flood forecasting model: benefits of upstream data for downstream forecasts

Auteurs : ROYER-GASPARD Paul^{1*}, BOURGIN François², PERRIN Charles², ANDRÉASSIAN Vazken², DE LAVENNE Alban², THIREL Guillaume², TILMANT François²

* *auteur correspondant*

¹Université Côte d’Azur, UMR CNRS 7300 ESPACE, Nice, 06204, France, e-mail: paul.royer-gaspard@hydroclimat.com

²Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, Antony, e-mail : charles.perrin@inrae.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : prévision des crues, modélisation semi-distribuée, assimilation de données

1. Contexte

Depuis la création du SCHAPI en 2003, des progrès importants ont été réalisés dans le domaine de l’anticipation des risques d’inondations. Dans celui plus particulier de la prévision hydrologique, ils ont notamment abouti au déploiement opérationnel du modèle GRP (Berthet, 2010), développé par INRAE (ex-Irstea), dans plusieurs Services de Prévision de Crues (SPC) en France métropolitaine. Les travaux autour de GRP en ont fait un modèle efficace (Berthet, 2010 ; Bourgin, 2014), et le modèle présente également l’avantage d’une structure et d’un schéma d’assimilation des débits simples qui le rend très facilement manipulable par les prévisionnistes. Son utilisation à grande échelle a néanmoins débouché sur l’identification de plusieurs pistes d’amélioration, qui ont conduit à plusieurs travaux de recherche (e.g. Peredo, 2021 ; Astagneau, 2022). En particulier, la discrétisation spatiale « globale » de GRP empêche à la fois la valorisation de données spatialisées de précipitations et l’assimilation dans le modèle d’observations de débit aux stations intérieures des bassins versants modélisés. Bien qu’une adaptation semi-distribuée de GRP existe (TGR ; Munier, 2009), elle est peu utilisée par les SPC car elle ne donne pas toutes les garanties espérées par rapport au modèle initial, du fait de la simplification de sa structure pour le besoin de l’assimilation de données de débit (Lobligeois, et al., 2015).

Bien qu’à première vue nécessairement bénéfique, le succès de l’évolution d’une version globale à une version semi-distribuée d’un modèle hydrologique dépend des interactions entre discrétisation spatiale et données à disposition. En effet, il faut être en mesure d’équilibrer la division d’un bassin versant en sous-bassins entre la quantité – souvent insuffisante – de données disponibles (pour le calage ou l’assimilation de données) et celle – souvent excessive – de paramètres et d’états à contraindre. Généralement, un nombre limité de stations de jaugeage (moins de 10) doivent servir à estimer plusieurs centaines de paramètres et d’états. En matière de calage, des méthodes de régionalisation permettent aujourd’hui d’avoir des performances souvent au moins aussi bonnes en simulation semi-distribuée qu’en simulation globale (e.g. de Lavenne et al., 2018). En matière d’assimilation de données, l’utilisation de méthodes d’ensemble permettant la représentation des incertitudes aboutit à

des résultats encourageants malgré des coûts de calcul importants (e.g. Abbaszadeh et al., 2018 ; Piazzini et al., 2021).

Par ailleurs, outre la faible disponibilité des données de débit, la question de la cohérence entre celles-ci est également un problème central, particulièrement en prévision où les observations servent à corriger les modèles. En effet, il est impératif que les contributions des sous-bassins amont soient correctement estimées pour corriger adéquatement les états du modèle aux sous-bassins aval. Or, ces contributions ne sont pas mesurables, et une forte incertitude subsiste quant à la provenance des erreurs lors de l’assimilation de données à l’aval : viennent-elles des estimations de débits produits par les sous-bassins aval ou amont ? D’une représentation incorrecte des transferts hydrauliques dans le réseau hydrographique ? Ou bien des observations elles-mêmes ?

Dans cette étude, nous avons cherché à caractériser les bénéfices de l’assimilation des observations de débit aux stations intérieures d’un bassin versant pour la prévision des crues à l’aval. Pour cela, nous avons construit GRPS, une version semi-distribuée simple de GRP. Les travaux ont été conduits pour répondre à deux questions :

- Comment la précision des prévisions de GRPS se compare-t-elle à celle de GRP ?
- Quelle est la sensibilité de GRPS aux erreurs dans les apports de débit venant de l’amont, c’est-à-dire à la fois aux erreurs de prévision aux stations amont et aux erreurs de routage ?

2. Méthodologie

Le modèle GRPS est un modèle hydrologique au pas de temps horaire, conçu à partir de l’architecture du modèle hydrologique semi-distribué GRSD (Lobligeois, 2014) et de GRP. Dans GRPS, les contributions au débit des sous-bassins versants amont sont modélisées avec le modèle GRP, et sont acheminées dans le réseau hydrographique vers l’aval avec un module de routage consistant en un décalage temporel simple des hydrogrammes amont. Le schéma d’assimilation des données de débit a été repris de GRP et consiste en une insertion directe de l’observation dans le réservoir de routage du modèle. Ainsi, la différence entre GRP et GRPS n’est liée qu’au caractère semi-distribué de ce dernier et à rien d’autre.

L’évaluation du modèle a été réalisée sur une sélection d’événements de crues survenus sur un grand échantillon de 136 bassins versants emboîtés répartis sur l’ensemble de la France métropolitaine. Ces bassins versants emboîtés ont été choisis de sorte que les stations amont soient toutes directement liées à l’exutoire aval du bassin sans station intermédiaire. De la sorte, la discrétisation spatiale des bassins versants de l’étude suit toujours le même schéma. Les événements ont été sélectionnés au moyen d’un algorithme automatique de détection de pics de crue et d’un algorithme de croisement entre les événements détectés aux différentes stations d’un bassin versant. Les 10 événements semi-distribués ayant les plus importants pics de crue ont été retenus pour chaque bassin versant emboîté, amenant à 1360 le nombre total d’événements sélectionnés.

Dans l’esprit d’une évaluation sans concession du modèle (*crash tests*, Andréassian et al., 2009), les modèles ont été évalués en calage-contrôle et forcés par les pluies de la réanalyse Comephore (Tabary et al., 2012) afin de disposer des prévisions idéales de GRP et donner à GRPS un adversaire aussi coriace que possible. Le calage de GRPS reprend l’architecture séquentielle décrite par Lobligeois (2014) pour GRSD. Les prévisions ont été évaluées jusqu’à 5 jours d’échéance, sachant que le temps de concentration du bassin le plus lent de la base de données est d’environ 4 jours et la moyenne autour d’un jour.

Enfin, nous avons examiné les performances relatives de plusieurs versions de GRPS par rapport à celles de GRP. Ces versions diffèrent essentiellement vis-à-vis du degré de correction du modèle avec les observations aux points exutoires amont (de non-utilisées à utilisées exclusivement) et du module de routage des hydrogrammes de l’amont vers l’aval dans le réseau hydrographique (*simple lag, lag & rout*).

3. Résultats et conclusion

Les résultats montrent que, d’une manière générale, l’approche semi-distribuée améliore faiblement la qualité moyenne des prévisions sur l’échantillon d’étude par rapport à l’approche globale, dissimulant cependant une grande disparité de situations. Un nombre significatif de bassins versants bénéficient clairement de l’assimilation des observations amont pour la prévision aval, particulièrement aux échéances de prévision correspondant au temps de routage des hydrogrammes amont corrigés. Aux échéances courtes, la qualité des prévisions de GRPS est très sensible à celle des observations amont et de la représentation du routage hydraulique. Aux échéances lointaines, c’est la qualité des prévisions des modèles des sous-bassins amont qui est déterminante.

Ce travail soulève un certain nombre de pistes de recherche. Premièrement, il convient de vérifier la transposition de ces résultats au contexte réel de la prévision, c’est-à-dire avec l’utilisation de précipitations prévues. Par ailleurs, le contexte spécifique de la prévision permettant d’après nos résultats de mieux différencier les formulations du routage, on peut se questionner sur l’utilisation de modèles plus aboutis que les méthodes conceptuelles utilisées ici ainsi que sur la sensibilité des gains éventuels à la discrétisation spatiale des bassins versants. Enfin, la capacité prédictive du modèle aux exutoires non jaugés n’a pas été considérée dans cette étude et mérite également des travaux spécifiques.

Malgré ces nombreuses questions, les résultats obtenus montrent qu’il est d’ores-et-déjà permis d’envisager l’adoption d’un modèle semi-distribué simple adapté de GRP pour la prévision opérationnelle des débits.

4. REFERENCES

- [1] Abbaszadeh, P., Moradkhani, H. et Yan, H. : Enhancing hydrologic data assimilation by evolutionary particle filter and Markov chain Monte Carlo. *Advances in Water Resources*, 111, 192–204, 2018.
- [2] Astagneau, P. : Pistes d’amélioration de la généralité et de l’efficacité d’un modèle opérationnel de prévision des crues. INRAE (Antony), Sorbonne Université (Paris), GRNE (Paris), 212 pp, 2022.
- [3] Andréassian, V., Perrin, C., Berthet, L., Le Moine, N., Lerat, J., Loumagne, C., Oudin, L., Mathevet, T., Ramos, M.-H., Valéry, A. : HESS Opinions “Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10), 1757-1764, 2009.
- [4] Berthet, L. : Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l’information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 2010.
- [5] Bourgin, F. : Comment quantifier l’incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 230 pp, 2014.

- [6] de Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., Ramos, M.-H. et Perrin, C. : A regularization approach to improve the sequential calibration of a semidistributed hydrological model. *Water Resources Research*, 55(11), 8821–8839, 2019.
- [7] Lobligeois, F. : Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français. Thèse de doctorat, AgroParisTech, 2014.
- [8] Lobligeois, F., Delaigue, O. et Furusho, C. : Développement de modèles hydrologiques semi-distribués GRP et TGR sur les bassins du Rhin, Sarre, Bruche, Ill et Zorn. Rapport Convention N° 2014/MRN/SPC, Affaire suivie par la DREAL Alsace, Irstea, 2015.
- [9] Munier, S. : Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d’un bassin versant anthropisé. Thèse de doctorat, Cemagref (Montpellier), AgroParisTech (Montpellier), 2009.
- [10] Peredo, D. : Quels gains d’une modélisation hydrologique adaptée et d’une approche d’ensemble pour la prévision des crues rapides ? Thèse de doctorat, INRAE (Antony), Sorbonne Université (Paris), GRNE (Paris), 269 pp, 2021.
- [11] Piazzi, G., Thirel, G., Perrin, C. et Delaigue, O. : Sequential data assimilation for streamflow forecasting : Assessing the sensitivity to uncertainties and updated variables of a conceptual hydrological model at basin scale. *Water Resources Research*, 57(4), 2021.
- [12] Tabary, P., Dupuy, P., L’Henaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., Merlier, C. et Soubeyroux, J.-M. : A 10-year (1997–2006) reanalysis of quantitative precipitation estimation over france: methodology and first results. *IAHS-AISH Publication*, 351, 255–260, 2012.

Retours d’expériences sur les inondations 2022 en Guadeloupe

Feedback 2022 Guadeloupe Floods

Auteurs : POIRAUD Océane^{1*}, BARREAU Laura²

¹DEAL Guadeloupe, Route de Saint-Phy, BP 54, 97102 BASSE-TERRE Cedex, France, e-mail: oceane.poiraud@developpement-durable.gouv.fr

²Cerema Normandie-Centre, Agence de Blois, 11 Rue Laplace, 41000 Blois, France, e-mail: laura.barreau@cerema.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : REX, protocole de collecte post-crue, tempête Fiona, inondations, plateforme des repères de crues

1. Contexte

La Guadeloupe est un petit archipel à grande variabilité spatiale avec des précipitations localement intenses. Les épisodes pluvieux sont liés aux phénomènes dépressionnaires de grande échelle pendant la saison cyclonique, mais aussi aux phénomènes convectifs locaux tout au long de l’année. La forte variabilité spatiale est imposée par le relief des îles. Le réseau hydrographique se distingue entre la Basse-Terre et la Grande-Terre avec respectivement des écoulements permanents et un système de ravines intermittentes. Sur le territoire il existe différents types d’inondation souvent concomitants : les débordements de cours d’eau, le ruissellement et les submersions marines.

En 2022, deux épisodes majeurs d’inondation ont touché le territoire entraînant trois décès : épisodes d’avril et de septembre (Fiona).

2. Protocole de collecte post-crue

La collecte terrain post-inondation suite aux épisodes pluvieux significatifs permet de caractériser l’aléa et les secteurs impactés pour en tirer des enseignements utiles et capitaliser de la donnée. Une organisation interne qui permette de répondre à ce besoin a ainsi été mise en place au cours de l’année 2020. Le protocole de collecte d’information sur le terrain suite à une inondation n’est pas relatif à un événement particulier et permet de déployer une méthode homogène pour tous les événements. Il s’agit d’une démarche d’anticipation, garante de la qualité de la collecte (réactivité, rapidité et efficacité). Ce protocole permet de relever des laisses d’inondations dont des Plus Hautes Eaux (PHE). Elles sont ensuite bancarisées sur la plateforme nationale des repères de crues. Des formations à la collecte sont réalisées en interne et depuis 2022 sont ouvertes aux collectivités afin que celles-ci s’emparent de l’action et la démultiplie à l’échelle de leur territoire.

L’existence d’un protocole de collecte doit permettre « d’assurer une réactivité lors de la survenue d’une inondation afin de lancer les collectes rapidement après l’évènement pour une plus grande

précision et fiabilité des informations collectées, une rapidité et une efficacité de ces collectes, et une qualité des résultats obtenus afin de pouvoir correctement analyser le déroulement et les conséquences de l'évènement » [1]

À titre indicatif, en 2022 c'est 243 relevés pour 5 évènements, tandis qu'en 2021 c'est 0 relevé pour 1 évènement.



Figure 1: Relevé de terrain dans une école à Pointe-à-Pitre par nos agents

3. Le 30 avril des pluies d'inter-saison

Dans une période d'inter-saison, comme l'est le mois d'avril, nous avons vécu dans la nuit du 29 au 30 avril un épisode pluvieux qui revêt un caractère exceptionnel avec une durée de retour supérieure à 50 ans et un bilan humain lourd de deux décès. La vigilance rouge est passée à 4h47 du matin. Les communes des Abymes, de Sainte-Rose et de Deshaies ont été fortement impactés.

Nous avons déclenché le protocole de collecte terrain post-inondation. Au total 19 agents, de la DEAL et de la collectivité de Cap Excellence confondus, se sont portés volontaires pour effectuer des relevés de terrain. Il nous a fallu une semaine de terrain pour recueillir 124 relevés dont 98 PHE. Les observations de terrains ont montré que les inondations étaient principalement liées à du ruissellement et à une mauvaise gestion des eaux pluviales.



Figure 2: Inondation du centre commercial des Abymes lors de l'épisode pluvieux du 30/04/22

4. Le 16 septembre, la tempête Fiona

La tempête tropicale Fiona a frappé la Guadeloupe le 16 septembre 2022 avec des cumuls parfois record. La quasi totalité du territoire a été touché mais le sud de la Basse-Terre plus sévèrement. Son passage a occasionné un épisode pluvio-orageux intense suivi dans son sillage par des bandes pluvieuses instables et durables imposant le maintien de la vigilance rouge pendant près de 24h.

Nous avons déclenché le protocole de collecte terrain post-inondation. Au total 9 agents DEAL se sont portés volontaires pour effectuer des relevés de terrain. Au vu de l'ampleur des dégâts, le peu d'effectif a entraîné une campagne de 10 jours de relevés étalés sur 3 semaines pour recueillir 100 relevés dont 75 PHE. La collecte a été impactée par un fort déplacement de sédiments dans les rivières qui empêchait parfois de voir jusqu'où l'eau était montée.



Figure 3: Chariage important des sédiments dans la Rivière Des Pères ayant entraîné un décès

5. Conclusion

Le territoire inégalement réparti en termes d’inondations a été sujet à de nombreux événements au cours de l’année précédente. Les retours d’expérience nous ont permis de capitaliser de l’information sur les différents types d’inondations et de connaître les facteurs pouvant favoriser celles-ci. Une fois versée sur la plateforme des repères de crues les données, accessibles à tous, peuvent être utilisées dans le cadre d’études hydrauliques, dans la cartographie de zones inondées, mais également participer à la culture du risque.

La tempête Fiona a bousculé les routines de collecte. Pour l’année 2023, nous souhaitons revoir les besoins d’amélioration pour gagner en temps et en efficacité.

6. REFERENCES

- [1] Cerema - Collecte d’informations sur le terrain suite à une inondation – Guide méthodologique. Mai 2017 (lien si utile : https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/09/agj_collecteinformations_inondation_guide_6sept17_cle0c83e7.pdf)

AMÉLIORATION DE LA PRÉVISION DES CRUES GRÂCE AU COUPLAGE DE MODELES HYDROLOGIQUES GRP

Improving flood forecasts by coupling GRP hydrological models

Auteurs : KHERROU Soufiane^{1*}, DEVERS Alexandre¹, CAILLOUET Laurie¹, VANNIER Olivier¹ et DOMMANGET Etienne¹

* *auteur correspondant*

¹Compagnie Nationale du Rhône, 2 rue André Bonin, 69004 Lyon, France

Choix du thème/session :

1/ Progrès réalisés et perspectives d’amélioration pour la prévision des crues et des inondations

2/ Evolutions des systèmes et chaînes de prévision hydrométéorologiques opérationnelles

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Prévision des crues, modélisation hydrologique, multi-modèle, GRP, Rhône, CNR

1. Contexte

Compagnie Nationale du Rhône (CNR), concessionnaire du fleuve Rhône, gère 19 aménagements de production d’hydroélectricité le long du Rhône français. Outre la production d’électricité, l’entreprise gère également 19 écluses afin de promouvoir le transport fluvial, et soutient l’agriculture via l’irrigation des terres agricoles par le fleuve Rhône.

Afin de réaliser au mieux ces missions et de garantir la sûreté hydraulique, il est nécessaire de prévoir à l’avance les débits du Rhône et donc le débit de ses affluents, notamment en période de crues. CNR s’est donc dotée de plusieurs chaînes opérationnelles de prévision des débits (Caillouet et al., 2022 [2]). Différents types de modèles de prévision des débits sont utilisés dans ces chaînes, dont les modèles GRP (Tangara, 2005 [7] & Berthet, 2010 [1]). Ces derniers sont des modèles pluie-débit conceptuels, utilisés au pas de temps horaire. Ils permettent la prévision du débit en fonction de variables météorologiques, et de paramètres de modélisation calés sur une période historique. Ils sont appliqués sur les affluents du Rhône les moins influencés par les activités humaines (Valserine, Guiers, Gier, Eyrieux, Drôme, Gard, etc.). Les modèles des affluents influencés par la neige sont enrichis d’un module neige conçu par CNR (FLOCON), cousin de CemaNeige (Valery, 2010 [8]). Il permet de gérer la limite pluie-neige et de générer une lame d’eau de fusion en simulant l’évolution du stock de neige.

2. Méthodes

Le calage de tous les modèles utilisés à CNR a été mis à jour en 2021 et 2022. Ce fût l’occasion d’une réflexion sur les stratégies de calage les plus pertinentes pour la prévision des débits. Cela a notamment permis de s’interroger sur le choix des critères de calage (NSE, Nash et Sutcliffe (1970) [5] ou KGE, Gupta et al., (2009) [3]) ou encore la nécessité de transformer les débits lors de la calibration (afin de donner plus de poids aux hautes eaux ou aux basses eaux).

L’étude d’Oudin et al., (2006) [4] propose de combiner les simulations issues de calibrations avec différentes fonctions objectifs, avec le modèle GR4J (Perrin et al., (2003) [6]), au pas de temps journalier. Dans cette étude, le modèle est calé deux fois en considérant deux fonctions objectif différentes. Le premier calage vise à minimiser la somme quadratique des erreurs sur le carré du débit

$\sum(Q_{obs,j}^2 - Q_{sim,j}^2)^2$), afin de donner plus d'importance aux erreurs sur les débits importants. Le second calage minimise la somme des erreurs quadratiques sur la racine carrée des débits $\sum(\sqrt{Q_{obs,j}} - \sqrt{Q_{sim,j}})^2$, afin de faire ressortir cette fois les erreurs sur les basses eaux. Finalement, par une approche multi-modèles, c'est une combinaison par pondération des simulations obtenues à partir de ces deux jeux de paramètres qui est retenue. Une variable interne du modèle (l'état de remplissage d'un réservoir reflétant l'état d'humidité du bassin versant) permet une pondération dynamique entre ces deux simulations : lorsque le réservoir est rempli, la simulation obtenue à partir du calage sur le carré des débits est prédominante, tandis que lorsque le réservoir est vide, c'est l'autre simulation qui est favorisée.

Nos modèles fonctionnant sur une base GRP horaire, la méthodologie d'Oudin et al. (2006) [4] a dû être adaptée. En effet, des études de sensibilité ont montré qu'il est plus pertinent de considérer une autre variable interne (état de remplissage du réservoir reflétant le transfert dynamique du débit dans le système) comme référence, afin de combiner les simulations.

Plusieurs combinaisons de simulations ont été testées avec une période de calibration allant de 2012 à 2018 et une période de validation sur 2019-2020. Parmi elles:

1. Une combinaison des simulations calées sur des débits sans transformation (Q) et transformés sous racine (\sqrt{Q}), notée $Q+\sqrt{Q}$,
2. Une combinaison des simulations calées sur des débits transformés au carré (Q^2) et transformés sous racine (\sqrt{Q}), notée $Q^2+\sqrt{Q}$.

3. Résultats

Le multi-modèle $Q^2+\sqrt{Q}$ montre les meilleures performances pour la plupart des bassins considérés. Dans le cas de l'Ardèche et pour les hauts débits, le multi-modèle donne un NSE de 0.80, alors que le modèle calé sur le débit brut donne un NSE de 0.84, soit une augmentation de 0.04, en considérant une simulation continue sur la période 2012-2020.

Les prévisions de ces modèles étant expertisées en opérationnel par les prévisionnistes de CNR, la validation objective a été complétée par une analyse qualitative des prévisions lors d'événements de crues. La Figure 1 présente un événement en mars 2019 sur le bassin du Guiers. Cet événement est traduit par un pic de 144 m³/s. Le multi-modèle $Q^2+\sqrt{Q}$ simule un débit maximal de 120 m³/s alors que le modèle Q prévoit un débit maximal de 104 m³/s.

En conclusion, l'approche de combinaison multi-paramètres proposée par Oudin et al. (2006) [4] a été adaptée à une modélisation au pas de temps horaire et évalué sur les affluents peu anthropisés du Rhône. Cette approche présente une amélioration sur la plupart des bassins en comparaison d'un simple calage sur les débits non transformés. Les modèles ainsi calés ont été implémentés dans la chaîne opérationnelle de prévision à court terme.

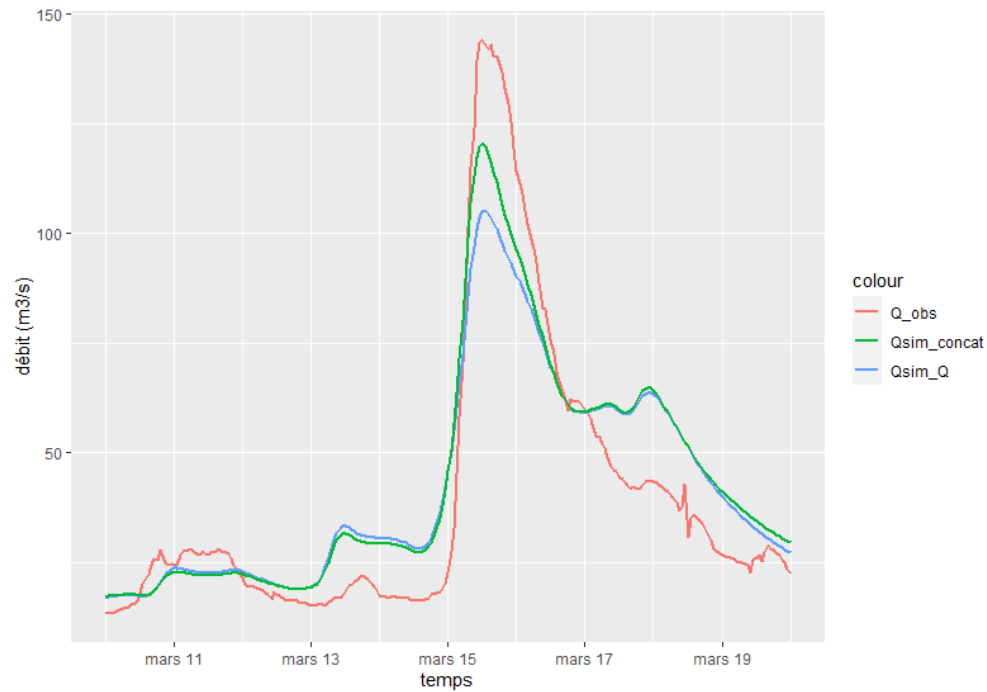


Figure 1- crue de mars 2019 sur le bassin du Guiers à Belmont. La courbe rouge représente le débit observé. Les courbes vertes et bleues représentent respectivement le débit simulé issu du modèle $Q^2+\sqrt{Q}$ (Qsim_concat), et du modèle Q (Qsim_Q)

4. REFERENCES

- [1] Berthet L. (2010), Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. Hydrologie. AgroParisTech. {NNT : 2010AGPT0017}. {pastel-00529652}
- [2] Caillouet; L., Celie, S., Vannier, O., Bontron, G. & Legrand, S. (2022) Operational hydrometeorological forecasting on the Rhône River in France: moving toward a seamless probabilistic approach, LHB, 108:1, DOI: 10.1080/27678490.2022.2061312
- [3] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez (2009), G. F.: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, J. Hydrol., 377, 80–91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- [4] Oudin, L., V. Andréassian, T. Mathevet, C. Perrin, and C. Michel (2006), Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations, Water Resour. Res., 42, W07410, doi:10.1029/2005WR004636.
- [5] Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, J. Hydrol., 10, 282–290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- [6] Perrin C., Michel C., Andréassian V., (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of hydrology 279 (1-4) 275-289.

- [7] Tangara, M., (2005), Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Sciences de la Vie et de la Terre. Ecole Pratique Des Hautes Etudes De Paris.
- [8] ValeryA. (2010) — *Modélisation précipitations-débit sous influence nivale, élaboration d’un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*. Thèse de doctorat, ENGREF, Cemagref, Paris. 405 pp

Apports et limites de l'intégration des prévisions de pluie expertisées dans la modélisation hydrologique pour la prévision des crues à 24 h en milieu cévenol

Auteurs : VALANTIN Pierre-Yves^{1*}, LABORDA Yann², DUSSUCHALE Antoine³, MANNESSIEZ Fabrice⁴

* *auteur correspondant*

¹ DREAL Auvergne-Rhône-Alpes Pôle Hydrométrie Prévision des Crues Grand Delta, 89 rue Weber 3000 Nîmes, France, email : pierre-yves.valantin@developpement-durable.gouv.fr

² Idem auteur 1, email : yann.laborda@developpement-durable.gouv.fr

³ Idem auteur 1, email : antoine.dussuchale@developpement-durable.gouv.fr

⁴ Idem auteur 1, email : fabrice.mannessiez@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : [Prévision de crues, incertitudes](#)

Dans les services de prévision des crues, pour les bassins versant importants (supérieurs à 1000 km²) et en régime de pluie stratiforme, la production de la vigilance et des prévisions opérationnelles sont souvent confondues dans le même processus opérationnel avec une alimentation des modèles par des pluies observées et prévues. L'intégration des produits de prévision météorologique de Météo-France dans l'architecture des outils du réseau de la prévision des crues a donc facilité l'utilisation des sorties de modèles météorologiques comme scénario d'entrée des modèles hydrologiques pour prévoir et anticiper l'ampleur des crues. Ainsi en opérationnel, les horizons de prévisions hydrologiques peuvent être désormais fortement étendus. Cependant cela s'accompagne d'une augmentation importante de l'incertitude sur les échéances les plus lointaines.

De ce fait, pour les bassins plus petits la vigilance reste essentiellement basée sur une approche par abaques qui permet d'intégrer facilement l'incertitude temporelle et spatiale liée à la prévision météorologique en milieu méditerranéen. La communication proposée fait le point sur l'apport et les limites de ce type de modélisation sur les petits bassins versants (quelques centaines de kilomètres carrés) du secteur cévenol. L'impact des limites de la prévision météorologique sur les incertitudes de la prévision hydrologique et son expertise est illustré à travers l'exemple de plusieurs épisodes sur les bassins du Gard et de l'Ardèche (pour ce résumé un seul épisode est retenu).

Nous montrerons que le prévisionniste de crue est souvent confronté à deux problèmes essentiels :

- En amont de l'épisode : le choix de la couleur de vigilance pour les 24 prochaines heures et la production de prévisions cohérentes avec ce choix pour les 24 prochaines heures,
- En cours d'épisode, le raccord entre les prévisions à court terme (basées sur les observations de pluies) et la prévision à long terme basée sur des scénarios météo antérieurs à l'épisode et donc plus d'actualité.

Nous détaillerons l'ensemble des produits de prévisions météorologiques mis à disposition du SPC GD pour élaborer sa vigilance (sorties brutes de modèles, prévisions et expertisées de la base SYMPOSIUM enrichies des prévisions expertisées des bulletins de précipitations, ...) et analyseront leur avantages et inconvénients au regard de leur précision.

1. L'épisode du 12/06/2020 sur le Gardon d'Anduze : un cas plutôt favorable

Parmi les épisodes qui seront retenus dans l'article final, l'épisode du 12/06/2020 sur le secteur du Gardon d'Anduze, illustre un cas plutôt favorable avec des prévisions météorologiques expertisées de bonne qualité malgré des sorties brutes AROME moyennement pertinentes. Il permet donc de mesurer l'apport de ces produits dans des conditions plutôt favorables.

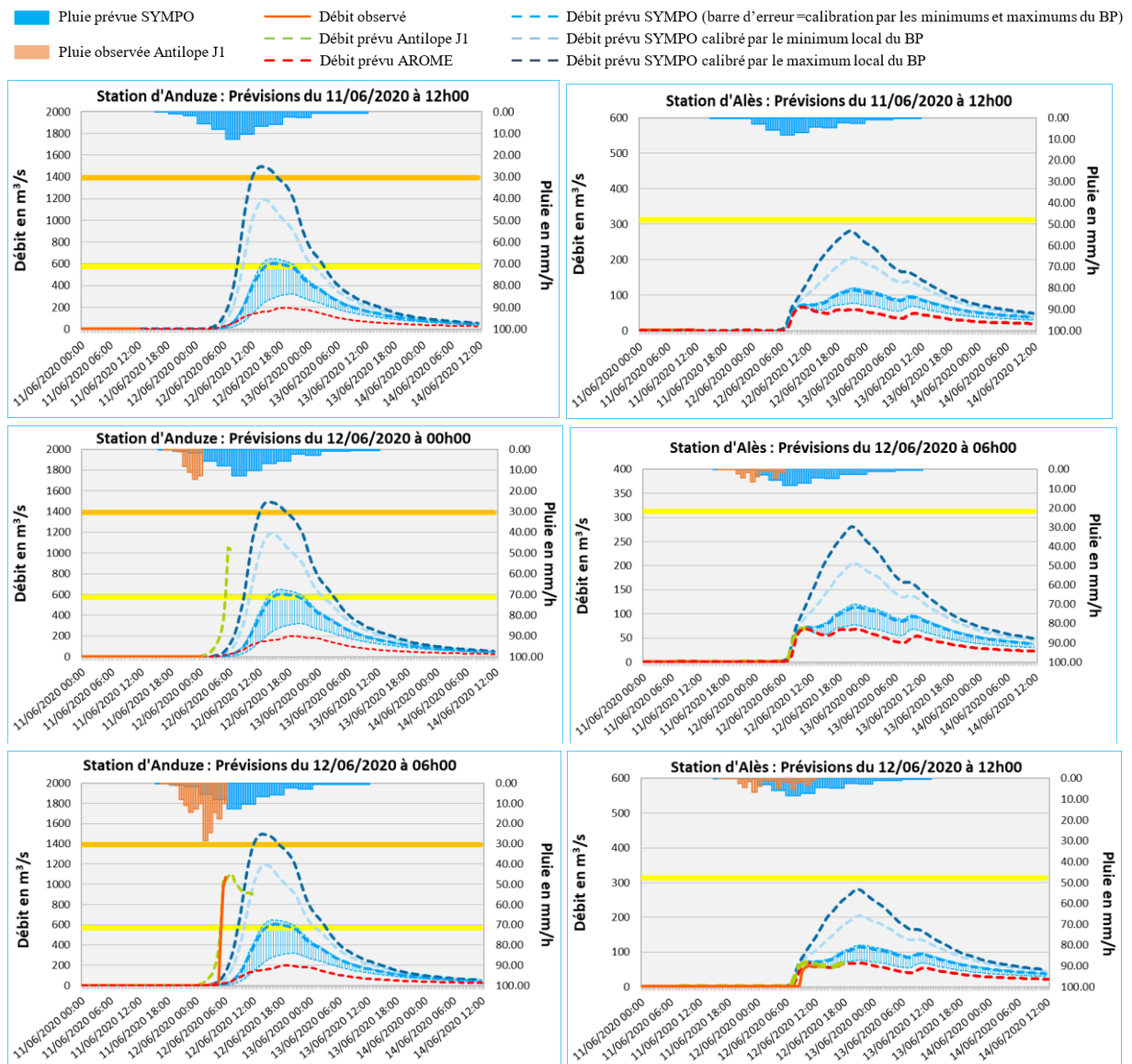


Figure 1 : Prévisions à Anduze et Alès à différentes étapes de la prise de décision

Lors de la prise de décision pour la vigilance du 11/06/2020 à 16h, alors que les prévisions de pluies expertisées du bulletin de précipitation ne permettent pas de différencier les 3 bassins versants concernés par la zone Cévennes gardoises, leur couplage avec les prévisions SYMPO permet de mettre en évidence le bassin d'Anduze qui sera effectivement le plus touché.

De même le 12/06 à minuit, à Anduze, les prévisions basées sur les maximums locaux peuvent aider le prévisionniste à prendre une décision au vu de la montée rapide prévue à partir des pluies observées.

Mais il apparaît très clairement que ce ne sont pas les mêmes scénarios qui s'avèrent pertinents sur Anduze et Alès. Si à posteriori il est relativement aisé de voir les informations que l'on peut tirer de ces simulations, en temps réel il est très complexe pour le prévisionniste d'en choisir un différent pour chaque bassin.

La réelle plus-value de ces simulations apparaît sans doute plutôt en cours d'évènement lorsque les observations de débits viennent confirmer un des scénarios, et pour prolonger les prévisions basées sur les pluies observées.

Dans la communication d'autres situations où les prévisions expertisées étaient moins pertinentes permettrons d'analyser la manière dont le prévisionniste SPC a pu gérer la situation.

2. Conclusion

En milieu méditerranéen, sans l'expertise ajoutée par un prévisionniste météo, les sorties brutes d'AROME n'apportent, dans beaucoup de cas, pas de réelle plus-value du fait des fortes incertitudes de localisation qui les entaches. En revanche, après expertise humaine (aujourd'hui disponible dans les BP et la base SYMPO), même en tenant compte de l'incertitude restante leur utilisation dans les modèles hydrologique peut apporter une information intéressante au prévisionniste même sur de petits bassins. Ces informations restent cependant encore particulièrement complexes à exploiter en temps réel et posent aussi la question de la gestion et de la communication des incertitudes vers le public.

3. REFERENCES

- [1] Bressand, F., 2002, Le projet ALHTAÏR du service d'annonce des crues du Gard. La Houille Blanche n°2, 64-68
- [2] Pierre-Alain Ayrat, Sophie Sauvagnargues, François Bressand. Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair ALHTAÏR. Etudes de Géographie Physique, 2005, n° XXXI

LE PROJET SCO-FLOODDAM : VERS UN JUMENT NUMÉRIQUE POUR LA DÉTECTION ET LA PRÉVISION DES INONDATIONS ET L'ÉVALUATION DES RISQUES D'INONDATION

*The SCO-FLOODDAM project: towards a digital twin for flood detection,
prediction and flood risk assessments*

Auteurs : RODRIGUEZ SUQUET Raquel^{1*}, RICCI Sophie², NGUYEN Thanh Huy², PIACENTINI Andrea², BONASSIES Quentin², FATRAS Christophe³, LAVERGNE Emeric³, ANDRAL Alice³, BRUNATO Sylvain⁴, GAUDISSERT Vincent⁴, GUZZONATTO Eric⁴, VALLADEAU Guillaume⁵, POISSON Jean-Christophe⁵, FROIDEVAUX Alice⁶, GUIOT Antoine⁶, THANH-LONG Huynh⁶, HUANG Thomas⁷, KETTIG Peter¹, BLANCHET Gwendoline¹, BRETAR Frederic¹

* *auteur correspondant*

¹ CNES, 31401 Toulouse Cedex 9, France (e-mail : raquel.rodriquezsuquet@cnes.fr)

² CECI, CNRS UMR 5318/CERFACS, 31057 Toulouse Cedex 1, France (e-mail : ricci@cerfacs.fr)

³ CLS, 11 rue Hermès, Parc Technologique du Canal, 31520 Ramonville Saint-Agne, France (e-mail : cfatras@groupcls.com)

⁴ CS Group, 31500 Toulouse, France, France (e-mail : sylvain.brunato@csgroup.eu)

⁵ Vortex.io, 31400 Toulouse Cedex 9, France (e-mail : guillaume@vortex-io.fr)

⁶ QuantCube Technology, 31401 Toulouse Cedex 9, France (e-mail : a.froidevaux@quant-cube.com)

⁷ NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA (e-mail : thomas.huang@jpl.nasa.gov)

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum): Digital Twin, Flood, monitoring, alert, detection, modeling, satellite, in-situ data, Data Assimilation, prediction

1. Introduction

Floods are the most common (and among the deadliest) natural disasters all over the world. They have brought destruction to a wide number of regions and countries, and in many areas they are getting worse. As global warming continues to exacerbate sea level rise and extreme weather, floods are expected to grow by approximately 45 percent by century's end. Between 80-90% of all documented disasters from natural hazards during the past 10 years have resulted from floods, droughts, tropical cyclones, heat waves and severe storms.

This context raises a real need to understand and anticipate these extreme events in order to address climate change and flood risks within the water cycle. Contributing to mitigation by developing mapping capabilities and analytical methodology (such as simulations at various scales) is a high priority according to NATO's Agenda Climate change and security plan.

2. A Digital Twin collaboration for flood prediction and assessment

In 2018, CNES initiated a collaborative work with NASA/JPL by developing prototype to automate alert and mapping of flood extents in order to provide an environment for real-time flood monitoring

and analysis, as well as reducing response time. This collaboration was the result of the FloodML project [1]. This prototype demonstrated the capability of processing multi-temporal data from Sentinel/Landsat satellites to extract river extent anomalies using a machine learning method. As a continuity of this joint effort, in 2020, the Space Climate Observatory (SCO) launched the Flood Detection Alert and rapid Mapping project, also known as SCO-FloodDAM. This project provided a pre-operational processing chain that generates a flood risk indicator map based on past time-series, detected events, local digital surface models, and land cover maps. These outputs allow to better prevent and assess flood events and provide quick response to decisions makers in several areas of interest, improving resolution, reactivity and adding a predictive capability [2].

Within this framework, in June 2022, the SCO-FloodDAM proceeds to SCO-FloodDAM-DT (Digital Twin) project with a joint collaboration effort between CNES, NASA’s partners (AIST and IDEAS) and JPL to develop a federated Earth System Digital Twin (ESDT) for water-cycle applications focused on flood events [3]. This work entails a multi-agency effort to define and develop ESDT architectures focused on water resources and flood analyses where test case studies serve as demonstrators. These digital twin architectures aim at dynamically connecting existing hydrology/hydrodynamic models and continental water data (in-situ, airborne, remote-sensing (RS) data sources e.g. radar and optical) from both agencies (NASA & CNES) to produce large and local scale understanding and prediction.

3. The SCO-FloodDAM Digital Twin project

SCO-FloodDAM-DT project aims to develop a Federated Digital Twins solution with NASA IDEAS for alert systems and flood risk maps on local and global scales using space technologies. This project demonstration will be done on two selected catchments in France and USA for proofs of concept. An additional catchment in France can be considered, as Adour, depending on the work effort on it. SCO-FloodDAM-DT products and the exploitation of its pre-operational chain aims to be at global scale depending on the availability of local physical models and in-situ and satellite data.

SCO-FloodDAM-DT project is based on its precursor SCO-FloodDAM by leveraging its open-source software tools and data. The main processing blocks are (i) flood detection and alert, (ii) rapid flood extent mapping, and monitoring of ongoing flood events, (iii) short-term forecasting using computational fluid dynamics (CFD) models to simulate water surface elevations at a local scale, and (iv) real-time measurement of financial risk of flooding at a site level based on assets over selected zones.

The first processing block (i) is based on in-situ river stations from the USGS and Vigicrues networks, in USA and France, respectively. SCO-FloodDAM-DT completes these measurements with new in-situ and flight drone data from vortex.io sensors in the US and France. Vortex.io will instrument local rivers and affluent streams over selected catchments for demonstration: Garonne catchment in France and USA catchment still to be selected.

The second processing block (ii) on rapid flood extent mapping is carried out using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images by a Random Forest algorithm trained on past flood events. SCO-FloodDAM-DT aims at improving flood mapping accuracy and reliability using new methods and data sources. The re-analysis of flood extends over past periods will allow establishing scenarios for end-users to better understand the dynamics of flood events.

The third processing block (iii) concerning short-term forecasting based on CFD modeling is carried out at large and local scales. The local scale aspect undertaken at CERFACS is achieved with TELEMAC-2D (T2D) hydrodynamic solvers and data assimilation (DA). SCO-FloodDAM-DT is set out to improve the existing predictive capability of T2D by assimilating in-situ and RS observations through ensemble-based DA algorithms. Indeed, the merits of using SAR-derived flood extent maps to validate and improve the forecast results based on hydrodynamic models with T2D-Ensemble Kalman

filter (EnKF) have been demonstrated in [4]. In addition, chaining of large-scale hydrologic model and local hydraulic model has been proposed to extend forecast lead times. This is supported by the large-scale river routing RAPID model from JPL combined with LIS and POWER outputs at medium resolution.

The fourth processing block (iv), carried out by QuantCube Technology, proposes a service to provide accurate flood risk maps to its users for better assessment of the situation and its impacts. By combining FloodDAM-DT data with geolocation data of physical assets and geolocated social media data this service improves the risk assessment, measures the user’s exposure to physical risk, minimizes risk, and integrates physical risk in credit scores. For project demonstration, QuantCube will present an estimation of the financial flood risks directly at the site level and more broadly at the company level.

4. Products

a. Alert service

Flood monitoring is achieved thanks to national in-situ networks such as Vigicrues in France and USGS in the USA. The project FloodDAM-DT completes these measurements with vortex.io new in-situ stations to improve spatial resolution and hydrodynamic modeling in the selected areas. In addition to these measurements, a drone flight is planned during a flood event.

Through the joint collaboration JPL-CNES FloodML project [1], a flood prediction model using USGS and Vigicrues river gauge data was developed to trigger data acquisition based on water level anomaly detection in the time-series profile. In the framework of SCO FloodDAM-DT, this algorithm will be compared with a simple station threshold using the Maelstrom platform (<https://maelstrom.vortex-io.fr>) provided by vortex.io to trigger flood event alerts. Indeed, local knowledge of the water level time-series and a station threshold (or alert height) have similar effects of using the JPL-CNES detection algorithm.

From a pre-operational point of view of this product, two triggering modes can be possible, either an on-request pre-operational service or an automatic service using the in-situ network.

b. Flood extent maps

The FloodML project showed good results and can cover automatically a 10,000 km² area in a few minutes only. In the continuity of this work, FloodDAM-DT aims to produce a flood monitoring near real-time (NRT) product by extent flood maps generation after water height level anomaly detection in local river gauges. Flood extent maps can be generated globally, where in-situ and satellite data are available as shown in Figure 1d. Advanced products with CFD modeling and DA will be available over sub-domains where hydrodynamic models are available.

c. Hindcast and short-term flood forecast prediction

Hindcast and short-term flood forecast prediction are expected to be produced using local CFD models improved by the data assimilation of in-situ and 2D satellite/drone imagery data, representing the flood evolution over time on selected catchments for demonstration purposes. This product is a map of water surface elevation representing the flood prediction by the model without and with as shown in Figure 1.

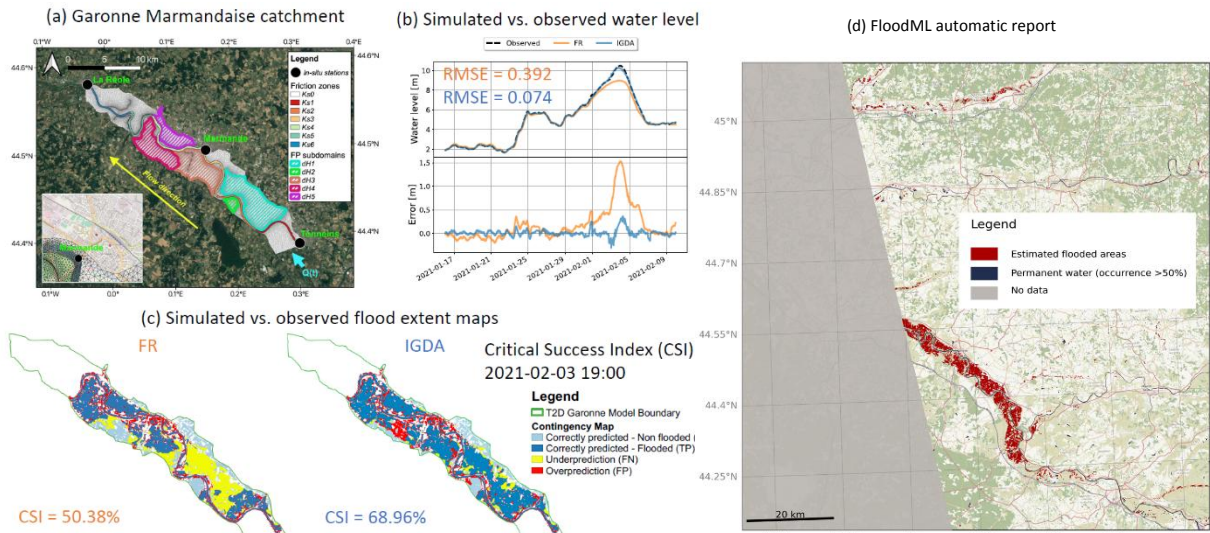


Figure 1 Left figure made of 4 plots: Water level map on Garonne catchment for the flood event 2021-02-03. (a) Garonne catchment over 50 km-long river. Yellow arrow shows flow direction. (b) CFD modelling comparison with observations where black-dashed line is the observed water level, orange line is the Telemac-2D free-run simulation and blue line is the Telemac-2D simulation using data assimilation. (c) Flood extent contingency map representing the flood extent prediction by FR and Data assimilation respectively, for 2021-02-03. Correctly predicted flooded areas are represented in dark blue, correctly predicted non-flooded areas in light blue, under-predicted areas in yellow, and over-predicted areas in red. (d) Flood extent map report on Garonne catchment for flood event 2021-02-03 using Sentinel-1 radar images.

d. Flood risk map

A real time financial flood risk product is expected at site level and at company level. Indeed, flood risk impact map is produced by combining outputs from modelling with a data base of physical assets and social media geo-localisation data and with text and structured data (prices of woods, fuel, inflation computing in real time for users, etc.). Then, flood risk map can be transformed in score.

5. Conclusion

In conclusion, the main objective of SCO-FloodDAM-DT project is to connect data and existing models from both agencies in order to combine multi-scale simulations taking into account multiple phases of an entire flood event, from early alert to post-event impact assessment. This project also aims at demonstrating the capability to integrate and combine new in-situ, airborne, and satellite data sources for flood extent mapping using DA with local hydrodynamic models. To facilitate data usage, standardized resource interfaces are defined using emerging Digital Twin specifications for both agencies. The entire processing chain will be integrated into the Hydroweb-Next Hydrological open visualization platform (open for users at the beginning 2023). Finally, for areas with high economic impact of flooding, a risk estimation can be made for industry, agriculture, or territory planning actors. Following the human-in-the-loop principle we expect direct feedbacks from end-users which allows an independent validation on-ground before being deployed at a larger scale. At the end of the demonstration, planned after 18 months, a showcase will be presented with all processing blocks chaining and its multi-scale aspect at least over the Garonne River (France) and USA selected River catchments. This will be achieved at least for a complete scenario, based on either a past event or a recent event occurred during the project. This demonstration comprises access to in-situ and satellite/drone data, flood extent mapping, flood evolution representation from modeling and data assimilation, and production of the associated flood risk impact map.

6. REFERENCES

- [1] T. Huang, A. Altinok, N.T. Chung, J. Hausman, C.M. Oaida, S. Shah, Z.M. Taylor, S. Baillarin, G. Blanchet, P. Kettig, and C. Taillan, 2020: Distributed Machine Learning and Data Fusion for Flood Detection and Monitoring, In AGU Fall Meeting 2020 American Geological Union, Fall Meeting, December 16, 2020, San Francisco, CA.
- [2] Kettig, P., S. Baillarin, G. Blanchet, C. Taillan, S. Ricci, T. Nguyen, T. Huang, A. Altinok, N.T. Chung, G. Valladeau, R. Goeury, A. Roumagnac, “2021: “The SCO-FloodDAM Project: New Observing Strategies for Flood Detection, Alert and Rapid Mapping”, In IGARSS 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 11-16, 2021, Brussels, Belgium.
- [3] Thomas Huang, Cedric David, Catalina Oadia, Joe T. Roberts, Sujay V. Kumar, Paul Stackhouse, David Borges, Simon Baillarin, Gwendoline Blanchet, and Peter Kettig, “An Earth System Digital Twin for Flood Prediction and Analysis”, IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 17-22 2022, Kuala Lumpur, Malaysia
- [4] Thanh Huy Nguyen, Sophie Ricci, Christophe Fatras, Andrea Piacentini, Anthéa Delmotte, Emeric Lavergne, and Peter Kettig, “Improvement of Flood Extent Representation with Remote Sensing Data and Data Assimilation”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1–22, 2022.

L’IMPACT DE L’ÉVOLUTION DES DONNÉES TOPOGRAPHIQUES DANS LA CARTOGRAPHIE DE L’ALÉA

The impact of topographic data changes in hazard mapping

Auteurs : ESCUDIER Aurélie¹, HANS Pierre-Adrien², FLAMANC David¹, ZUBER
Félicien³

¹ DREAL Occitanie, 1 rue de la Cité administrative, 31074 Toulouse Cedex 9, France, e-mail :
aurelie.escudier@developpement-durable.gouv.fr

² DREAL Centre-Val de Loire, 5, Avenue Buffon, BP 6407 45064 ORLEANS Cedex 2,
France, e-mail: pierre-adrien.hans@developpement-durable.gouv.fr

³ Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations
(MTECT/DGPR/SRNH), 42 avenue Gaspard Coriolis, Toulouse, France,
felicien.zuber@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : LIDAR Haute Densité, Inondation, Cartographie, Précision

1 La cartographie des inondations, une histoire de modèles numériques de terrain (MNT)

Le risque d’inondation est l’un des premiers risques naturels en France : 17 millions d’habitants sont soumis au risque d’inondation par débordement de cours d’eau et 1,4 millions au risque de submersion marine. Pour caractériser ce risque, les politiques publiques se sont dotées depuis le milieu du XX^{ème} siècle d’outils informatifs et réglementaires (Plans des Surfaces Submersibles, Atlas des Zones Inondables, Plans de Prévention des Risques d’Inondation (PPRI), Directive Inondation, ...) basés sur un socle commun : la cartographie des zones inondables.

Les méthodes de production de l’aléa inondation sont aujourd’hui très variées et vont de l’interpolation d’une ligne d’eau de crue à la modélisation 2D. Pour évaluer l’altitude atteinte par les eaux correspondant à un aléa inondation, les hauteurs de submersion doivent être produites. Elles sont obtenues par la différence entre l’altitude des eaux et l’altitude du sol. Cette altitude ou information topographique caractérisant le sol nu d’un territoire mais également ses particularités topographiques des infrastructures (digues, routes, remblais) se présente aujourd’hui en grande majorité sous la forme de Modèles Numériques de Terrain (MNT).

Ainsi, dans les années 90 dans le cadre des premiers travaux de cartographies de zones inondables « modélisées » menés dans le cadre des PPRI, c’est la BD ALTI® qui a servi de donnée d’entrée à l’établissement de ces documents réglementaires. Entre 1987 et 2001, cette base de données altimétrique était issue principalement de la numérisation des courbes de niveaux produites dans le cadre de la cartographie grande échelle et de restitution photogrammétrique, et apportait une représentation de l’altitude du sol, d’abord sous forme de données vectorielles, puis sous forme d’images matricielles (appelées communément « raster ») avec une résolution spatiale de 25 m et des écarts-type de précision altimétrique pouvant aller jusqu’à quelques mètres sur certaines zones.

Dans les années 2000, avec la nécessité d’avoir une représentation de la topographie plus précise, les premières données LIDAR (*Figure 2*) sont acquises dans des cadres plutôt spécifiques, tels que ceux financés dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature sur la Loire moyenne dès 2002. Basées sur une

technologie de laser aéroporté, les données LIDAR permettent d'obtenir les premiers MNT de résolutions inférieures à 5 m et de précision altimétrique de quelques décimètres.

En 2011, la Directive inondation [1] et l'exercice imposé de cartographies pour les 3 aléas de crues (fréquent, moyen, fort) impulse une ambition forte d'acquérir de la donnée de qualité sur les linéaires des grands cours d'eau. Parallèlement, les services de prévision des crues (SPC) et le réseau Vigicrues s'engagent dans la prévision des inondations [2] et la production de zones d'inondation potentielles (ZIP). Dans ce contexte, le SCHAPI - tête de réseau Vigicrues - et la DGPR ont lancé avec l'IGN l'acquisition à grande échelle de données topographiques haute résolution. Principalement orientée sur les cours d'eau Vigicrues, cette campagne sera définie dans le cadre d'une convention dédiée, entre 2011 et 2014. Cette première génération de levés LIDAR acquis sur la France sera produite en période hivernale (de mi-novembre à mi-avril), pour éviter la saison de végétation et obtenir la meilleure précision altimétrique possible, avec une exigence de densité de 2 points par mètres carrés pour les levés LIDAR et une résolution pour le MNT de 1 m .

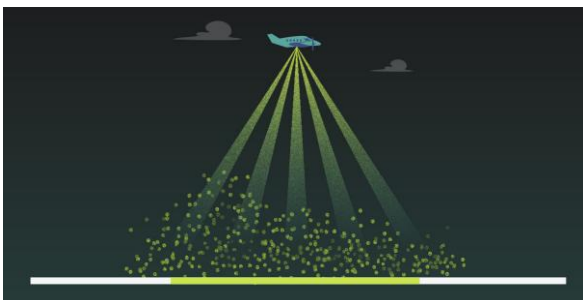


Figure 1: Représentation des nuages de points acquis par levé LIDAR
Source IGN <https://www.ign.fr/institut/lidar-hd-vers-une-nouvelle-cartographie-3d-du-territoire>

Cette première campagne sera suivie d'une seconde entre 2016 et 2019, avec les mêmes spécifications de levés qu'en 2011 et ayant pour objectif de couvrir les « autres cours d'eau » sur lesquels des besoins de cartographies PPRi ou ZIP étaient identifiés. Les données acquises dans le cadre de ses conventions ont été intégrées dans le RGE Alti[®], accessible à tous et constituant la référence pour tous les acteurs de la prévention des risques.

2. Ce que la première génération de MNT LIDAR a amené dans la cartographie de zones inondables

La génération de MNT LIDAR issue des levés 2011-2014 a permis de poser les bases de nombreuses réflexions méthodologiques, en particulier au sein du réseau de la prévision des crues (tout du moins, dans un premier temps). Ces nouvelles données, de grande qualité, ont apporté un gain considérable dans la précision de la représentation d'une zone inondable, notamment pour les ZIP. Ces données plus denses ont permis d'avoir une meilleure vision de la topographie et des éléments structurant un lit majeur (infrastructures, routes, etc.) et d'ouvrir un champ de possibilités sur l'utilisation de ces données en matière de cartographie d'inondation, parmi lesquelles l'extraction de l'altitude de laisses de crues à partir de prises de vues aériennes [3] ou l'obtention de produits dérivés liés aux ouvrages hydrauliques ou infrastructures [4].

Elles ont également posé de nombreuses questions, à commencer par l'exploitation en tant que telles de ces données : la résolution native du MNT LIDAR à 1 m a engendré des questions de capacité de calculs dans les outils informatiques des SPC. Au-delà de l'aspect purement informatique, des écueils propres à l'acquisition et au post-traitement de la donnée ont aussi été soulevés pour la cartographie

des ZIP tel que le manque de prise en compte des ouvrages de franchissement des cours d'eau car naturellement « effacés » dans le post-traitement appliqué par l'IGN. Des travaux spécifiques pour la ré-intégration de l'altitude des tabliers de ponts (Figure 2), notamment menés par le SPC Loire-Cher-Indre, sont apparus nécessaires pour traduire leur état de submersion réel. La question de l'exploitation des données source de levé LIDAR s'est alors posée, mais a été mise de côté compte tenu de l'incapacité des services à utiliser les données « nuages de points » disposant d'un format spécifique (fichiers .laz).

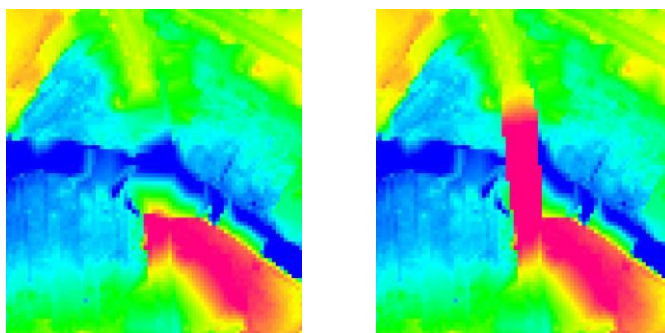


Figure 2: Exemple de traitement de MNT pour l'intégration des altitudes des tabliers de ponts

De plus, les ZIP produites ont vocation à intégrer la base de données nationale Viginond. Celle-ci fournit des services web qui permettent une diffusion aux gestionnaires de crise. Dans ce contexte opérationnel, les données doivent pouvoir être affichées rapidement, et donc être suffisamment légères. Or, la construction des ZIP à partir de cette nouvelle génération de MNT engendre un rendu, très fin, mais parfois pouvant donner une fausse impression de précision et des secteurs « bruités ». Ainsi, la mise à disposition d'outils facilitant le lissage de la donnée d'aléa inondation (Figure 3) et l'établissement de préconisations pour la création des données revêtent une importance capitale pour permettre aux flux de répondre dans des temps satisfaisants.

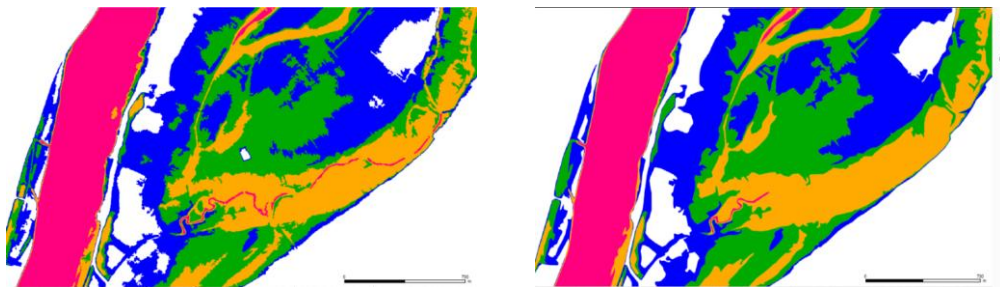


Figure 3: Exemple de lissage d'une zone d'inondation potentielle (ZIP)

3. La génération HD : un gain dans la précision, à étudier

Depuis 2021, l'IGN a lancé un nouveau programme de levés LIDAR de Haute Densité avec une cible d'acquisition de 10 points par mètre carré. Ce programme « d'une ampleur inédite » soutenu conjointement avec le Ministère de l'Agriculture et le Ministère de l'Écologie a pour objectif d'assurer la couverture totale du territoire. Les nouvelles données MNT issues de ces acquisitions ont vocation, d'ici 5 ans, à devenir la référence en matière de topographie et de représentation du sol nu.

Outre la densité de points importante, la particularité des levés est qu'ils peuvent être réalisés en hiver comme en été, contrairement aux préconisations faites par le CEREMA sur la première génération de MNT LIDAR notant l'importance « de réaliser les campagnes aériennes pour l'acquisition de données

LIDAR en période « sans feuille » et « sans culture », par beau temps et si possible avec des débits dans les cours d'eau les plus faibles possibles ainsi qu'à marée basse » [4].

La nouvelle génération de MNT pose donc la question de l'impact de la végétation (cultures, feuillages des arbres) sur la qualité du levé pour les secteurs acquis au printemps et en été, le LIDAR ne pouvant pas traverser la couverture végétale. Pour les SPC et les études ZIP, mais également les services risques en DDT dans le cadre des études PPRi, il y a donc un enjeu dans l'analyse et les impacts potentiels de cette nouvelle donnée sur l'aléa produit.

Ainsi, la DREAL Occitanie, la DREAL Centre-Val de Loire et leurs SPC se sont engagés fin 2022 en lien avec la DGPR et l'IGN à comparer l'apport de cette nouvelle génération de MNT (issu des 10 points/m² été) au regard de la première génération de MNT (issu des 2 points/m² hiver).

Le secteur d'étude retenu est la Garonne à Agen sur laquelle le SPC Garonne-Tarn-Lot dispose :

- d'une prise de vues aériennes acquise sur la crue de février 2021 au quasi maximum de crue et permettant d'avoir la vision de la réalité « observée »
- des repères de crues matérialisant les plus hautes atteintes sur ce même évènement ;
- d'un jeu de ZIP produites en 2022 et plus particulièrement des modèles numérique de surface en eau des différents scénarios de crues allant des premiers débordements aux débordements majeurs ;

Ce secteur endigué, urbanisé et disposant de plaines agricoles, présentent plusieurs particularités morphologiques d'intérêt et pouvant être étudiées.

L'objectif de ce travail, qui est en cours et sera mené d'ici la fin du premier semestre 2023 est :

- 1 de mesurer la quantité et la finesse d'information les levés Lidar HD et les apports potentiels par rapport aux levés LIDAR première génération ;
- 2 d'appréhender et de quantifier la sensibilité des données ZIP produites à la fois à partir des données MNT issus du Lidar HD et du Lidar première génération ;
- 3 d'étudier ainsi, pour l'IGN et à partir des résultats de l'analyse précédent, les optimisations possibles du calcul du MNT LIDAR HD ;
- 4 d'engager une réflexion sur les produits dérivés utiles à la communauté d'utilisateurs prévision/prévention des inondations issus des produits HD de l'IGN.

Les travaux déjà engagés sur la première génération de MNT représentent un socle d'exigences techniques au regard des besoins propres à la cartographie de ZIP et guideront les réflexions et échanges entre SPC et IGN. Le présent article aura pour objectif d'en présenter les résultats. Le regard porté sur ces données acquises sur l'ensemble du territoire national de manière homogène et leur apport potentiel pour la prévision des crues et des inondations sera orienté vers l'ambition du réseau Vigicrues de la couverture totale du territoire dans les prochaines années.

4. REFERENCES

- 1 DIRECTIVE 2007/60/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation
- 2 ESCUDIER, A., *et al.*, *From high waters forecasts to flooded areas forecasts*, 3rd European Conference on Flood Risk Management, 2016.
- 3 ESCUDIER, A., *et al.*, *De l'observation de la crue à la représentation de l'inondation : les apports de la cartographie numérique*, Assises Nationales des Risques Naturels, Marseille, 2015.
- 4 LAROCHE, C., *et al.*, *Utilisation des données LIDAR dans les études hydrauliques : outil à disposition et recommandations aux maîtres d'ouvrage*, Congrès SHF : " Grands Transitoires Hydrauliques", Nice, 2014.
- 5 ESCUDIER, A., *et al.*, *Prévision des inondations : gestion de crise et partage de l'information des zones inondées*, La Houille blanche, 2016.

Comment favoriser l’intégration opérationnelle de la mission des référents départementaux inondation au sein des organisations de sécurité civile? Éléments de réponse basés sur un travail collégial en Occitanie et sur le retour d’expérience des crues de 2018 dans l’Aude

How to promote the operational integration of the Departmental Flood Referent mission within the organizations of civil security? Answers based on collegial work in Occitanie and on feedback from the 2018 floods in Aude

Auteurs : ESCUDIER Aurélie¹, JELIC Thomas², DUBOIS Pierre-Olivier²

¹DREAL Occitanie, 1 rue de la Cité administrative, 31074 Toulouse Cedex 9, France, e-mail : aurelie.escudier@developpement-durable.gouv.fr, pierre-olivier.dubois@developpement-durable.gouv.fr

²Direction Départementale des Territoires et de la Mer de l’Aude, 105, boulevard Barbès, 11838 Carcassonne Cedex e-mail: thomas.jelic@aude.gouv.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : mission RDI, gestion de crise, ORSEC, Inondation

Le risque d’inondation est l’un des premiers risques naturels en France : 17 millions d’habitants sont soumis au risque d’inondation par débordement de cours d’eau et 1,4 millions au risque de submersion marine. Pour s’y préparer, la loi de modernisation de la sécurité civile marque, en 2004, le début de la refonte de l’Organisation des Secours avec un nouvel outil : l’Organisation de la Réponse de Sécurité Civile, l’ORSEC, destiné aux préfets de métropole et d’outre-mer. En plus de dispositions générales, l’ORSEC comprend des dispositions spécifiques pour faire face à des risques identifiés, notamment celui de l’inondation. Il précise le rôle important de la mission de référent départemental inondation (RDI), incombant à la DDT(M) dans cette démarche. Il a également pour objectif de recenser les outils d’anticipation et de suivi de l’inondation disponibles.

La circulaire de 2011 [2], relative à la définition et à l’organisation au sein de la direction départementale des territoires (et de la mer) de la mission de référent départemental, complétée par la note technique de 2018 [3] définissent le rôle des missions de RDI. Celles-ci consistent à appuyer les services préfectoraux, à la fois :

- en période de crise, par l’interprétation des données hydrologiques issues des services de prévision des crues (SPC) mais aussi par leur traduction en termes d’enjeux territoriaux ;
- hors période de crise, par la préparation d’éléments techniques et la formalisation des documents utiles pour la gestion de crise.
- en post crise, par la capitalisation des informations des crues et la contribution aux retours d’expériences (RETEX)

Cette mission a notamment pour objectif d’apporter une expertise technique aux services préfectoraux qui n’ont en général pas les moyens de la développer, car le risque inondation est l’un des multiples risques auxquels la préfecture se doit d’apporter une réponse de sécurité civile.

Depuis 2014, l’animation nationale des missions RDI, pilotée par le SCHAPI, a ciblé les actions permettant d’engager la montée en compétences des missions RDI dans le cadre d’une stratégie pluriannuelle. Celles-ci traitent de la structuration, de l’outillage et aussi de la professionnalisation des missions RDI.

Toutefois, si le cadre réglementaire existant et l’animation nationale mise en place côté RDI permettent de définir clairement le champ d’action des RDI, des préfectures et de leur Service interministériel de défense et de protection civile (SIDPC), des marges de progrès subsistent encore dans certains départements pour mieux formaliser les attendus de « la mission du référent départemental inondations (RDI), aux différentes étapes de la crise (préparation, alerte, conseil au préfet...) »[4], comme a pu le montrer le retour d’expérience des événements survenus dans l’Aude en 2018.

De ce constat peuvent poindre plusieurs questions : si la traduction de l’information technique produite par les SPC est *a priori* attendue des missions RDI par les services préfectoraux, à quels moments clés d’un évènement doivent-ils réellement apporter la connaissance du risque prévu ? Plus généralement, quelle place attribuer à la mission RDI dans la gestion d’un évènement ? Dans un contexte de crise et en un temps contraint, sous quelle forme traduire au mieux l’information pour un public préfectoral varié et ne disposant pas de compétences techniques poussées ? Hors période de crise, comment se préparer individuellement et collectivement pour être efficace le jour J ? Comment, et sous quelle forme, capitaliser les retours d’expériences des évènements ?

Dans le cadre de l’animation régionale RDI sur la région Occitanie, deux ateliers de travail réunissant les missions RDI et leur SIDPC, menés en 2019 et 2022, ont permis d’aborder ces questions pour l’ensemble des départements de la région. Le premier atelier avait pour objectif d’identifier collectivement l’ensemble des actions à mettre en place avant, pendant et après un évènement, au regard d’une crue fictive de niveau de vigilance orange et de l’arrivée régulière des bulletins produits par le SPC. Ce premier atelier a permis de partager les actions inhérentes à chacun, SIDPC d’un côté et RDI de l’autre dans la gestion de crise inondation, et plus particulièrement, les moments clés relatifs à la fourniture ou la réception d’informations, ainsi que les étapes essentielles de l’organisation attendue (déclenchement d’un COD, mobilisation des équipes techniques RDI en astreinte d’urgence, etc.). Ce premier travail s’est vu enrichi, en 2022, d’un atelier axé sur le jeu d’acteurs lors d’une gestion de crise inondation, les informations et les outils utilisés pour le faire. Cette réflexion avait pour but de mettre en évidence les points de fragilité existants dans la mise en place et le suivi d’une gestion de crise inondation et les enjeux de la relation RDI-SIDPC.

Les résultats des deux ateliers menés ont permis de mettre en lumière des difficultés rencontrées aujourd’hui dans la bonne articulation des services, s’expliquant d’un côté (RDI) comme de l’autre (SIDPC) notamment par :

- des équipes en renouvellement régulier pouvant engendrer un manque de connaissance des personnes mobilisées et mobilisables, freinant la fluidité des informations échangées et l’implication des bonnes personnes au bon moment. Le besoin de maintenir ou d’augmenter les rencontres RDI-SIDPC a été soulevé ;
- parfois, une méconnaissance des attentes de la préfecture par la mission RDI engendrant l’établissement d’une information trop ou trop peu détaillée en préparation de crise ;
- des outils en constante évolution nécessitant des formations régulières de la mission RDI mais également des SIPDC (par exemple, dans la compréhension de l’outil Synapse et son utilisation en COD, et de son interopérabilité avec les outils d’information géographique propres aux DDT(M) comme spécifié dans la note technique d’octobre 2018)

- une vision partielle des réelles capacités de la mission RDI sur le territoire départemental, nécessitant la définition et le partage des niveaux de service de la mission ;
- un besoin de fluidifier la transmission des informations au sein même du COD en (re)définissant le rôle des cellules d’anticipation et de gestion de crise, lorsqu’elles existent.

Ces deux ateliers ont permis de dégager conjointement entre RDI et SIDPC des pistes de progrès communes pour améliorer la bonne articulation des services. Ce travail va dans le sens d’une meilleure prise en compte de l’expertise RDI au moment d’un évènement. Il existe désormais un enjeu pour l’animation régionale à poursuivre les efforts engagés à l’issue de ces ateliers. Dans un premier temps, la traduction des conclusions du dernier atelier en actions concrètes est à mener et à partager avec les services préfectoraux et RDI. A la suite, des échanges seront programmés au niveau départemental pour favoriser la prise en compte d’une série de points d’attention issus de ces travaux dans la déclinaison des plans ORSEC Inondation, et l’articulation opérationnelle RDI-SIDPC. L’exemple des travaux engagés dans le département de l’Aude depuis 2018 viendra illustrer cet article, en évoquant très concrètement les actions mises en place par la préfecture et la mission RDI depuis la crue de 2018 en les mettant en perspective avec les besoins identifiés dans les ateliers régionaux.

RÉFÉRENCES

- [1] *PRÉVENTION DES INONDATIONS : une politique partenariale à tous les échelons* – MTE/DGPR, 2020, Plaquette
- [2] *Circulaire interministérielle du 28/04/11 relative à la définition et à l’organisation au sein de la direction départementale des territoires (et de la mer) de la mission de référent départemental pour l’appui technique à la préparation et à la gestion des crises d’inondation dans les départements couverts par un service de prévision des crues* - NOR : DEVP1023698C
- [3] *Note technique du 29 octobre 2018 relative à l’organisation des missions de référent départemental pour l’appui technique à la préparation et à la gestion de crises d’inondation sur le territoire national* - NOR : TREP1817757N
- [4] *Retour d’expérience des inondations du 14 au 17 octobre 2018 dans l’Aude* - Rapport CGEDD n° 012561-01, IGA n° 18105-RP

**AMELIORATION DE LA PREVISION DES INONDATIONS PAR
L’ASSIMILATION DE CARTE D’ETENDUES D’INONDATIONS
PROBABILISTES SATELLITAIRES**
*IMPROVING FLOOD FORECASTING VIA THE ASSIMILATION OF
SATELLITE PROBABILISTIC FLOOD EXTENT MAPS*

Auteurs : DI MAURO Concetta¹, HOSTACHE Renaud^{2*}, PELICH Ramona¹, CHINI Marco¹,
MATGEN Patrick¹

* *auteur correspondant*

¹ Luxembourg Institute of Science and Technology, Belvaux, Luxembourg

² UMR Espace-Dev, IRD, Univ. Reunion Univ. Guyane Univ. Antilles Univ. Nouvelle
Calédonie Univ. Montpellier, Montpellier France : renaud.hostache@ird.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : crues, inondations, prévisions, modélisation hydrologique,
modélisation hydraulique, assimilation de données, images satellitaires radar.

1. Introduction et objectif

La prévision des inondations s’avère très souvent cruciale dans les stratégies de gestion des bassins fluviaux. Dans ce contexte, les modèles hydrodynamiques (pluie-débit et hydraulique à surface libre) sont fondamentaux pour estimer les niveaux d'eau et les étendues inondées qui représentent des informations nécessaires pour prévenir et/ou atténuer les conséquences dévastatrices des inondations. Cependant, les modèles d'inondation sont soumis à plusieurs sources d'incertitudes concomitantes (provenant par exemple des conditions aux limites, des paramètres des modèles, des observations, de la structure des modèles) qui conduisent souvent à des prédictions inexactes. L'assimilation de données peut contribuer à réduire l'incertitude des prévisions par des mises à jour régulières et fréquentes des états et/ou des paramètres du modèle grâce aux observations.

Idéalement, l'assimilation de données dans les modèles d'inondation devrait exploiter des données observées par des réseaux de mesures spatialement distribués par exemple de niveau d'eau et/ou de débit. Cependant, ce type d'information n'est pas toujours disponible, soit en raison d'un manque de stations hydrométriques, soit parce que les mesures effectuées lors de fortes crues ne sont pas fiables (Grimaldi et al., 2016). En complément des données in situ, les images satellitaires représentent des sources d'information précieuses, en particulier dans les régions où les données in situ sont rares. Par exemple, les capteurs radar à synthèse d'ouverture (SAR) ont la capacité de capturer les étendues inondées sur de grandes zones, de pénétrer les nuages et de produire des observations de jour comme de nuit grâce à leur technique de détection active par micro-ondes. Grâce aux satellites Sentinel-1, ces images sont désormais disponibles librement en quasi-temps-réel, avec des latences d'une à quelques heures au maximum, permettant ainsi d'envisager leur assimilation opérationnelle dans les systèmes de prévision.

Dans cette étude nous proposons d'évaluer comment l'assimilation de cartes d'inondation probabilistes dérivées d'images satellitaires radar permet d'améliorer la prévision des inondations. Trois inondations différentes (2007, 2012 et 2020) de la rivière Severn (Royaume-Uni) sont utilisées comme cas test (Figure 1).

2. Méthode

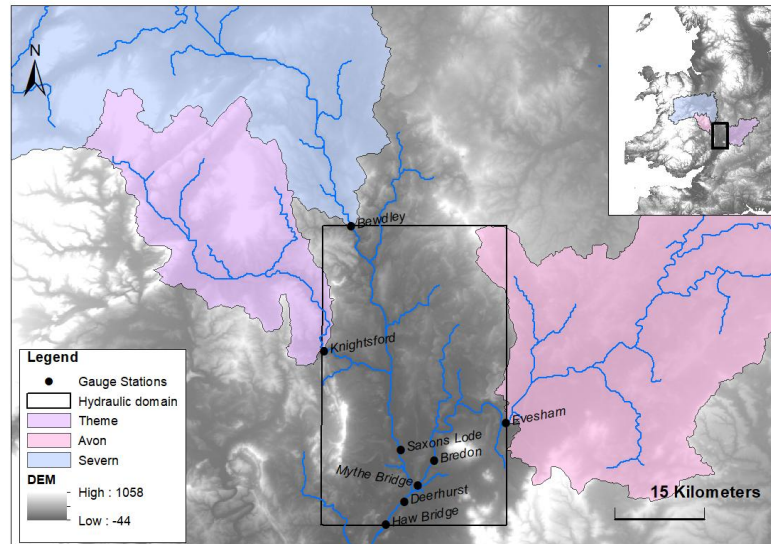


Figure 1 : Zone d'étude: la partie aval de la rivière Severn (les limites du domaine hydraulique sont représentées par un cadre noir). Les 3 bassins versants sont représentés par des polygones colorés ; leurs sorties sont situées aux stations de jaugeage de Bewdley, Evesham et Knightsford. Les stations de jaugeage sont représentées par des points noirs. (d'après Di Mauro et al., 2022)

La série chronologique des précipitations et des variables complémentaires permettant le calcul de l'évapotranspiration (température de l'air, radiation solaires, vitesse du vent...) issue de ERA5 est utilisée pour simuler des cartes d'étendue inondée grâce au couplage (non dynamique) de modèles conceptuels pluie-débit et d'un modèle hydraulique à surface libre (Figure 1). Les images satellitaires SAR sont utilisées pour calculer des cartes probabilistes d'inondation (PFM) (Giustarini et al. 2016) où chaque pixel représente sa probabilité d'être inondé en fonction des valeurs de rétrodiffusion enregistrées représentant ainsi conjointement les cartes d'étendues inondées et l'incertitude de classification associée. Afin d'émuler une prédiction d'ensemble, la série chronologique des précipitations d'ERA5 est perturbée et utilisée comme entrée pour le système de prévision des inondations. Les PFM sont assimilées dans ce système à l'aide d'un filtre à particule à tempérence récemment développé (van Leuwen et al., 2019). Ce filtre d'assimilation, basé sur une factorisation du théorème de Bayes permet une transition itérative progressive entre la distribution ensembliste a priori du système de prévision (i.e., ébauche) et la distribution postérieure optimale après assimilation (i.e., analyse).

3. Résultats et conclusions

Dans cette étude, l'assimilation a été appliquée à 3 événements d'inondation survenus le long de la rivière Severn (Royaume-Uni) en 2007, 2012 et 2020. Les résultats montrent que les erreurs de prévision sont réduites de 60%-70% au moment de l'assimilation pour la majorité des stations de jaugeage. Les améliorations de la précision des niveaux d'eau persistent également pendant plusieurs

heures ou jours après l'assimilation. En outre, les cartes d'étendues inondées sont améliorées, sauf lorsque la carte de l'ébauche (avant assimilation) est déjà très bonne. La principale limite actuelle du filtre à particule à température est liée aux mauvaises prédictions des flux entrants en limite du domaine du modèle hydraulique. Cela pourrait être dû au fait que d'autres sources possibles d'incertitude, autres que les précipitations et les données satellitaires, doivent être prises en compte (e.g. paramètres des modèles).

Les principales conclusions que l'on peut tirer de notre expérience peuvent être formalisées comme suit :

- Le filtre à particule utilisé représente une méthodologie pertinente pour améliorer la qualité des prévisions. En effet, notre expérience montre une amélioration substantielle et quasi systématique des niveaux d'eau prédits grâce à l'assimilation.
- Les améliorations de la précision de la prévision des niveaux d'eau persistent pendant plusieurs heures et dans certains cas pendant plusieurs jours après l'assimilation, à moins que les conditions hydrologiques ne changent trop rapidement.
- Des performances médiocres du filtre d'assimilation sont obtenues pour l'estimation des débits entrants aux limites du modèle hydraulique.
- Le filtre d'assimilation appliqué dans cette étude calcule des poids globaux qui sont ensuite utilisés pour mettre à jour indépendamment les variables du modèle hydrologique. Les poids globaux sont calculés sur la base de l'étendue de la crue qui est le résultat combiné des conditions hydrologiques des 3 bassins versants amont indépendants. Étant donné la complexité du système fluvial, la mise à jour des variables basée sur les poids globaux peut conduire à des erreurs et à des estimations inexactes des débits entrants aux limites de la rivière, car différents ensembles de particules peuvent générer des cartes d'étendue de crue très similaires.

REFERENCES

- [1] Di Mauro, C (2022). Data Assimilation of SAR derived flood extent maps into flood forecasting models via Particle Filters, PhD Thesis, Technical University of Vienna, Austria, 94 pp.
- [2] Grimaldi, S., Li, Y., Pauwels, V. R. N., & Walker, J. P. (2016). Remote sensing-derived water extent and level to constrain hydraulic flood forecasting models: Opportunities and challenges. *Surveys in Geophysics*, 37(5), 977–1034.
- [3] Giustarini, L., Hostache, R., Kavetski, D., Chini, M., Corato, G., Schlaffer, S., & Matgen, P. (2016). Probabilistic flood mapping using synthetic aperture radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(12), 6958–6969. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2592951>
- [4] van Leeuwen, P. J., Künsch, H. R., Nerger, L., Potthast, R., & Reich, S. (2019). Particle filters for high-dimensional geoscience applications: A review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(723), 2335–2365. <https://doi.org/10.1002/qj.3551>

Evaluation du nouveau produit de prévision d'ensemble sans couture PIAF-PE, pour l'anticipation des crues soudaines sur l'arc méditerranéen français

Assessing the ability of a seamless short-range ensemble rainfall product to detect flash floods on the French Mediterranean area

Auteurs : GODET Juliette^{1*}, JAVELLE Pierre², PAYRASTRE Olivier¹ et BOUTTIER François³

* *auteur correspondant*

¹GERS/LEE, Univ Gustave Eiffel, Campus de Nantes, 44344, Nantes, France, e-mail: juliette.godet@univ-eiffel.fr

²UMR RECOVER, INRAE, 13100 Aix-en-Provence, France

³CNRM, Université de Toulouse, Météo-France and CNRS, Toulouse, France

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

2/ **Prévision des crues et des inondations**

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Crue soudaine, prévision d'ensemble, évaluation

Les crues soudaines ont souvent des conséquences économiques, sociales et naturelles dramatiques. Les risques associés à ces crues pourraient encore s'aggraver à l'avenir dans un contexte de changement global où la croissance démographique tendra à aggraver notre vulnérabilité aux inondations, et où les régimes de pluie vont probablement s'intensifier, provoquant des aléas plus fréquents et plus forts. Une meilleure anticipation de ces phénomènes constitue une stratégie d'adaptation possible, qu'il est crucial de développer.

Ce travail présente une première évaluation du produit de prévision de pluie à courte échéance PIAF-PE (PIAF Prévision d'Ensemble), récemment développé par Météo-France, pour l'anticipation des phénomènes de crues soudaines. PIAF-PE est une première version ensembliste expérimentale du produit déterministe PIAF. PIAF (pour Prévision Immédiate Agrégée Fusionnée) correspond pour sa part à la fusion « sans couture » entre les extrapolations radars à faible échéance et un modèle numérique de prévision immédiate nommé AROME-PI, pour les plus longues échéances. Des perturbations d'amplitude et spatiales ont été appliquées sur ce produit pour générer un ensemble de 17 membres^[1], constituant le produit PIAF-PE.

1. La chaîne de prévision mise en œuvre

La chaîne de prévision utilisée dans ce travail pour anticiper les crues soudaines est directement inspirée du système d'avertissement opérationnel Vigicrues Flash^[2]. Elle est basée modèle hydrologique SMASH^[3], dans sa version « lag 0 », c'est-à-dire sans routage de l'écoulement de pixel en pixel, pour correspondre à la version du modèle hydrologique actuellement utilisé en opérationnel dans Vigicrues Flash. La méthode AIGA^[4] permet finalement d'émettre ou non un avertissement si le débit simulé dépasse un certain seuil de référence.

La principale différence avec Vigicrues-Flash est que la chaîne de modélisation a été alimentée ici non seulement avec les lames d'eau radar PANTHERE, mais aussi avec des scénarios de prévisions de pluie. Parmi ces scénarios figurent en premier lieu le produit PIAF-PE à évaluer, et également plusieurs références de comparaison : deux scénarios déterministes issus de modèles numériques (PIAF et AROME-PI) et un scénario « naïf » (la pluie future constante).

2. La méthode d'évaluation

La méthode d'évaluation appliquée porte sur la capacité de la chaîne de prévision à anticiper les dépassements de seuils de débits de périodes de retour 2, 5 et 10 ans, pour sept événements de crues soudaines récents (entre 2019 et 2021) qui ont été rejoués.

L'évaluation se base sur l'utilisation de tableaux de contingence et leur représentation cartographique, suivant la méthode proposée par M. Charpentier-Noyer et al^[5] qui a été légèrement adaptée ici, ainsi que sur le calcul de scores synthétiques (Critical Success Index). Il est important de noter que cette évaluation, bien que basée sur des scores statistiques classiques, ne permet pas de caractériser la performance des prévisions sur de longues chroniques temporelles, mais simplement de regarder leur capacité à prédire correctement des événements spécifiques de forte intensité. L'évaluation est en revanche conduite sur chaque pixel de 1km² du territoire, afin de produire un haut niveau de détail sur les résultats d'évaluation.

3. Les résultats de l'évaluation

Les résultats ont démontré une plus-value nette et systématique de la version ensembliste PIAF-PE par rapport à PIAF déterministe, et par rapport au scénario naïf de pluie future constante, pour les sept événements étudiés. En revanche, il n'a pas été possible de mettre en évidence une plus-value systématique de PIAF par rapport à AROME-PI avec cette méthode d'évaluation, qui regarde toutes les échéances sans les distinguer. En effet, il a été montré^[6] que le différentiel de performance entre PIAF et AROME-PI dépendait fortement de l'échéance, et que si PIAF est généralement meilleur que AROME-PI pour de très faibles échéances, la prise en compte des extrapolations radars peut également parfois détériorer la qualité de la prévision pour des échéances autour de 1h15 / 1h30. Cependant, dans plusieurs cas la version PIAF-PE permet de compenser ces erreurs de PIAF lorsqu'elles sont présentes, ce qui démontre un réel apport de l'utilisation de la prévision d'ensemble pour ce produit.

4. REFERENCES

- [1] Kévin Walcarius. Prévision immédiate probabiliste de précipitations adaptée à la prévision de crues. Rapport de stage, Ecole Centrale de Lyon, 2021.
- [2] C. Fouchier, C. Saint Martin, P. Javelle, P. Meriaux, D. Organde, and J. Demargne. Mises en oeuvre opérationnelles de la méthode AIGA pour anticiper les crues sur les cours d'eau non surveillés. *Sciences Eaux & Territoires*, (23) :48–55, 2017. doi : 10.14758/SET-REVUE.2017.23.09. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01538553>.

- [3] Maxime Jay-Allemand, Pierre Javelle, Igor Gejadze, Patrick Arnaud, Pierre-Olivier Malaterre, Jean-Alain Fine, and Didier Organde. On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model : application on a Mediterranean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11) :5519–5538, November 2020. doi : 10.5194/hess-24-5519-2020. URL <https://hal.inrae.fr/hal-03085942>. Publisher : European Geosciences Union.
- [4] Pierre Javelle, Didier Organde, Julie Demargne, Clotilde Saint-Martin, Céline de Saint-Aubin, Léa Garandeau, and Bruno Janet. Setting up a French national flash flood warning system for ungauged catchments based on the AIGA method. *E3S Web of Conferences*, 7 :18010, 2016. ISSN 2267-1242. doi:10.1051/e3sconf/20160718010. URL https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2016/02/e3sconf_flood2016_18010/e3sconf_flood2016_18010.html. Publisher : EDP Sciences.
- [5] Maryse Charpentier-Noyer, Daniela Peredo, Axelle Fleury, Hugo Marchal, François Bouttier, Eric Gaume, Pierre Nicolle, Olivier Payrastra, and Maria-Helena Ramos. A methodological framework for the evaluation of short-range flash-flood hydrometeorological forecasts at the event scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, pages 1–42, July 2022. ISSN 1561-8633. doi : 10.5194/nhess-2022-182. URL <https://nhess.copernicus.org/preprints/nhess-2022-182/>. Publisher : Copernicus GmbH
- [6] Alexane Lovat, Béatrice Vincendon, and Véronique Ducrocq. Hydrometeorological evaluation of two nowcasting systems for Mediterranean heavy precipitation events with operational considerations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(10) :2697–2714, May 2022. ISSN 1027-5606. doi : 10.5194/hess-26-2697-2022. URL <https://hess.copernicus.org/articles/26/2697/2022/>. Publisher : Copernicus GmbH

IMPACT HYDROLOGIQUE DES TRÈS FORTES INTENSITÉS DE PLUIE : APPLICATION À LA PRÉVISION DES CRUES

Hydrological impact of high-intensity rainfall: application to flood forecasting

Auteurs : ASTAGNEAU Paul¹, BOURGIN François^{1*}, ANDRÉASSIAN Vazken¹, PERRIN Charles¹

* *auteur correspondant*

¹Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, 1, rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex (francois.bourgin@inrae.fr)

Choix du thème/session :

- 1/ ~~Préparation et gestion de crise~~
- 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Pluie ; Intensité ; Prévision ; Modélisation hydrologique

1. Contexte et objectifs

Afin d’anticiper au mieux les crues, des systèmes opérationnels de prévision des crues ont été mis en place dans de nombreux pays. Ces systèmes reposent sur des modèles hydrologiques qui transforment des observations et prévisions météorologiques en prévisions de débit dans les rivières. Malgré les nombreuses améliorations apportées aux systèmes de prévision des crues au cours des deux dernières décennies, les prévisions des modèles hydrologiques restent entachées de fortes incertitudes.

En France, le modèle hydrologique GRP est utilisé par la plupart des services opérationnels de prévision des crues du réseau national Vigicrues. Les retours d’expérience avaient permis d’identifier plusieurs limitations du modèle, en particulier une sous-estimation fréquente des volumes et pics de crue. Plusieurs aspects de la chaîne de modélisation hydrologique peuvent contribuer à ces problèmes, parmi lesquels la structure du modèle, son paramétrage ou encore la méthode d’assimilation de données employée.

L’objectif du travail de recherche présenté ici (Astagneau, 2022) a été de mieux comprendre, par une approche de diagnostic détaillé, les raisons des limites du modèle GRP et d’améliorer la qualité de ses prévisions, tout en conservant un degré de complexification adapté au niveau d’information couramment disponible à l’échelle des bassins versants. Une attention particulière a été portée à une meilleure prise en compte des événements de crue générés par des fortes intensités de pluie.

2. Matériel et méthodes

Ce travail a exploité une grande base de données de 229 bassins versants français répartis sur le territoire métropolitain, sur lesquels 10 652 événements de crue ont été sélectionnés. Des séries de données au pas de temps horaire ont été utilisées, sur la période 2000-2018, représentant une large gamme de conditions hydroclimatiques.

Les modèles GRP et GR5H (et un grand nombre de variantes de ces modèles), ont été utilisés pour tester différentes hypothèses de fonctionnement. Un panel de critères de qualité a été utilisé pour évaluer les performances, sur l'ensemble de la série et sur les événements. Nous avons utilisé la réanalyse radar COMEPHORE de Météo-France.

Une première partie du travail a consisté à caractériser les erreurs en crue du modèle et à chercher les facteurs pouvant les expliquer (Astagneau et al., 2021). Ensuite, l'information donnée par l'intensité de pluie au pas de temps horaire a été utilisée pour modifier le comportement du modèle afin d'améliorer la simulation des crues qui ont lieu à la fin de l'été et au début de l'automne (Astagneau et al., 2022). Enfin, une évaluation fine des gains de performance obtenus par la modification de la structure du modèle a été menée, dans un objectif de prévision des crues.

3. Résultats

Les résultats ont montré que les modèles initiaux ont tendance à sous-estimer le volume des crues qui résulte de fortes intensités de pluie, en particulier en conditions de faible humidité antécédente des bassins. Ces sous-estimations sont parfois dues à une mauvaise estimation de la pluie efficace mais plus largement à une dynamique trop lente du routage lorsque la réaction des bassins est très rapide. La modification des flux internes du modèle à partir de l'intensité de pluie horaire permet d'améliorer sensiblement la simulation des crues estivales sans dégrader la simulation des autres événements.

Ces modifications de la structure permettent d'améliorer la qualité des prévisions des crues pour les échéances supérieures à 6 h (voir exemple en Figure 1). Ces améliorations donnent toutefois lieu à une complexification du paramétrage et de la méthode d'assimilation. Plusieurs solutions sont proposées pour tenter de dépasser les problèmes d'estimation des paramètres.

4. Conclusion et perspectives

Les travaux menés ont permis de proposer une nouvelle version du modèle de prévision des crues GRP, plus performante, prenant explicitement en compte les événements de précipitations intenses. Plus généralement, les résultats mettent en évidence les interactions entre le choix de la structure du modèle, le paramétrage et la méthode d'assimilation employée, et suggèrent donc d'adopter une approche intégrant simultanément ces différentes composantes dans les démarches d'amélioration des modèles de prévision des crues.

La nouvelle version du modèle de prévision proposée à l'issue de ce travail devrait en augmenter l'efficacité globale en conditions opérationnelles, et élargir son applicabilité à des types d'événements et des contextes hydroclimatiques variés.

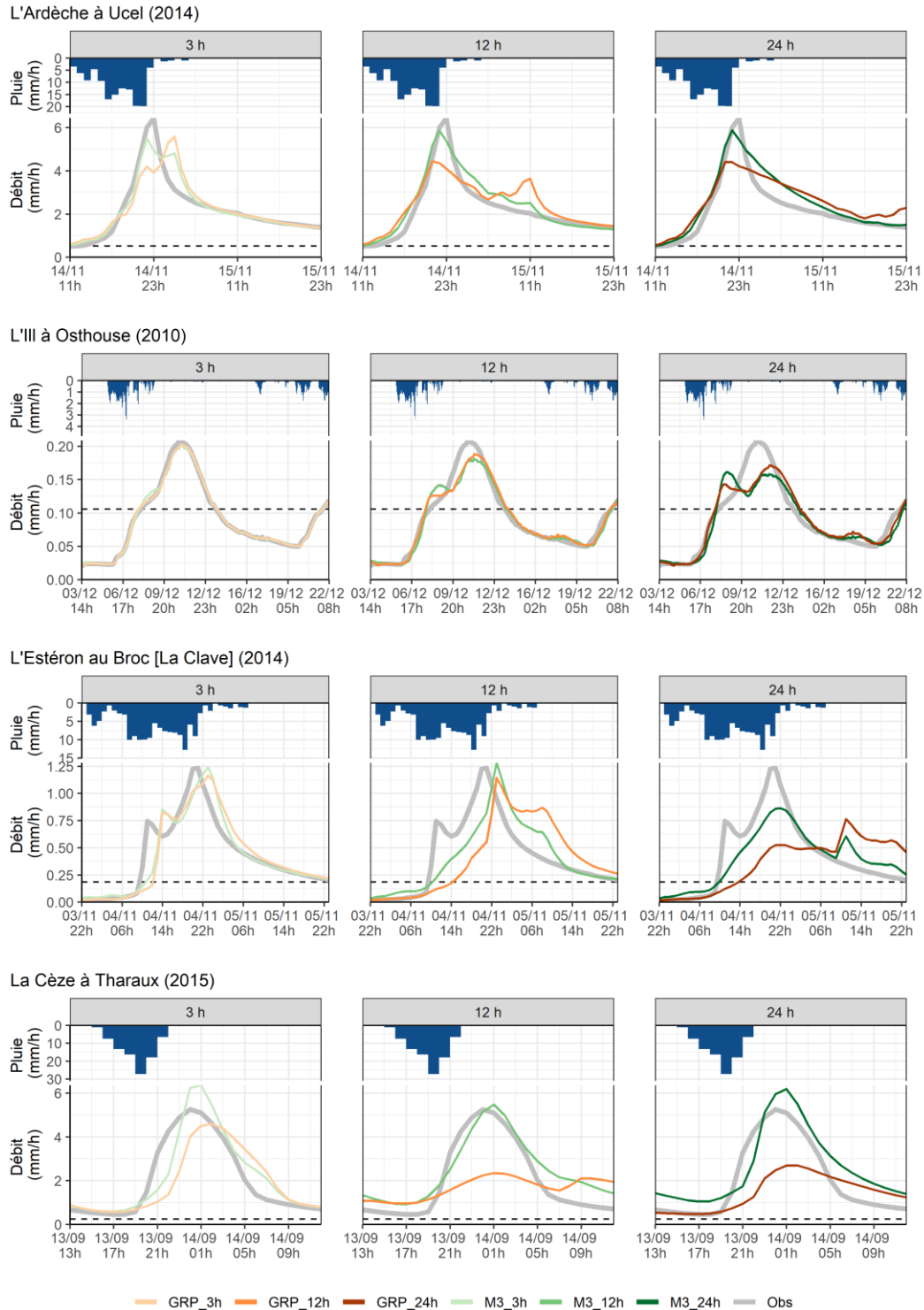


Figure 1 : Exemples d'hydrogrammes de crue (à horizon fixe) prévus par le modèle GRP et la version modifiée prenant en compte l'intensité (M3) sur quatre bassins versants pour trois échéances de prévision (validation). La ligne en pointillées noires est le quantile 95 % des débits sur la série complète.

5. REFERENCES

- [1] Astagneau, P. (2022). Pistes d’amélioration de la généralité et de l’efficacité d’un modèle opérationnel de prévision des crues. Thèse de doctorat, Sorbonne Université, INRAE, 212 pages.
- [2] Astagneau, P. C., Bourgin, F., Andréassian, V., and Perrin, C. (2021). When does a parsimonious model fail to simulate floods? Learning from the seasonality of model bias, *Hydrological Sciences Journal*, 66:8, 1288-1305, <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1923720>.
- [3] Astagneau, P. C., Bourgin, F., Andréassian, V., Perrin, C., (2022). Catchment response to intense rainfall: evaluating modeling hypotheses, *Hydrological Processes Journal*, <https://doi.org/10.1002/hyp.14676>.

VERS UNE ANTICIPATION A 1-6H DES RISQUES DE PLUIES INTENSES QUASI-STATIONNAIRES

Prediction of quasi-stationary intense precipitation risks at 0-6h lead times

Auteurs : BOUTTIER François^{1*}, MANDEMENT Marc¹

* *auteur correspondant*

¹CNRM, Météo-France et CNRS, Université de Toulouse, 42 Av. Coriolis 3015 Toulouse, France, francois.bouttier@meteo.fr

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : modélisation numérique de l'atmosphère, prévision d'ensemble, modèle AROME

1. Introduction et objectifs

La prévision numérique des précipitations est un axe important d'amélioration de l'anticipation des crues soudaines et inondations. Les prévisions numériques opérationnelles météorologiques fournissent maintenant une anticipation utile de la plupart des épisodes produisant des pluies impactantes. Mais certains épisodes s'avèrent encore mal prévus jusqu'à quelques heures d'avance: les prévisions numériques peuvent soit les sous-estimer, soit susciter des fausses alarmes.

Les progrès techniques récents incluent la mise au point de modèles numériques atmosphériques à maille kilométrique, leur déploiement dans des systèmes de prévision d'ensemble aidant à quantifier les incertitudes de prévision avec une anticipation d'environ 6h à 48h, et les améliorations des systèmes de prévision immédiate ciblant les échéances de 0 à 2h environ, basés sur l'extrapolation des observations et/ou des mises à jour fréquentes de prévisions numériques.

L'objectif de la présente étude est d'améliorer l'utilisation de ces outils pour **anticiper les pluies intenses aux échéances de 1 à 6h**, l'expérience montrant que ces dernières sont imparfaitement traitées à la fois par les extrapolations d'observations (l'extrapolation lagrangienne des pluies pouvant être défaillante lors de systèmes orageux quasi-stationnaires) et par les outils de prévision numérique (qui ne convergent généralement pas à très courte échéance vers les structures précipitantes observées).

On s'intéresse ici à des épisodes récents de pluies intenses méditerranéennes associés à des systèmes convectifs quasi-stationnaires. Ces épisodes sont intéressants par leurs forts impacts.

Nous avons cherché à y identifier, par la technique de **sensibilité ensembliste** décrite en section suivante, les sources d'erreurs de prévision des pluies intenses, afin (1) de caractériser les processus de propagation d'erreur responsables des incertitudes sur les prévisions, et (2) de tester la faisabilité d'améliorer ces dernières aux échéances 1-6h par une utilisation ciblée des observations les plus récentes. Ce travail s'intéresse à la jonction entre les échéances actuellement couvertes par les extrapolations d'observation de pluie, et celles de la prévision numérique de l'atmosphère.

2. Méthode et outils

La méthode proposée est une extension de la sensibilité ensembliste, originellement développée [1] pour le ciblage d'observations et les analyses de corrélations physiques. Nous l'étendons ici sur deux aspects originaux: (1) l'introduction d'une approche objet permettant d'identifier la propagation des erreurs le long du flux d'alimentation des systèmes convectifs précipitants, ce qui a été précédemment identifié comme un mécanisme clé dans les épisodes de pluies intenses méditerranéennes, et (2) l'utilisation des sensibilités ainsi identifiées pour

effectuer une pondération bayésienne sélectionnant les membres les plus probables des ensembles de prévision numériques à partir d'observations récentes.

La sensibilité ensembliste utilise les prévisions numériques du système opérationnel de prévision d'ensemble AROME (PE AROME), sachant qu'elles pourront dans le futur être complétées par les prévisions déterministes AROME (celles couplées aux modèles ARPEGE et IFS, et celles à rafraîchissement fréquent AROME-PI). AROME est un modèle numérique non-hydrostatique actuellement exploité opérationnellement par Météo-France à maille horizontale 1,3km sur la métropole et ses environs, avec des paramétrisations détaillées de la microphysique nuageuse, de la turbulence, du rayonnement et des surfaces. AROME est actuellement initialisé par un système d'assimilation 3D-Var et couplé au système de prévision global ARPEGE. La PE AROME [2] simule, par 16 membres calculés 4 fois par jour à échéance d'environ 48h, les incertitudes des prévisions AROME via des perturbations du modèle, des surfaces, des conditions initiales et des couplages ARPEGE. Ces systèmes sont capables de simuler explicitement les principaux mécanismes physiques des épisodes de précipitations intenses, mais avec des délais de production de plusieurs heures liés à leurs coûts numériques.

La technique de sensibilité ensembliste repose ici sur le calcul de corrélations, dans l'échantillon constitué par une prévision d'ensemble, entre des paires de variables x et y où

- **x est une mesure de la sévérité des précipitations** prévues par la PE AROME, cumulées dans une zone où un risque significatif de crue/inondation a été préalablement identifié. Dans cette étude, il s'agit du quantile Q99 des cumuls sur 3h des pluies dans une période et une zone cadrées subjectivement à environ 100km et 6h près, et précisément définie comme l'enveloppe spatiale des pluies dépassant un certain seuil d'intensité, avec une tolérance spatiale de 20km. Cette définition de x identifie un objet précipitant "à enjeu" (c'est à dire, ayant une probabilité significative de provoquer des impacts s'il se concrétise, mais avec une incertitude sur sa localisation et son intensité). Notre but est de déterminer à quoi la prévision de x est sensible, et si possible de réduire l'incertitude sur cette prévision.
- **y est un champ météorologique situé de 1 à 6 heures avant x** , susceptible d'y être corrélé.

x étant un scalaire et y un champ, la corrélation $\text{cor}(x,y)$ entre x et y , sur les 16 membres de la PE AROME, est un champ qui représente la relation statistique de y avec les pluies attendues. Cette statistique souffre d'un bruit d'échantillonnage pouvant masquer l'information physiquement significatives. Un filtrage du bruit de corrélation est donc effectué comme suit:

- les points du champ $\text{cor}(x,y)$ associés à des écart-types de prévision de la PE AROME (c'est à dire, des incertitudes) inférieures à un certain seuil sont mises à zéro : on ne tient pas compte des corrélations associées à des incertitudes si faibles, que les observations ne permettront pas de distinguer entre les meilleurs et les moins bons membres de l'ensemble.
- à chaque instant, le champ $\text{cor}(x,y)$ est remplacé par sa moyenne spatiale dans la "**zone amont**" de l'objet précipitant, définie comme l'enveloppe convexe des rétrotrajectoires de tous les points de l'objet précipitant, rétroadvectés par les vents de la PE AROME à altitude 500m (les résultats ne sont pas sensibles au choix précis de l'altitude). Cela permet de filtrer le bruit d'échantillonnage tout en ciblant l'étude de sensibilité sur les zones pertinentes pour la prévision des pluies.

Dans les cas sélectionnés, les pluies associées à de forts vents importants en basse altitude, ce qui est typique des épisodes de fortes pluies sur le sud-est de la France. Cela garantit qu'il y a causalité entre y et x (puisque'il est peu vraisemblable que les pluies en x influent sur les zones amont y), donc qu'améliorer y permettrait a priori d'améliorer la prévision de x .

Physiquement, les objets y caractérisent les propriétés de masses d'air qui influencent les épisodes de pluie via leur alimentation par un jet de basses couches. Cette notion de contrôle à distance des pluies quasi-stationnaires méditerranéennes a été confirmée expérimentalement dans le cadre du programme

de recherches HyMeX [3]. Cette approche n'est a priori pas valable là où les systèmes précipitants sont déjà établis et modifient leur environnement, par exemple en zone de plage froide, ou dans des systèmes convectifs se propageant à vitesse comparable à leur environnement.

Nous avons appliqué cette méthode à 7 cas de pluies en 2021 et 2022, incluant à la fois des cumuls exceptionnels et modérés. Dans chaque cas, après cadrage manuel, l'algorithme automatique a été appliqué sur les 9h précédant le déclenchement des pluies intenses, dans la PE AROME la plus récente. Les corrélations $\text{cor}(x,y)$ ont été calculés à chaque heure, avec pour y les paramètres suivants:

- températures: T à hauteur $z=2\text{m}$, T de surface, température humide potentielle à 500m
- humidités: spécifique q à 500m et intégrale verticale de q (TCWV: *total column water vapour*)
- vents: vitesse du vent horizontal ff à 10m, convergence du vent en moyenne spatiale à 500m
- diagnostics multivariés: énergie convective CAPE et flux horizontal d'humidité à 500m

Les conclusions sont peu sensibles aux choix des altitudes dans le jet de basses couches (0-800m).

3. Résultats et conclusions

La première question est d'identifier quels paramètres y produisent les plus fortes corrélations avec les pluies x , et de vérifier si ces corrélations sont significatives. Les principales conclusions sont que

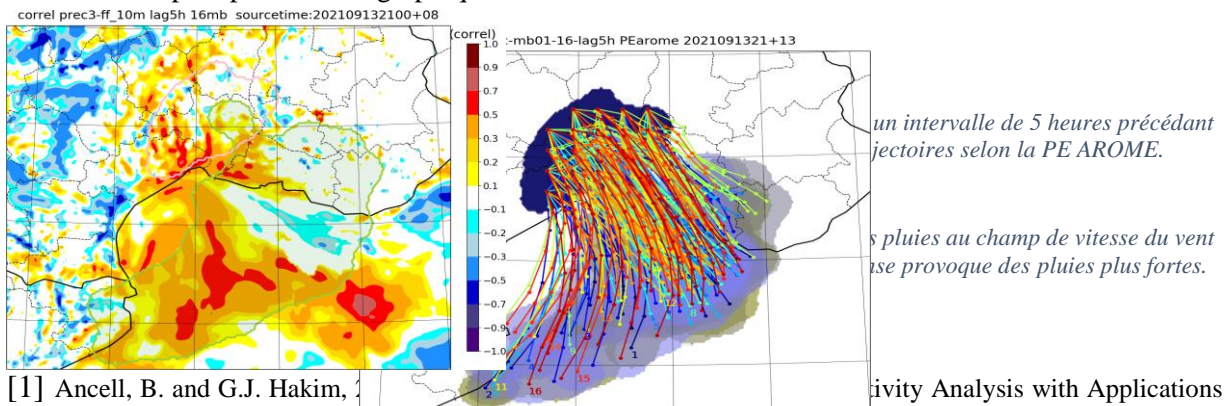
- tous les cas étudiés comportent des **sensibilités importantes** (corrélations dépassant 0,5 voire 0,6) sur certains paramètres, plusieurs heures (0-6h) avant les pluies intenses.
- comme physiquement attendu, les zones les plus sensibles se situent le long du jet de basses couches, sur la mer Méditerranée.
- les paramètres présentant des sensibilités importantes varient d'un cas à l'autre. Certains épisodes sont uniquement sensibles au vent, d'autres à l'humidité ou à la température. Cela indique que les modèles conceptuels répandus des précipitations intenses méditerranéennes (importance de la CAPE, de la convergence, de l'alimentation en humidité, etc) ne sont pas entièrement pertinents tous les épisodes. La méthode proposée ici permet d'identifier en temps réel quels paramètres sont réellement pertinents pour la prévision des pluies du jour.
- certains paramètres dont l'importance est communément admise n'ont, en fait, quasiment aucune influence selon notre diagnostic. Il s'agit notamment de la CAPE, de la température potentielle $\theta_{w'}$ et de la convergence de vent. Une explication possible est que ces paramètres sont dans l'absolu importants pour la production de pluies intenses, mais qu'améliorer leur analyse n'est pas prioritaire pour la prévision des pluies. Concernant la convergence de vent, la méthode de calcul employée ici étant assez fruste, on ne peut exclure qu'un mode de calcul différent en aurait révélé une importance significative.

La question suivante est le potentiel de ces informations pour améliorer les prévisions. La technique testée consiste à effectuer une pondération bayésienne des membres de la PE AROME (initialement équiprobables), en accordant plus de poids au membres les plus cohérents avec les analyses 3DVar AROME, qui sont ici utilisées comme substitut à des observations. Cette cohérence est mesurée à chaque heure de prévision avec le paramètre y le mieux corrélé avec les précipitations x . Sur le cas d'étude du 14 sept 2021, cette pondération permet d'améliorer la prévision probabiliste des pluies, au sens où la pondération réduit la dispersion des pluies prévues, et rapproche les intervalles de confiance des valeurs prévues de ce qui s'est effectivement produit. Autrement dit, sur ce cas, la pondération en temps réel de l'ensemble par les observations récentes (disponibles après la production PE AROME) aurait permis de faire une prévision à la fois plus confiante et plus réaliste du scénario de pluies intenses attendues quelques heures plus tard. Ce résultat prometteur reste à être consolidé sur un plus grand nombre de cas avec des évaluations des taux d'échecs.

En conclusion, on a montré la faisabilité d'une amélioration des prévisions probabilistes de pluie par post-traitement de prévisions d'ensemble à l'aide d'observations disponibles en temps réel, quelques

heures avant la survenue d'épisodes de pluies méditerranéennes intenses. Les travaux futurs prévus pour valoriser cette approche concerneront

- un usage plus direct des observations, incluant des satellites et des variables non-assimilées,
- le déploiement ciblé d'observations supplémentaires pour améliorer les prévisions de pluies,
- la fusion entre les outils de prévision immédiate, de prévision numérique, et d'hydrologie,
- des test d'applicabilité à d'autres types de phénomènes, notamment les orages non-stationnaires et les précipitations orographiques non-méditerranéennes.



- [1] Ancell, B. and G.J. Hakim, 2007: Sensitivity Analysis with Applications to Observation Targeting. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 4117-4134. [doi:10.1175/2007MWR1904.1](https://doi.org/10.1175/2007MWR1904.1)
- [2] Bouttier F., L. Raynaud, O.Nuissier and B. Ménérier, 2016: Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX.. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 142, 390-403. <https://doi.org/10.1002/qj.2622> et <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03157081v1>
- [3] Khodayar, S., and collaborators, 2021: Overview towards improved understanding of the mechanisms leading to heavy precipitation in the Western Mediterranean: lessons learned from HyMeX. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 17051-17078. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17051-2021>

PREVISION DES CRUES SOUDAINES ET DE LEURS IMPACTS : LE PROJET EUROPEEN NEPTUNE SUR LE BASSIN FRANCO-ITALIEN DE LA ROYA

*Nowcasting and impact-based predictions of flash floods: the NEPTUNE
European project on the French-Italian basin of La Roya*

Auteurs : JAVELLE Pierre^{1*}, ALFIERI Lorenzo², CANTET Philippe³, CAVALLO Andrea⁴,
DEMARGNE Julie³, DREYFUS Raphaëlle⁵, GARAMBOIS Pierre-André¹, GIANNONI
Francesca⁴, HUYNH Ngo-Nghi-Truyen¹, LE BOUAR Erwan⁶, MARTINA Federica⁴,
MOREAU Emmanuel⁶, POGGIO Julie⁵, POLETTI Maria Laura², SILVESTRO Francesco²,
VILLENAVE Lilian¹

* *auteur correspondant*

¹INRAE, Aix Marseille Université, RECOVER, 3275 route de Cézanne, 13182 Aix-en-Provence, France, e-mail: pierre.javelle@inrae.fr, pierre-andre.Garambois@inrae.fr, ngo-nghi-truyen.huynh@inrae.fr, lilian.villeneuve@inrae.fr

²CIMA (Centro Internazionale in Monitoraggio Ambientale), Via A. Magliotto 2, Savona 17100, Italy, e-mail : lorenzo.alfieri@cimafoundation.org, laura.poletti@cimafoundation.org, francesco.silvestro@cimafoundation.org

³HYDRIS hydrologie, 2196 Boulevard de la Lironde, 34980 Montferrier-sur-Lez, France, e-mail: philippe.cantet@hydris-hydrologie.fr, julie.demargne@hydris-hydrologie.fr

⁴ARPAL (Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente Liguria), via Bombrini 6, Genova 16149, Italy, email : andrea.cavallo@arpal.liguria.it, francesca.giannoni@arpal.liguria.it, federica.martina@arpal.liguria.it

SMIAGE (Syndicat Mixte Inondations, Aménagement et Gestion de l’Eau - Maralpin), 147 boulevard du Mercantour – CS 23182 - 06204 Nice Cedex 3, France, email : r.dreyfus@smiage.fr, j.poggio@smiage.fr

⁶BOWEN (NOVIMET), 7 avenue du Canada - 91940 Les Ulis, France, email : emmanuel.moreau@bowenfr.com, erwan.lebouar@bowenfr.com

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Mots clefs/Keywords : early warning, nowcasting, flash flood, impact-based forecast

1. Context and scientific objectives

Fatalities and economic damages from short-lived precipitation extremes along the Mediterranean coasts leading to flash floods (FF) take a considerable share of the impacts of all weather related hazards in general. Their damaging potential is particularly strong due to their sudden onset, fast development, destructive power and poor forecasting skills. Physically-based modelling chains to predict FF impacts suffer from large uncertainties which often prevent from skilful predictions in the different modelling steps. A recent example of transborder disaster in Europe is that of the storm Alex. This extra-tropical cyclone affected no less than 9 different countries between 30 September and 3 October 2020, causing huge damages and 16 fatalities. Crossing the Mediterranean region, the storm

Alex caused severe FF, with return period of peak flows estimated over 200 years in the France-Italy transborder area, causing severe damage on both sides.

In this context, the general objective of the NEPTUNE European project is to develop tools and methods improving preparedness and prevention in transborder areas affected by Mediterranean flash flood events. More precisely, the project will reinforce the cooperation between the services of civil protection and the operational actors in charge of issuing flood warnings, ARPAL in the Italian Liguria district and SMIAGE in the French Alpes-Maritimes area. Particular attention will be paid on the Roya catchment, a transboundary river basin severely hit by the storm Alex, and where fast and effective crossborder collaboration is key to improve disaster risk reduction.

To improve both the observed and forecast precipitation and the hydrological predictions, the project consortium includes INRAE, HYDRIS and CIMA, involved in the development and enhancement of national or regional operational flash flood forecasting tools, as well as NOVIMET, an operational provider of radar-based precipitation estimates. The operational actors in charge of issuing flood warnings, ARPAL and SMIAGE, are crucial in the development and dissemination of relevant impact-based forecasts to collect feedback from users and adapt the products to maximise their usefulness. NEPTUNE will provide improved impact-based flood forecasting methods to be run by ARPAL and SMIAGE on their own real-time platform. This is a first step toward more integrated and unified flood management services on the Roya, for emergency and better preparedness. Then the concept and results achieved through NEPTUNE could be transferred and scaled up in larger areas.

2. Methods

To develop improved flash flood forecasting chains, aiming both at improving anticipation and enabling a better representation of impacts with hydro-meteorological products at high temporal and spatial resolutions, innovative methods will be tested and implemented to lead to:

1) improving the radar-gauge Quantitative Precipitation Estimates (QPE), especially on the upper part of the Roya catchment, at present poorly covered by weather radars; it involves merging reflectivity measures from the French and Italian radars to build a seamless precipitation mosaic product taken into account additional data developed by NOVIMET;

2) improving Quantitative Precipitation Nowcasts at short ranges (0-2h) based on the extrapolation of the QPE by using two nowcasting procedures; the PhaSt phase-stochastic spectral-based nowcasting [1], developed by CIMA, nowcasting technique used in this paper is a radar-based probabilistic technique, PhaSt, uses the spectral space for preserving the spatial correlation within the rainfall fields and a stochastic process for modeling the phase evolution (i.e. the positioning of rainfall structures) to generate ensemble nowcasts; the second nowcasting method, STEPS (Short-Term Ensemble Prediction System), available in the pySTEPS framework [2], combines Lagrangian persistence with a stochastic perturbation applied to different spatial scales to control the temporal evolution and correlation structure of precipitation; from these 2 methods, QPN will be generated every 10 minutes as deterministic and probabilistic (ensemble) forecasts to account for uncertainties from errors in the initial state of the rainfall and motion fields and model errors of the evolution of precipitation (initiation, growth, decay and termination processes);

3) merging QPN with Numerical Weather Prediction (NWP) forecasts available at longer lead times to obtain seamless Quantitative Precipitation Forecast (QPF) up to a 12-h forecast horizon using optimised weights to combine both products to focus on the representation of short-lived intense

precipitation events; this aims at better taking into account the processes of growth and decay of the precipitation structures as described by a NWP model at convection-permitting resolution and with rapid update cycle procedures for improved initial conditions; the skill of nowcasting varies with season, event duration, scale and characteristics of the rainfall system (e.g., convective storms, persistent stratiform events) and can generally better capture the spatio-temporal pattern during the first 30 min to 2 h of the forecast; therefore, for longer forecast horizon, less weight is given to the nowcasting rainfall field in favour of the NWP model forecast;

4) improving Rainfall-Runoff (RR) models based on recent enhancements of the CIMA’s Continuum hydrological model [3] and the INRAE’s SMASH platform for Spatially distributed Modelling and ASsimilation for Hydrology [4]; both highly distributed and continuous rainfall-runoff models are designed to simulate discharge in ungauged conditions; they will be implemented over the whole Roya catchment at high spatio-temporal resolution to enable multi-model comparisons;

5) generating impact-based forecasts with an estimation of the corresponding inundation areas, in order to provide information on the assets potentially at risks; this project will capitalize on the products of two previous European projects (RiskACT and Concert-Eaux) ; we will link the severity of the peak flow magnitude and the flood volume to already available high resolution inundation maps (~1-2 m resolution) for specific return periods to clearly identified elements at risk; operational "impact matrix" will be built, combining flash flood hazard and different exposure layers (population, type of building, transport networks, among others); when the hydrologic model detects a severe flood event upcoming, the impact assessment framework will be automatically triggered to produce estimates of impacts and inform on hotspots at highest risk; such information is critical for the local civil protection to issue timely and spatially accurate warnings and for optimal emergency management.

The project focuses on the Roya basin, with a total catchment area of 660 km² and only 90 km² (the downstream part) in Italy, characterized by a wide range of assets and issues (hydro-electricity dams, exposed road network, strong urbanisation, transnational communication network, and water quality issues). Furthermore, like many Mediterranean catchments, the Roya is regularly affected by very intense and rapid flash floods. The French and Italian partners have identified 20 of the most severe events that occurred during this 2015-2020 period, for which the radar-gauge QPE re-analysis dataset was produced at a 5-min time step in the WGS84 projection at ~0.01° x 0.01° resolution. QPE is made available over an enlarged domain to produce relevant precipitation nowcasts for the Roya basin without any potential deterioration toward the edge of the domain, including precipitation cells coming from the sea and farther land areas (Fig. 1).

3. Expected results and perspectives

The NEPTUNE project started in March 2022 and will end in March 2024. Thus, this communication will present some preliminary results obtained at mid-term. We will discuss their limitations and the improvements that need to be made for operational use by ARPAL and SMIAGE. Because the Roya catchment area concentrates many problems related to flash flood early warning, the lessons learned by the NEPTUNE project could benefit the wider community.

4. REFERENCES

- [1] Poletti, M. L., Silvestro, F., Davolio, S., Pignone, F., and Reborà, N.: Using nowcasting technique and data assimilation in a meteorological model to improve very short range hydrological forecasts, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 3823–3841, <https://doi.org/10.5194/hess-23-3823-2019>, 2019.
- [2] Pulkkinen, S., Nerini, D., Pérez Hortal, A. A., Velasco-Forero, C., Seed, A., Germann, U., and Foresti, L.: Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0), *Geosci. Model Dev.*, 12, 4185–4219, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4185-2019>, 2019.
- [3] Silvestro, F., Gabellani, S., Delogu, F., Rudari, R., and Boni, G.: Exploiting remote sensing land surface temperature in distributed hydrological modelling: the example of the Continuum model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 39–62, <https://doi.org/10.5194/hess-17-39-2013>, 2013.
- [4] Jay-Allemand, M., Javelle, P., Gejadze, I., Arnaud, P., Malaterre, P.-O., Fine, J.-A., and Organde, D.: On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model: application on a Mediterranean catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 5519–5538, <https://doi.org/10.5194/hess-24-5519-2020>, 2020.

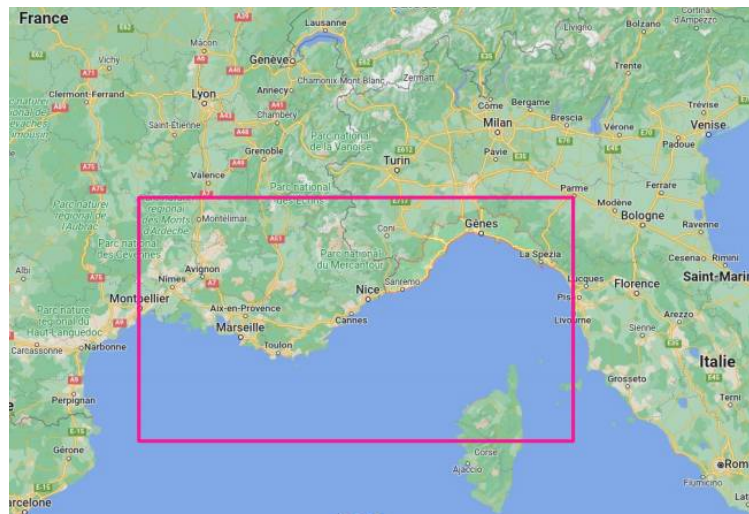


Figure 1 : Study area of the NEPTUNE project centered on the Roya transboundary basin with a enlarged domain to produce precipitation nowcast products



« Préviation des crues et des inondations –
Avancées, valorisation et perspectives », étude comparative d'un modèle de machine learning avec un modèle
pluie-débit conceptuel pour la prédiction des inondations, Boodoo fadil,
Toulouse, Automne 2023

BOODOO fadil
Fadil.boodo@umontpellier.fr

**ETUDE COMPARATIVE D'UN MODELE DE MACHINE LEARNING
AVEC UN MODELE PLUIE-DEBIT CONCEPTUEL POUR LA
PREDICTION DES INONDATIONS**
*COMPARISON OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK WITH A
CONCEPTUAL RAINFALL-RUNOFF MODEL FOR STREAMFLOW
PREDICTION*

Auteurs : BOODOO fadil¹, DELENNE Carole², & HOSTACHE Renaud³

¹Université de Montpellier, Hydrosience de Montpellier, 15 Av. Charles Flahault, 34093
Montpellier, France, e-mail : fadil.boodo@umontpellier.f

²Université de Montpellier, Hydrosience de Montpellier, 15 Av. Charles Flahault, 34093
Montpellier, France, e-mail : carole.delenne@umontpellier.fr

³ UMR Espace-Dev, IRD, Univ. Reunion Univ. Guyane Univ. Antilles Univ. Nouvelle
Calédonie Univ. Montpellier, Montpellier, France, e-mail : renaud.hostache@ird.fr

**Choix du thème/session : Progrès réalisés et perspectives d'amélioration pour la
préviation des crues et des inondations**

Mots clefs: artificial intelligence, machine learning, Long Short-Term Memory, Superflex,
conceptual runoff-rainfall model, Neuralhydrology

Orateur: (BOODOO fadil/ fadil.boodo@umontpellier.fr)

Accurate streamflow forecasting can help minimizing the negative impacts of hydrological events such as floods and droughts. To address this challenge, we explore artificial neural network models (ANNs) for streamflow forecasting. These models, which have been proven successful in other fields, may offer improved accuracy and efficiency compared to traditional conceptually based forecasting approaches.

The goal of this study is to compare the performance of a state-of-the-art conceptual rainfall-runoff (hydrological) model with an artificial neural network (ANN) model for streamflow forecasting. As a test area, we use the Severn catchment in the United Kingdom. The adopted ANN model has a long short-term memory (LSTM) architecture with two hidden layers, each with 256 neurons.

The model is trained on a 2-year dataset (2016-2017) and validated on a 3-year dataset (from 2018 to 2020), and also on a 14-year dataset (2004-2017) for training, validated over the same period as previously. 2019 was chosen in the validated period for being a particularly wet year relevant to assess the model performance in extreme hydrological conditions. The study focuses on daily and hourly predictions.

The Severn River is the longest in Great Britain and runs from its source in the Welsh hills to the Bristol channel. The basin is mainly rural, with some urban settlements like Worcester, Tewkesbury and Evesham. The study area focuses on the area on Saxons Lode (Figure 1):

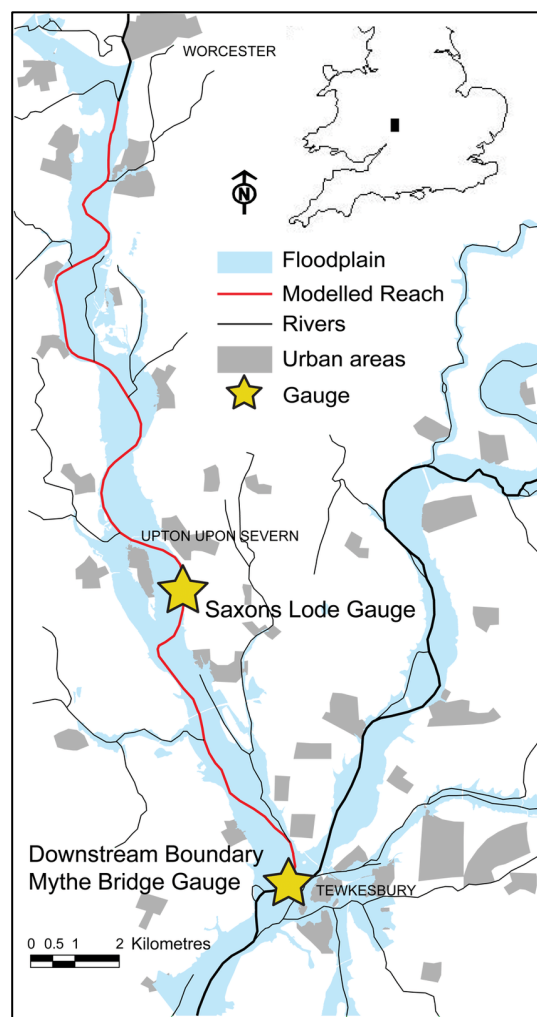


Figure 1 The study area includes the location of the river's gauging stations at Saxons Lode and Mythe Bridge.[1].

The data of our study is provided by ERA5, which is a dataset that provides hourly estimates of various climate variables such as precipitation, temperature, mean surface downward short-wave radiation flux,

snow-depth, atmospheric and dewpoint temperature. The data covers the entire Earth on a 0.25-degree grid and has a detailed resolution of the atmosphere using 137 levels from the surface up to 80km high.

Our model is based on a LSTM, that is a type of Recurrent Neural Network (RNN) architecture, specifically designed to handle sequential data with long-term dependencies. LSTMs can retain information for longer periods of time by using gates to control the flow of information through the network. These gates can decide which piece of information to keep and which to discard, enabling LSTMs to remember important information from earlier in the sequence while also being able to forget irrelevant information. LSTMs are commonly used in natural language processing, speech recognition, and time-series forecasting tasks. As can be seen in fig.2, a scheme of a two-layer LSTM model used for our study.

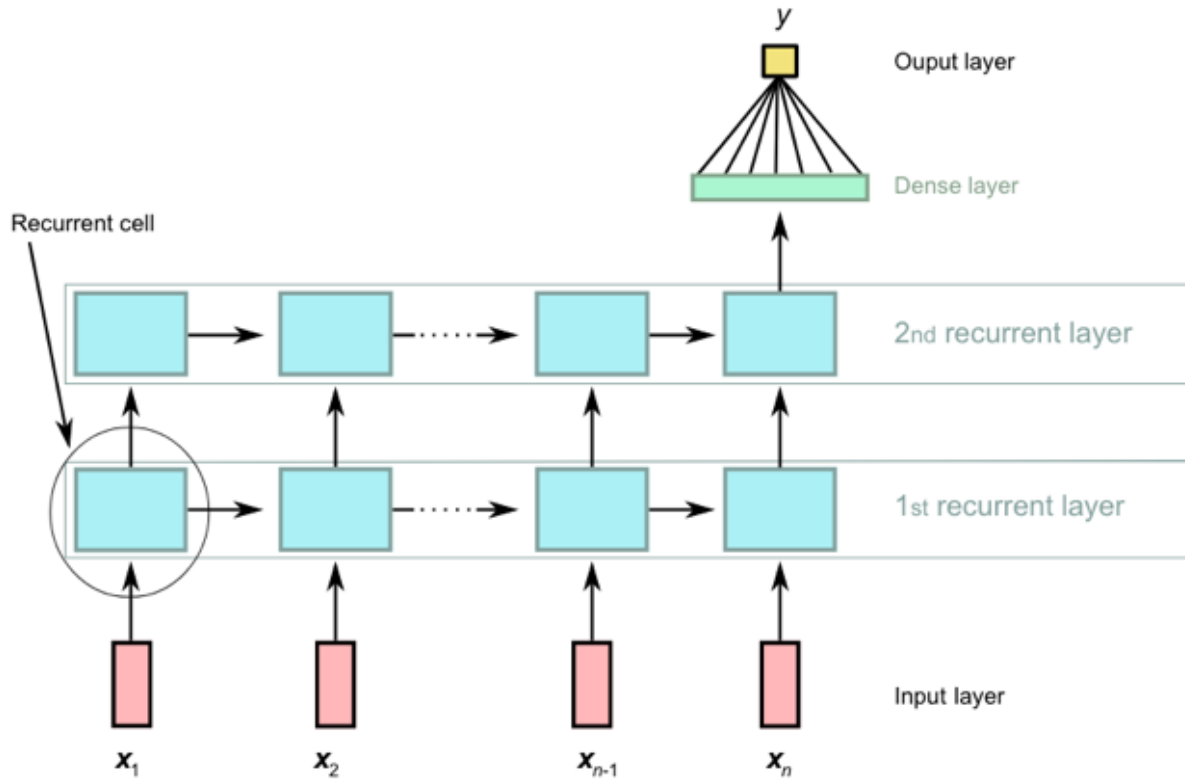


Figure 2 : Example of a two-layer recurrent neural network, in which the input sequence is processed over a period of time. The output from the second recurrent layer at the final time step are passed through a dense layer to make a prediction (y) [2]

To carry out this study, the conceptual hydrological model called Superflex is used as a benchmark. Superflex is a flexible framework for conceptual hydrological modeling who aims to generalize and systematize the field of conceptual models and provide a robust platform for understanding and modeling hydrological systems at the catchment scale. It allows hydrologists to use a combination of generic components to hypothesize, build, and test different model structures, which is useful due to the limitations in process understanding and data availability at this scale [3].

Both models are first evaluated using the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) score. To enable a meaningful and fair comparison, both models share the same inputs (i.e., meteorological forcings: total precipitation, daily maximum and minimum temperatures, daylight duration, mean surface downward short-wave radiation flux, and vapor pressure) and share the same training and validation period. The ANN model was implemented using the Neuralhydrology library developed by F. Kratzert [2].

In our study, for the 2-years training period, we found that LSTM model can provide more accurate one-day forecasts than the hydrological model Superflex. For the daily predictions, the average NSE score using the LSTM model is 0.81 for validation period (With an average NSE score of 0.96 for training

period), which is higher than the NSE score of 0.76 achieved by the Superflex model (with a score of 0.70 for training period), as we can see in figure 3 & 4.

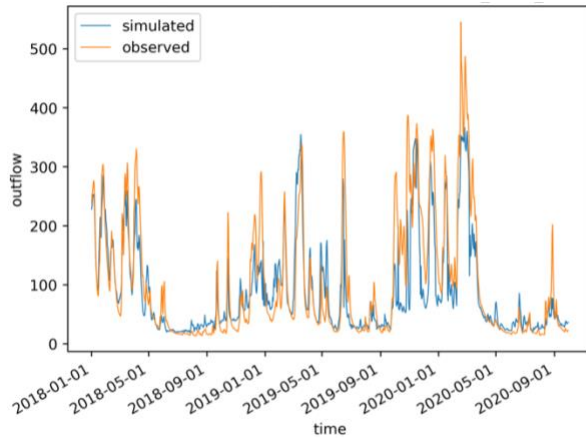


Figure 4 Comparison of simulated outflow (in blue) and observed outflow (in orange) over the validation period for the LSTM.

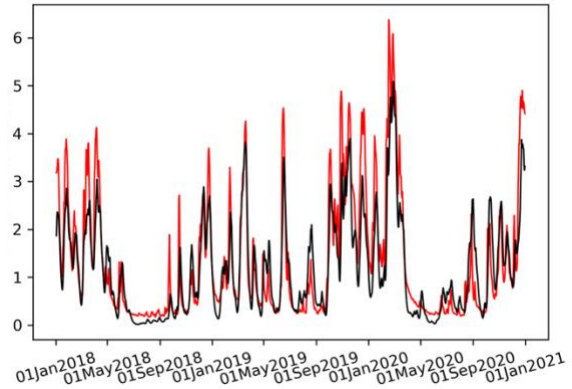


Figure 3 Comparison of simulated outflow (in black) and observed outflow (in red) over the validation period for SuperFlex [4].

During the 14-year training period, we obtained an average NSE score of 0.88 using the LSTM model, which had an average NSE score of 0.97 during the training period. The Superflex model had an NSE score of 0.72 (and 0.70 during the training period).

We have conducted the same experiments for the hourly time step, and we obtained similar results and conclusions to those of the daily time step.

These results were obtained without adjusting the hyperparameters and by training the model only on data from the Severn watershed.

The ANN model has demonstrated promising results compared to a state-of-the-art conceptual hydrological model in our studies. We will further compare both models using different training dataset periods, and different catchments. These additional tests will provide more information on the capabilities of the LSTM model and help to confirm its effectiveness.

References:

- [1] Neal, Jeffrey & Hawker, Laurence & Savage, James & Durand, Michael & Bates, Paul & Sampson, Christopher. (2021). Estimating River Channel Bathymetry in Large Scale Flood Inundation Models. *Water Resources Research*. 57. 10.1029/2020WR028301.
- [2] Rainfall–runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks, volume 22, pages 6005 :6022, number 11, Kratzert, Frederik and Klotz, Daniel and Brenner, Claire and Schulz, Karsten and Herrnegger, Mathew.
- [3] Fenicia, F., Kavetski, D., and Savenije, H. H. G. (2011), Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development, *Water Resour. Res.*, 47, W11510, doi:10.1029/2010WR010174.
- [4] PFE STES, Modélisation hydrologique pluie-débit sur la rivière Severn (UK), Freychet Julien

GESTION DES DETARAGES DE LA RELATION HAUTEUR-DEBIT POUR LA MESURE ET PREVISION DES CRUES ESTIVALES

MANAGEMENT OF STAGE-DISCHARGE RATING SHIFTS FOR MEASURING AND FORECASTING SUMMER FLOODS

Auteurs : LOGNON Denis^{1*}, LE COZ Jérôme², SOLTERMANN Yohan³

* *auteur correspondant*

¹Direction Régionale de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement Grand Est -
Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires - 22 rue Augustin
Fresnel 57000 Metz, e-mail : denis.lognon@developpement-durable.gouv.fr

²INRAE Lyon-Grenoble, Unité de Recherche RIVERLY, 5 rue de la Doua CS 20244, 69625
Villeurbanne Cedex, e-mail : jerome.lecoz@inrae.fr

³Direction Régionale de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement Grand Est -
Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires - 22 rue Augustin
Fresnel 57000 Metz, e-mail : yohan.soltermann@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Relation hauteur/débit crues estivales

1. Contexte

Pour pouvoir réaliser des prévisions de débits et hauteurs d’eau, à certains points précis d’une rivière, dans le but d’anticiper l’impact de l’augmentation du niveau d’un cours d’eau, des données issues du terrain sont essentielles. Pour cela, des stations hydrométriques sont implantées sur les rivières, afin de pouvoir détenir des informations en temps réel émanant du terrain. Ces stations mesurent, en continu et en temps réel, la hauteur d’eau relative des cours d’eau par rapport à un point de référence. Cette donnée est ensuite transformée en débit (grandeur conservative beaucoup plus facile à utiliser) par une courbe de tarage. Une courbe de tarage est la relation univoque entre la hauteur et le débit en un point définit d’un cours d’eau.

Ces courbes de tarage sont construites à l’aide de mesures terrain couplées hauteur/débit (à différentes hauteurs) et à un instant donné, les jaugeages. Les courbes de tarage traduisent les conditions d’écoulement des cours d’eau que ce soit en basses, moyennes ou hautes eaux. Cependant à la suite de plusieurs événements de crue estivaux, avec débordement dans un lit majeur important, (Loing et Orne en juin 2016, Chiers et Sambre en juillet 2021, etc.), il a été constaté que les conditions d’écoulement estivales avaient un impact non négligeable sur la relation hauteur/débit, entraînant un détarage « temporaire » lié à l’état de la végétation, de la saison, etc. En général, ce sont plutôt les détarages de basses eaux qui sont plus fréquemment étudiés et remarqués, ils se produisent progressivement et les CT peuvent être ajustées au fur et mesure des jaugeages, mais en période de crue estivale, il est difficile voire impossible d’ajuster les CT en temps réel. Ce Phénomène de détarage estivale en hautes eaux, a pu être mis en lumière grâce aux jaugeages réalisés pendant l’évènement.

2. Gestion des détarages, en conditions d’écoulements estivales, sur la relation hauteur/débit

L’évènement de juillet 2021 qui a frappé la Belgique et l’Allemagne et causé la mort de plusieurs centaines de personnes a aussi touché une partie du bassin versant de la Chiers (affluent de la Meuse, Fig. 1) et ce cours d’eau a atteint des hauteurs historiques.

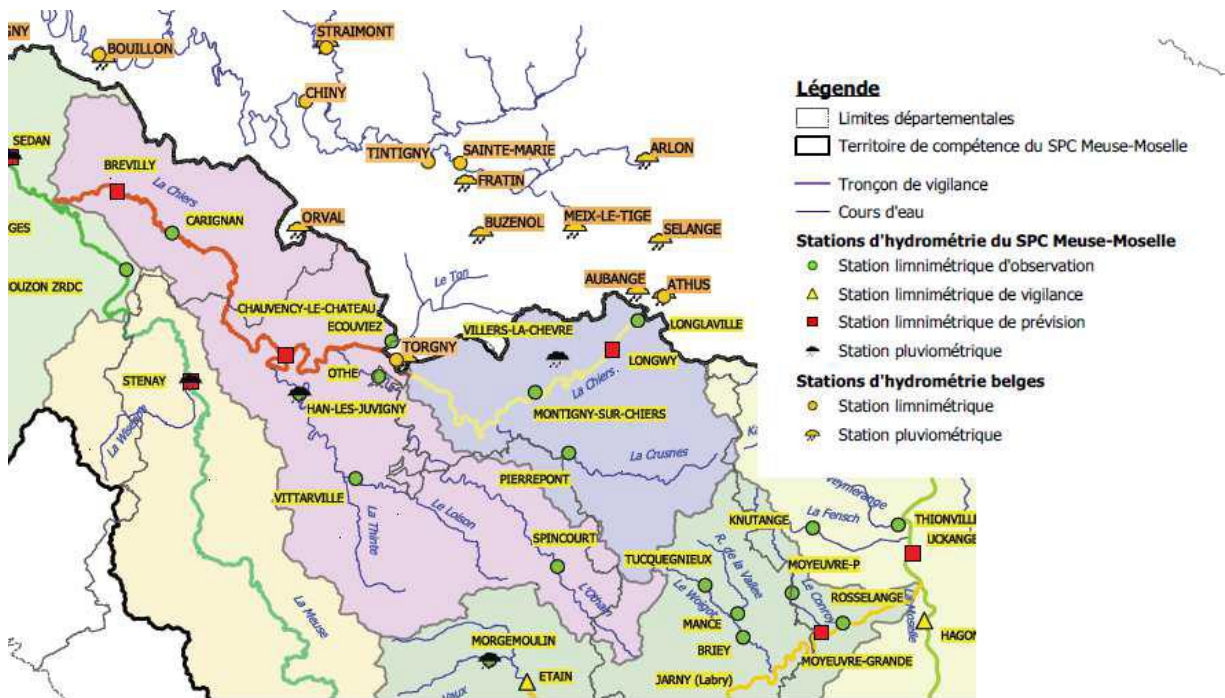


Figure 1: Carte du réseau de mesure hydrométéorologique – Bassin versant de la Chiers - SPC Meuse Moselle - 2021

Ces hauteurs historiques, et les débits associés, ont pu être mesurés sur la quasi-totalité des stations du bassin, grâce à de nombreux jaugeages par profileur hydro-acoustique (ADCP), ce qui constitue une donnée précieuse. L’analyse des jaugeages effectués nous montre que les débits aux stations, obtenus par les courbes de tarage en vigueur lors de l’évènement, **sont surévalués de 10 à 25 %** par rapport aux débits jaugeés en fonction des stations (tableau 1).

Cours d'eau	Station	Date et heure du pic de crue (heure locale)	Hauteur max atteinte retenue (en cm)	Q max atteint en m ³ /s (brut – CT sans correctif)	Q max atteint retenu en m ³ /s (CT avec correctif herbe)
Chiers	LONGLAVILLE	15/07/2021 – 06:05	341	98	88
Chiers	LONGWY	15/07/2021 – 06:55	382	98	88
Chiers	MONTIGNY	15/07/2021 – 11:40	246	95	82
Crusnes	PIERREPONT	15/07/2021 – 02:40	366	42	34
Ton	ECOUVIEZ	15/07/2021 – 21:20	400	48	39
Othain	OTHE	15/07/2021 – 18:35	314	44	35
Loison	VITTARVILLE	15/07/2021 – 12:30	284	70	48
Loison	HAN LES JUVIGNY	15/07/2021 – 19:40	349	142	92
Chiers	CHAUVENCY	16/07/2021 – 06:50	327	399	312
Chiers	CARIGNAN	17/07/2021 – 01:15	401	292	194
Chiers	BREVILLY	17/07/2021 – 12:30	448	337	262

Tableau 1: Tableau de synthèse des hauteurs et débits associés aux stations hydrométriques lors de la crue de la Chiers en juillet 2021 – SPC Meuse Moselle

Plusieurs

hypothèses sont possibles pour expliquer ce phénomène :

- la présence de végétation développée en été, dans les lits mineur et majeur, qui ralentit les écoulements,
- le caractère orageux des pluies qui induit de plus fortes intensités et donc des hydrogrammes qui se laminent et des temps de propagation plus long.

Pour retrouver un « débit juste » sur ce type d'évènement, suite aux observations faites, plusieurs approches sont possibles :

- soit l'on utilise des CorTH (correctifs temps/hauteur) qui permettent de « corriger la hauteur » pour obtenir le débit souhaité avec la courbe de tarage en vigueur (hivernale), cette méthode est plus précise et garantie une continuité dans les débits sans cassure,
- soit l'on construit une succession de courbe de tarage appelée **courbes filles**, mais avec une difficulté pour déterminer les limites de validité de ces CT, sans créer des paliers dans la chronique des débits.

Ces méthodes ne peuvent fonctionner qu'avec de nombreuses observations terrain, notamment avec des jaugeages réalisés fréquemment durant la période influencée.

Dans la présente étude, l'objectif est de **faciliter** la construction d'une courbe de tarage de crue estivale, à partir de la courbe de tarage hivernale expertisée.

La méthode proposée, permettra **avec une seule courbe de tarage**, de garantir un débit en continu pour toutes la gamme de hauteur avec possibilité de la réajuster au fur et mesure des jaugeages réalisés.

3. Extrapolation de la courbe de tarage

Les détarages constatés pourraient être dus à la végétation du lit majeur qui était très différente des conditions hivernales de celles des jaugeages de crue utilisés pour construire les hauts des courbes de tarage. En juillet 2021, en effet, les plaines inondables étaient couvertes de hautes cultures d'été qui n'avaient pas été récoltées en raison du temps exceptionnellement froid et pluvieux.

Pour tester cette hypothèse sur une base hydraulique, les courbes de tarage de stations sur les rivières touchées par l'évènement dans le Nord-Est de la France, notamment la Chiers et le Loison, ont été ré-analysées à l'aide de la méthode bayésienne BaRatin [1] implémentée dans le logiciel libre BaRatinAGE. Pour chacune de ces stations, les contrôles identifiés comprennent le chenal principal (et éventuellement

d'autres contrôles bas débit) et un lit majeur rural relativement large. Pour chaque station, deux courbes de tarage et leurs enveloppes d'incertitude sont calculées : la courbe de tarage « mère » (ou « d'hiver ») utilisant tous les jaugeages associés à la courbe en vigueur sauf ceux de la crue de juillet 2021, et la courbe de tarage « juillet 2021 » n'utilisant aucun jaugeage de crue débordante sauf ceux de la crue de juillet 2021. Pour la courbe de tarage « juillet 2021 », l'a priori sur la hauteur d'activation du lit majeur est généralement estimé à partir de l'a posteriori (résultats calés) de la courbe de tarage « normale », mais le coefficient du contrôle par le lit majeur est estimé par BaRatin en utilisant les jaugeages ADCP de juillet 2021. Les courbes de tarage ainsi obtenues sont cohérentes avec les courbes de tarage estimées manuellement par les hydromètres locaux (Figure 3). Les coefficients du contrôle par le lit majeur estimés par BaRatin pour la courbe de tarage « juillet 2021 » sont diminués d'un facteur allant de 1,6 à 14, typiquement (c'est-à-dire des coefficients de Strickler allant typiquement de 15-20 m^{1/3}/s à 2-10 m^{1/3}/s), ce qui est spectaculaire mais cohérent avec les tables de valeurs disponibles pour les coefficients de frottement dans des champs nus ou végétalisés par des cultures.

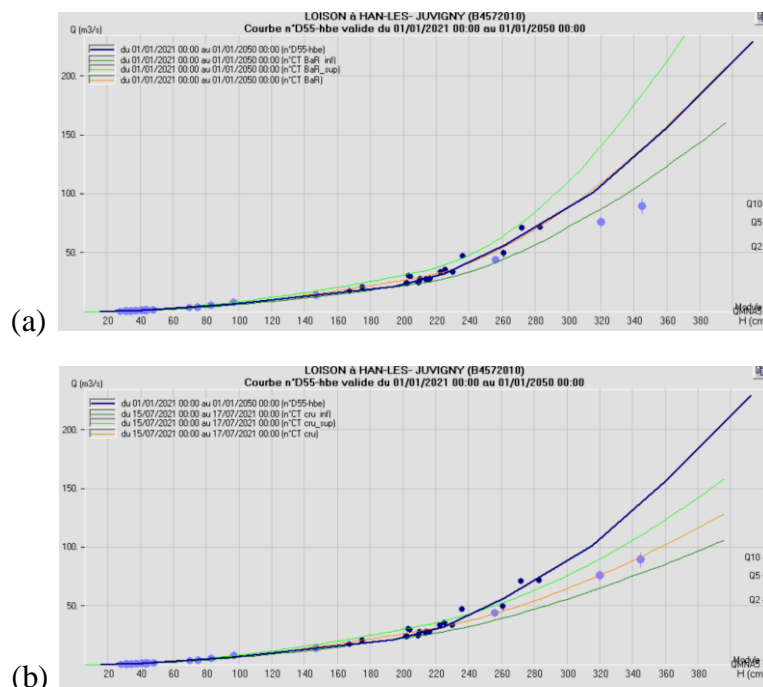


Figure 2 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (B4572010) : courbes de tarage de l’UH Meuse-Moselle (bleu foncé) et courbes de tarage estimées via BaRatin (orange, et enveloppe d’incertitude à 95% en vert) pour les crues (a) d’hiver et (b) d’été (les deux jaugeages les plus élevés ont été mesurés pendant la crue de juillet 2021)

4. Utilisations pratiques de ces méthodologies

Pour la prévision en temps réel par les prévisionnistes des Services de Prévision des Crues. La mise à disposition d’une courbe de tarage “estivale” type (juillet 2021 et autres événements de ce type) sur laquelle s’appuyer, permet la prise en compte des phénomènes de détarage estivaux mentionnés ci-dessus en temps réel dans les modèles.

L’utilisation d’une seule CT « fille », uniquement en cas de phénomène estival, permettrait d’éviter des erreurs de conversion non négligeables dues à l’utilisation de CT mère « hivernale » qui ne sont pas adaptées aux conditions d’écoulement.

Pour la bancarisation de la donnée. A posteriori l’utilisation d’une CT événementielle pour chaque crue estivale, permettrait la bancarisation de données de débits plus proche de la réalité, qu’en utilisant les CT

« mère » basée sur les conditions hivernales. Elle permettra aussi de pouvoir répondre rapidement aux sollicitations des administrations (ex CATNAT) .

5. REFERENCES

[1] [Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R. \(2014\). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. J. Hydrol. 509, 573–587.](#)

EVALUATION PAR MODELISATION INVERSE DES ECHANGES LATERAUX EN CRUES ET DES CONCENTRATIONS EN SOLUTES : APPLICATION SUR UNE PLATEFORME EXPERIMENTALE ET SUR DES BASSINS NATURELS

Auteurs : MOUSSA Roger^{1*}, MAJDALANI Samer², CHARLIER Jean-Baptiste^{3,4}, LE MESNIL Martin^{1,3,4}, DELESTRE Olivier^{5,6}

* *auteur correspondant*

¹LISAH, Univ. Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France

²Univ. Montpellier, Polytech Montpellier/HSM, France.

³BRGM, Univ. Montpellier, Montpellier, France.

⁴G-eau, INRAE, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Institut Agro, BRGM, Montpellier, France.

⁵Université Côte d'Azur, CNRS, LJAD, France

⁶Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, Ecole des Ponts ParisTech - EDF R&D, Chatou, France

Choix du thème/session : 2/ Progrès réalisés et perspectives d'amélioration pour la prévision des crues et des inondations - Les méthodes novatrices de prévision des crues et des inondations

Mots clefs : crue, onde diffusante, modélisation inverse, échanges latéraux, concentrations

1. Contexte et objectifs

L'écoulement latéral (Figure 1) est un processus majeur en crue, qui peut représenter soit un gain pour le tronçon, tel que le ruissellement de surface sur les versants ou le drainage de la nappe, soit une perte pour le tronçon, tel que le débordement lors des crues extrêmes ou l'infiltration vers une nappe sous-jacente. L'écoulement latéral peut également être dû aux activités anthropiques, comme le pompage ou les rejets d'eau. Malgré les progrès récents dans les mesures, l'écoulement latéral ne peut pas être mesuré et les expérimentations ne peuvent pas être menées in situ en raison de la difficulté de contrôler tous les échanges le long d'une rivière (interactions rivière – versant – nappe - zone d'inondation).

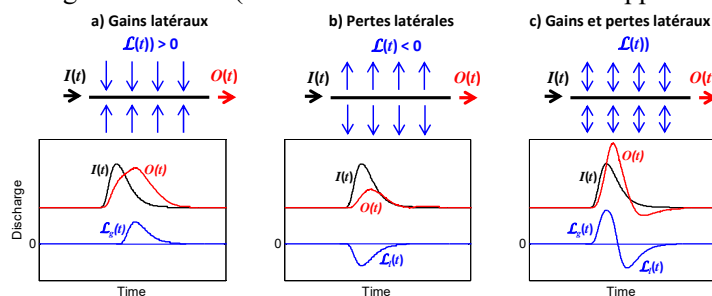


Figure 1 : Hydrogramme d'entrée $I(t)$, hydrogramme de sortie $O(t)$ et échanges latéraux uniformément distribués le long du tronçon de rivière $\mathcal{L}(t)$ (en bleu) pour trois cas : a) gains latéraux ; b) pertes latérales ; c) gains et pertes latéraux.

Le modèle de l'onde diffusante à deux paramètres (célérité et diffusivité), qui est une simplification des équations de Saint-Venant, est largement utilisé pour la propagation des crues. Sous l'hypothèse de célérité et diffusivité constantes, l'équation de l'onde diffusante a une solution analytique exacte qui est le modèle d'Hayami. La solution d'Hayami a été étendue au cas de propagation d'onde avec apports ou pertes latéraux uniformément répartis le long de la rivière [7]. En plus, [7] propose une résolution du

problème inverse qui consiste à calculer l'hydrogramme des écoulements latéraux sous l'hypothèse d'un débit latéral uniformément réparti le long du tronçon, en utilisant à la fois le débit entrant et le débit sortant comme entrées du modèle, et en connaissant les deux paramètres célérité et diffusivité. Cette approche a été appliquée sur la Loire [7], le Tarn [1] et en Normandie [2], et a ensuite été étendue pour estimer les concentrations en solutés des apports latéraux connaissant les concentrations en solutés des entrées et des sorties [3].

Récemment, [6, 8] ont développé une nouvelle plateforme expérimentale au laboratoire pour étudier la propagation d'onde de crues et de solutés conservatifs dans un canal dans des conditions d'écoulement transitoire. Cette plateforme présente l'intérêt de mesurer les hydrogrammes et les concentrations en solutés à l'entrée du canal, à la sortie ainsi que les apports et pertes latéraux.

Cet article vise à calculer l'hydrogramme de l'écoulement latéral et les concentrations en solutés sur des canaux expérimentaux au laboratoire et sur des bassins versants naturels en utilisant la solution analytique du problème inverse de l'équation de l'onde diffusante [7].

2. Plateforme expérimentale et sites d'étude

Les applications ont été conduites :

- i) sur une plateforme expérimentale où les hydrogrammes et la conductivité électrique des entrées, sorties et apports/pertes latéraux sont mesurés : l'objectif de ces expérimentations est de disposer d'un grand nombre d'événements de crues en milieu contrôlé. Ces données sont utilisées : i) pour valider l'approche de modélisation inverse [7], eau et solutés; ii) pour vérifier et modéliser les relations d'hystérésis hauteur-débit et concentration-débit.
- ii) sur des bassins naturels où les hydrogrammes et les concentrations en solutés des entrées et sorties seulement sont disponibles : l'objectif est d'appliquer la méthodologie sur des bassins naturels où les données sur les échanges latéraux manquent, afin d'établir un schéma de fonctionnement hydrologique des échanges surface-souterrain lors des crues en vue de proposer une typologie des réponses hydrologiques.

2.1. Plateforme expérimentale

Le canal expérimental est un serpentif de 4 m de long avec quatre fois 1 m, 3 cm de largeur et 5 cm de hauteur (Figure 2). Trois pompes sont utilisées pour simuler respectivement le débit entrant $I(t)$, les gains latéraux $\mathcal{L}_g(t)$ et les pertes latérales $\mathcal{L}_l(t)$ uniformément répartis le long du canal. Le débit de sortie est mesuré par une balance. Le pas de temps de mesure est la seconde. Nous avons réalisé deux catégories d'applications :

- a) Sur le canal rectangulaire [6] : 62 scénarios expérimentaux correspondant à différentes formes de $I(t)$ et $\mathcal{L}(t)$ et différentes concentrations de NaCl qui est un sel conservatif, permettant de s'affranchir des processus réactifs susceptibles de perturber l'expérience. Les variables mesurées sont les débits et la conductivité électrique de $I(t)$, $O(t)$ et $\mathcal{L}(t)$.
- b) En remplaçant le canal rectangulaire par un modèle réduit de la partie aval du Var en utilisant une imprimante 3-D (1,80 m de long, 3 cm de large et 4 cm de haut). Nous générons des hydrogrammes de crue inspirés de l'événement de la crue de 1994. Des simulations ont été menées pour différentes conditions aval et différentes pentes. Les variables mesurées sont les débits de $I(t)$, $O(t)$ et $\mathcal{L}(t)$, ainsi que les hauteurs d'eau à l'exutoire.

2.2 Bassins naturels

Nous avons étudié des bassins en zones karstiques où les échanges latéraux surface-souterrain sont reconnus comme des processus majeurs qui contrôlent les crues : deux tronçons de rivière dans le bassin de la Loue dans le Jura, et trois tronçons dans le bassin de la Cèze dans les Cévennes [4, 5]. Les

données horaires de pluie, débit et conductivité électrique (équivalent à une concentration, étant donné que la conductivité électrique est une mesure de la minéralisation de l’eau considérée comme un traceur conservatif à l’échelle de l’épisode de crue). Le nombre d’événements de crues débit-débit est de 58 sur la Loue et 8 sur la Cèze.

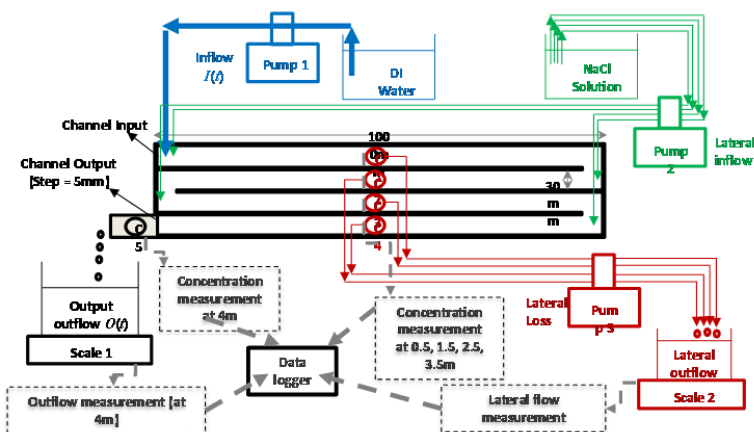


Figure 2 : Plateforme expérimentale. Bleu : Entrée d’eau désionisée $I(t)$ à 0 m. En vert : Apport latéral de NaCl qui peut être introduit soit en un point soit répartis à quatre abscisses d’espace différentes. Rouge : Pertes latérales qui sont uniformément réparti à 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5 m. Les conductimètres C1, C2, C3 et C4 mesurent la concentration des pertes latérales. La balance 2 mesure le débit de pertes latérales. Noir : Le conductimètre C5 mesure la concentration du débit à la sortie (à 4 m). La balance 1 mesure le débit sortant (à 4m). Gris : Toutes les mesures sont enregistrées au pas de temps de 1s.

3. Résultats

La démarche de modélisation comporte deux étapes :

- Calage des deux paramètres, célérité C et diffusivité D , sur des événements où il n’y a pas d’apports et pertes latéraux. Il s’agit de caler un couple (C, D) pour l’eau et un autre pour la conductivité électrique.
- Application du modèle inverse [7] sur les événements restant pour calculer les hydrogrammes des apports et pertes latéraux et les concentrations correspondantes. Les performances du modèle sont évaluées en calculant les critères de Nash-Sutcliffe ainsi que les erreurs sur la valeur et le temps d’occurrence des pics des hydrogrammes des écoulements latéraux et des concentrations.

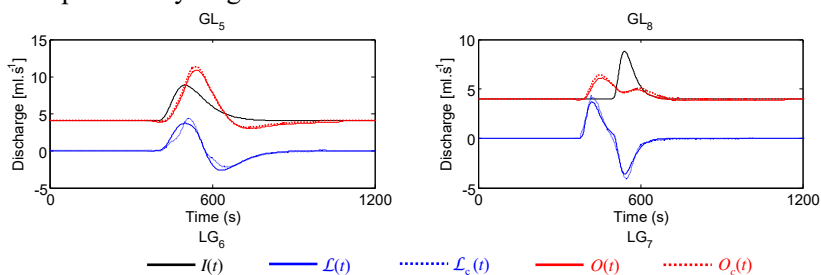


Figure 3 : Exemples de validation du modèle sur le canal expérimental sur 2 scénarios. Hydrogramme d’entrée $I(t)$ en noir plein, écoulement latéral mesuré $L(t)$ en bleu continu, hydrogramme de sortie mesuré $O(t)$ en rouge continu, écoulement latéral calculé $L_c(t)$ en bleu pointillé, et hydrogramme de sortie calculé $O_c(t)$ en rouge pointillé.

La Figure 3 montre des exemples d’hydrogrammes des écoulements latéraux reconstitués sur le canal rectangulaire. Pour l’ensemble des 62 scénarios expérimentaux, on obtient pour les hydrogrammes reconstitués des écoulements latéraux des critères de Nash > 0.85 et des erreurs sur les débits de pointe $< 15\%$ pour 70 % des événements. Pour le modèle appliqué aux flux massiques, qui permettent de

comparer les concentrations, on obtient des critères de Nash > 0.75 et des erreurs sur les débits de pointe $< 25\%$ pour 70% des événements. Les applications sur le modèle réduit du Var ont permis de simuler la propagation d'une crue inspirée de celle de 1994 et de modéliser les relations d'hystérésis hauteur-débit H-Q. Les applications sur la Loue et la Cèze ont permis d'étudier le processus d'échange surface-souterrain sur différents types de tronçon : gain, perte, alternance de pertes et gains au cours d'un même épisode de crue. Les résultats ont permis d'évaluer les hydrogrammes d'écoulements latéraux et les concentrations correspondantes (et les hystérésis C-Q), et par conséquent proposer un schéma du fonctionnement hydrologique de l'ensemble des bassins versants.

4. Conclusion

Les échanges latéraux sur un tronçon de rivière est l'un des principaux processus hydrologiques en crue. La difficulté majeure réside dans la difficulté de mesurer le débit latéral. Cette étude utilise des approches complémentaires d'expérimentation et de modélisation pour évaluer l'évolution temporelle des échanges latéraux. Ce travail a permis en premier la réalisation d'une plateforme expérimentale caractérisée par une faible occupation de l'espace, une courte durée expérimentale, une grande précision de mesure, des courbes expérimentales de haute qualité et reproductibles, une faible consommation d'eau et d'énergie, et la possibilité de tester une grande variété de scénarios d'hydrogrammes de crues. Pour illustrer la démarche, les applications sont menées i) sur un canal rectangulaire et ii) sur un modèle réduit de l'aval du Var. La plateforme expérimentale permet de disposer d'un grand nombre d'événements de crue en milieu contrôlé, indispensables pour vérifier et valider les modèles hydrauliques : onde diffusante, modèle inverse et hystérésis H-Q, C-Q. Ce travail a aussi permis le développement et l'application du modèle inverse par onde diffusante afin de calculer les hydrogrammes d'apports et de pertes latéraux ainsi que les conductivités électriques. Les applications sur le canal expérimental ont permis de valider les équations du modèle, et les applications sur des bassins versants ont permis d'évaluer les flux d'échanges latéraux en condition naturelle et de proposer un schéma de fonctionnement hydrologique en crue des bassins. Cette démarche mixte d'expérimentation et de modélisation est d'un grand intérêt pour améliorer la modélisation hydrologique de crue et pour l'hydrologie opérationnelle et notamment la prévision des crues.

5. REFERENCES

- [1] Charlier, J.-B., Moussa, R., Bailly-Comte, V., Danneville, L., Desprats, J.-F., Ladouche, B., Marchandise, A., 2015. Use of a flood-routing model to assess lateral flows in a karstic stream: implications to the hydrogeological functioning of the Grands Causses area (Tarn River, Southern France). *Environmental Earth Sciences*, 74, 7605–7616.
- [2] Charlier, J.-B., Moussa, R., David, P.-Y., Desprats, J.-F., 2019. Quantifying peakflow attenuation/amplification in a karst river using the diffusive wave model with lateral flow. *Hydrological Processes*, 33, 2337–2354.
- [3] Cholet, C., Charlier, J.-B., Moussa, R., Steinmann, M., Denimal, S., 2017. Assessing lateral flows and solute transport during floods in a conduit-flow-dominated karst system using the inverse problem for the advection–diffusion equation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3635–3653.
- [4] Le Mesnil, M., 2021. Signatures Hydrologiques des Bassins Karstiques. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro.
- [5] Le Mesnil, M., Charlier, J. B., Moussa, R., & Caballero, Y., 2022. Investigating flood processes in karst catchments by combining concentration-discharge relationship analysis and lateral flow simulation. *Journal of Hydrology*, 605, 127358.

- [6] Majdalani, S., Moussa, R., Chazarin, J.-P., 2020. A novel platform to evaluate the dampening of water and solute transport in an experimental channel under unsteady flow conditions. *Hydrological Processes*, 34, 956-971.
- [7] Moussa, R., 1996. Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. *Hydrological Processes*, 10(9), 1209-1227.
- [8] Moussa, R., Majdalani, S., 2019. Evaluating lateral flow in an experimental channel using the diffusive wave inverse problem. *Advances in Water Resources*, 127, 120–133.

QUELLE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR BATTRE L’EXPERTISE DU PREVISIONNISTE ? EXEMPLE DES OUTILS COMBINES DEDIES A LA PREVISION DES NIVEAUX D’EAU SUR L’ESTUAIRE DE LA GIRONDE.

*Which artificial intelligence to beat the flood forecaster’s expertise? The
example of water levels and flood forecast in the Gironde estuary.*

Auteurs : DIEVAL Laurent^{1*}, LABORIE Vanessya²

* *auteur correspondant*

¹ DREAL Nouvelle Aquitaine - Service de Prévisions des Crues, rue Jules Ferry - 33090
Bordeaux cedex - boîte 55, Pays, e-mail : laurent.dieval@developpement-durable.gouv.fr

² CEREMA Risques, Eau et Mer \ Groupe de Recherche Hydraulique et Aménagement, 134
rue de Beauvais, CS60039, 60280 Margny Lès Compiègne, France - e-mail:
vanessya.laborie@cerema.fr

Choix du thème/session : 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : estuaire de la Gironde, prévision des niveaux d’eau, modélisation numérique
bidimensionnelle, assimilation de données

1. Introduction

L’estuaire de la Gironde, qui concentre un grand nombre d’enjeux économiques, mais aussi de sécurité publique et industrielle, est le plus vaste estuaire d’Europe occidentale de longueur 75 km environ et de largeur maximale dans sa partie centrale égale à 12 km. La Garonne et la Dordogne y confluent au niveau du bec d’Ambès. Son comportement est macrotidal et hypersynchrone. Le Service de Prévision des Crues Gironde-Adour-Dordogne (SPC GAD) assure une mission de vigilance et de prévision des crues sur un ensemble de tronçons réglementaires sur les bassins versants de la Dordogne, de l’Adour, de la Garonne et de l’estuaire de la Gironde. Environ 15 % de ce réseau surveillé est sous influence fluvio-maritime. Le SPC GAD produit ainsi, en cas d’événement de crues ou de tempêtes, deux bulletins de vigilance (<https://www.vigicrues.gouv.fr/>), ensuite transmis au service de la préfecture chargé de la sécurité des biens et des personnes. Pour définir le niveau de vigilance en leur associant leurs incertitudes, les équipes de prévisionnistes disposent de données et d’outils opérationnels de prévision des niveaux d’eau de plusieurs types : formules de propagation des niveaux d’eau empiriques, modèle numérique déterministe de prévision des niveaux d’eau. Les prévisionnistes combinent les résultats produits par les différents modèles en une prévision qu’ils corrigent grâce à leur connaissance du comportement de l’hydrosystème héritée de l’expérience du SPC GAD des événements extrêmes passés.

Moyennant des ressources informatiques coûteuses, ils peuvent aussi bénéficier des apports de techniques alliant modélisation déterministe et mesures *in situ*. Ces techniques sont de deux types. La première est fondée sur des méthodes d’assimilation de données. Ainsi, un prototype d’assimilation de données couplant le modèle Telemac2D de prévision des Hautes Eaux de l’estuaire de la Gironde et un Filtre de Kalman d’Ensemble (EnKF) [1] a été développé dans le cadre de ([4],[6]). Il corrige les paramètres et les forçages du modèle numérique pour améliorer les sorties du modèle. Par ailleurs, aujourd’hui, les méthodes d’intelligence artificielle (IA), type machine learning (ex: MLP, LSTM) ou apprentissage profond ((DC)CNN par exemple) sont également largement utilisées dans la communauté hydrologique pour construire des méta-modèles de débits, le plus souvent, mais aussi de niveaux d’eau en des points particuliers d’un hydrosystème [8].

Comme le montre la figure~1, l’hydrodynamique de l’estuaire de la Gironde est complexe et est le lieu d’interactions entre les processus physiques non-linéaires du fait de l’influence des astres (marée), de la météorologie (sur/décote météorologiques, sens et intensité du vent, durée de l’événement), au passage des crues fluviales, mais aussi de la houle. Le présent article s’intéresse à la question suivante : comment réaliser la prévision la plus pertinente possible au niveau des stations de Bordeaux, Libourne, Pauillac et le Verdon ? Les prévisionnistes du SPC GAD doivent disposer d’un outil opérationnel simple, rapide et fiable en terme de précision. Ils ne peuvent pas attendre les sorties d’un modèle numérique, car la prise de décision doit souvent être réalisée en moins d’une dizaine de minutes. Nous nous interrogeons ici sur l’utilisation combinée de ces outils qui va de pair avec une disponibilité de ressources informatiques croissante. Peut-elle *in fine* remplacer la correction et l’expertise apportée par le prévisionniste ?

L’article est divisé en plusieurs sections. La Section~1 présente les outils et les méthodes actuellement disponibles au SPC GAD, mais aussi la méthodologie d’expertise et de correction du prévisionniste pour produire une prévision. La section~2 présente les performances de la chaîne opérationnelle lors de l’événement de décembre 2019. La Section~3 présente les pistes d’amélioration par assimilation de données ou intelligence artificielle, leur mise en œuvre et les résultats obtenus pour la prévision des niveaux d’eau en 2019. L’article conclut en Section~4 sur un bilan et quelques perspectives.

2. Les outils et méthodes du prévisionniste

Les équipes des prévisionnistes du SPC GAD disposent de deux types d’outils pour établir leur bulletin de vigilance : un tableur contenant des formules empiriques (lois issues de régressions statistiques entre les données d’observation telles que représentées sur la Figure 1 et données de simulation) et les prévisions d’un modèle Telemac 2D construit et validé dans le cadre du projet Gironde [4] décrit ci-dessous.

Les formules empiriques pour prévoir les niveaux d’eau en chaque station réglementaire (Bordeaux, Libourne, Pauillac, Ambès) sont prédites pour les 3 ou 4 pics de pleine mer (PM) suivant le temps de base Tb . Un ajustement aux moindres carrés est utilisé qui permet d’obtenir les niveaux d’eau à partir des variables suivantes (elles-mêmes obtenues sur la PM précédant Tb): le niveau d’eau de PM mesuré, la valeur prédite de la surcote de PM au Verdon (rephasée), l’intensité et la direction du vent au Verdon prédites par METEO-FRANCE, le niveau d’eau ou le débit prédit sur la rivière considérée. La période d’ajustement de cette fonction dite “empirique” est, pour chaque station, d’une dizaine d’années.

Par ailleurs, un modèle numérique d’hydrodynamique pour l’estuaire de la Gironde (présenté sur la Figure 2) fondé sur TELEMAC2D [2] est utilisé pour calculer les hauteurs d’eau et les vitesses dans l’estuaire et sur les rivières Garonne et Dordogne [3]. Meteo-France transmet ainsi au SPC GAD les réanalyses et les prévisions produites par les simulations forcées par les modèles météorologiques ARPEGE et AROME (METEO-FRANCE) et du CEPMMT en plusieurs points de l’estuaire : Le Verdon, Bordeaux, Libourne, Le Verdon et Ambès. Théoriquement, ces points servent à construire la prévision produite par les prévisionnistes tel qu’indiqué précédemment. En réalité, seules les prévisions au Verdon extraites du modèle de prévision des hautes eaux de l’estuaire de la Gironde sont considérées comme fiables, c’est-à-dire qu’elles sont utilisées et ne sont pas corrigées par les prévisionnistes du SPC GAD.

Pour réaliser des prévisions des niveaux d’eau des pleines mers au droit de chaque station réglementaire, l’équipe des prévisionnistes analyse les conditions météorologiques, le comportement des prévisions de moins de 36h et les sorties du modèle Telemac2D au Verdon forcé par les modèles météorologiques AROME (0h, 3h, 6h, 12h, 18h), ARPEGE (0h, 6h, 12h, 18h) et CEP (0h, 6h, 12h, 18h). En ayant une connaissance complète de la situation, de l’état de l’hydrosystème et des prévisions de surcotes au Verdon, des champs de vent, l’équipe du SPC GAD corrige les prévisions délivrées par chaque outil (des modèles au Verdon et des formules empiriques sur toutes les autres stations). La valeur de la prévision du niveau d’eau en chaque station est ensuite comparée à une base de données des prévisions réalisées depuis 2013. La distribution de l’incertitude associée à cette prévision est étudiée pour en extraire les quantiles Q10, le Q50 et le Q90. La prévision est alors corrigée à l’aide de l’incertitude déterminée

précédemment grâce à l’outil OTAMIN développé par l’INRAE (<https://webgr.inrae.fr/logiciels/otamin/>) et à l’outil EAO (Expertise associée par ordinateur) du SCHAPI. Le prévisionniste, en fondant son analyse des valeurs obtenues de prévision sur son expertise et l’expérience collective du SPC GAD, confronte les trois valeurs obtenues aux seuils de transition pour établir la couleur de vigilance.

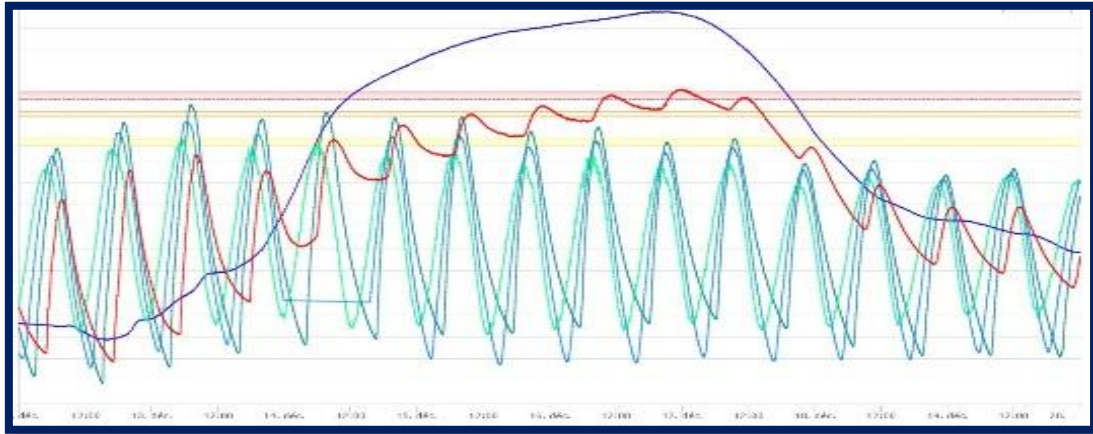


Figure 1: Observations des niveaux d’eau pour plusieurs stations de mesure sur la rivière Garonne pour l’événement de décembre 2019 (La Réole (bleu), Cadillac (rouge), Bordeaux (bleu foncé), Pauillac (bleu clair), Ambès (turquoise)). Les niveaux d’eau observés montrent la complexité de la forme du signal induite par l’hypersynchronie de l’estuaire et son asymétrie lors de la propagation de l’onde le long de la rivière Garonne depuis la confluence jusqu’à la limite amont de l’influence maritime à La Réole.

Récemment, [6] a développé un prototype d’assimilation de données pour l’amélioration de la prévision des niveaux d’eau dans l’estuaire de la Gironde. L’hypothèse est d’approximer l’incertitude temporelle des conditions aux limites par un processus gaussien caractérisé par une fonction d’autocorrélation et une longueur caractéristique de corrélation associée. Les coefficients de la décomposition de Karhunen-Loève tronquée de ce processus, ainsi que les coefficients de frottement appliqués à chaque zone 1 à 4 (voir Figure 2-a) et le coefficient d’influence du vent, sont ensuite considérés dans le vecteur de contrôle d’un filtre de Kalman d’ensemble pour réduire l’incertitude. Les performances du prototype ont été évaluées sur des expériences synthétiques. Il a été démontré que l’assimilation de données réussit à identifier un frottement et reconstruire le forçage maritime tous deux dépendants du temps et qu’il permet d’améliorer ainsi la prévision du niveau d’eau dans l’estuaire de la Gironde (voir Figure 2-b).

3. Résultats et performances pour l’événement de décembre 2019

Les performances de la modélisation numérique seule (modèle “Gironde”), celles issues de l’expertise et des outils empiriques du prévisionniste et, enfin, celles issues du prototype d’assimilation de données ont été comparées. L’événement de tempête Fabien du 19 décembre au 26 décembre 2019 est utilisé pour comparer les performances des outils, y compris d’assimilation de données, avec la prévision fournie après expertise par le SPC GAD. Le coefficient de marée de cet événement égale 87 et les débits atteignent respectivement 3600 m³/s et 1900 m³/s sur la Garonne et la Dordogne.

Les performances en termes de prévision à 1 (environ 12 h), 2 (environ 24 h) et 3 PM (environ 36 h) sont représentées sur la Figure 3 ci-dessous. De manière générale, sur l’événement considéré, les niveaux de PM prédits par le SPC GAD sont sous-estimés par rapport aux niveaux d’eau de PM réellement observés. Il paraît donc intéressant de compléter l’expertise du SPC GAD par des méthodes d’assimilation de données par correction des forçages ou par apprentissage pour la correction des résultats selon [6].

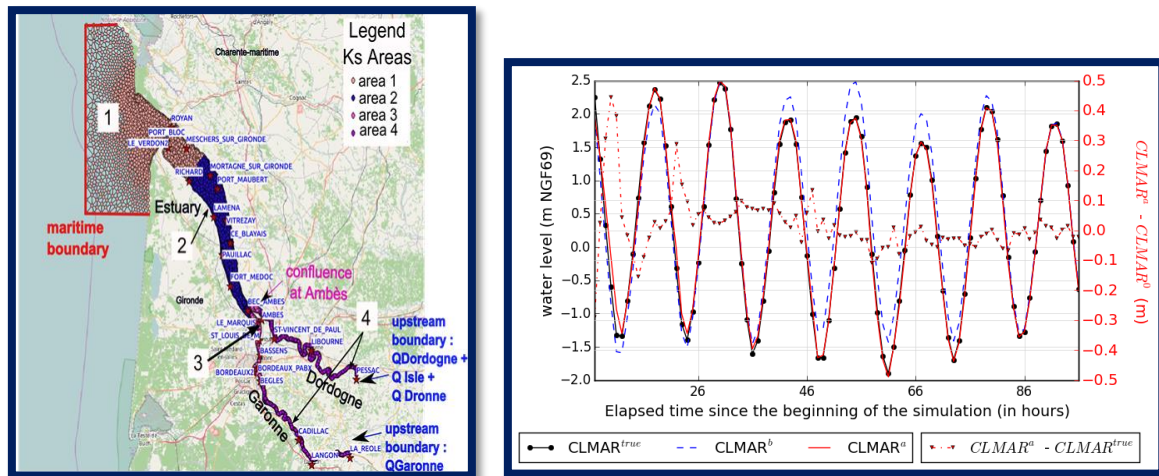


Figure 2: a) (à gauche) emprise et localisation du modèle numérique de l'estuaire de la Gironde et délimitation des zones de coefficient de Strickler 1 à 4. Les cercles représentent les nœuds du modèle numérique basé sur un maillage construit avec des éléments finis (en noir). Les étoiles rouges indiquent les principales stations de mesure et d'intérêt pour la prévision des niveaux d'eau (source : [5]) – b) (à droite) évolution temporelle (depuis le début de l'événement) de la condition limite maritime reconstruite CLMAR corrigée par EnKF γ -KLBC pendant les cycles d'assimilation ($L=1h - S=1h$). Le signal maritime au Verdon est représenté par une ligne pointillée bleue (axe bleu à droite). CLMAR^{true} représentée par une ligne pointillée noire, est la valeur "vraie" de la condition de frontière maritime CLMAR à partir de laquelle les observations synthétiques y^0 sont dérivées. CLMAR^b (resp. CLMAR^a) est le forçage "initial" (background) (resp. après l'étape d'analyse) de la simulation de contrôle. (source : [6])

4. Conclusions et perspectives

Ce travail propose de réfléchir à l'expertise nécessaire à la production de prévisions sur un hydrosystème complexe et soumis à des processus fortement non-linéaires tel que l'estuaire de la Gironde. D'une part, il décrit les outils et méthodes développés par le SPC GAD pour produire la prévision. Il s'agit d'une part du développement du modèle de prévision des hautes eaux de l'estuaire de la Gironde dont l'extraction des niveaux d'eau prédits au Verdon alimente, d'autre part, des outils empiriques fondés sur une analyse statistique des temps de propagation et des corrélations entre les niveaux observés sur les stations réglementaires de Pauillac, Ambès, Bordeaux et La Réole. Pour l'événement de décembre 2019 (tempête Fabien), l'utilisation de ces outils combinée à l'expertise des prévisionnistes du SPC GAD a, une fois n'est pas coutume, conduit à une sous-estimation des pics de PM sur les stations principales de l'estuaire. Il convient dès lors de s'interroger sur les apports de l'assimilation de données pour corriger les forçages et paramètres du modèle Telemac2D et améliorer la qualité des sorties du modèle ou, encore, de l'utilisation de techniques d'apprentissage soit sur les données observées seules (data driven) soit pour corriger les sorties du modèle Telemac2D.

5. REFERENCES

- [1] Asch, M., Bocquet, M., & Nodet, M. (2016). *Data assimilation: methods, algorithms, and applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [2] Hervouet, J. M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons.

- [3] Hissel, F; (2010). Projet gironde – rapport final d’évaluation du modèle gironde. Technical report, CETMEF.
- [4] LABORIE, Vanessya. *Quantification d'incertitudes et assimilation de données pour la modélisation hydrodynamique bidimensionnelle: application au modèle de prévision des hautes eaux de l'estuaire de la Gironde*. 2020. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- [5] LABORIE, Vanessya, RICCI, Sophie, DE LOZZO, Matthias, et al. Quantifying forcing uncertainties in the hydrodynamics of the Gironde estuary. *Computational Geosciences*, 2020, vol. 24, p. 181-202.
- [6] LABORIE, Vanessya, GOUTAL, Nicole, et RICCI, Sophie. Improving Water Levels Forecast in the Gironde Estuary Using Telemac2D and Data Assimilation by Inferring Time-Dependent Boundary Conditions. In : *Advances in Hydroinformatics: Models for Complex and Global Water Issues—Practices and Expectations*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2022. p. 903-920.
- [7] Stroud, J. R., Katzfuss, M., & Wikle, C. K. (2018). A Bayesian adaptive ensemble Kalman filter for sequential state and parameter estimation. *Monthly weather review*, 146(1), 373-386.
- [8] WANG, Jih-Huang, LIN, Gwo-Fong, CHANG, Ming-Jui, *et al.* Real-time water-level forecasting using dilated causal convolutional neural networks. *Water resources management*, 2019, vol. 33, p. 3759-3780.

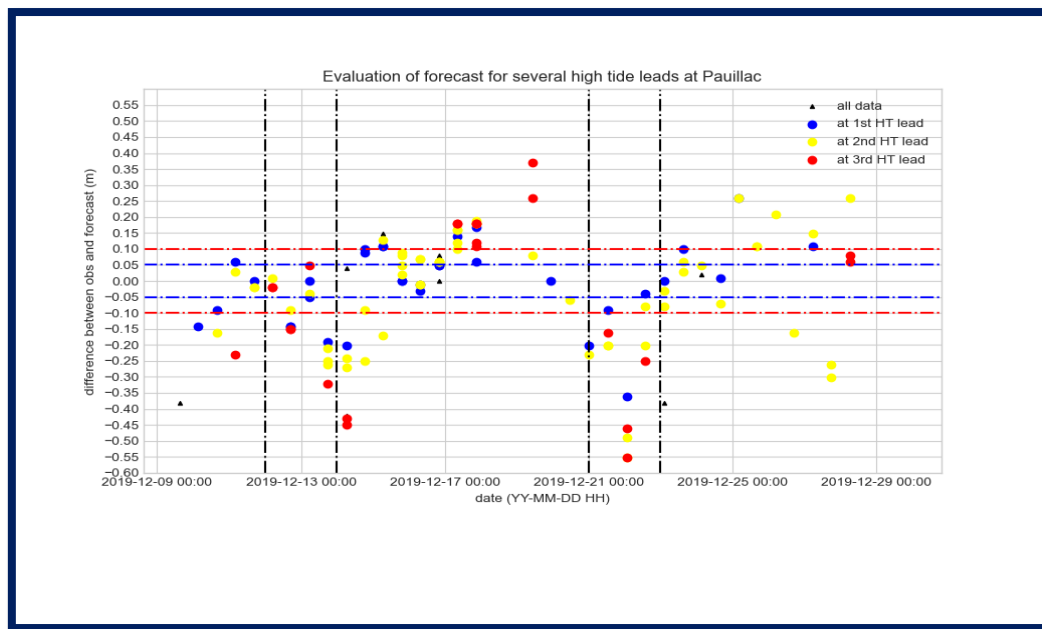


Figure 3: différence entre les niveaux d'eau de PM observés et ceux prédits par le SPC GAD à une, deux et trois PM pour la période du 09/12/2019 au 29/12/2019

Capitalisation des données de la crue majeure de février 2021 sur la Garonne aval, exploitation actuelle et perspectives d'amélioration de la prévision des crues et des inondations

Flood Forecasting on Garonne River : data compilation on the February 2021's major flood, actual valorization of data and expected improvement on flood forecasting

Auteurs : MARCHANDISE Arthur¹, ESCUDIER Aurélie¹, AUDOUY Jean-Nicolas², ROUTHE Ludovic¹, COMBEDOUZON Benoit², LACAZE Yan³, LE PAPE, RICCI Sophie⁴

¹DREAL Occitanie, Cité administrative Bât. G, 1 rue de la cité administrative CS 80002, 31074 Toulouse Cedex 9, France, arthur.marchandise@developpement-durable.gouv.fr, aurelie.escudier@developpement-durable.gouv.fr, ludovic.routhe@developpement-durable.gouv.fr

²SCHAPI, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse cedex 1, France, jean-nicolas.audouy@developpement-durable.gouv.fr, benoit.combesouzon@developpement-durable.gouv.fr

³DREAL Nouvelle Aquitaine, Cité administrative, Rue Jules Ferry - Boite 55, 33090 Bordeaux cedex, France, yan.lacaze@developpement-durable.gouv.fr

⁴CERFACS, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31100 Toulouse, ricci@cerfacs.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs : Garonne, Prévision, Crue, Inondation, Retour d'Expérience

La Garonne, sur sa partie fluviale aval – après la confluence avec le Lot et jusqu'à la commune de La Réole - a connu une crue majeure en février 2021, ayant fait l'objet d'une vigilance rouge aux crues sur sa partie marmandaise. Avec une hauteur maximale supérieure à 10,20 m atteinte à l'échelle de crue de Marmande, soit plus de 6000 m³/s, cela en fait la crue la plus haute depuis celle de décembre 1981 ([5]).

Cette partie de la Garonne, longue d'environ 50 kilomètres, se caractérise, sur les crues les plus fortes, par une mobilisation importante de toute l'étendue du lit majeur – large de plus de 5 kilomètres à certains endroits-, ce qui induit sur Marmande et sur La Réole une forte non-linéarité dans la prévision des hauteurs et des débits d'eau depuis Tonneins. Le ressaut hydraulique, marmandais notamment, est déjà bien documenté ([5] et [7]) mais la prévision de son ampleur est encore soumise à une incertitude importante. Par ailleurs, ce linéaire de Garonne, au fonctionnement hydraulique pourtant homogène, a pour spécificité d'être géré, d'un point de vue de la vigilance et de la prévision des crues, par deux Services de Prévision des Crues : le Service de Prévision des Crues Garonne-Tarn-Lot (SPC GTL) et le Service de Prévision des Crues Gironde-Adour-Dordogne (SPC GAD).

Cette communication vise à présenter comment, grâce à une organisation adaptée du réseau Vigicrues, un volume significatif de données a pu être capitalisé sur cette crue majeure. Ensuite le travail d'exploitation des données réalisé est évoqué, notamment pour la cartographie des zones d'inondation potentielle (ZIP). Sont enfin décrites les perspectives de travail apparues à la lumière du retour d'expérience hydrologique réalisé par le Service de Prévision des Crues Garonne-Tarn-Lot ([6]), notamment en termes de réduction de l'incertitude sur les prévisions de hauteur d'eau à travers l'amélioration d'un modèle hydraulique 2D.

1. Capitalisation des données

Une succession de 4 perturbations pluvieuses en 96 heures, dans un flux d'ouest dynamique – la tempête Justine constitue la troisième d'entre elles- est à l'origine de l'ampleur de la crue observée. Dans cette configuration, le Tarn et le Lot apportent la contribution principale en débits à la Garonne Marmandaise. Ces contributions sont estimées respectivement à 2800 m³/s et à 2000 m³/s. Pour ces gammes de débits, une prévisibilité sur Tonneins, depuis Sainte-Livrade sur le Tarn et depuis Cahors sur le Lot, est possible jusqu'à

20 heures d'horizon. Par ailleurs, le bon cadrage des prévisions de précipitations par MÉTÉO-FRANCE a permis de se projeter sur des tendances chiffrées sur le maximum de crue à 48 heures d'horizon. Cette anticipation a permis de mobiliser à la fois les équipes d'hydrométrie pour la réalisation, notamment, d'un jaugeage à Marmande au plus proche du pic de la crue - 5800 m³/s jaugés, plus haut débit jaugé sur cette station- , mais également des équipes de terrain pour le relevé de laisses et de repères de crues, dans le cadre d'un marché piloté par la DREAL Occitanie. Ce marché permet la mobilisation suite à une crue, d'équipes de terrain propres à un ou plusieurs prestataires privés. La convention IGN-DGPR a pu également être mobilisée en liaison avec le SCHAPI, pour l'acquisition de prises de vues aériennes sur l'ensemble de la Garonne marmandaise et girondine permettant d'obtenir au quasi maximum de crue, une vision de l'inondation observée (voir Figure 1).



Figure 1: Extrait de la Prise de vue aérienne acquises sur la Garonne marmandaise le 3 février 2021 au quasi pic de crue - village de Couthures-sur-Garonne - IGN-DGPR, 2021

2. Premières exploitations des données

Dans un second temps, l'exploitation des données réalisée depuis 2021 sera détaillée. Cette matière riche et variée a notamment permis :

- un retravail de la courbe de tarage de Tonneins. Si la station de Tonneins présente la particularité de ne pas être jaugeable en crue débordante, un rétrécissement à l'aval de Marmande permet de trouver une section adaptée qui voit passer la grande majorité du débit. Le plus haut débit jaugé à Marmande à l'occasion de cette crue, associé à des hypothèses sur le fonctionnement hydraulique entre Tonneins et Marmande et à une cohérence des volumes entre Tonneins et Marmande, a permis de retravailler la partie haute de la courbe de tarage de Tonneins ([1]). L'intégration de cette nouvelle courbe de tarage a permis une nette amélioration des simulations du modèle TELEMAC2D mis à disposition par EDF R&D ([2], [4] et [8]).

- d'alimenter l'étude de production des ZIP, menée entre 2021 et 2022, sur la base d'une modélisation 2D ([3]). Cette étude, menée sur un secteur allant de la confluence avec le Lot jusqu'à Meilhan-sur-Garonne, particulièrement endigué, a été l'occasion de travailler en étroite collaboration avec la mission RDI du Lot-et-Garonne et le service gemapien (Val de Garonne) également lancé dans la réalisation de l'étude de danger du système d'endiguement de la Garonne marmandaise.

- par le biais des ZIP produites (voir Figure 2), d'engager la révision des niveaux de vigilance selon la nouvelle doctrine établie en 2021 par le réseau Vigicrues. Cette révision, en cours de réalisation, a la particularité d'être menée conjointement avec le SPC Gironde-Adour-Dordogne. Définie à l'issue du retour d'expérience de la crue de février 2021, cette étude commune a pour objectif de garantir sur la Garonne aval, une définition des niveaux de vigilance harmonisée et basée sur les mêmes critères propres aux enjeux et caractéristiques hydrologiques.

- d'exploiter les données sur les crues majeures historiques de la Garonne marmandaise, afin d'étoffer les abaques empiriques de prévision des hauteurs d'eau du Service de Prédiction des Crues.

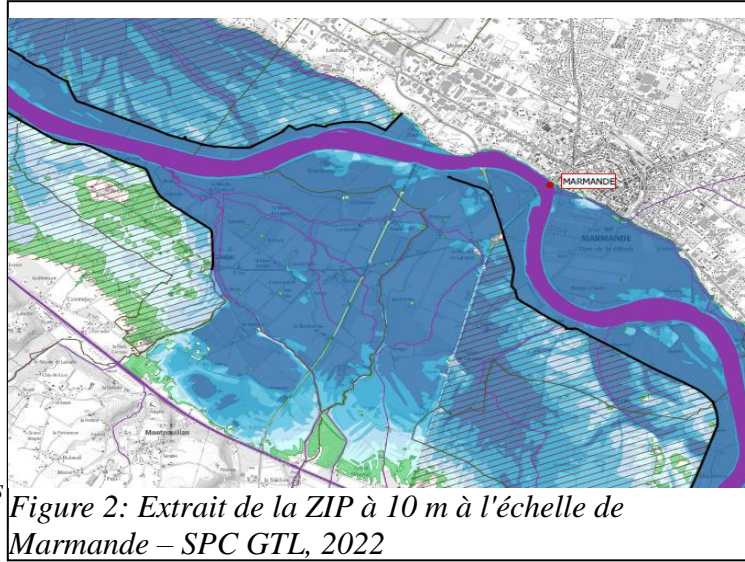
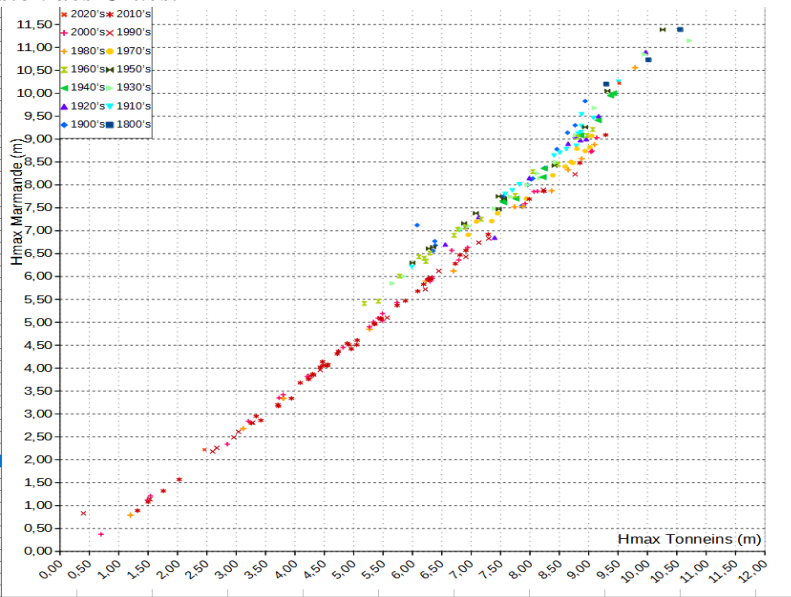


Figure 2: Extrait de la ZIP à 10 m à l'échelle de Marmande – SPC GTL, 2022



(voir

Figure 3)

3. Perspectives d'amélioration de la prévision

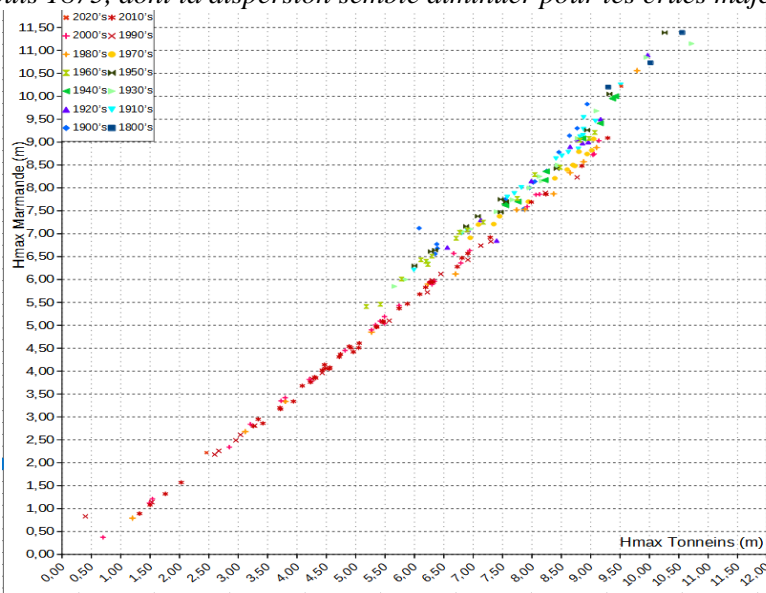
Dans un troisième temps enfin, seront présentées les perspectives d'affinage de la prévision hydrologique sur ce secteur qui passent :

- par une meilleure caractérisation quantitative du déterminisme du ressaut hydraulique observé entre Tonneins et La Réole, qui introduit une non-linéarité importante sur la prévision à Marmande à La Réole au-delà des 8,80 m à Marmande ;

Pour cela, des études liminaires utilisant un modèle TELEMAC 2D mis en place sur ce secteur par EDF R&D [2], a montré des perspectives intéressantes - capacité du modèle à représenter le ressaut hydraulique-, une fois corrigée la sous-estimation de la courbe de tarage à Tonneins, mais également des limites à représenter l'intégralité de l'hydrogramme de crue ([4] et [8]). Les perspectives proposées concernent l'évaluation de l'impact d'une réévaluation de la bathymétrie du lit mineur du modèle – valorisation de levés bathymétriques de 2013 et de 2023- à la construction d'un maillage en lit majeur qui tienne compte de l'état actuel des systèmes d'endiguement longitudinaux. Pour cela, le Modèle Numérique de Terrain Haute Résolution acquis lors de la cartographie des Zones Inondables de la Garonne Marmandaise (2021) et le maillage (1,7 millions de noeuds) du lit majeur réalisé à cette occasion seront valorisés ([3]). Il s'agira également, à travers ce modèle, d'évaluer l'impact sur la propagation des crues de la gestion dynamique de l'inondation des champs d'inondation situés derrière les digues. Enfin, un enjeu important sera l'étude de la dégradation acceptable de la résolution du maillage pour concilier performance et temps de calcul.

- par une étude des conditions de valorisation des données historiques sur ce secteur : en effet, La Garonne aval dispose d'une archive de données mesurées de hauteurs d'eau depuis un siècle et demi. Une analyse

rapide des hauteurs maximales des crues passées permet de constater que 10 crues ont dépassé la hauteur maximale de la crue de février 2021 à Marmande (10,20 m) depuis 1875. Même si l'endiguement de la plaine marmandaise a fait l'objet d'évolutions permanentes depuis le XIXe siècle, on peut penser que les crues majeures, seront moins impactées par des modifications locales, le volume de l'encaissant ayant globalement peu évolué (hormis l'anthropisation de certaines espaces). Des indices allant dans ce sens sont apportées par l'étude de la relation empirique des hauteurs maximales des crues entre Tonneins et Marmande depuis 1875, dont la dispersion semble diminuer pour les crues majeures, supérieures à 9,30 m à



Tonneins (voir

Figure 3).

L'exploitation de ces données passera par un travail de rassemblement et de numérisation de l'archive limnimétrique de ce secteur qui est aujourd'hui dispersée entre plusieurs services d'archives départementales (Lot-et-Garonne, Haute Garonne notamment) au gré des réorganisations des services d'annonce puis de

prévision des crues. Le centième anniversaire de la crue historique de 1930 sera une occasion pour le SPC Garonne-Tarn-Lot de motiver et de structurer une action ambitieuse sur ce sujet.

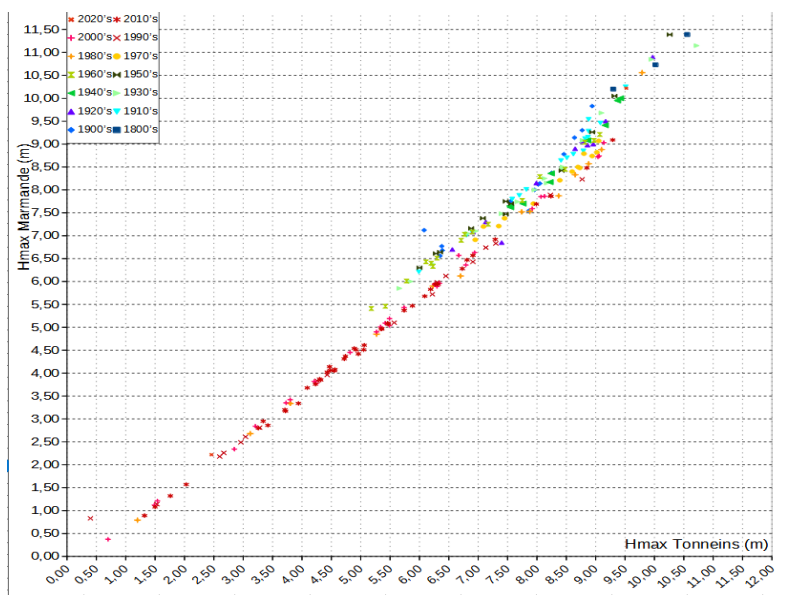


Figure 3: Relation empirique sur les hauteurs maximales de crue entre Tonneins et Marmande

internationale de l'eau, 2011, 3, pp.42-47. ([10.1051/lhb/2011031](https://doi.org/10.1051/lhb/2011031)) . ([hal-00678705](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00678705))

[3] Cartographie de zones d'inondation potentielle en fonction des hauteurs à une échelle réglementaire sur la Garonne Marmandaise. Rapports d'études réalisé par Hydrétudes pour la DREAL Occitanie (2022).

4. REFERENCES

[1] Audouy J.-N., Routhe L., Rauzy G., (2021). Rapport de validation de la courbe de tarage de Tonneins (15 p.).

[2] Besnard A., Gouta N., Comparaison de modèles 1D à casiers et 2D pour la modélisation hydraulique d'une plaine d'inondation - Cas de la Garonne entre Tonneins et La Réole. *La Houille Blanche - Revue*

- [4] Delmotte Anthéa (2021). Apport de la donnée spatiale pour la prévision des crues et des inondations. Rapport de stage de fin d'études réalisé au CERFACS.
- [5] Gazelle F., La crue de décembre 1981 dans le bassin de la Garonne. In: *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 55, fascicule 1, 1984. Géographie physique. pp. 5-28. DOI : <https://doi.org/10.3406/rgpso.1984.4602>
- [6] Marchandise A., Routhe L., Combedouzon B., Desmaisons P., Puls R., Dufieu R., Negre C., Audouy J.-N., Escudier A., (2021) . La crue du 27 janvier 2021 au 4 février 2021 sur les bassins du Lot, de la Garonne, du Lannemezan, de l'Aveyron et du Tarn. Retour d'expérience du Service de Prévision des Crues Garonne Tarn Lot (178 p.)
- [7] Pardé, M. (1958). LA GRANDE CRUE DE LA GARONNE EN JANVIER 1955. *Annales de Géographie*, 67(363), 452–454. <http://www.jstor.org/stable/23443677>
- [8] Routhe L., Lapergue E., Marchandise A. (2022). Évaluation et recalage d'un modèle TELEMAC2D sur la Garonne Marmandaise. Journées annuelles du club Modélisation Hydraulique, 8-9 juin 2022, Bordeaux, France.

GRP ET OTAMIN, DEUX OUTILS POUR LA PRÉVISION DE CRUE OPÉRATIONNELLE ET LA QUANTIFICATION DES INCERTITUDES ASSOCIÉES

GRP and OTAMIN, two tools for operational flood forecasting and uncertainty estimation

Auteurs : TILMANT François^{1*}, BOURGIN François¹, ZUBER Félicien², BELLEUDY Anne², PERRIN Charles¹

* *auteur correspondant*

¹Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex (francois.tilmant@inrae.fr)

²SCHAPI, 42 avenue Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1

Choix du thème/session :

1/ ~~Préparation et gestion de crise~~

2/ Prévision des crues et des inondations (poster)

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Prévision des crues, incertitudes

1. Deux outils pour la prévision opérationnelle des crues

GRP et OTAMIN sont deux outils utilisés dans le réseau national de prévision des crues pour réaliser des prévisions et estimer les incertitudes associées :

- L'outil de prévision des crues GRP, actuellement utilisé par une grande partie des services de prévisions des crues (SPC) français, est fondé sur un modèle hydrologique qui fonctionne en continu. Il permet d'estimer les débits futurs sur des cours d'eau jaugés à partir d'observations et de prévisions de pluie. (Viatge et al., 2019b).
- Le logiciel OTAMIN (OuTil Automatique d'estiMation des INcertitudes prédictives) est un produit d'estimation des incertitudes applicable à des modèles de prévision hydrologiques ou hydrauliques. Cet outil permet notamment d'associer en temps réel des intervalles de confiance à des prévisions déterministes, intervalles qui peuvent être ensuite expertisés par les prévisionnistes (Viatge et al., 2019a),

Le développement de ces outils et des méthodes associées fait l'objet d'un processus de collaboration avec le réseau Vigicrues. Les évolutions sont faites sur la base des retours d'expérience des prévisionnistes du réseau. Des rencontres entre les utilisateurs et l'équipe de développement d'INRAE sont organisées chaque année dans l'optique de mieux cerner les limites des outils et de proposer des axes de développement pour répondre à ces difficultés (Furusho et al., 2016).

2. Objectif de la communication

La communication présentera le principe de fonctionnement de ces deux outils, et leurs évolutions récentes. Les perspectives de développement seront également détaillées.

3. REFERENCES

- [1] Furusho, C., C. Perrin, J. Viatgé, R. Lamblin et V. Andréassian (2016). Synergies entre acteurs opérationnels et scientifiques au service de l’amélioration de la prévision des crues. *La Houille Blanche*(4): 5-10, <https://doi.org/10.1051/lhb/2016033>.
- [2] Viatgé J., Berthet L., Marty R., Bourgin F., Piotte O., Ramos M.-H., Perrin C. (2019a). Vers une production en temps réel d’intervalles prédictifs associés aux prévisions de crue dans Vigicrues en France. *La Houille Blanche*, 2, 63–71, <https://doi.org/10.1051/lhb/2019016>
- [3] Viatgé J., Pinna T., Ficchi A., Dorchies D., Garandeanu L., Perrin C., Tilmant F. (2019b). Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prévision des crues GRP. *La Houille Blanche*, 2, 72-80, <https://doi.org/10.1051/lhb/2019017>

PLACE DE L’HUMAIN DANS LE SERVICE PUBLIC VIGICRUES ? ANALYSE AU SPC GAD À PARTIR D’UN EXERCICE GRANDEUR NATURE

*The place of the human element in the flood forecasting public service ?
Analysis based on a life-size forecasting exercise*

Auteurs : PERRIN Romane¹, PIOTTE Olivier¹, LACAZE Yan¹

¹Service Risques Naturels et Hydrauliques, DREAL Nouvelle Aquitaine, rue Jules Ferry,
Bordeaux, e-mail: romane.perrin@developpement-durable.gouv.fr,
olivier.piotte@developpement-durable.gouv.fr, yan.lacaze@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session : 1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Vigicrues, prévision des crues, exercice, rôle du prévisionniste, facteur humain

1. Éléments de contexte

2006. Création du service public Vigicrues, qui a pour mission d’informer la population et les acteurs de la gestion de crise en cas de risques de crues sur les cours d’eau surveillés par l’État. Pour cela, la mission s’appuie sur une vingtaine de Services de Prévision des Crues (SPC), qui se partagent la surveillance et la vigilance des principaux cours d’eau de France. Ces SPC sont pilotés par le Service Central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (Schapi), implanté à Toulouse, qui a pour rôle d’appuyer les SPC dans leurs missions et de faire le lien avec les services opérationnels de Météo-France. Au quotidien, le service Vigicrues doit publier au minimum deux bulletins de prévision des crues par jour, rendre accessible les données de hauteurs d’eau mesurées sur les cours d’eau du réseau surveillé et porter un appui aux acteurs de la gestion de crise en cas d’évènement.

2013. Après 7 ans d’existence, les SPC de Pau et Périgueux, responsables respectivement d’assurer la prévision des crues sur les cours d’eau principaux des bassins versants de l’Adour et de la Dordogne, fusionnent avec une partie des compétences du SPC Littoral Atlantique basé à La Rochelle pour ne former qu’une seule et même entité : le Service de Prévision des Crues Gironde Adour Dordogne (SPC GAD). Cette fusion doit permettre d’améliorer la robustesse et la qualité du service public Vigicrues proposé aux citoyens. Au quotidien, ce nouveau SPC a alors en charge la production d’une vigilance “crue” sur 27 tronçons de cours d’eau des bassins versants de la Dordogne, de l’Adour, de la Garonne en Gironde et de la Nivelle. Dès la vigilance jaune, des prévisions de hauteurs d’eau chiffrées valables 24h sont produites à des stations matérialisées physiquement par une échelle limnimétrique implantée le long des cours d’eau en question. Pour se lancer dans ce défi, le SPC GAD se voit attribuer de nouveaux locaux au sein de la DREAL Aquitaine à Bordeaux, et compose une équipe de prévisionnistes aux compétences variées à 100 % renouvelée.

1^{er} Juillet 2013. Après un tuilage de quelques semaines entre précédentes et nouvelles équipes, et une transmission des connaissances existantes, le SPC GAD est opérationnel. Les précédentes équipes s’appuyaient beaucoup sur leur expérience. Ils ont notamment laissé à disposition des outils développés grâce à celle-ci, se présentant souvent sous forme d’abaques. C’est le cas de la Nivelle, illustré dans la figure 2 ci-dessous et de certains cours d’eau du bassin versant de la Dordogne. Les prévisionnistes du SPC GAD se basent alors sur ceux-ci et leurs compétences en météorologie, hydrologie et hydraulique pour réaliser leurs premiers bulletins.

Janvier 2023. C’est l’heure des premiers bilans. En 10 ans, le SPC GAD a eu le temps de développer de nombreux modèles hydrologiques ou hydrauliques (GRP illustré en figure 2 ci-dessous, Mascaret, Télémac, Plathynes) complétés par des abaques et catalogues de crues enrichis au fil des ans des plus récents événements. Le service a en outre vécu quelques crues d’ampleur (période de retour entre 20 et 50 ans), illustrées par la frise ci-jointe, lui permettant rapidement de perdre son statut de SPC le moins expérimenté de France.

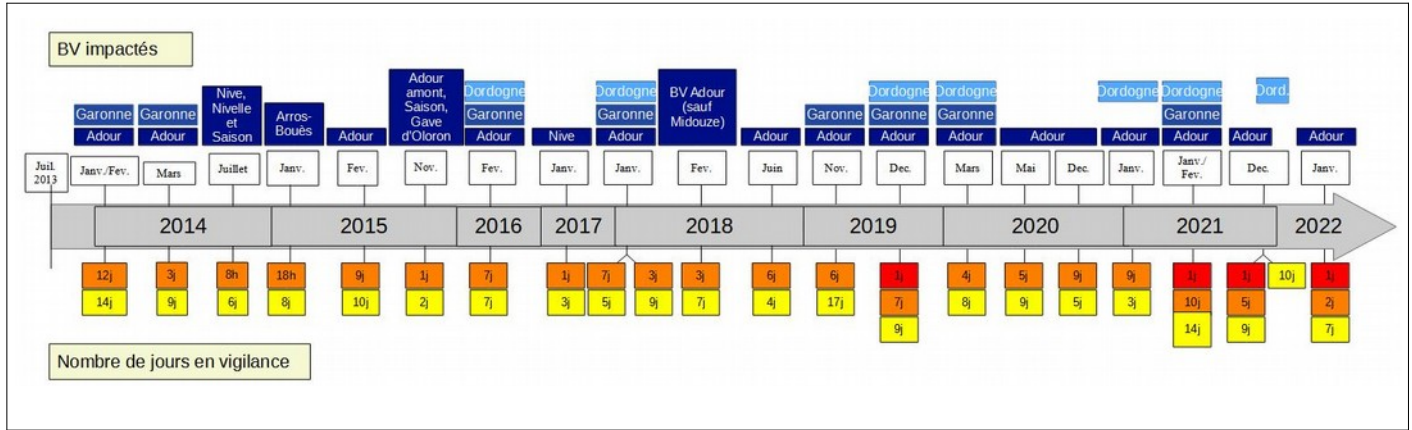


Figure 1: Historique des crues d’ampleur vécues par le SPC GAD entre le 1^{er} juillet 2013 et le 1^{er} janvier 2023

Ces vingtaines d’évènements, ainsi que tous ceux plus ponctuels ou à faibles niveaux de débordement, ont permis au SPC d’enrichir sa connaissance des différents bassins versants. Grâce à cela, les équipes opérationnelles ont pu faire évoluer les informations de l’ensemble de la chaîne de production (courbes de tarage, outils et modèles de prévisions, niveaux de vigilance jaune/orange/rouge aux stations, etc).

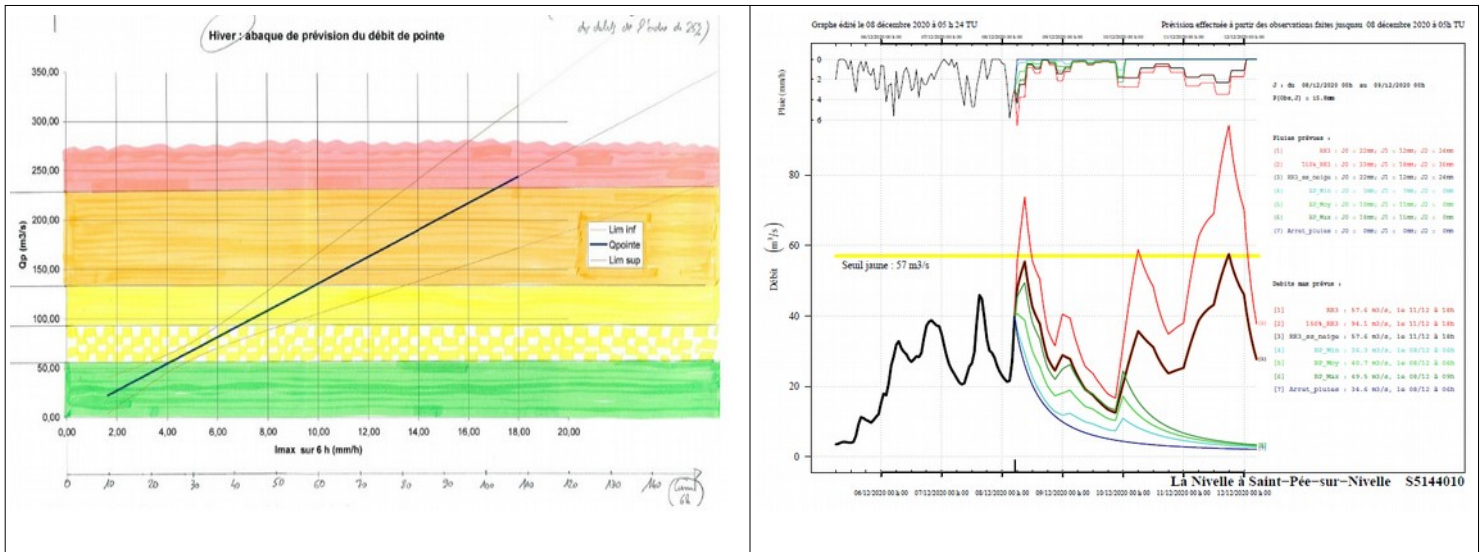


Figure 2 : Comparaison des outils disponibles à Saint-Pée-sur-Nivelle en fonction des années.

À gauche, abaque manuel qui permet d’estimer le débit de pointe en fonction de l’intensité maximale de pluie sur 6h (SPC de Pau, 2013).

À droite, sorties de modèles GRP qui permet de suivre des prévisions de débits en fonction de différents scénarios de pluies donnés par Météo-France (SPC GAD, 2021).

2. Genèse de l'exercice de prévisions des crues grandeur nature

Pour assurer ses missions sur son territoire de compétences, le SPC GAD met en astreinte programmée 3 prévisionnistes sur 7 jours, du mardi au mardi.

Pour cela, il se base sur un vivier théorique de 23 personnes : 10 travaillent au sein du pôle ouvrages hydrauliques de la DREAL Nouvelle Aquitaine et 13 contribuent directement à l'amélioration continue de l'activité du SPC. L'ensemble de ces agents sont prévisionnistes sur 15 % de leur temps de travail. Des prévisionnistes supplémentaires peuvent être mobilisés au gré de l'importance de l'événement auquel doit faire face le SPC. À titre d'exemple, ce sont 15 prévisionnistes qui se sont relayés en janvier 2021 pour assurer un service de production des prévisions 24h/24.

Comme tout service, le SPC GAD connaît du renouvellement au fil des années. Pour intégrer les nouveaux arrivants, une formation locale complémentaire aux formations nationales de prise de poste en SPC est dispensée, avec pour objectif d'intégrer au vivier tout nouvel agent en 9 mois environ.

Cette formation a comme objectif principal de donner une bonne maîtrise de tous les outils de prévision, une bonne connaissance des tronçons et du territoire en général notamment en intégrant de nombreux exercices pratiques. De plus, les récents retours d'expériences internes réalisés suite aux crues importantes de 2020 et 2021 ont mis en évidence une volonté partagée par l'ensemble des prévisionnistes de bénéficier d'une répétition générale à l'automne, avant la saison la plus propice aux crues. C'est dans ce cadre qu'a été programmé un exercice de prévisions des crues grandeur nature, en octobre 2022.

3. Conditions de réalisation de l'exercice

L'objectif principal de l'exercice a été d'immerger les prévisionnistes formés du SPC GAD dans une journée type de production en crue, en apportant un soin particulier à la rendre la plus proche possible d'une situation réelle, à tous points de vue (outils, organisation de la salle, interactions avec les acteurs extérieurs, etc.).

Pour cela, quatre équipes de prévisionnistes ont « joué » une même situation de crue sur une journée complète (7 h/17 h). Les équipes, composées de 3 ou 4 personnes, ont été constituées de manière homogène avec au moins 1 prévisionniste expérimenté (+ de 8 ans d'expérience en tant que prévisionniste), 1 prévisionniste débutant (- de 1 an d'expérience en tant que prévisionniste), et des profils de compétences répartis de façon équilibrée (1 profil « ouvrages hydrauliques » et 1 profil « SPC » dans chaque équipe).

Le jour J, chaque équipe a été immergée dans le même scénario de gestion de crise, avec à leur disposition :

- Une salle opérationnelle type dans laquelle était présent un observateur ;
- Des ordinateurs ayant des interfaces émulant celles utilisées de manière opérationnelle ;
- Des données, notamment météorologiques et hydrologiques, régulièrement mises à jour ou envoyées sur la boîte mail du SPC comme cela est le cas en temps réel ;
- Des outils tels que des abaques, des catalogues de crue et des relations linéaires numériques ainsi que des sorties de modèles GRP présents sur les différents bassins. Seuls les sorties de modèles Plathynes, Mascaret et Télémac n'étaient pas disponibles mais cela n'impactait que 5 tronçons sur 27 ;
- Un téléphone d'astreinte pour assurer des échanges avec certains acteurs extérieurs, et ainsi recevoir ou donner des informations sur l'évènement en cours.

Ce cadre de travail est illustré en figure 3.

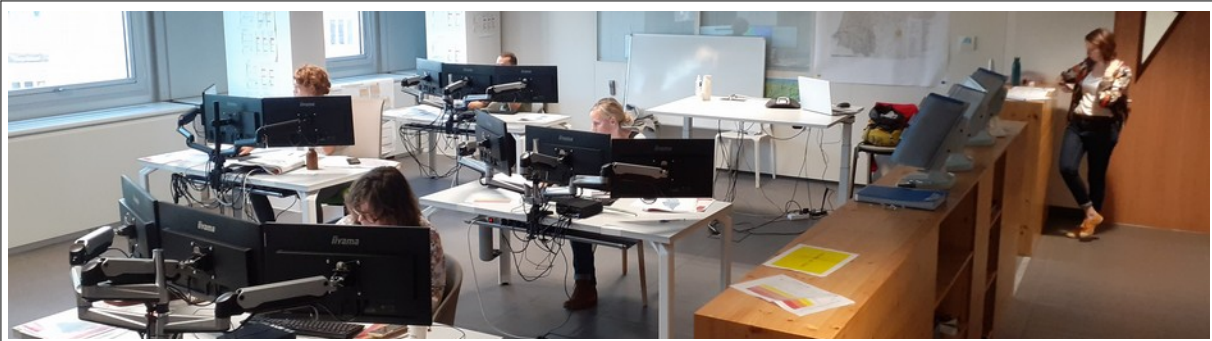


Figure 3 : Équipe de prévisionnistes en train de jouer l'exercice grandeur nature (partie gauche) et observateur (partie droite) (SPC GAD, octobre 2022)

4. Exploitation des résultats et questionnements

Au cours de la journée, les différentes équipes ont produit deux bulletins de vigilance crue comportant des prévisions chiffrées sur certains secteurs. L'exploitation des premiers résultats montre que ces équipes ont été en accord sur la couleur de vigilance à chaque étape dans plus de 2/3 des cas. Le reste du temps, des différences ont pu être constatées. Ces différences peuvent parfois être expliquées techniquement, car il arrive que les règles de production de Vigicrues laissent la possibilité de produire l'une ou l'autre des couleurs de vigilance, selon le contexte et suite à une analyse multi-critères, pour une même situation (cas des zones de transition). Dans le cadre de l'exercice, cette situation s'est produite dans 1/3 des différences de couleur de vigilance constatées, et les premières analyses n'ont pas permis d'expliquer les 2/3 des différences restantes, soit celles constatées 20 % du temps. Dans ces autres cas, les choix peuvent parfois s'expliquer par une temporisation différente d'un groupe à l'autre. Il s'agit alors du positionnement face aux incertitudes, principalement météorologiques.

Sachant que l'ensemble des équipes était soumis exactement au même scénario et qu'elles avaient les mêmes données et outils à leur disposition, plusieurs questions peuvent alors se poser : Quelle est la part du facteur humain dans la prévision des crues (expertise, expérience, sang-froid, *etc.*) ? Et de manière plus générale, comment garantir une parfaite continuité et homogénéité dans la production ?

L'exercice grandeur nature, par la manière dont il a été réalisé, donne l'occasion de creuser ces questionnements. L'objectif de cette étude est d'analyser ce qui rend robuste les productions et dans le cas où des écarts ont pu être constatés, ce qui pourrait expliquer ces différences.

Pour cela, les deux principales hypothèses d'explication seront approfondies :

- la qualité de l'outillage mis à disposition des prévisionnistes, avec pour objectif d'identifier les secteurs où les méthodes de prévisions sont les plus robustes, des secteurs où le prévisionniste est moins outillé, ce qui laisse davantage de place à sa plus-value personnelle ;
- le détail des profils composant les équipes de prévisionnistes (âge, formation initiale, expérience, ancienneté dans le domaine de la prévision des crues, nombre de crues vécues, *etc.*)

Enfin, l'exercice de simulation de la crise a pu être l'opportunité de mettre à l'épreuve des prévisionnistes moins expérimentés ; les prévisionnistes plus aguerris ont en effet pu se mettre légèrement en retrait pour laisser s'exposer leurs collègues. En crise, cette prise de risque n'est pas permise. L'expérience des crises a conduit le SPC à mettre en place des process de contrôle et des garde-fous pour renforcer la robustesse de la production : rotation des équipes, contrôle croisé des prévisions sur les secteurs sensibles, supervision par un prévisionniste expérimenté, fiches de cadrage par secteur, traçage des hypothèses des prévisions.

METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DE FORÇAGES METEO PROBABILISTES POUR LA PREVISION HYDROLOGIQUE

Methodology for Building Probabilistic Meteorological Forcings for Hydrological Forecasting

Auteurs : RINALDI Fabien^{1*}, LE LAY Matthieu^{1*}, CORON Laurent²

* *auteur correspondant*

¹EDF-DTG, 134 rue de l'étang, 38950 SAINT-MARTIN LE VINOUX, France

²EDF-DTG, 4 rue Claude Marie Perroud, 31096 TOULOUSE, France

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Préférence : communication orale

Mots clefs : Prévision probabiliste, utilisation opérationnelle

Orateur : Fabien RINALDI / Matthieu LE-LAY¹

Résumé

Les évolutions récentes des prévisions météorologiques numériques ont amené des avancées importantes en termes de mise à disposition de scénarios météorologiques d'entrées pour les simulations hydrologiques. Ces progrès concernent à la fois la résolution numérique des modèles météorologiques ainsi que le nombre de scénarios disponibles.

À EDF-DTG, les prévisionnistes hydro-météorologistes ont à disposition les informations des modèles météorologiques déterministes : AROME, ARPEGE, CEP et probabilistes PEAROME, PEARP, EPS, représentant ainsi 104 scénarios possibles. Une expertise météorologique quotidienne est réalisée permettant (ou pas), en fonction du type de situation météorologique, de choisir entre les sources de prévisions disponibles. À titre d'exemple, le prévisionniste aura tendance à choisir des scénarios AROME et PEAROME en cas de détection de situation convective, il pourra être amené aussi à arbitrer entre à des échéances plus lointaines entre ARPEGE (PEARPEGE) et CEP(EPS), ...

On se propose donc de présenter la méthodologie retenue ainsi que les outils pour valoriser l'expertise météorologique en fonction des échéances de prévisions et des sources de prévisions disponibles dans les chaînes de prévisions hydrométéorologiques en cours de développement à EDF-DTG. La méthodologie adresse

- la pondération des sources de prévisions
- la création de jeux de prévisions homogènes (prévisions sans couture)
- le choix des sources de prévisions en fonction des échéances de prévisibilité

RETOUR D’EXPERIENCE DE LA GESTION DES CRISES INONDATIONS RECENTES PAR LES EPCI DES ALPES MARITIMES

*Crisis management and intermunicipality : analysis of récents flood risks
management in the department of Alpes Maritimes*

Auteurs : CHAVE Sylvain^{*1}, DREYFUS Raphaëlle²

* *auteur correspondant*

¹ Predict Services, Montpellier, France, sylvain.chave@predictservices.com

² SMIAGE, Nice, France, r.dreyfus@smiage.fr

³

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Alpes Maritimes, EPCI, Sécurité civile, gestion de crise, tempête
Alex

Les EPCI ont vu leurs compétences s’accroître de façon importante au cours des dernières années, notamment en lien avec l’adoption de lois de décentralisation successives (Loi dite de « Réforme des collectivités territoriales » du 16/12/2010, loi MAPTAM du 27/01/2014, loi NOTRe du 7/08/2015). La loi MAPTAM crée la compétence de Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI) et de risques majeurs confiée aux Etablissements Public de Coopération Intercommunale (EPCI). Cette évolution place les EPCI dans un rôle actif dans la gestion des événements hydrométéorologiques : il devient aujourd’hui un acteur clé de la gestion de crise sur son territoire, aux côtés et en complémentarité avec les communes (Plan Communal de Sauvegarde) et l’échelon départemental (Préfet).

Parallèlement à ces évolutions, notre modèle de sécurité civile se renforce à travers l’adoption de la loi relative à la consolidation du modèle de sécurité civile français et à la modernisation des Services d’Incendie et de Secours, dite loi MATRAS (25 novembre 2021). Inscrite en effet dans le prolongement de la loi de 2004, relative à la modernisation de la sécurité civile, la loi MATRAS impose de nouvelles obligations aux acteurs intercommunaux dans le domaine de la gestion des risques. On trouve ainsi parmi les axes forts de la loi, un axe relatif à l’anticipation et à la gestion des crises, renforce la réalisation des Plans Communaux de Sauvegarde et instaure l’obligation de réalisation des Plans Intercommunaux de Sauvegarde (PiCS). C’est en ce sens que s’organiser, se structurer pour apporter une réponse opérationnelle adaptée devient un élément clé pour la gestion de crise à l’échelle intercommunale. Même si le Président de l’EPCI ne prend pas la responsabilité de la Direction des Opérations de Secours qui reste sur les épaules du maire, il intervient en appui des maires en mutualisant des moyens humains et

matériels, des expertises, à tous les moments de la gestion de l'évènement pour contribuer à solutionner des situations parfois très complexes à gérer.

Trois évènements hydrométéorologiques majeurs ont concerné le département des Alpes Maritimes entre 2015 et 2020, sollicitant à chaque fois l'intervention des EPCI. Les inondations du 3 octobre 2015 ont concerné plus particulièrement la bande littorale du département. Les pluies particulièrement intenses ont (environ 200 mm en deux heures, entre 20 et 22h) ont provoqué des ruissellements très importants, généralisés, et des crues torrentielles en provoquant des dégâts considérables. Le bilan s'élève en effet à 20 morts et plus de 600 millions € de dégâts. En septembre 2019, deux épisodes majeurs se produisent à quelques jours d'intervalle dans le secteur de Cannes, Mandelieu avec des cumuls de l'ordre de 270 mm à Caussols sur 72h les 22-23-24 novembre, ou encore 365mm en 72 h à Tanneron. Ces pluies ont fait suite à un automne particulièrement pluvieux, donc des sols saturés avant la première vigilance rouge. Les cours d'eau de la Siagne, du Riou de l'Argentière et du Loup ont réagi avec des crues de période de retour estimées à plus de 50 ans, engageant des dommages matériels colossaux mais aucun décès. Dernièrement, le 3 octobre 2020, la tempête Alex a concerné plus particulièrement les vallées alpines du département en causant des dégâts rarement vus par le passé et un bilan catastrophique de 18 morts ou disparus et plus d'un milliard € de dégâts. La tempête Alex sur le secteur maralpin s'est caractérisée par des cumuls localisés et des intensités très fortes sur les bassins du moyen Var, en particulier sur la Tinée et la Vésubie, et sur le bassin de la Roya. Le cumul maximum a été observé vers Malaussène à plus de 610mm en 24h, avec des intensités horaires allant de 100 à 150mm. Ces pluies ont généré des réactions des cours d'eaux de la Siagne à la Roya, avec notamment des gradients horaires de l'ordre de presque 400m³/s sur la Tinée, 450 m³/s par heure sur la Vésubie ou encore 1600m³/s en 1h sur le Var aval.

L'objectif de la présente communication est de proposer un retour d'expérience de la gestion de ces évènements à l'échelle de chaque EPCI et en l'absence du cadre donné aujourd'hui par la loi MATRAS. Chaque EPCI a dû déployer dans l'urgence une réponse opérationnelle pour faire face à la crise et accompagner les communes sinistrées, assurer la continuité des services et des activités de l'EPCI (transports, eau, assainissement, déchets...). Dans certaines situations l'implication de l'EPCI s'est déroulée sur plusieurs mois entre la réalisation des actions d'urgence mais aussi de post urgence. L'objectif est donc d'identifier les éléments structurants de la gestion de crise en vue notamment de la conception à venir des Plan Intercommunaux de Sauvegarde, qui démarrent dans le département pour plusieurs EPCI. En particulier à travers le jeu d'acteurs et les complémentarités nécessaires entre l'ensemble des acteurs institutionnels, les collectivités locales et territoriales et parfois internationales lorsqu'on se trouve en secteur transfrontalier à l'image de la Roya dont la majeure partie du bassin versant se situe en France mais a son exutoire en Mer Méditerranée en Italie.

Il s'agira par conséquent d'illustrer à travers ces exemples récents les bonnes pratiques des EPCI avant, pendant et après les évènements. Les actions de sensibilisation au risque, d'appropriation des méthodes de gestion de crise par les acteurs concernés, l'acculturation des populations aux risques et aux réflexes de mise en sûreté ont une portée et une efficacité démontrée dans le cadre de la gestion de la tempête Alex. Les outils de gestion de crise qui se déploient à l'usage des collectivités permettent également d'évoluer dans les pratiques et de partager les actions de sauvegarde de façon instantanée à l'ensemble des acteurs impliqués. La connaissance des phénomènes (instrumentation, études, formations) et le partage sur les différentes procédures de surveillance mises en place se fait avec chaque commune, mais la coordination avec l'EPCI est cruciale afin de favoriser tous les temps de la gestion de crise, de la préparation au retour à la normale. Parmi les évolutions à apporter, le besoin de coordination ressort en priorité car le jeu d'acteurs avec chacun leurs compétences propres est souvent très complexe d'autant plus en territoire transfrontalier ou les échanges nécessaires amont aval par exemple impliquent deux pays et deux organisations différentes. Cette communication montrera avec l'exemple du bassin versant

de la Roya l'évolution de la surveillance du bassin versant des cinq dernières années, entre acteurs locaux et acteurs historiques jusqu'à la mise en place de procédures et d'outils récents permettant à la structure intercommunale de dessiner le rôle de coordinateur de la gestion de crise sur son territoire.



3 23-11-2019 : patrouilleur du SMIAGE sur le Mardaric à Villeneuve-Loubet



2 post 23-11-2019 : agents de la CACPL en prise de laisses de crue source : P.BRIGODE



1 : RECO post Alex SMIAGE/CARF/RTM

1. REFERENCES

ARBIZZI Sandrine, CINOTTI Bruno, DESBOUIS Jean-François, MOREAU Laurent, SAUZEY Philippe, VILMUS Florence (2021) Retour d'expérience des intempéries des 2 et 3 octobre 2020 dans les Alpes Maritimes, Rapport CGEDD n°013618-01, CGEDD IGA, 167 pages.

PREFECTURE DES ALPES MARITIMES (2019) Retour d'expérience des intempéries des 22-24 novembre et 1-2 décembre 2019

De 2018 à 2022, bilan de cinq années d’application de la doctrine du SPC GAD pour le déclenchement de vigilance jaune montée rapide

*A five-year analysis of the practise of the yellow vigilance for rapid rise in water
levels at Gironde-Adour-Dordogne SPC*

Auteurs : PERON François^{1*}, LACAZE Yan¹, PIOTTE Olivier¹

¹ Service des Risques Naturels et Hydrauliques, DREAL Nouvelle-Aquitaine, Cité administrative, 33000 Bordeaux, France,

francois.peron@developpement-durable.gouv.fr, yan.lacaze@developpement-durable.gouv.fr,

olivier.piotte@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : crues rapides, vigicrues, saisonnalité, enjeux touristiques

1. Rappel sur la doctrine “Jaune montée rapide” du SPC GAD

Cette doctrine élaborée en 2017 a déjà fait l’objet d’un article à l’occasion du colloque SHF de 2018 [1]. Elle a été proposée par le SPC GAD sur son territoire de compétence pour cadrer les critères de déclenchement de la vigilance faute de critères nationaux. Elle repose sur les critères suivants que nous expliciterons :

- prévision d’un maximum local sur une zone AB/BP où se trouvent des tronçons éligibles à la vigilance jaune montée rapide ;
- écart entre le cumul moyen prévu et le maximum attendu localement ;
- situation météorologique orageuse mise en évidence dans le texte accompagnant le bulletin de prévision ;
- vigilance météorologique orange orage publiée par Météo France ;
- saisonnalité de l’évènement (de mai à septembre) ;
- chronologie de l’évènement.

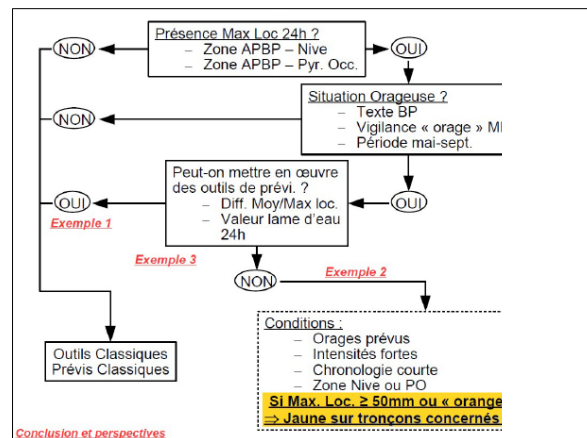


Figure 1: Logigramme montée rapide

2. Bilan de cinq années de mise en œuvre de cette doctrine

Du 1er janvier 2018 au 31 décembre 2022, trente six occurrences de vigilance jaune montée rapide sur le territoire de surveillance du SPC GAD ont été recensées. Est ici considérée comme une occurrence un bulletin de vigilance par bassin (Adour ou Dordogne) indifféremment du nombre de tronçons concernés dans un même bulletin.

À travers l’analyse de chacune de ces mises en vigilance nous cherchons à mettre notamment en exergue :

- les réactions hydrologiques observées aux stations réglementaires des tronçons placés en vigilance jaune montée rapide ainsi que les stations d’observation associées au tronçon ou à ses affluents ;
- les gradients moyens et maximum de montée des niveaux ;
- les lames d’eau, les intensités maximales de précipitation sur l’évènement ;
- l’envoi ou non d’un avertissement vigicrues flash associé à l’évènement.

Et ce afin de discriminer parmi les événements le type de réactions observées, leur origine (réaction rapide sur le réseau surveillé, hors réseau surveillé, réaction hydrologique peu rapide aux stations, pas de réaction hydrologique mesurée) et, in fine, leur compatibilité avec la vigilance jaune risque de montée rapide.

3. Élaboration de critères quantitatifs visant à mieux approcher la vigilance jaune montée rapide

Des analyses de chacun de ces évènements, nous approcherons l’élaboration de critères quantitatifs permettant la détection de bonnes alertes, de fausses alertes et d’alertes manquées dans le cas de vigilances jaune émises pour risque de montées rapides. Le but est donc d’établir des paramètres permettant d’apprécier de manière exhaustive les performances de la vigilance, alors qu’actuellement

seuls les critères de débordement et d’atteinte des zones de transition sont pris en compte. Ces analyses permettront aussi potentiellement de réviser et d’améliorer la doctrine du SPC GAD.

Enfin, l’analyse des performances de cette vigilance aux effets très locaux, se heurte à la densité du réseau de mesure. Nous présentons en conclusions, des perspectives de capitalisation rustique permettant de combler les lacunes du réseau hydrométrique automatisé. Ces approches low-tech pourraient permettre d’enrichir aisément la connaissance des effets locaux de précipitations fortes.

4. RÉFÉRENCES

- [1] Vigilance Jaune Montée Rapide : face aux difficultés d'interprétation et de mise en oeuvre, un exemple de pratique opérationnelle (2018). Conférence SHF : "De la prévision des crues à la gestion de crise", Avignon, France

Modèle opérationnel hydrologique distribué couplé à un modèle d'apprentissage automatique : cas de la station d'Argelès-Gazost sur le Gave de Pau

Distributed hydrological operational model coupled with a machine learning model : case of the Argelès-Gazost station on the « gave de Pau »

Auteurs : Vincent DOURDET*², Mouhamed SEYE², Reyhaneh HASHEMI¹, Laurent DIEVAL², Pierre-André GARAMBOIS¹, Pierre JAVEL¹

¹INRAE UMR1467, 3275 Route de Cézanne CS40031 13182 Aix-en-Provence France, e-mail : prénom.nom@inrae.fr

²DREAL Nouvelle Aquitaine, Service de Prévision des Crues Gironde-Adour-Dordogne, rue Jules Ferry Boite 55 33090 Bordeaux cédex France, e-mail: prénom.nom@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

~~1/ Préparation et gestion de crise~~

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Modèle hydrologique opérationnel distribué, SMASH, modèle d'apprentissage LSTM

1. PRESENTATION DU CONTEXTE

Le Service de prévision des crues Gironde Adour Dordogne (SPC GAD) assure une mission de vigilance et de prévision des crues sur un ensemble de tronçons réglementaires. Ceux-ci représentent un linéaire de plus de 2 000 kilomètres répartis sur les bassins versants de la Dordogne, de l'Adour, de la Garonne et de l'estuaire de la Gironde. Il établit notamment l'état de la vigilance des cours d'eau Pyrénéens surveillés réglementairement et notamment le gave de Pau qui prend sa source dans le cirque de Gavarnie.

Le gave de Pau bigourdan, tronçon réglementaire situé en partie amont du gave de Pau, est principalement alimenté par des sources et la fonte des glaciers. Son régime hydrologique est de type pluvio-nival avec des périodes orageuses. Les deux stations réglementaires de prévision des crues qui sont installées sur le gave de Pau bigourdan, se trouvent à Argelès-Gazost et à Lourdes.

La crue de référence dans le secteur est celle de juin 2013. Elle résulte d'une concomitance entre des sols très humides, un fort épisode de pluie de sud et une fonte exceptionnelle du manteau neigeux.

Le travail du prévisionniste est de comprendre l'événement météorologique et hydrologique en cours et de s'appuyer sur des outils opérationnels performants afin de prévoir l'état de la vigilance et de quantifier en hauteur et dans le temps les niveaux d'eau qui seront atteints au droit des stations de prévision. Le secteur du gave de Pau bigourdan nécessite la prise en compte de multiples facteurs pour réaliser des prévisions de hauteur d'eau notamment les débits, les précipitations, l'enneigement et la fonte nivale.

Le manque de performance actuel des outils opérationnels de prévision des crues dans le secteur tels que les modèles empiriques ou les modèles hydrologiques globaux et distribués a été le moteur du

développement d'une collaboration entre l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) et le SPC-GAD autour de la mise en œuvre d'un modèle opérationnel de type hydrologique distribué couplé à une correction d'erreurs basée sur une approche d'apprentissage automatique de type long short-term memory (LSTM).

2. LE MODELE MIS EN PLACE

Le modèle SMASH (Spatially-distributed Modelling and ASsimilation for Hydrology) (Colleoni, F et al. [1]) est un modèle hydrologique distribué conceptuel conçu pour la prévision des crues éclair et qui intègre un module permettant de prendre en compte l'influence nivale. Le modèle calé correspond à la version "calage uniforme". Il est défini sur une grille régulière de 1 km^2 et s'exécute en continu à un pas de temps horaire. Pour chaque pas de temps, l'entrée du modèle comprend les précipitations maillées et l'évapotranspiration potentielle, et la sortie est le champ de décharge défini aux nœuds du schéma de routage. La Figure 3 illustre l'architecture du modèle. P représente pluviométrie locale sur une cellule, E est l'évapotranspiration potentielle, P_r est la pluviométrie effective, q est la décharge élémentaire et Q est la décharge totale acheminée.

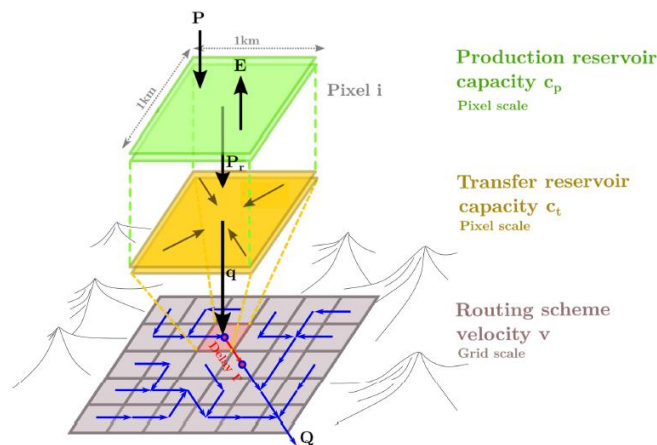


Figure 3 : Architecture du modèle SMASH

Dans le cadre de cette étude, le modèle a été calé par l'INRAE sur les données observées de pluie moyenne (mm), d'humidité des sols (%), d'épaisseur du manteau neigeux (m), et du débit (m^3/s) sur la période du 1^{er} août 2006 au 1^{er} août 2018 pour un objectif de prévision à horizon 6 heures. Cet horizon est cohérent avec le temps de réponse du bassin versant d'Argelès-Gazost et permet une meilleure anticipation des services de secours.

Afin de corriger les erreurs du modèle pour l'horizon de 6 heures, l'apport des réseaux de neurones a été étudié. Les réseaux de neurones constituent aujourd'hui l'état de l'art pour diverses tâches d'apprentissage automatique. Ils sont très largement utilisés par exemple dans les domaines de la vision par ordinateur (classification d'images, détection d'objets, segmentation...) et du traitement automatique du langage (traduction automatique, reconnaissance, vocale, modèles de langage...). Les réseaux de neurones grâce à leur très grande capacité de généralisation et leur capacité à capturer des processus non linéaires numériquement sans aucune connaissance des processus physiques sont aujourd'hui utilisés pour la modélisation hydrologique (Anctil et al. [2], Cheng, M [3], Kao et al. [4]).

Les réseaux de neurones de type LSTM ont été retenus comme les plus adaptés à la correction d'erreurs du modèle de prévision des crues SMASH. Cette correction se fait suivant 2 étapes :

- Une première étape qui consiste à caler un modèle LSTM de prévision d'erreur à horizon 6 heures. Cette étape de calage nécessite une division du jeu de données disponible (août 2006 – août 2018) en trois parties : une base d'entraînement (70% du jeu de données), une base de validation (20% du jeu de données) et une base de test (10% du jeu de données).
- Une seconde étape qui consiste à corriger le débit simulé par le terme d'erreur déterminé par le modèle LSTM calé.

3. RESULTATS

L'apport du modèle LSTM entraîne un gain de performance du modèle SMASH comme le montre la Figure 4. En effet, le couplage SMASH-LSTM permet de réduire la surestimation chronique du modèle pour les forts débits (gamme d'intérêt pour la prévision des crues), à partir de 125 m³/s.

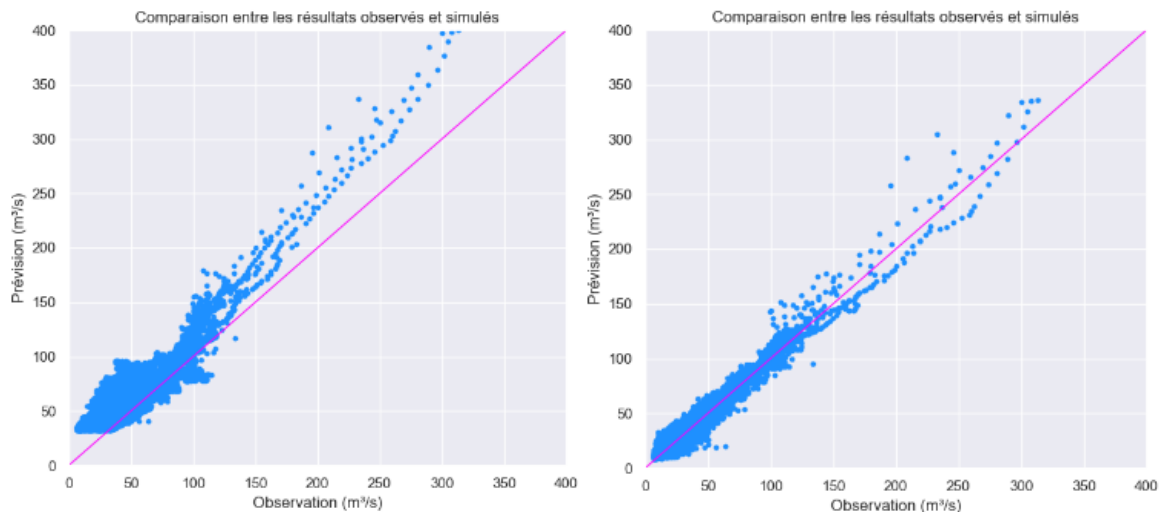


Figure 4 : Comparaison des débits observés et simulés, modèle SMASH seul (gauche) et couplage modèle SMASH + LSTM (droite)

La crue de référence dans le secteur du gave de Pau bigourdan, celle de juin 2013, ayant été retenue pour le calage, c'est la seconde crue récente la plus significative, celle de juin 2018, qui a été évaluée. La Figure 5 met en évidence le gain de performance du modèle SMASH avec le couplage d'un modèle LSTM.

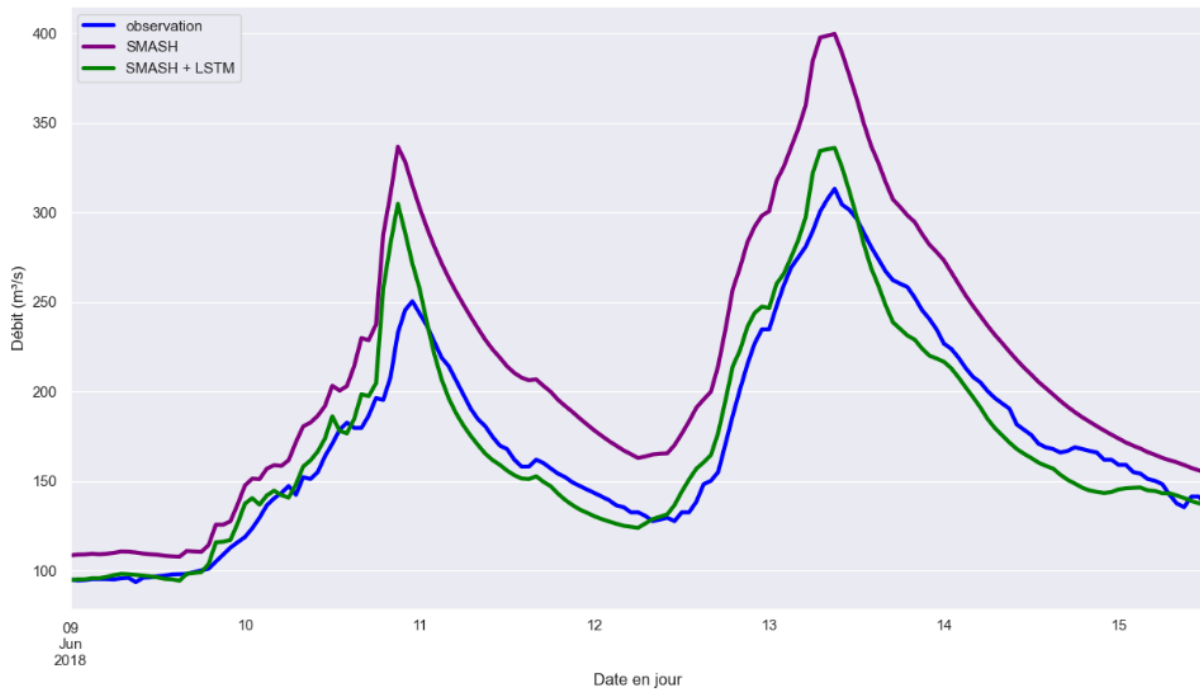


Figure 5 : Comparaison des hydrogrammes prévus par le modèle SMASH seul et le couplage SMASH + LSTM pour la crue de juin 2018

4. REFERENCES

- [1] [Colleoni, F et al. - 2021]
- [2] [Anctil et al. - 2003]
- [3] [Cheng, M - 2020]
- [4] [Kao et al. - 2020]

Élaboration d’une méthode d’évaluation des temps caractéristiques des petits bassins versants

Auteurs : GIBERT Lucas¹, FROMENTAL Anne-Marie¹, BELLEUDY Anne¹, FOUCHIER Catherine² ?, GAUTHERON Alain³ ?

* *auteur correspondant*

¹ DGPR/SRNH SCHAPI, 42 avenue Gaspard Coriolis 31057 Toulouse cedex, France, e-mail: anne.belleudy@developpement-durable.gouv.fr, anne-marie.fromental@developpement-durable.gouv.fr

² INRAE, Aix Marseille Université, Unité RECOVER, Aix-en-Provence, France, e-mail : catherine.fouchier@inrae.fr

³ DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, 17, bd Joseph Vallier 38100 Grenoble, e-mail : alain.gautheron@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : Temps caractéristiques, temps de réponse, crues rapides, base nationale des bassins versants

Le réseau Vigicrues assure la production et la diffusion de la vigilance crues (www.vigicrues.gouv.fr) sur les principaux cours d’eau du territoire, ainsi qu’un service complémentaire de détection et d’avertissement automatique du risque de crues soudaines sur les plus petits bassins, Vigicrues Flash. Dans le cadre de ces activités opérationnelles, une estimation du temps de réaction des cours d’eau en n’importe quel point, y compris sur des secteurs non jaugés, est souvent utile.

L’estimation des temps caractéristiques des bassins non jaugés est généralement réalisée à partir de différentes formules empiriques, largement utilisées en ingénierie (Bressand-Golossov [1], Passini, Kirpich, Ventura,...). Ces formules font intervenir des caractéristiques morphologiques des bassins telles que leur surface, leur pente moyenne et la longueur du thalweg principal.

La pertinence de ces formules est régulièrement interrogée du fait de l’absence de références bibliographiques claires, de l’absence d’homogénéité dans les méthodes de calcul des paramètres morphologiques considérés et de l’utilisation de ces formules sur des bassins ayant des caractéristiques différentes de celles pour lesquelles les formules ont été initialement établies.

L’objectif de l’étude est de proposer une méthode d’estimation des temps caractéristiques pour les petits bassins sur tout le territoire national. Elle sera assortie de ses conditions de validité. La variabilité des temps caractéristiques selon les événements (hétérogénéité spatio-temporelle de la pluie, sensibilité différente de la réponse selon l’ampleur de la crue et des débordements engendrés, etc) n’est pas prise en compte.

Ce travail comporte trois étapes :

- L’estimation des temps caractéristiques sur un échantillon de bassins jaugés par l’analyse automatique de chroniques de précipitations et de débit.
- L’établissement d’un lien statistique entre ces temps caractéristiques et les caractéristiques géomorphologiques des bassins versants afin d’en déduire une formule utilisable sur des bassins non jaugés.
- Une analyse de sensibilité de la formule obtenue au regard de différents paramètres hydro-morphologiques des bassins versants.

Chacune des étapes est présentée dans les chapitres suivants.

1. Détermination des temps caractéristiques sur un échantillon de bassins jaugés

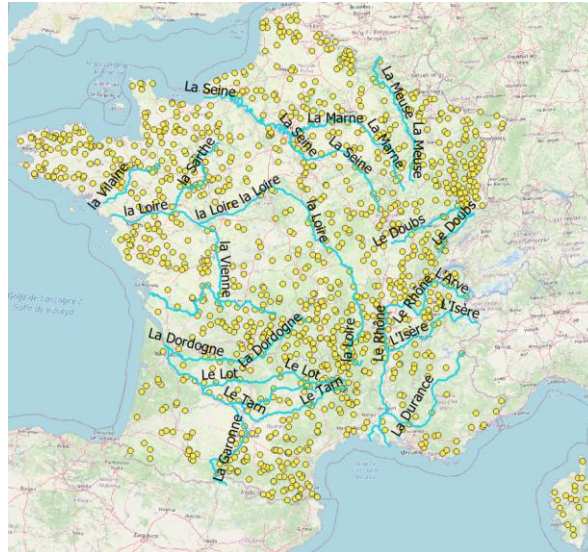


Figure 1: échantillon constitué de 968 bassins versants

On constitue un échantillon de sites hydrométriques situés en France métropolitaine, dont la surface du bassin versant est inférieure à 500 km² et pour lesquels une estimation du débit biennal est disponible. Pour chaque site, sur la période 2007-2022, une sélection d'épisodes hydrométéorologiques est réalisée à partir des données les plus valides de débits et de pluies de bassin issues de la lame d'eau Antilope (fusion de données radar et pluviomètres).

Deux méthodes d'analyse automatique des épisodes hydrométéorologiques sont élaborées et permettent de fournir une évaluation du temps de réaction et du temps de concentration pour 968 bassins.

L'algorithme d'analyse des épisodes mis en place pour déterminer les temps de réaction apparaît plus robuste que celui mis en œuvre pour le temps de concentration (en raison de la difficulté d'analyse dans les cas d'épisodes comportant plusieurs pics de crue).

Par ailleurs, la notion de temps de concentration (T_c), assez théorique est utilisée en ingénierie mais le temps de réaction (T_r) intéresse davantage les prévisionnistes et modélisateurs dans un contexte opérationnel.

Pour ces raisons, dans la suite de l'étude, les estimations de temps de réaction sont privilégiées.

L'analyse des temps caractéristiques obtenus permet également de confirmer la relation usuellement admise entre les deux paramètres $T_r = 0.5 T_c$.

Cette étape permet d'obtenir une évaluation homogène du temps de réaction pour 968 bassins versants.

2. Ajustement d'une formule de prédétermination du temps de réaction

L'objectif de cette étape est d'établir un lien statistique entre les temps de réaction précédemment obtenus et les caractéristiques géomorphologiques des bassins versants.

La base nationale des bassins versants (BNBV) [2] est une base de bassins topographiques construite en 2013 à partir d'un modèle numérique de terrain à 50m de résolution. Elle représente l'ensemble des

cours d'eau français et leur bassin versant à partir d'une superficie de 5 km² et compte environ 140 000 entités. Chaque exutoire est relié à un identifiant unique (code BNBV), à un tronçon (une portion de cours d'eau entre deux exutoires) et à un bassin versant.

Les caractéristiques suivantes sont calculées de manière homogène pour chaque bassin de la BNBV :

- S superficie du bassin versant (km²)
- L longueur du chemin hydraulique le plus lent (m). Calculé en sommant les longueurs des tronçons élémentaires entre chaque exutoire. $L = \sum L_j$
- P pente pondérée sur ce chemin hydraulique (m/m). Calculée à partir des pentes élémentaires

$$P = \left(\frac{\sum L_j}{\sum \frac{L_j}{\sqrt{P_j}}} \right)^2$$

de chaque tronçon.

Afin de s'affranchir des écarts liés aux différences de longueurs de cours d'eau, nous définissons pour chaque bassin de l'échantillon une variable vitesse de réaction, Vr (m/s), égale à la longueur du chemin

$$Vr = \left(\frac{L}{Tr} \right)$$

hydraulique le plus lent rapportée au temps de réaction évalué.

On choisit d'ajuster un modèle de la forme $Vr = \alpha P^\beta S^\gamma L^\tau$ sur l'échantillon.

Les modèles plus simples ($\gamma = 0$ ou $\tau = 0$) sont comparés au modèle complet mais présentent une erreur quadratique moyenne sur l'échantillon test plus importante. Le meilleur ajustement est obtenu en conservant les 4 paramètres.

L'erreur relative médiane pour les temps caractéristiques obtenus avec cette formule est de l'ordre de 25%, très inférieure à celle obtenue par les temps estimés plusieurs formules de la littérature.

Formules (TC = ½ TR) TR	Erreur relative (%)
Bressand-Golossov	57
Kirpich	64
Passini	61
Ventura	53
Giandotti	49
Johnstone	39
Espagnole	44
Formule calée	25

Figure 2: comparaison des erreurs relatives de formules empiriques et de la formule calée

3. Etape 3 : études de sensibilité

Afin de préciser le domaine de validité de la formule obtenue, ses performances sont évaluées au regard de différentes caractéristiques des bassins de l'échantillon de calage :

- la région dans laquelle se trouve le bassin versant,
- les paramètres morphologiques surface et pente,
- la présence de barrage, de karst et l'influence de la neige.

La classification en hydro-écorégions définies par Wasson et al. [3] est utilisée. Pour chaque hydro-écorégion, on compare les erreurs relatives obtenues avec la formule calée nationalement (présentée dans le chapitre précédent) et celles obtenues avec une nouvelle formule calée seulement sur les bassins de la région.

Pour 6 des 10 régions le score est équivalent entre calage national et calage spécifique, on observe une amélioration apportée par le calage spécifique sur 3 régions et une légère dégradation sur une région.

Pour l'influence de la pente, on définit trois classes de pente (inférieure à 1%, comprise entre 1 et 2% ou supérieure à 2%) et, pour chaque classe, on compare la formule ajustée sur la totalité des bassins versants à une formule ajustée uniquement sur les bassins de la classe concernée.

On procède de la même façon pour l'influence de la superficie (3 classes de superficie).

Les résultats de la formule calée nationalement sont meilleurs sur les bassins plus petits et plus pentus, cependant, un calage spécifique par classe de pente ou de superficie n'apporte pas de plus-value.

Pour les influences des barrages, du karst et de la neige, on s'appuie sur les indices de confiance de la méthode Shyreg-debit élaborés par INRAE [4]. Pour chaque facteur d'influence, un indicateur compris entre 1 et 4 indique proportion du bassin versant influencée (1 : influence du facteur sur plus de 50% du bassin, 4 : influence du facteur sur moins de 5% du bassin).

La présence de barrage ou de karst ne semble pas avoir d'influence sur la qualité de l'estimation des temps de réaction et un calage spécifique n'améliore pas les résultats. La présence de neige semble corrélée avec la qualité de l'estimation (meilleurs résultats sur les bassins influencés par la neige), ce qui est probablement lié aux meilleurs résultats sur les bassins petits et pentus, mais un calage spécifique sur les bassins influencés par la neige dégrade les résultats.

4. Conclusion

L'étude menée a permis d'obtenir :

- une estimation du temps de réponse sur un échantillon de 968 bassins versants jaugés inférieurs à 500km², répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain,
- une formule empirique d'estimation du temps de réaction utilisable sur l'ensemble des bassins inférieurs à 500km² de la BNBV, plus fiable que les formules empiriques précédemment utilisées.

5. REFERENCES

- [1] Bressand François, Prise en compte du risque d'inondation torrentielle – Méthode de calcul des débits rares et exceptionnels sur des petits bassins versants naturel situés sur l'arc méditerranéen français (Formules Bressand-Golossov)
- [2] Organde Didier, Base Nationale des Bassins versants – Note explicative, 2013
- [3] Wasson J.G. et al., Les hydro-écorégions : une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la directive cadre européenne sur l'eau. 2001
- [4] Caruso A. et al. Notice sur les indices de confiance de la méthode shyreg-debit. Définition et calculs. 2013

LA PLATEFORME NATIONALE COLLABORATIVE DES REPERES DE CRUES, BILAN DE 7 ANS D’EXISTANCE ET PERSPECTIVES

Auteurs : FROMENTAL Anne-Marie¹, CAZAUBON Anaïs², DAUBAS Mathias³, LAVIE Romain⁴, LE DIRACH Pierre-Jakez⁵, MOULIN Christophe⁶, NEGRE Christophe⁷, PERON François⁸, PIOTTE Olivier⁹, SEMERY Mathieu¹⁰, ZUBER Félicien¹¹

^{1,3,11}Service central d’Hydrométéorologie et d’Appui à la Prévision des Inondations (MTECT/DGPR/SRNH), avenue Gaspard Coriolis, 31100 Toulouse, anne-marie.fromental@developpement-durable.gouv.fr, mathias.daubas@developpement-durable.gouv.fr

²Cerema Ouest 9 Rue René Viviani, 44200 Nantes, anais.cazaubon@cerema.fr

^{4,5}DRIEAT Île-de-France 21/23 Rue Miollis, 75015 Paris, romain.lavie@developpement-durable.gouv.fr, pierre-jakez.le-dirach@developpement-durable.gouv.fr

⁶Cerema Méditerranée 30 Rue Albert Einstein, 13290 Aix-en-Provence, christophe.moulin@cerema.fr

⁷DREAL Occitanie, 1 Rue de la Cité Administrative, 31000 Toulouse, christophe.negre@developpement-durable.gouv.fr

^{8,9}DREAL Nouvelle-Aquitaine 2 Rue Jules Ferry, 33200 Bordeaux, francois.peron@developpement-durable.gouv.fr, olivier.piotte@developpement-durable.gouv.fr

¹⁰DREAL Centre-Val de Loire 5 Av. Buffon, 45064 Orléans, mathieu.semery@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session : Prévision des crues et des inondations

Préférence : communication orale

Mots clefs : repères de crues, prévision des inondations, modélisation hydraulique, plateforme collaborative

1. Contexte

La plateforme nationale collaborative des repères de crues est le fruit de réflexions lancées dans le cadre du projet « prévision des inondations » initié par le réseau Vigicrues à la fin des années 2000 [1].

Outre leur intérêt technique pour la délimitation des emprises de zones inondées, les repères de crues sont également utiles et importants pour d’autres usages de la prévention et prévision des inondations. Les repères historiques, matérialisés par des plaques ou gravures sur le territoire sont autant de rappels visuels, entretenant une culture du risque d’inondation sur les territoires. Les repères éphémères, laissés et témoignages, relevés et nivelés à la suite d’événements récents sont des éléments indispensables pour la réalisation des études, modélisations hydrauliques visant à caractériser les phénomènes d’inondation.

Aussi, le référentiel national a été conçu pour intégrer tous les recensements de marques d’inondation : repères physiques, historiques mais également marques d’inondation sous toutes leurs formes.

Le site internet (<https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr/>) associé à la base de données a été ouvert fin 2016. L’originalité de l’initiative réside dans son fonctionnement collaboratif,

qui permet à tous, citoyens, collectivités, services de l’État et acteurs professionnels de la prévention des risques de contribuer au recensement.

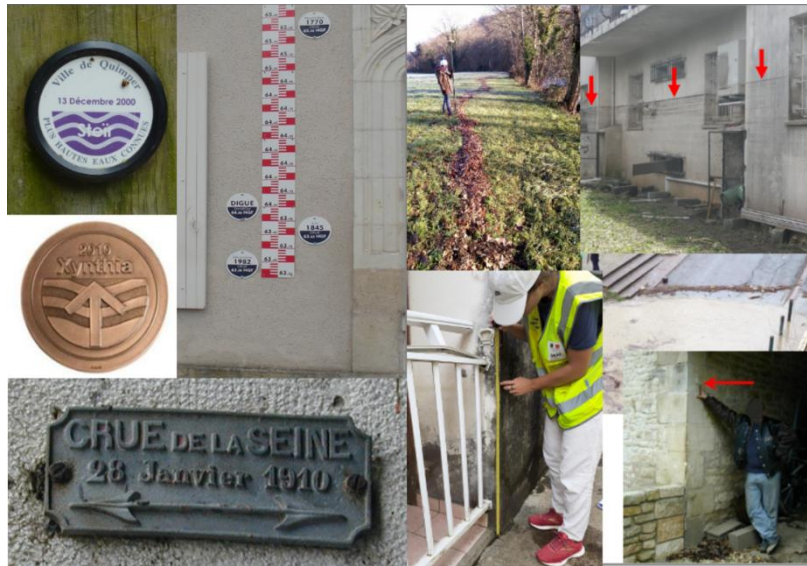


Figure 1: A gauche, exemple de repères historiques matérialisés par des plaques ou gravures, à droite exemple de repères éphémères laissés ou témoignages relevés à la suite d’événements

La vérification et la gestion des données sont assurées par les services de prévision des crues sur leur territoire (SPC) et quelques Établissements Publics Territoriaux de Bassins (EPTB) volontaires. Le fonctionnement de la démarche repose sur un travail en réseau et une formation régulière des différents acteurs. Les repères de crues sont mis à disposition du public conformément à la directive européenne Inspire.

Une nouvelle version de la plateforme a vu le jour fin 2022 sans remise en cause de ses principes de fonctionnement et du formalisme initial de la base de données [2].

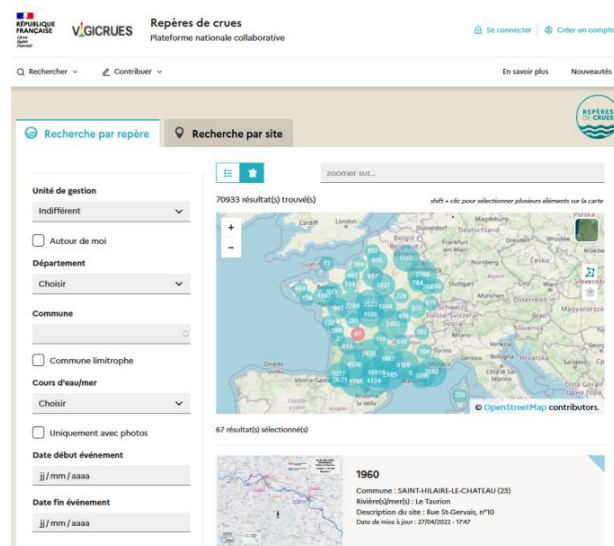


Figure 2: Plateforme nationale collaborative des repères de crues <https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr/>

2. Bilan de fonctionnement et analyse du patrimoine de repères de crues recensé

Au moment du lancement de l’outil en 2016, le principal point d’interrogation portait sur l’appropriation de la démarche collaborative. Après une première phase de rodage, le fonctionnement, basé sur différentes catégories d’utilisateurs et droits associés (contributeurs, contributeurs experts et gestionnaires de données) s’est progressivement consolidé. Les services gestionnaires garantissent actuellement la qualité des données sur la quasi-totalité du territoire. Des dynamiques de collaborations et un travail transversal entre services professionnels concernés (contributeurs experts généralement dans services de l’état et les collectivités) se sont mises en place et permettent d’inscrire le fonctionnement collaboratif de la plateforme dans la durée.

Par ailleurs, le contenu de la base ne cesse de s’enrichir. La base initiale comptait environ 20 000 repères issus essentiellement de la reprise des bases historiques des services régionaux sur la Garonne, la Loire et la Seine. Les recensements historiques et données d’archives continuent à alimenter la base. Cependant, le volume prépondérant des nouvelles contributions est maintenant davantage lié aux relevés de laisses de crues suite aux campagnes de relevés post-inondation.

Il y a actuellement environ 71 000 repères recensés sur l’ensemble du territoire.

Si le référentiel de la base est assez exhaustif et permet théoriquement le recensement de tout type de marques d’inondation pour tout type de phénomène d’inondation, il est plus difficile de s’assurer de la bonne intégration de toutes ces données. Par exemple les nouveaux repères posés par les collectivités ne sont pas systématiquement insérés dans la plateforme, il subsiste également probablement des gisements d’archives historiques qui n’ont pas encore pu être intégrées au recensement.

Des analyses statistiques seront proposées dans l’article, elles porteront sur la typologie des repères renseignés, leur répartition géographique et temporelle et permettront de mettre en avant les points forts et éventuelles lacunes du patrimoine de repères recensés dans la base nationale.

3. Usages des données et amélioration de la collecte

Le recueil, l’homogénéisation des recensements et la facile mise à disposition qu’offrent la plateforme ont permis de valoriser les données de repères de crues. Parmi les usages réguliers ou plus occasionnels des données de la plateforme, on retrouve des utilisations techniques et scientifiques notamment :

- La reconstitution de l’emprise de crues historiques passées, par exploitation directe de repères de crues (et éventuellement à d’autres sources de données telles que les prises de vue aériennes) et des données topographiques. Pour les services de prévision des crues, ces emprises, une fois rattachées à une cote à une station de référence peuvent alimenter le catalogue national de scénarii d’inondation Viginond pour la prévision des inondations [1].
- Le calage de modèles hydrauliques, utilisé au sein du réseau Vigicrues, pour produire des données de prévision des crues et pour déterminer les zones d’inondation potentielle liées à un niveau de crue. Des modélisations hydrauliques sont également utilisées par les services en charge de l’hydrométrie pour l’extrapolation des courbes de tarage.

- La réalisation de différents types d'études d'aménagement (document de prévention tels que PPRi, études pour la réalisation d'ouvrages, etc.), par les services de l'Etat (DDT), les collectivités, des bureaux d'études...
- L'utilisation dans le cadre d'opérations de recherche (par exemple sur la prévision immédiate des crues soudaines visant notamment à estimer les zones inondées à partir de méthodes hydrauliques).

La plateforme est également utilisée dans le cadre d'actions de prévention des inondations. Le recensement et la pose de nouveaux repères, souvent mises en œuvre par les EPTB dans le cadre de PAPI, sont facilitées par le recensement national.

Pour gagner en efficacité et garantir la qualité et la bonne bancarisation des relevés de laisses de crues post inondation, une préparation et une coordination des services est indispensable [3]. Encouragées par le SCHAPI, des démarches régionales d'organisation pour les relevés post-inondation se sont développées depuis 2016, et plusieurs services ont développé différents outils numériques facilitant la saisie des relevés terrain.

L'article reviendra sur plusieurs exemples d'utilisation récents de données de repères de la plateforme et présentera une synthèse de différentes démarches de facilitation de collecte post-inondation mises en place.

4. Conclusion et perspectives

Après sept ans d'existence on constate que la plateforme des repères de crues et son référentiel données ont été adoptés comme la référence nationale en matière de recensement de marques d'inondations. L'outil est original par son volet collaboratif et sans équivalent connu dans les pays étrangers. Ses usages sont variés dans le domaine du risque d'inondation. La base de données du recensement constitue un patrimoine très précieux qui ne cesse de s'enrichir. Il reste cependant difficile de s'assurer de l'exhaustivité du recensement. Des démarches visant à améliorer l'interfaçage et les flux de données avec les outils numériques de relevés terrain sont en cours. Elles devraient faciliter l'intégration des volumes croissants de laisses de crues dans la plateforme nationale.

5. REFERENCES

- [1] Prévision des inondations : gestion de crise et partage de l'information des zones inondées, Aurélie Escudier, Pierre-Adrien Hans, Christophe Astier and Jean-Luc Souldadié, La Houille Blanche, 5 (2016) 5-10
- [2] Vers une gestion collaborative des recensements de repères de crues, Congrès SHF/AFEPTB: «Gestion des risques d'inondation», Paris, 27-28 mai 2015 – Piotte et al.
- [3] Collecte d'informations sur le terrain suite à une inondation, Guide méthodologique, mai 2017, Cerema

**Retour sur vingt ans de recherches partenariales DGPR-INRAE
sur la prévision des crues et des inondations –
Avancées, valorisation et perspectives**

*Twenty years of applied research on flood and inundation forecasting -
Advances, transfer and perspectives*

Auteurs : PERRIN Charles Perrin^{1*}, ANDRÉASSIAN Vazken¹, BOURGIN François¹, DELAIGUE Olivier¹, DORCHIES David², DRAMAIS Guillaume³, FOUCHIER Catherine⁴, GARAMBOIS Pierre-André⁴, JANET Bruno⁵, JAVELLE Pierre⁴, LAGOUY Mickaël³, LANG Michel³, LE COZ Jérôme³, RAMOS Maria-Helena¹, RENARD Benjamin⁴, SCHAPI Paule⁵, TILMANT François¹

* *auteur correspondant*

¹ Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, 1, rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex

² INRAE, UMR G-Eau, 361 Rue Jean François Breton, 34090 Montpellier

³ INRAE, UR RIVERLY, 5 Rue de la Doua, CS 20244, 69100 Villeurbanne

⁴ INRAE, UR RECOVER, 3275 Route de Cézanne - 13100 Le Tholonet

² SCHAPI, 42 avenue Gaspard-Coriolis 31057 Toulouse Cedex 1

Choix du thème/session :

~~1/ Préparation et gestion de crise~~

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Crue, hydrométrie, prévision, avertissement

1. Contexte et objectif

La prévision des crues et des inondations est une composante majeure de la stratégie française de gestion des risques d'inondation (DGRP, 2014). Son développement trouve son origine il y a un peu plus de 20 ans dans la publication d'un rapport parlementaire sur les causes et les conséquences des inondations (Galley et Fleury, 2001), suite à diverses catastrophes ayant touché le territoire (Vaison-la-Romaine en 1992 ; l'Aude, l'Hérault, le Tarn et les Pyrénées-Orientales en 1999 ; la Somme en 2001). Ce rapport mettait notamment en lumière les capacités limitées des *services d'annonce des crues* (SAC) pour anticiper les événements, avec à l'époque une compétence davantage administrative que scientifique et technique, et une absence de coordination amont-aval de leurs actions. Parmi les 24 propositions du rapport figurait celle d'intégrer progressivement les services d'annonce des crues dans de véritables services de prévision organisés à l'échelle du bassin et non plus celle du département. Cela conduira en 2003 à la création du réseau des services de prévision des crues (SPC) et du service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations, le SCHAPI (Journal officiel, 2003).

Dès sa création, le SCHAPI a mis en place des partenariats avec différents opérateurs de recherche, pour l'accompagner dans sa stratégie de développement de méthodes et d'outils pour la prévision, mais aussi

dans le développement des compétences au sein du réseau des SPC. Un partenariat de recherche appliquée avec le Cemagref (devenu Irstea puis INRAE) a ainsi démarré dès 2003, et s’est poursuivi jusqu’à aujourd’hui. Cette dynamique de recherche partenariale de long terme a notamment permis :

- de développer la connaissance des débits en rivière par l’amélioration des techniques d’hydrométrie et leur mise à disposition dans la base de données nationale ;
- de mettre en place des chaînes de prévision pour la vigilance crues sur le réseau des cours d’eau surveillés par l’État ;
- de constituer des chaînes d’avertissement aux crues soudaines en dehors du réseau réglementaire.

L’objectif de cette communication est de retracer l’évolution de ce partenariat au cours des vingt dernières années, de présenter un bilan rétrospectif des principaux travaux menés, de mettre en lumière les principales avancées et les difficultés rencontrées, et de discuter des perspectives.

2. Principaux travaux

Au cours de la période 2003-2023, le SCHAPI a fait avancer de nombreux chantiers (voir par ex. Bachoc, 2011). Le réseau de prévision opérationnel actuel est radicalement différent de ce qu’il était il y a 20 ans, en termes d’organisation, de méthodes et d’outils, de compétences, de missions couvertes, etc. Cette évolution a connu quelques étapes clé, en lien notamment avec les évolutions des priorités stratégiques du SCHAPI.

La communication s’attachera à retracer l’évolution de différents outils et méthodes développés par INRAE au cours des vingt dernières années. Les travaux de développement seront illustrés sur quelques thèmes phares, notamment :

- l’amélioration de l’observation des débits en rivières, qui sont utilisés en temps réel par les outils de prévision : développement et qualification de techniques de mesure des crues (ADCP, LSPIV notamment) et développement de méthodes opérationnelles pour la quantification des incertitudes des jaugeages (dans Barème et QRevInt) et des courbes de tarage et produits hydrologiques (BaRatinAGE) ;
- l’amélioration des outils de traitement statistiques dans la banque HYDRO ;
- les modélisations hydrologiques pour la prévision des crues sur bassins jaugés, notamment l’outil GRP,
- la quantification des incertitudes associées aux prévisions, avec les approches de prévision d’ensemble et le module OTAMIN,
- la modélisation hydrologique distribuée sur bassins non jaugés, notamment avec le modèle AIGA (aujourd’hui intégré sous la plateforme SMASH).

Ces outils et méthodes ont été transférés pour des applications opérationnelles dans les services d’hydrométrie et de prévision des crues. Des échanges réguliers avec les utilisateurs opérationnels permettent de réaliser de nombreux retours d’expérience, d’identifier les limites des outils, et de les améliorer progressivement par des actions de recherche pour mieux répondre aux besoins opérationnels.

La communication mettra ainsi en relief la démarche de co-construction de solutions innovantes pour la prévision opérationnelle, le rôle joué par les différents acteurs et les gains obtenus par cette démarche.

3. Perspectives

La communication discutera des perspectives ouvertes aujourd’hui par ce partenariat, et les projets clés qui devraient structurer la démarche de recherche dans les prochaines années, à l’aune des défis soulevés par l’accroissement de l’occurrence et de l’intensité des phénomènes extrêmes.

4. Références

- [1] Bachoc, A., Garçon, R., Daly, F., Gautheron, A., Gaume, E., Perrin, C., Obled, C., Lepelletier, T. (2011). Besoins opérationnels et progrès actuels en matière de connaissance des phénomènes physiques dans l’hydrologie des crues. *La Houille Blanche*, 1 (2011) 14-21, <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/lhb/2011001>
- [2] DGPR (2014). Stratégie nationale de gestion des risques d’inondation. Ministère de l’écologie, 22 page. URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2014_Strategie_nationale_gestion_risques_inondations.pdf
- [3] Galley, R., Fleury, J. (2001). Rapport fait au nom de la commission d’enquête sur les cause des inondations répétitives ou exceptionnelles et sur les conséquences des intempéries afin d’établir les responsabilités, d’évaluer les coûts ainsi que la pertinence des outils de prévention d’alerte et d’indemnisation. Assemblée nationale, Rapport n°3386, Url : <https://www.assemblee-nationale.fr/11/rap-eng/r3386-01.asp>
- [4] Journal officiel (2003). Arrêté du 2 juin 2003 portant création du service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations, NOR : DEVE0210450A, URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2003/6/2/DEVE0210450A/jo/texte>, JORF n°129 du 5 juin 2003, Texte n° 27.

Le modèle LARSIM : de la prévision linéaire des crues à la prévision surfacique

Auteurs : ZILLHARDT Delphine^{1*}, DOMANGE Muriel¹, REIMINGER Eva¹, HUSSER Claude¹

* *auteur correspondant*

¹Service de Prévision des Crues Rhin-Sarre, DREAL Grand Est, 14 rue du Bataillon de Marche n°24, Strasbourg, France – prénom.nom@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

- 1/ ~~Préparation et gestion de crise~~
- 2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) : LARSIM ; modèle à bilan hydrologique ; prévision des crues ; prévisions surfaciques ; coopération internationale

Le modèle de bilan hydrologique LARSIM (Large Area Runoff SIMulation Model) est un modèle conceptuel spatialisé, c'est-à-dire que les processus complexes du système naturel sont reproduits par des concepts de modèles simplifiés, appliqués avec un maillage soit d'un kilomètre carré, soit à l'échelle des sous-bassins élémentaires. Pour chaque maille, le modèle effectue un bilan des sous-processus hydrologiques (interception, évapotranspiration, infiltration, écoulements, translation...), bilan croisé avec le réseau de stations de mesures hydrologiques.

Ce modèle est libre d'accès et perfectionné par une active communauté de développeurs. En particulier, il est utilisé par 17 centres de prévisions des crues répartis en Allemagne, en Suisse, en Autriche, au Luxembourg et en France.

LARSIM est notamment développé dans le cadre de la coopération internationale sur la Moselle et la Sarre en application d'un accord inter-gouvernemental signé en 1987 entre l'Allemagne, le Luxembourg et la France. Dans ce cadre, un programme de travail est établi chaque année ce qui a permis d'améliorer et de développer de nouveaux modules sur le traitement des incertitudes, la prise en compte de la neige, l'extrapolation des courbes de tarage, l'intégration des prévisions d'ensemble courte échéance pour les alertes à l'échelle des petits bassins versants...

En outre, chaque année est organisé un exercice international auquel participent l'ensemble des Services de Prévision des Crues (SPC) du bassin versant de la Moselle et de la Sarre. Les SPC utilisent le modèle LARSIM avec un même jeu de données et communiquent via la plateforme d'échanges (PLATIN MS).

Le domaine surveillé par le Service de Prévision des Crues Rhin-Sarre fait actuellement l'objet d'un recalage avec les données de l'ensemble des stations d'observations hydrologiques et météorologiques depuis 1998 mais aussi avec de nouvelles données pédologiques.

La présente communication a pour but de présenter :

- les différentes fonctionnalités de LARSIM pour la prévision des crues (linéaire)
- les améliorations apportées à la prévision des crues par ce nouveau recalage
- les possibilités de développement pour la prévision des crues (surfactive) à l'échelle des petits bassins versants.

Fiches réflexes : interface entre ouvrages en crue et gestion de crise

Reflex forms : interface between structures during floods and crisis management

Auteurs : REY Eugénie, BROUST Perrine, PERRIN Jordan¹,

¹Affiliation : France Dignes, 2 chemin des marronniers 38100 Grenoble, France,
contact@france-dignes.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise (La production, la collecte et la mise à disposition d'informations utiles pour la préparation et la gestion de crise / Les problématiques de gestion de crise et de coordination des différents acteurs impliqués).

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Ouvrages de protection contre les inondations, digue, système d'endiguement, communication, acteurs, gestion de crue, gestion de crise, fiches réflexes

1. Le rôle pivot du gestionnaire d'ouvrages et ses enjeux

Avec plus de 9000 km de digues, la France a construit au fil des siècles des ouvrages de protection contre les inondations visant à réduire l'impact de l'aléa et à protéger ses enjeux. Depuis la création de la compétence GEMAPI¹ en 2014, seule la structure compétente en matière de gestion de la prévention des inondations (item 5 de la GEMAPI) peut définir et gérer les systèmes d'endiguement² de son territoire. Les missions du gestionnaire sont la gestion et l'anticipation des crues, jusqu'à un niveau pour lequel il s'engage et au-delà duquel on passe en situation de crise. Le gestionnaire de systèmes d'endiguement assume donc la surveillance et l'entretien des ouvrages en période de routine et s'organise en interne pour anticiper une potentielle crue. Il met en place des consignes détaillant comment il suit ses ouvrages de protection en situation de crue, forme et mobilise ses équipes, et s'équipe du matériel nécessaire pour pouvoir intervenir. Lorsqu'un événement dépasse les engagements du gestionnaire et la capacité de protection de ses ouvrages, la situation passe alors de crue à crise. Bien que n'étant plus en charge de la gestion de l'évènement à ce stade, la structure gemapienne y a un rôle clé, que ce soit en anticipation de la crise, ou pendant celle-ci via la transmission d'informations sur « ses » ouvrages.

Conformément à son pouvoir de police³, le Maire, ou dans certains cas le Préfet, coordonne les services de secours pour gérer les situations de crise et protéger les enjeux d'une inondation. Parmi les éléments déclencheurs de la gestion de crise, le dépassement des niveaux de protection, de sûreté et de danger sur les ouvrages hydrauliques est une information clé (cf. figure 1). Ces niveaux sont déterminés par le gestionnaire des ouvrages hydrauliques via l'étude de danger réalisée pour la définition de chaque système d'endiguement. Le niveau de protection définit le débit ou la hauteur d'eau au-delà duquel les ouvrages ne permettent plus de garantir que la zone protégée restera « pied au sec », conformément à l'engagement du gestionnaire des ouvrages de protection contre les inondations.

¹ [Article L211-7](#) du code de l'environnement

² La notion de Système d'Endiguement a été introduite par le [Décret du 12 mai 2015](#)

³ Article L.2212-2 du Code Général des Collectivités Territoriales

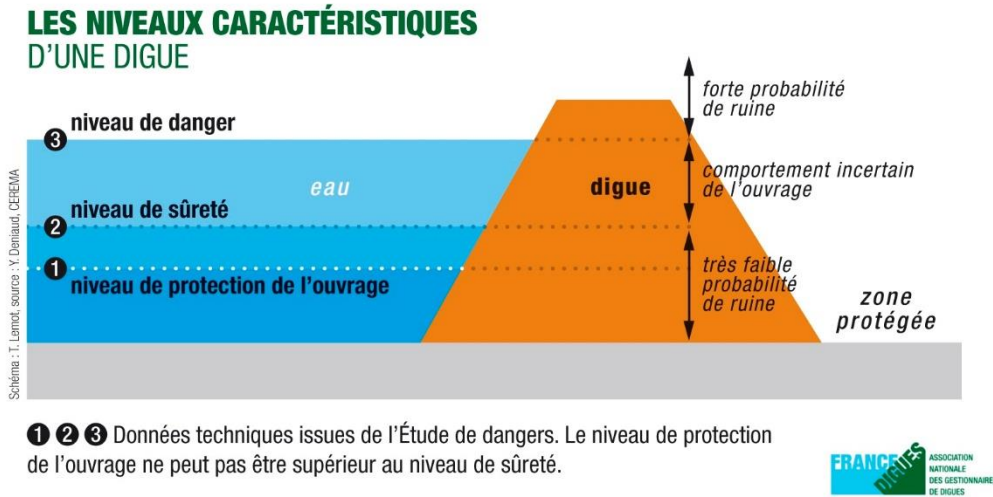


Figure 1 : Niveaux caractéristiques d'une digue

Durant toute la crise, le Maire et le Préfet peuvent avoir besoin d'accéder aux informations relatives aux ouvrages de protection contre les inondations de leur territoire : niveaux d'alerte, particularités de certains ouvrages hydrauliques, points de faiblesse identifiés, etc. Ces données vont être fournies par le gestionnaire des ouvrages, le plus clairement possible, sans restriction (probabilité, statistique, bruits, etc.). Il est ainsi un interlocuteur important en période de crue, d'autant plus si le niveau de protection risque d'être atteint ou en cas de défaillance du système (cf. figure 2).



Figure 2 : Interfaçage entre gestionnaire de crue et gestionnaire de crise – France Dignes

Au-delà de ce besoin opérationnel, l'enjeu pour le gestionnaire de digues est aussi de répondre à une obligation réglementaire mise à jour avec la publication de l'arrêté du 8 août 2022⁴. Ce texte précise les obligations documentaires et la consistance des vérifications et visites techniques approfondies des ouvrages hydrauliques autorisés ou concédés. Il est venu encadrer le contenu des attendus et notamment

⁴ Arrêté du 8 août 2022 précisant les obligations documentaires et la consistance des vérifications et visites techniques approfondies des ouvrages hydrauliques autorisés ou concédés, NOR : TREP2214612A

le document d'organisation (anciennement connu sous le nom "des consignes"). Ce document, exigé lors d'une demande d'autorisation de système d'endiguement, décrit l'organisation mise en place par le gestionnaire pour assurer la gestion du système d'endiguement, son entretien et sa surveillance. Cela nécessite des moyens humains et organisationnels. Ces missions sont à apprécier lors des différentes phases de vie de l'ouvrage, que ce soit en gestion courante, en période de crue ou d'évènement météorologiques ou encore en situation d'urgence. L'article 3 de l'arrêté fait aussi référence aux règles de transmission des informations du gestionnaire d'ouvrages vers les autorités compétentes, voire aux modalités d'alerte/de contact avec les services impliqués en cas d'urgence. A travers le document d'organisation, le gestionnaire doit donc avoir identifié :

- Les services à contacter (exemples : Maires, Préfets, autorités publiques, etc.) ;
- Son service chargé de transmettre les informations ;
- La nature, les modalités et les moyens de transmission de ces informations.

Les rendus réglementaires restant très complexes et peu accessibles dans l'urgence, le gestionnaire d'ouvrages de protection contre les inondations a un véritable enjeu de vulgarisation et de simplification des informations concernant ses ouvrages. Celui-ci doit donc mettre en place des outils pour transmettre ses informations vers les acteurs impliqués dans la gestion de crise.

2. Des situations inégales

Les gestionnaires d'ouvrages de protection contre les inondations sont souvent la clé de voûte des informations relatives aux inondations par débordement : le gemapien connaît ses ouvrages, leurs limites et capacités, et l'impact potentiel des inondations sur la/les zone(s) protégée(s) par leur(s) système(s) de protection. Les gestionnaires de crise, quant à eux, ont besoin d'anticiper et de connaître l'aléa et les risques.

Certains gestionnaires d'ouvrages, pour la plupart présents de longues dates sur leur territoire, ont engagé des démarches auprès des communes et des autres acteurs impliqués dans la gestion de crise pour réfléchir aux données utiles à transmettre en période de crue/crise, mettre en place des procédures d'information, de communication, de surveillance, etc. Cela suppose, en amont, un important travail de coordination avec les communes notamment pour clarifier la répartition des rôles de chacun, voire des responsabilités. Cela peut mener à la signature de conventions pour la mise en place de gestion déléguée, de mise à disposition de personnel communal ou pour réaliser des manœuvres sur le terrain.

Les « néo-gestionnaires », arrivés dans le domaine de la gestion des ouvrages de protection depuis la création de la compétence GEMAPI en 2018, sont plus démunis pour transmettre ces informations et faire le lien avec les acteurs de la gestion de crise. Ces structures parfois très jeunes et/ou ayant des équipes restreintes doivent s'appropriier l'ensemble de leurs missions, dont la gestion d'ouvrages en crue et le lien avec le gestionnaire de crise. Symptôme de leur création récente, ces acteurs sont peu connus sur leur territoire, ajoutant de fait des difficultés à la bonne mise en place de leurs obligations.

3. Des fiches réflexes, un outil de transmission d'informations de la gestion de crue vers la gestion de crise

L'association France Dignes⁵ a pour mission, depuis 2013, de structurer et consolider la profession de gestionnaire de digues en construisant un réseau qui leur est dédié. Ce réseau se base, entre autres, sur les échanges et le partage d'expériences pour répondre aux besoins des gestionnaires (connaissances,

⁵ www.france-dignes.fr

compétences, bonnes pratiques, etc.). Elle réunit aujourd’hui plus d’une centaine d’adhérents, regroupant ainsi des syndicats mixtes, EPTB, collectivités ou autres structures ayant la compétence GEMAPI.

Dans ses missions, France Dignes identifie avec son réseau des nœuds sur lesquels travailler pour faire évoluer la profession des gestionnaires de digues. C’est ainsi que sont régulièrement montés des groupes de travail (GT) afin de proposer un support d’échanges et de travail entre ses membres sur des thématiques identifiées. Dans ces groupes, des travaux sont menés pour élaborer des outils à destination des gestionnaires, que ce soit par exemple la rédaction de guides, la clarification de la réglementation (via des échanges avec le Ministère), la rédaction de notes méthodologiques, etc.

Dans ce cadre, un groupe de travail intitulé « astreinte et anticipation de crue » a été créé début 2023 et réunit, dès son lancement, une vingtaine d’adhérents. Il fait suite à plusieurs retours des adhérents sur leurs difficultés dans leur rôle de transmission d’informations lisibles vers les gestionnaires de crise. Ce groupe vise à apporter des outils aux gestionnaires pour favoriser les échanges d’informations entre leurs structures et les acteurs impliqués dans la gestion de crise, et ainsi répondre aux obligations de l’arrêté du 8 août 2022. En concertation avec le réseau, le GT ambitionne d’élaborer des fiches réflexes d’ici la fin d’année 2023. Ces documents supports viseront à mieux cadrer les informations que les gémapiens transmettent aux partenaires et services en amont et pendant une crue. Ces supports, ou « trames », ainsi élaborés seront à s’approprier par les structures gémapiennes et personnalisables. L’enjeu pour le gestionnaire de digues sera de les adapter à son territoire, en fonction principalement des besoins de « ses » acteurs impliqués dans la gestion de crise. Cela suppose donc une concertation au préalable avec les communes, le SDIS, les RDI (référénts départementaux pour l’appui technique à la gestion des crises d’inondation), etc., pour identifier leurs besoins et clarifier les moyens de transmission de l’information. In fine, l’objectif de ces fiches réflexes est donc une appropriation rapide par ces différents acteurs des informations techniques issues des études réalisées sur les ouvrages. Toutes autres informations pratiques qui seraient utiles au Maire pourraient être ajoutées à ces fiches.

En conclusion, ces fiches auraient le double avantage :

- de donner un support de réflexion et de concertation aux acteurs pour la phase de préparation, en amont des périodes de crue/crise ;
- de permettre à chacun de s’approprier rapidement et efficacement les informations relatives aux ouvrages en période de crise/d’urgence.

Le groupe de travail réunit aujourd’hui à la fois des gestionnaires ayant déjà mis à l’épreuve leurs outils, et des « néo-gestionnaires » qui pourront orienter les travaux selon leurs besoins. Il sera certainement envisagé que le groupe intègre des non-adhérents pour impliquer des communes, Préfectures, experts, etc. Ces derniers auront ainsi la possibilité de relayer leurs réflexions dès la phase de conception des outils.

Les échanges au sein de groupe seront menés en visioconférence et en présentiel, et aboutiront à préciser ce projet de fiches réflexes. Une méthode de travail sera ainsi définie collectivement, avec un calendrier d’actions, pour in fine aboutir à une première ébauche de documents avant la fin d’année. L’association propose donc de présenter le fruit de ce travail lors du colloque SHF d’automne 2023. Cela permettra d’une part de recueillir les avis de la communauté scientifique sur ces premiers supports, et d’autre part d’informer de leur existence.

4. REFERENCES

Arrêté du 8 août 2022 précisant les obligations documentaires et la consistance des vérifications et visites techniques approfondies des ouvrages hydrauliques autorisés ou concédés, NOR : TREP2214612A

CEPRI Centre Européen de Prévention du Risque d’Inondation. « *Les digues de protection contre les inondations, L’action du maire dans la prévention des ruptures* ». 2008. 47 p. Les guides du CEPRI.

CEPRI Centre Européen de Prévention du Risque d’Inondation. « *Les ouvrages de protection contre les inondations, S’organiser pour exercer la compétence GEMAPI et répondre aux exigences de la réglementation issue du décret du 12 mai 2015* ». 2017. 100 p. Les guides du CEPRI.

Cerema. « *Caractérisation de systèmes d’endiguement à l’heure de la GEMAPI - Outils et retours d’expérience* ». Cerema, 2021. Collection : Expériences pratiques ISBN : 978-2-37180-513-2.

France Dignes. « *Note explicative des notions techniques et réglementaires liées au système d’endiguement* ». 2023.

France Dignes (2023). « *GT/GE – Astreinte et anticipation de crue* », Rubrique « *Cotech et groupes de travail* ». www.france-dignes.fr

Approche probabiliste de prévision immédiate de dépassements de seuils de précipitations à l'échelle communale

Probabilistic approach for nowcasting of rainfall threshold exceedance at the district scale

Auteurs : WARNAN Adrien^{1*}, BOUTTIER François², MONTMERLE Thibaut³, TZANOS Renaud⁴

¹MÉTÉO-FRANCE (DIROP/PI), adrien.warnan@meteo.fr

²MÉTÉO-FRANCE (CNRM/GMME), francois.bouttier@meteo.fr

³MÉTÉO-FRANCE (DIROP/PI), thibaut.montmerle@meteo.fr

⁴MÉTÉO-FRANCE (DIROP/PI), renaud.tzanos@meteo.fr

Choix du thème/session :

~~1/ Préparation et gestion de crise~~

2/ Prévision des crues et des inondations

Mots clefs :

Prévision Ensembliste – Dépassement de seuils de pluie – Échelle communale

1. Introduction

La prévision des pluies à courte échéance est un enjeu pour de nombreux professionnels ainsi que pour le grand public. Dans ce cadre, différents produits de prévision liés aux précipitations ont été développés à Météo-France jusqu'à une échéance de 3h. Ces produits se basent sur des extrapolations d'images pour les premières échéances, puis sur les images simulées par le modèle de prévision numérique AROME-PI. La méthode PIAF-RR a été développée pour fusionner de manière optimale ces deux sources de données, via l'attribution de poids déduits de statistiques sur leur performance respective récente.

Les productions PIAF-RR déterministes opérationnelles sont utilisées pour générer des ensembles de prévisions pour les trois applications que nous présentons ici : extension à 3h du produit « Pluie dans l'Heure », fourniture de scénarios pour le forçage hydrologique, avertissement de risques pluviométriques.

2. Prévisions de dépassement de seuil de précipitation à l'échelle communale

Actuellement, le produit public « Pluie Dans l'Heure » (PDH) de Météo-France fournit une prévision déterministe à l'échelle de la commune à échéance maximale d'une heure, basée sur l'extrapolation de la dernière lame d'eau ANTILOPE 5 min observée, issue d'une fusion entre la lame d'eau déduite d'observations radars et de pluviomètres. Afin de prolonger l'échéance au-delà d'une heure, une approche probabiliste utilisant PIAF-RR a été élaborée.

Les prévisions PIAF-RR sont tout d’abord perturbées spatialement de manière anisotropes selon le déplacement des précipitations prévues. Ce pseudo ensemble est complété par des prévisions antérieures de même validité.[1]. Des cartes de probabilités sont ainsi produites pour chaque seuil utilisé par PDH et pour chaque échéance, en considérant des cumuls de profondeurs croissantes afin de représenter une partie de l’incertitude temporelle. Des quantiles, identifiés comme optimaux en termes de scores, sont appliqués pour traduire les distributions de probabilité en information d’apparence déterministe plus compréhensible. Une agrégation communale de ces données est ensuite effectuée et fournit des probabilités de non-pluie/pluies faibles/modérées/fortes, ainsi qu’une valeur privilégiée. La figure 1 montre un exemple de prévision de ces différents paramètres pour la commune de Die, la figure 2 une cartographie pour une échéance donnée.

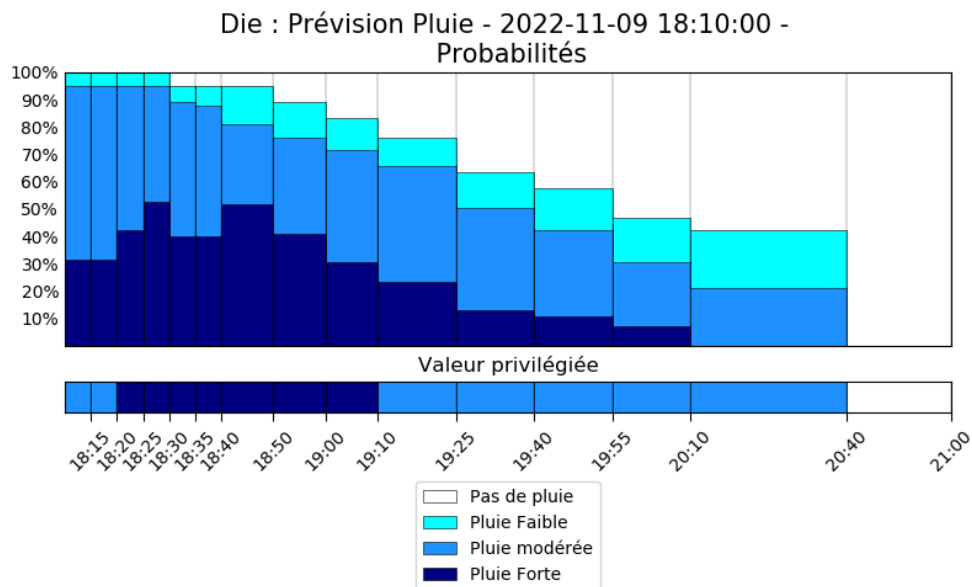


Figure 1: Exemple de la prévision probabiliste de pluie sur une commune de la Drôme (Die 26113) en novembre 2022, La partie haute du graphe montre la probabilité de chaque classe d’intensité sur une échéance donnée (les zones blanches correspondent à la probabilité de non pluie). La partie basse du graphe montre la valeur privilégiée résultant de la distribution des probabilités. Afin de tenir compte des incertitudes temporelles, les échéances sont inégalement réparties.

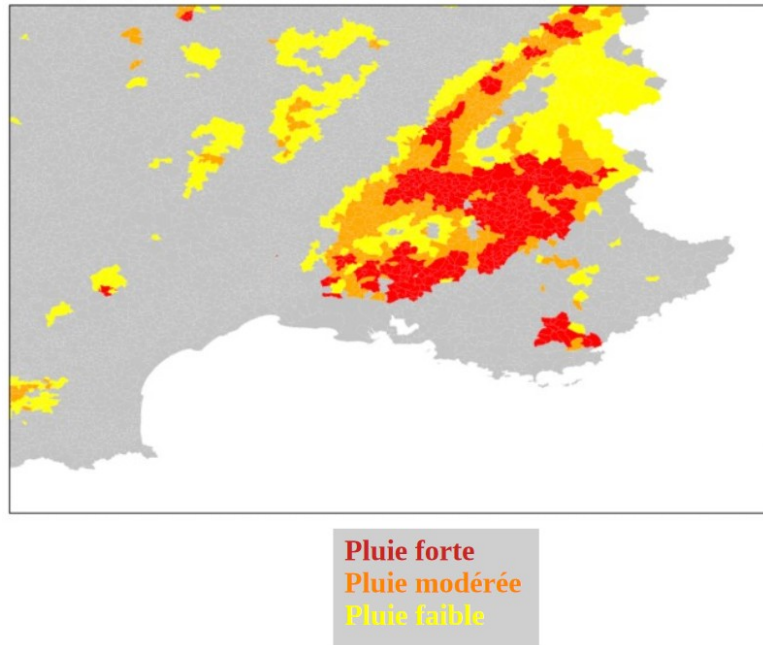


Figure 2: Exemple de prévision de valeur privilégiée à échelle communale sur le sud-est de la France - 9 nov. 2022 à 17h00 locales

3. Prévision des crues et inondations

Une extension à la prévision des crues et inondations à l'échelle communale s'appuie directement sur cet outil de génération d'ensemble de scénarios : elle vise principalement à mettre à disposition des hydrologues des scénarios complets de prévisions à la résolution du km², à une fréquence de 15 min jusqu'à 3 h d'échéance. Pour cette application, une version de PIAF-RR, basée sur l'extrapolation de la lame d'eau Antilope 15 min pour les premières échéances, a été spécifiquement mise en place. Les mêmes méthodologies de perturbations anisotropes et de time-lagging sont utilisées pour générer des ensembles d'une trentaine de membres.

Les avantages d'une telle méthode ensembliste, basée sur des champs de déplacements radar et réactualisée toutes les 15 min, sont notamment le potentiel à discriminer des cas de stationnarité fréquemment impliqués lors d'épisodes de crue-éclair, ainsi que l'attribution d'un niveau de confiance à accorder à un risque de dépassement de seuils engendrant des conséquences importantes. Cela implique une modélisation des taux de détections et de fausses alarmes, qui sera un point clé de l'utilisation optimale de l'information probabiliste dans un contexte de production d'alertes sous forte contrainte temporelle.

4. Enrichissement de l'information APIC

Une troisième application vise le calcul d'une tendance à l'aggravation dans les 3h d'un APIC observé. Les APIC¹ visent à avertir le grand public (via l'interface de visualisation apic-vigicruesflash.fr) et des usagers institutionnels abonnés au service (via l'interface d'abonnement apic-pro.meteofrance, service partagé avec VigicruesFlash) de précipitations exceptionnelles observées à l'échelle de la commune.

¹ Avertissement de Précipitations Intenses à l'échelle des Communes

Leur calcul se base actuellement (i) sur des comparaisons de cumuls de précipitation de différentes profondeurs avec les valeurs climatologiques SHYREG correspondantes fournies par l’INRAE, (ii) sur l’agrégation communale des dépassements de seuils ainsi diagnostiqués.

De la même manière que pour l’application précédente, la configuration ensembliste en cours de test se base sur la génération, toutes les 15 minutes, de pseudo-membres à partir de la version de PIAF-RR basée sur Antilope 15 min. Les différents cumuls prévus par chacun des membres, correspondant aux profondeurs utilisées par les APIC, sont calculés aux différentes échéances, puis comparés aux valeurs SHYREG pour différentes durées de retour. Des cartes de quantiles de dépassement de seuils de durée de retours sont ainsi générées à chaque échéance, puis agrégées à l’échelle de la commune. Le calcul d’une telle probabilité de dépasser des seuils extrêmes dans les 3h sur une commune donnée permet d’envisager un enrichissement de l’avertissement sur observation déjà envoyé aux abonnés du service APIC.

5. CONCLUSION

Une approche probabiliste permet de prendre en compte l’incertitude et la stabilité d’une prévision à la fois dans l’espace et dans le temps grâce à un ensemble de membres générés avec des méthodes adaptatives. Cet atout peut s’avérer être un des apports majeurs de cette approche.

L’agrégation de l’information probabiliste à l’échelle communale permet quant à elle d’associer une distribution de ces probabilités à une zone de surveillance, ce qui permet par exemple d’attribuer une tendance d’évolution à une alerte existante APIC tout en lui afférant un niveau de confiance.

Les perspectives d’intégration de ces données apportent une nouvelle entrée pour les modèles hydrologiques ainsi qu’une prévision associée à un phénomène en cours ouvrant la voie d’une possible anticipation plus précoce d’épisodes parfois non détectés.

6. REFERENCES

- [1] Osinski, R. and F. Bouttier : Short-range probabilistic forecasting of convective risks for aviation based on a lagged-average-forecast ensemble approach. *Meteorol. Appl.* 25 : 105-118 (2018) <https://doi.org/10.1002/met.1674>

Evolutions récentes du systèmes APIC-VigicruesFlash *Recent advances of the APIC-VigicruesFlash system*

Auteurs : TZANOS Renaud^{1*}, MONTMERLE Thibaut², BELLEUDY Anne³

¹Météo-France (DIROP/PI), renaud.tzanos@meteo.fr

²Météo-France (DIROP/PI), thibaut.montmerle@meteo.fr

³SCHAPI, anne.belleudy@developpement-durable.gouv.fr

Choix du thème/session :

1/ Préparation et gestion de crise

Mots clefs : avertissements, pluies exceptionnelles, crues soudaines

1. Introduction

Les APIC¹ permettent de prévenir un usager abonné au service de pluies exceptionnelles observées et d’en informer le grand public via un site web dédié. Ils sont complétés par les avertissements aux crues soudaines délivrés par le produit VigicruesFlash (VF) mis à disposition par le SCHAPI. L’ensemble du service est mis à jour toutes les 15 min. Une première plateforme de visualisation est disponible pour le grand public (apic-vigicruesflash.fr), une deuxième a été développée spécifiquement pour l’institutionnel (apic-pro.meteofrance.fr).

Nous présenterons les récentes évolutions de chacune des deux productions amonts, ainsi que celle des plateformes. Pour APIC, une révision de la méthode de calcul, l’ajout d’une nouvelle catégorie « Pluies exceptionnelles » et l’utilisation de nouvelles lames d’eau en entrée de l’algorithme pour l’outre-mer ont été effectués. VigicruesFlash est désormais accessible sur de nouveaux tronçons non instrumentés. Les interfaces se sont dotés de nouvelles fonctionnalités, notamment de divers diagnostics disponibles pour les abonnés au service.

2. Production amont APIC

Les APIC se basent sur l’agrégation au niveau communal des cartes d’aléa pluviométrique AIGA-Pluvio, issus d’un croisement entre des lames d’eau de différentes profondeurs de cumul à résolution kilométrique avec les valeurs climatologiques SHYREG [1] correspondantes. Le produit APIC est proposé depuis 2011 en métropole (avec une extension à toutes les communes depuis juillet 2021) et depuis 2015 à la Réunion. Il reste en test aux Antilles et en Nouvelle-Calédonie.

Son calcul a récemment subi les modifications suivantes :

- seules les profondeurs 1, 2, 3 et 4 h sont désormais considérées. Les profondeurs 6, 12 et 24h, historiquement utilisées pour tenir compte des phénomènes d’accumulation (risques hydrologiques ou ruissellement par saturation des sols), ne sont en effet plus utiles depuis que l’information VigicruesFlash est proposée conjointement
- une nouvelle classe « pluies exceptionnelles », exploitant les durées de retours 100 ans, a été rajoutée

L’impact de ces modifications sur la génération d’avertissement sera illustré pour des situations fortement précipitantes et pour chaque niveau de sévérité.

1 Avertissement de Pluies Intenses à l’échelle des Communes

La récente mise à disposition sur certains domaines ultra-marins de la lame d'eau ANTILOPE, issue d'une fusion entre les lames d'eau déduite des radars de Météo-France et de divers pluviomètres, a de plus permis d'améliorer les productions AIGA et APIC sur les Antilles, la Réunion et la Nouvelle Calédonie. La prise en compte de cette nouvelle lame d'eau a notamment permis d'étendre largement la couverture de service.

3. Production amont VigicruesFlash

La production amont Vigicrues Flash repose sur un modèle hydrologique développé par INRAE. Ce service est opérationnel depuis 2017 et la production amont a connu d'importantes évolutions en 2021 :

- Changement de modèle hydrologique. Vigicrues Flash utilise maintenant une version à deux paramètres et en Lag0 (pas de routage) du modèle distribué SMASH [2].
- Alimentation par la lame d'eau ANTILOPE 15 minutes.

Comme pour la version précédente, les débits simulés en temps réel sont comparés, pour chaque bassin à des seuils issus d'un rejeu sur 22 ans, afin de détecter un risque de crue forte ou très forte. Ce risque est ensuite agrégé à l'échelle des communes. Ces évolutions ont permis d'étendre largement la sélection des communes éligibles au service.

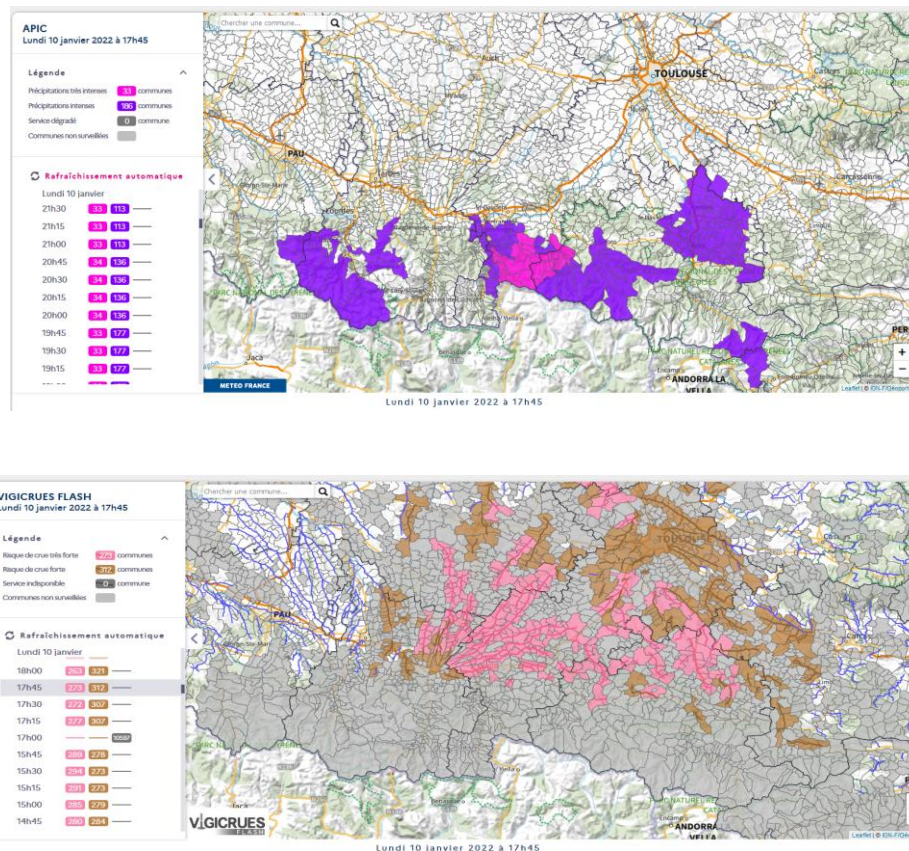


Figure 1: Exemple de visualisation des APIC (haut) et VigicruesFlash (bas) pour le cas du 10 janvier 2022 sur le piémont Pyrénéen

4. Interfaces APIC-VF

L'interface de visualisation apic-vigicruessflash.fr reste accessible depuis les sites vigilance.meteofrance.fr (onglet « précipitations intenses ») et vigicruess.gouv.fr. Depuis le site d'abonnement apic-pro.meteofrance.fr, divers usagers (préfectures, communes, intercommunalités, opérateurs de service, gestionnaires de crise) peuvent prendre jusqu'à 5 abonnements APIC ou VigicruessFlash. Pour chaque abonnement, ils peuvent définir une zone de surveillance constituée de grains communaux ou départementaux, et désigner différents destinataires des avertissements qui seront envoyés par SMS, mail ou appel vocal lorsqu'un APIC ou un tronçon VigicruessFlash s'« allumera » sur un des grains surveillés. Il y a actuellement plus de 12 000 abonnés au système.

Ces deux interfaces ont été totalement revues en 2021 à l'occasion du déploiement de la V2 du système APIC-VF. Depuis, une phase de consultation vers divers usagers a permis d'identifier différents besoins pour chacune des deux interfaces. Pour y répondre, plusieurs évolutions importantes ont été récemment implémentées :

- améliorations ergonomiques diverses,
- développements de nouveaux outils d'administration,
- mise à disposition d'un mode rejeu et de divers diagnostics permettant d'analyser une situation passée.

Une présentation de ces nouvelles fonctionnalités sera faite, et les perspectives d'évolutions seront discutées. Il s'agira également de prendre en compte les récentes avancées des productions amonts, notamment les APIC « exceptionnels ».

5. REFERENCES

- [1] Arnaud P., Lavabre J., Sol B. et Desouches Ch. (2008) – Regionalization of an hourly rainfall generating model over metropolitan France for flood hazard estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 53 (1) 34-47.
- [2] D. Organde, P. Javelle, J. Demargne, M. Jay-Allemand, J.A. Fine, and P. Arnaud. Méthode AIGA : vers une modélisation hydrologique au pas de temps infra-horaire continue et totalement distribuée. In *De la prévision des crues à la gestion de crise*, page 9, Avignon, France, November 2018. Société Hydrotechnique de France. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02608804>.

INFO-CRUE : PRÉVISION SPATIALISÉE DES INONDATIONS AU QUÉBEC

Auteurs : LAVOIE, Audrey^{1*}, LACHANCE-CLOUTIER, Simon¹, TURCOTTE, Richard¹
* *auteur correspondant*

¹ Ministère de l’environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Gouvernement du Québec, Canada, e-mail:

audrey.lavoie@environnement.gouv.qc.ca

Choix du thème/session :

Prévision des crues et des inondations

Mots clefs (2 à 3 minimum) :

Prévisions des inondations; prévisions en milieux non-jaugés; hydrologie.

1. Le projet INFO-Crue et les objectifs de prévision cartographique

En 2017 et 2019, le Québec a vécu deux des plus grandes inondations de son histoire. Ces inondations ont affecté des milliers de personnes en endommageant des bâtiments et en perturbant de nombreuses activités critiques pour le Québec (transport, agriculture, commerce, etc.). Ces événements ont rappelé l’importance des risques liés aux inondations au Québec et mis en évidence l’importance d’en améliorer les outils en permettant la gestion. Dans cette optique, le gouvernement du Québec a mis en branle le projet INFO-Crue dont l’un des deux principaux objectifs est de fournir des prévisions cartographiques des étendues et profondeurs d’inondation dans une portion significative du Québec habité. Le défi est grand puisque les Québécois habitent un territoire vaste où sont présents une multitude de rivières et de lacs. Il implique de fournir des prévisions hydrologiques et hydrauliques des plusieurs secteurs où peu ou pas de données sont disponibles. Pour la prévision des débits en particulier, il devient essentiel de déployer une approche permettant de réaliser des prévisions dans des secteurs non jaugés sachant qu’une vaste majorité des endroits où la cartographie des inondations est pertinente ne disposent pas de stations hydrométriques.



Figure 1: Territoire qui sera potentiellement couvert par une cartographie prévisionnelle

2. Prévisions hydrologiques en milieux non jaugés

La mise sur pied d’un système de prévision cartographique a nécessité des changements importants au niveau de la prévision hydrologique qui, jusqu’alors, se limitait aux sites de stations hydrométriques. Depuis leur mise en place au début des années 2000, les prévisions hydrologiques sont émises par le ministère de l’environnement qui s’occupe d’assimiler et de valider chaque jour les débits simulés par les modèles hydrologiques. Ce mode de fonctionnement présente plusieurs avantages dont : une assimilation de qualité supérieure, la prise en compte de spécificités/contraintes locales ainsi qu’un plein contrôle sur la prévision qui est émise. À moyen terme, ce mode de fonctionnement, où un prévisionniste est amené à interagir directement avec les modèles dans le but d’émettre une prévision localement, est appelé à se poursuivre bien que des travaux aient été entrepris afin d’explorer d’autres modes de fonctionnement.

Au fil des ans, le nombre de sites, où une prévision de débit est émise quotidiennement, a continuellement augmenté pour atteindre plus de 120 sites en 2022. La prévision à chacun de ces sites s’appuie sur une implantation locale d’un modèle hydrologique. Ce nombre demeure toutefois largement insuffisant pour répondre aux besoins du projet INFO-Crue dans lequel on prévoit déployer une cartographie prévisionnelle sur près de 15 000 km (Figure 1) de rivière au Québec.

Puisqu’il n’est pas réaliste d’augmenter de façon similaire le nombre de point de prévisions expertisés, le gouvernement du Québec s’est mis à la recherche de solutions permettant de produire des prévisions de débits distribuées sur un grand nombre de tronçons non-jaugés. L’un des principaux enjeux est d’offrir une prévision qui demeure spatialement cohérente avec les prévisions validées par l’équipe de prévisionnistes et actuellement diffusées aux quelques 120 sites de prévisions hydrologiques.

C’est dans cette optique que le produit d’analyse de la prévision en milieu non-jaugé a été développé. Ce produit vise à combiner les prévisions open-loop (non-assimilée) issues d’un modèle hydrologique distribué couvrant le Québec méridional (Figure 2) aux prévisions expertisées par les prévisionnistes de sorte à offrir un produit de prévision spatialement cohérent. Cette combinaison est produite via la méthode d’interpolation optimale qui est une méthode d’interpolation numérique permettant de combiner des données disponibles localement aux données issues d’un champ d’essai distribué spatialement. L’approche utilisée en prévision s’inspire directement de l’approche de Lachance-Cloutier et al.(2017) utilisée en reconstruction des débits historiques au Québec.

La performance de l’approche non jaugée a été évaluée à partir de re-prévisions effectuées sur une période s’étendant du 2018-10-01 au 2022-03-01 pour un total de 87 points de prévisions en régime naturel (exempt de l’influence de barrages). Les résultats obtenus en validation croisée de type «leave-one-out» (Analyse-L1O) montre que l’utilisation de l’analyse est préférable à l’utilisation de la prévision Open-Loop dans la quasi-totalité des cas pour les jours de prévisions 1 et 2 (figure 3). Le résultat de l’analyse est également spatialement cohérent avec la prévision expertisée validée par les prévisionnistes et qui est disponibles à certains sites seulement (figure 4).

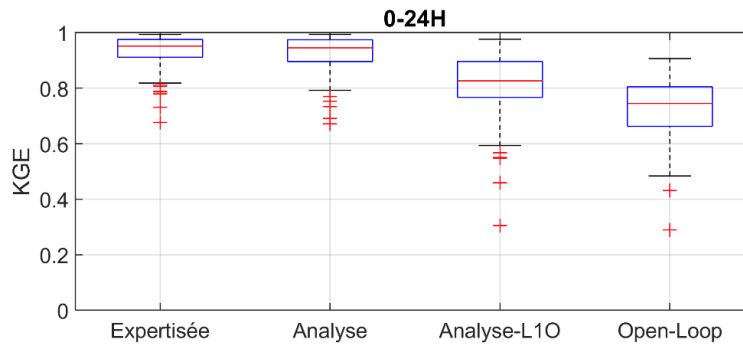


Figure 3 : Distribution du KGE obtenu aux 87 sites de prévisions pour le premier jour de prévision

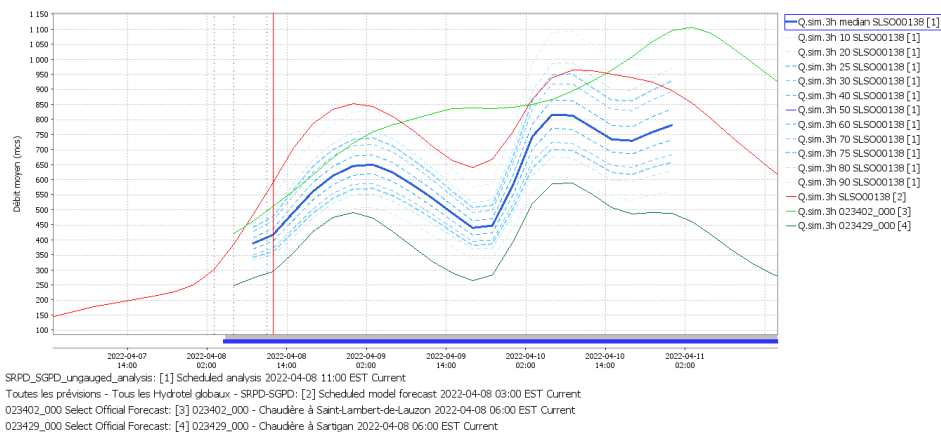


Figure 4 : Prévision champ d'essai (rouge) et résultats de l'analyse (bleu) à un tronçon de rivière situé à mi-chemin entre 2 stations hydrométriques – amont (vert foncé) et aval (vert lime)

3. Conclusion

La présentation proposée portera sur la description du contexte des inondations au Québec, du projet INFO-Crue et de ses produits prévisionnels finaux, de l'approche et des outils de prévisions hydrologiques et des ajouts actuellement en rodage pour effectuer de la prévision dans des secteurs non jaugés. Une première analyse, encore à l'étape préliminaire, sera aussi présentés.

La disponibilité d'outils tels que ceux développés dans le cadre du projet INFO-Crue sur une grande partie du Québec habité, et pouvant être bonifiés à long terme, est l'une des fondations sur lesquelles s'appuiera la gestion des inondations dans le futur. Il est important pour le gouvernement du Québec de communiquer ses façons de faire et d'apprendre des pratiques hors-Québec dans l'optique de faire des choix scientifiques adéquats dans le domaine.

Référence

Lachance-Cloutier, S., Turcotte R., Cyr, J.F. (2017). Combining streamflow observations and hydrologic simulations for the retrospective estimation of daily streamflow for ungauged rivers in southern Quebec (Canada). Journal of Hydrology. 550. 294-306. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.05.011

Depuis 1979, la Ville de Paris a construit un réseau piézométrique dense pour répondre aux différentes contraintes et interrogations liées au sous-sol parisien, tant géologique qu'humain. Quatre problématiques ont guidé le choix du nombre et des implantations des piézomètres : la stabilité de la butte Montmartre, les variations de pompage et leur influence sur les nappes sous Paris, l'influence des crues sur les sous-sols parisiens et les risques de mouvements de terrain liés à la dissolution des gypses ludien et ante ludien.

En ce qui concerne les crues de la Seine, ces dernières entraînent une remontée du niveau des nappes qui peut se traduire par des venues d'eaux importantes dans les sous-sols, une détérioration des ouvrages par des sous-pressions ou des embarquements de fines, ainsi qu'une déstabilisation des carrières les plus proches de la Seine. De plus, après un pic de crue de la Seine, les nappes restent durablement chargées au-dessus du niveau d'avant crue, et les effets d'un nouveau pic de crue se manifestent alors plus rapidement. Ainsi, dans le cadre de ses missions de prévention des risques liés aux sous-sols, l'Inspection générale des carrières suit, à Paris et sur le lit majeur de la Seine, l'évolution des nappes pendant et après ses crues, localise les zones sensibles et fournit à l'exécutif municipal des informations pertinentes pour aider à ses décisions.

Historiquement, les niveaux d'eau étaient mesurés manuellement une fois par mois et quotidiennement en période de crue (1995, 2001...). À partir de 2016, les premiers appareils enregistreurs et télé-transmetteurs ont été installés (23 appareils de télé-relève en 2016). Ils ont permis de suivre plus précisément la dynamique des nappes en augmentant la fréquence de mesure à une cadence biquotidienne et de consulter la donnée à distance. Lors du premier Programme d'Action et de Prévention des Inondations (PAPI) de la Seine et de la Marne Francilienne, le réseau d'enregistreurs s'est développé dans la plaine alluviale et dans d'autres secteurs influençables par les crues. À la fin de ce 1^{er} PAPI, l'IGC comptait 250 appareils de télé-relève sur les 310 piézomètres constituant le réseau complet dans Paris intra-muros. Ce nombre impressionnant est en réalité la transcription de la complexité du site urbain, avec de nombreuses nappes superposées et des ouvrages profonds. Aujourd'hui, l'IGC travaille à maintenir ce réseau soumis en zone urbaine à de nombreuses contraintes et à consolider ses connaissances dans les zones sensibles et peu connues.

Avoir 250 enregistreurs impose à l'IGC une maintenance stricte et permanente de son réseau : entretien des piézomètres, maintenance des enregistreurs, suivi des données... Ils nécessitent une surveillance quasi quotidienne, des déplacements fréquents sur site pour entretenir un fonctionnement correct et des connaissances du contexte parisien pour l'analyse des données. En période de crue, la surveillance est accentuée afin de maintenir une fiabilité des données en période de crise.

Pendant les crues 2016 et 2018, 120 piézomètres ont été suivis quotidiennement. Les données étaient intégrées manuellement et retransmises sous forme graphique aux principaux partenaires ; ce qui était assez chronophage. L'IGC a tout de même réussi à produire des cartes d'incidence sur les sous-sols pendant la crue et la décrue dans les deux cas. Cela nous a permis de constater que ces

deux crues, différentes hydrauliquement, l'étaient également au niveau des nappes : temps de réaction, distance d'influence par rapport à la Seine, nappes impactées et retour à la normale. Tout a été différent pour des niveaux maximum très proches mesurés en Seine.

La nouvelle plateforme hydrogéologique de l'IGC - Ville de Paris, mise en place avec son prestataire OTT Hydromet, permet à l'IGC un meilleur contrôle de son réseau et de se consacrer plus complètement aux cartes réalisées en période de crue. Cette plateforme est composée de deux interfaces web reliées entre-elles. La première interface permet à l'IGC de traiter les données de terrain (visite sur site, mesures manuelles...) et de télé-relève (correction de dérive, validation de la données...). La deuxième interface permet une visualisation simplifiée de la donnée (graphique, liste et carte) et donc un partage de la donnée. Celui-ci est mis en place avec les partenaires conventionnés de l'IGC. Chaque partenaire possède un compte de connexion qui lui est propre et qui a été créé en fonction de ses besoins. Ainsi, un accès est donné vers les piézomètres proches de leurs ouvrages où ils peuvent consulter en temps réel les données sous forme de carte, de différents graphiques prêts à l'avance et de listes listings.

L'interface de partage, avec une première série de paramétrages, a été proposée en test à quelques partenaires, afin de pouvoir améliorer le rendu conformément à leurs besoins. En parallèle, la reprise des données historiques se poursuit. À l'avenir, cette plateforme devra avoir toutes ses anciennes données entrées et validées afin de remplir son rôle d'informations fiables des partenaires. De plus, les données provenant d'autres gestionnaires de réseaux pourront être ajoutées afin d'améliorer notre compréhension du système hydrogéologique. En prenant soin de choisir les piézomètres représentatifs des nappes parisiennes sans influence directe urbaine pouvant fausser la réalité, une ouverture publique des données pourrait être envisagée.

Dans un contexte de changement climatique, se pose la question sur la tendance future des crues et de leurs influences sur les nappes dans Paris, mais également dans l'ensemble du territoire métropolitain. Les nappes en effet ne s'arrêtent pas aux limites communales, mais agissent sur tout leur bassin versant. La connaissance de ces nappes en amont de Paris permettrait de mieux appréhender les risques de remontées des nappes, notamment dans le cas de grandes crues (type 1955 ou 1910). Étendre la connaissance permettrait d'affiner les différentes modélisations de nappes en cas de grande crue sur la région parisienne.