



**HAL**  
open science

## **Cartographie automatisée des zones inondables sur les têtes de bassins versants : évaluation de 3 approches sur 3 crues rapides exceptionnelles dans le sud de la France**

Nabil Hocini, Olivier Payrastre, Eric Gaume, François Bourgin, Philippe Davy, Dimitri Lague, Frédéric Pons, Léa Poinsignon

### ► To cite this version:

Nabil Hocini, Olivier Payrastre, Eric Gaume, François Bourgin, Philippe Davy, et al.. Cartographie automatisée des zones inondables sur les têtes de bassins versants : évaluation de 3 approches sur 3 crues rapides exceptionnelles dans le sud de la France. Colloque SHF : “Ruissellement : diagnostic et solutions ”, Société Hydrotechnique de France, Nov 2020, Lyon, France. hal-04395901

**HAL Id: hal-04395901**

**<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04395901>**

Submitted on 15 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Cartographie automatisée des zones inondables sur les têtes de bassins versants : évaluation de 3 approches sur 3 crues rapides exceptionnelles dans le sud de la France

Nabil HOCINI<sup>1</sup>, Olivier PAYRASTRE<sup>1</sup>, Eric GAUME<sup>1</sup>, François BOURGIN<sup>2</sup>, Philippe DAVY<sup>3</sup>, Dimitri LAGUE<sup>3</sup>, Frédéric PONS<sup>4</sup>, Léa POINSIGNON<sup>4</sup>

<sup>1</sup> GERS-LEE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France

<sup>2</sup> University Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, Antony, France

<sup>3</sup> Géosciences Rennes, 35042 Rennes, France

<sup>4</sup> Cerema Méditerranée, 13290 Aix-en-Provence, France

*Les crues éclair qui touchent les têtes de bassin causent d'importants dégâts matériels et humains dans le monde entier. En France, elles frappent fréquemment les petits cours d'eau de la zone méditerranéenne, entraînant souvent des conséquences catastrophiques. Compte tenu du grand nombre de petits cours d'eau concernés, l'utilisation de méthodes de cartographie automatisée des zones inondées peut être d'une grande aide pour l'identification des zones susceptibles d'être touchées et la prévision des impacts potentiels de ce type de crues. Une application de trois méthodes de cartographie d'un niveau de complexité croissant (HAND/MS, caRtino 1D, et Floodos 2D), est présentée ici pour la simulation de trois crues éclair majeures observées au cours des dix dernières années (15 juin 2010 sur l'Argens et ses affluents, 3 octobre 2015 sur les côtières des Alpes Maritimes, et 15 octobre 2018 sur l'Aude et ses affluents). Les simulations hydrauliques sont exécutées en régime permanent sur la base des débits de pointe estimés par un modèle hydrologique, ajusté sur chaque événement. Les résultats des simulations sont comparés aux cartes d'inondations observées et aux marques des plus hautes eaux (PHE). Ces résultats révèlent une hiérarchie assez nette entre les méthodes utilisées, en faveur des méthodes basées sur des modèles hydrauliques St Venant. Avec ces méthodes, les différences entre niveaux d'eau simulés et les marques de crue restent majoritairement inférieures à 70 cm. Les erreurs les plus importantes sont généralement liées à la représentation du lit mineur et des ouvrages (digues, ponts) dans la modélisation.*

*Mots-clefs : crues-éclair, inondation, cartographie, automatisation.*

## *Automated inundation mapping for small headwater streams : evaluation of 3 mapping approaches for 3 exceptional flash floods in southern France*

*Flash floods observed in headwater catchments cause significant material and human damage worldwide. In France, they frequently hit small watersheds in the Mediterranean area, often causing catastrophic impacts. Considering the large number of small rivers possibly affected, the use of automated methods for flood hazard mapping flooded can be of great help for the identification of threatened areas and the prediction of potential impacts of these floods. An application of three mapping methods of increasing level of complexity (HAND / MS, caRtino 1D, and Floodos 2D) is presented herein for the simulation of three major flash floods observed during the last ten years in France: the 15<sup>th</sup> of June 2010 flood on the Argens river and its tributaries (585 km of rivers simulated) ; the 3<sup>rd</sup> of October 2015 flood on small coastal rivers of the French Riviera (131 km of rivers); and the 15<sup>th</sup> of October 2018 floods on the Aude river and its tributaries (561 km of rivers). The common feature of these 3 approaches is their high level of automatization, their application based on a high-resolution (5m) DTM, and their reasonable computation times. Hydraulic simulations are run in steady state regime on the basis of peak discharges estimated with a hydrological model, which has been preliminary adjusted for each event. The results of the simulations are compared with the observed flood maps and the high-water marks. These results reveal a clear hierarchy between the methods used, in favour of the methods of the St Venant hydraulic models. With these methods, the differences between the simulated water levels and the flood marks remain mostly below 70 cm. The most important errors are related to the representation of the riverbed cross section (no bathymetry) and the artificial structures (dikes, bridges) in the models.*

*Key words : Flash-floods, inundation, flood mapping, automatization.*

## INTRODUCTION

Lors des événements pluviométriques intenses sur de courtes durées, la concentration des écoulements dans les fonds de talwegs occasionne régulièrement des crues très rapides sur les petits cours d'eau situés en tête de bassin. Ces crues, souvent qualifiées de crues éclair ou crues soudaines, s'avèrent particulièrement

dommageables du fait de leurs forts débits, et de leur évolution très rapide qui limite fortement les capacités d'anticipation. Bien que ces crues s'avèrent nettement plus fréquentes dans les secteurs méditerranéens du fait d'un aléa pluviométrique plus intense, elles concernent potentiellement l'ensemble des petits cours d'eau du territoire Français, comme l'illustrent par exemple les crues qui ont causé d'importants dégâts dans l'agglomération de Nancy en 2012 [Chiffre et al., 2014].

La connaissance des zones inondables associées aux petits cours d'eau reste relativement limitée à l'heure actuelle en France, du fait du grand nombre de cours d'eau concernés (120.000 km de cours d'eau de plus de 1m de large d'après les bases de données existantes), et du manque de données descriptives de ces cours d'eau et de leur régime (topographie, bathymétrie, débits, ...). Des progrès importants ont été néanmoins réalisés du point de vue de la connaissance des débits et de la topographie, avec le développement de la base nationale des débits SHYREG [ARNAUD et al., 2013], et la généralisation progressive des MNT Lidar à haute résolution au sein du RGE Alti.

Le contexte est donc de plus en plus favorable à la connaissance des zones inondables associées aux petits cours d'eau. Compte tenu de la quantité importante de cours d'eau concernés, une avancée significative ne pourra néanmoins être réalisée qu'à la condition de disposer de méthodes de cartographie facilement applicables sur de grands linéaires de cours d'eau. Ceci implique notamment un grand niveau d'automatisation de ces approches, et un recours aussi limité que possible à l'expertise humaine et au calage des modèles. Des méthodes de cartographie répondant à cet objectif se sont petit à petit développées au cours des dernières années. Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Des modèles hydrodynamiques 2D, avec des schémas de résolution simplifiés ou parallélisés pour accélérer les temps de calcul (Lisflood, Iber, ...). D'abord appliquées pour la cartographie des grands cours d'eau à une échelle continentale et à des résolutions assez grandes [Pappenberger et al., 2012; Alfieri et al., 2014; Sampson et al., 2015; Dottori et al., 2016], ces méthodes évoluent peu à peu vers des applications plus locales et des résolutions plus fines (inférieure à 10m) pour la cartographie associée aux petits cours d'eau [Cea and Bladé, 2015; Xia et al., 2017; García-Feal et al., 2018; Nguyen et al., 2016; Neal et al., 2018; Sanders and Schubert, 2019]

- Des méthodes basées sur l'application de modèles hydrodynamiques 1D, proposées plus récemment, et appliquées sur la base de profils en travers extraits des MNT [Choi and Mantilla, 2015; Le Bihan et al., 2017; Lamichhane and Sharma, 2018].

- Des approches des remplissages directs du MNT à partir d'une hauteur d'eau déterminée localement. Ce groupe comprend la méthode Autoroute [Follum et al., 2017], ainsi que plusieurs approches basées sur le concept de hauteur par rapport au point de drainage le plus proche (HAND ou Height Above Nearest Drainage; [Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2011]: approches f2HAND [Speckhann et al., 2017], Geoflood [Zheng et al., 2018], MHYST [Rebolho et al., 2018]. Dans ces approches une relation débit/hauteur est déterminée à partir de la géométrie du profil en travers extraite du MNT (moyennée sur un tronçon pour les approches basées sur HAND), et d'une formule hydraulique (Manning strickler, Debord, ...). Ces approches présentent l'avantage d'être très efficaces en temps de calcul [Teng et al., 2017]. Mais leurs limites en précision ont déjà été mises en évidence par rapport à des approches 2D conventionnelles [Afshari et al., 2018].

Cet article propose une comparaison de trois méthodes de cartographie issues de ces trois familles, dans le contexte des crues-éclair observées dans le sud-est de la France. Les trois méthodes appliquées sont : 1 - une approche de remplissage du MNT basée sur un raster HAND, ici nommée HAND/MS; 2 - la méthode caRtino [Pons et al., 2014] de modélisation 1D; 3 - une application automatisée du modèle 2D Floodos [Davy et al., 2017].

Si ces trois approches répondent à l'objectif de construire des scénarios d'inondation sur de grands linéaires de petits cours d'eau, leur simplicité et/ou leur application automatisée introduit néanmoins inévitablement des erreurs, qu'il est nécessaire d'évaluer et de limiter dans la mesure du possible. Cet article présente donc les résultats d'un effort important d'évaluation, portant sur la capacité de ces méthodes à reconstituer trois crues récentes observées dans le sud-est de la France (emprises inondées et plus hautes eaux observées).

L'article est organisé de la façon suivante : la première partie présente les trois méthodes utilisées, ainsi que leurs modalités d'application et d'évaluation sur trois études de cas sélectionnées; dans un deuxième temps les résultats obtenus sont présentés et discutés ; la dernière partie présente les conclusions de ce travail.

## **APPROCHES DE CARTOGRAPHIE ÉVALUÉES**

### **HAND/MS**

La méthode « HAND/MS » est une approche de remplissage du MNT analogue à la méthode Geoflood [Zheng et al., 2018]. Cette approche se base sur l'utilisation d'un raster HAND directement déduit du MNT, et d'une formule de Manning Strickler. Le raster HAND est utilisé dans un premier temps pour estimer la géométrie hydraulique "moyenne" à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau (relation hauteur - surface et périmètre mouillés), puis une relation hauteur-débit est établie sur chaque tronçon en appliquant la formule de Manning-Strickler. En suivant cette relation, chaque valeur de débit détermine le seuil de hauteur d'eau à appliquer sur le raster HAND pour retrouver l'extension de la zone inondée. Cette méthode présente l'avantage d'être très rapide en temps de calcul. Elle a déjà été appliquée à très grande échelle sur des MNT de très haute résolution. Néanmoins elle présente des simplifications fortes: géométrie hydraulique et hauteur d'eau « moyennées » à l'échelle du tronçon, débit unique le long de chaque tronçon, pas de représentation des effets de remous hydraulique (hauteur normale), débordement limité aux seuls pixels "associés" à chaque tronçon dans le raster HAND (pas de débordement possible d'un tronçon vers un autre).

### **caRtino 1D**

La méthode caRtino 1D [Pons et al., 2014; Le Bihan et al., 2017], permet la construction et l'application automatisée d'un modèle hydrodynamique 1D (Mascaret, Flutor, HEC-RAS) à partir du MNT. La méthode permet le positionnement et l'extraction automatique de profils en travers à partir du MNT, qui sont utilisés pour construire la structure de la modélisation 1D. Un post-traitement de la ligne d'eau simulée permet de récupérer l'emprise de la zone inondée et les hauteurs d'eau sur le maillage du MNT. Cette approche permet une représentation 1D de la ligne d'eau tenant compte des variations de géométrie du lit et de certains effets de remous. Ses limites se situent principalement dans l'application automatisée qui supprime la plus-value de l'expertise dans la construction de la structure du modèle: profils en travers parfois mal positionnés ou de largeur inadaptée, pas de pertes de charge introduites, pas de distinction lit mineur/lit majeur, pas de fonctionnement à casiers. Ces limites prennent une importance particulière dans les secteurs des lits très larges, les lits perchés, ou les secteurs de confluences.

### **Floodos 2D**

Cette approche correspond à une application automatisée du modèle hydrodynamique 2D Floodos [Davy et al., 2017]. Ce modèle présente l'avantage d'une certaine simplicité de mise en œuvre puisque le calcul est effectué directement sur le maillage du MNT. La résolution des équations de St Venant, basée sur la circulation dans le domaine de volumes d'eau élémentaires appelés précipitons, présente l'avantage d'une grande rapidité. Néanmoins les termes d'inertie sont négligés dans la résolution, ce qui peut occasionner quelques erreurs dans des secteurs de variations brusques de direction et/ou de chocs contre des obstacles. Cette méthode reste également plus lourde en temps de calcul que les précédentes. Elle nécessite une vérification attentive de la convergence du modèle, qui a été automatisée ici.

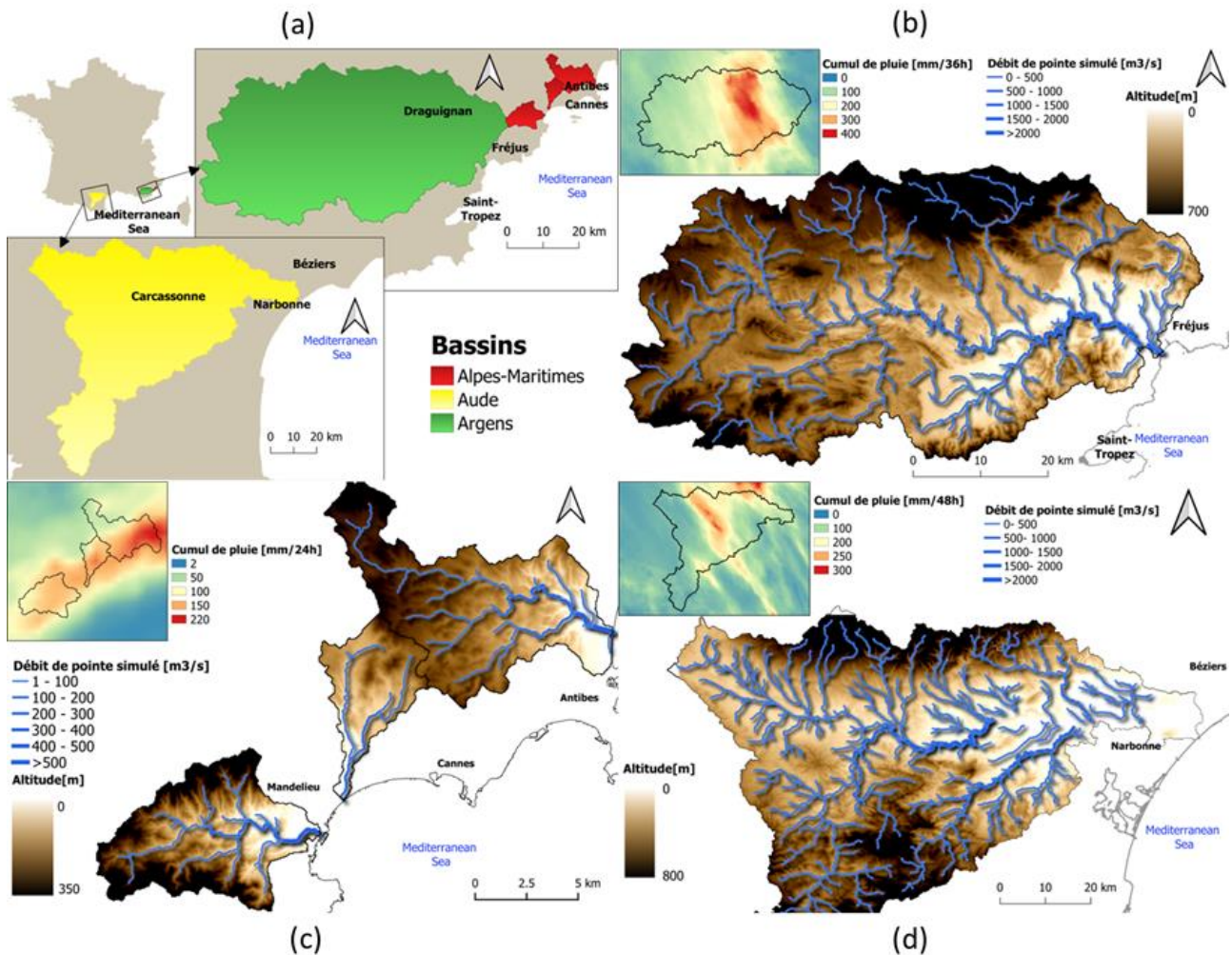


Figure 1. Présentation des 3 études de cas: a) Localisation des bassins étudiés, b) Bassin de l'Argens et pluviométrie observée en juin 2010, c) Bassins côtiers des Alpes Maritimes et pluviométrie observée en octobre 2015, d) Bassin versant de l'Aude et pluviométrie observée en octobre 2018

## ETUDES DE CAS SÉLECTIONNÉES ET APPLICATION DES MODELES

Les études de cas sélectionnées sont présentées sur la Figure 1. Elles correspondent à trois crues-éclair majeures observées dans le sud de la France au cours des dernières années: les crues du 15 juin 2010 sur la partie orientale du bassin versant de l'Argens; les crues du 3 octobre 2015 sur les cours d'eau côtiers des Alpes Maritimes (Brague, Grande Frayère, Riou de l'Argentière); les crues du 15 octobre 2015 sur le bassin intermédiaire de l'Aude.

Ces études de cas ont été sélectionnées en raison de la disponibilité de données d'observation détaillées, permettant à la fois une bonne connaissance des pluies et débits observés, ainsi que des champs d'inondation. Des estimations de débits de pointe sur les cours d'eau non jaugés ont notamment été réalisées pour les 3 événements dans le cadre du programme HyMeX [Ducrocq et al., 2019 ; Payrastra et al., 2019]. Des relevés détaillés des niveaux de Plus Hautes Eaux (PHE) sont disponibles pour les trois événements, ainsi que les enveloppes des zones inondées pour les deux événements de l'Argens et de l'Aude.

Les trois approches de cartographie sont appliquées ici à partir des MNT de RGE Alti à 5m, après incorporation des derniers relevés Lidar disponibles dans le cas de l'Aude. Ces MNT ont été prétraités de façon à s'assurer de l'effacement des ponts et ouvrages de franchissement pouvant rester présents dans les MNTs. Néanmoins, ces MNTs n'incluent pas la bathymétrie des cours d'eau (relativement limitée pour les études de cas traitées), et ne peuvent tenir compte d'éventuelles évolutions morphologiques des lits en cours de crue.

Les domaines de calcul retenus correspondent aux cours d'eau pour lesquels un débordement a été observé, et incluent les petits cours d'eau à partir d'une surface drainée élémentaire de 5 km<sup>2</sup> (1km<sup>2</sup> dans le cas des Alpes Maritimes). Ces domaines incluent 585 km de cours d'eau dans le cas de l'Argens, 131 km dans le cas de l'événement des Alpes Maritimes, et 569 km dans le cas de l'Aude.

Les calculs sont réalisés en régime permanent à partir des débits de pointe de la crue à simuler, ce qui permet un gain important en temps de calcul. Ceci conduit à négliger les effets dynamiques liés au régime transitoire, hypothèse qui paraît acceptable pour des cours d'eau amont dont les champs d'inondation restent peu volumineux par comparaison avec les volumes des crues. Les débits de pointe n'étant pas connus partout, ils sont estimés par un modèle pluie-débit (Cinecar), sur chaque branche du réseau hydrographique à couvrir. La validité des débits estimés sur les petits affluents a pu être vérifiée grâce à la disponibilité des observations produites dans le cadre du programme HyMeX. Les écarts entre simulation et observation (Figure 2) restent généralement dans une limite de 20%, ce qui s'avère raisonnable compte tenu des incertitudes associées aux observations.

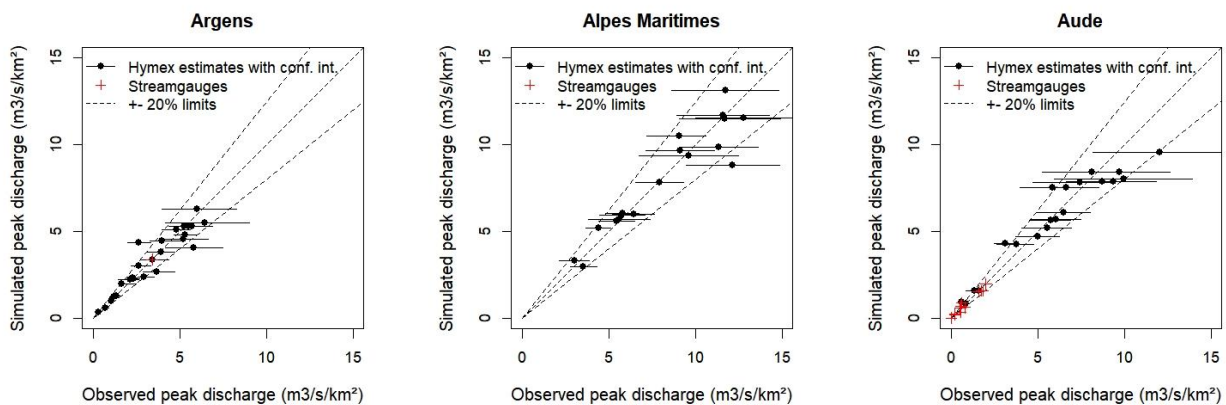


Figure 2. Comparaison des observations de débits de pointe disponibles (exprimées en débit spécifique), avec les débits obtenus par simulation pluie-débit et utilisés pour les calculs hydrauliques

Le même coefficient de rugosité est utilisé dans tous les calculs ( $K=15$ ), sans effectuer de calage, de façon à respecter le principe d'automatisation complète des méthodes évaluées. La valeur de rugosité retenue correspond à une valeur réaliste pour ce type de crues, d'après les données d'enquête post-événement disponibles [Lumbroso et Gaume, 2012]. Ce choix peut bien sûr être à l'origine de certaines erreurs dans les résultats, mais qui seront néanmoins identiques pour les trois méthodes.

En raison de l'étendue des domaines à couvrir, les calculs ne peuvent être réalisés en une seule fois (soit par construction des méthodes, soit en raison des capacités mémoire disponibles pour un calcul). Un principe commun de segmentation du calcul par tronçons de cours d'eau est donc appliqué ici, avec au minimum un découpage à chaque confluence. Un calcul indépendant est effectué sur chaque tronçon de cours d'eau, puis les résultats sont combinés en retenant si nécessaire la hauteur maximale dans les secteurs où plusieurs simulations se chevauchent (cas des méthodes 1D et 2D). Une segmentation plus fine a été appliquée dans le cas de l'approche HAND/MS, avec des tronçons de 1500 m de long maximum, de façon à limiter les erreurs liées aux variations de géométrie hydraulique le long d'un tronçon.

## CRITERES D'EVALUATION

### Comparaison des emprises inondées simulées et observées

L'évaluation des résultats se fait ici en comparant l'emprise inondée calculée à l'emprise de référence observée, dans les cas de l'Aude et de l'Argens, pour lesquels les emprises inondées observées sont disponibles. Cette comparaison (Figure 3) permet de distinguer quatre zones : zone inondée commune (a),

zone en excès (b), zones en défaut (b), et zone sèche commune (d). L'étendue respective de ces zones est synthétisée sous forme d'un score pour chaque tronçon de cours d'eau, le Critical Success Index (CSI):

$$CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad (1)$$

Les valeurs du CSI varient de 0% (aucune zone commune entre simulation et observation) à 100% (correspondance parfaite). [Fleischmann et al., 2019] suggère qu'un modèle hydrodynamique fournit des estimations localement pertinentes de l'étendue des inondations lorsque le CSI est supérieur à 65%.

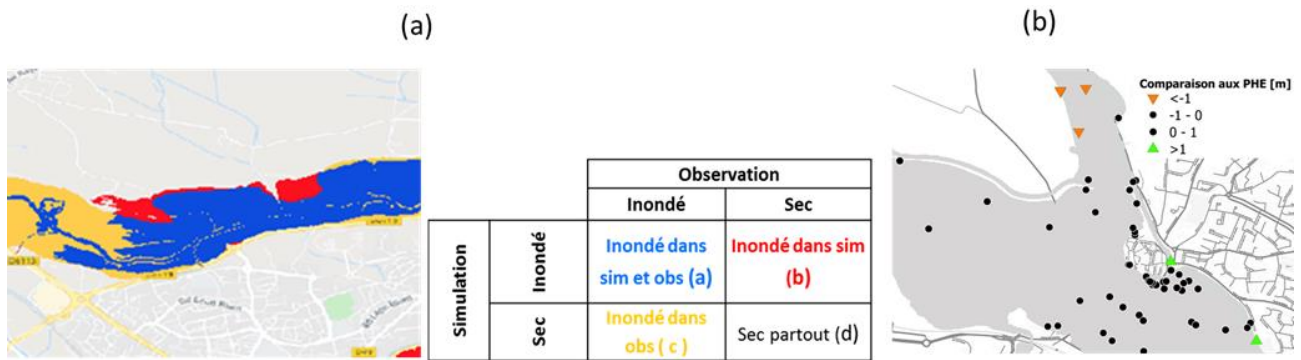


Figure 3. Processus d'évaluation : a) Comparaison des étendues d'inondation simulée et observée, b) comparaison des hauteurs d'eau simulées et observées

### Comparaison des hauteurs d'eau simulées et observées

Les hauteurs d'eau simulées sont comparées aux marques des plus hautes eaux (PHE) relevées sur le terrain pour les 3 événements étudiés (plusieurs centaines de relevés PHE disponibles pour chaque événement).

Les résultats sont illustrés à partir de la différence d'altitude de la ligne d'eau entre simulation et observation. Une valeur négative indique donc une sous-estimation des hauteurs par le modèle, et une valeur positive une surestimation (cf. Figure 3).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

La Figure 4 donne une illustration d'une sortie de modèle et de son évaluation à partir des emprises observées et des relevés PHE. Cette figure illustre la diversité des résultats obtenus, avec des secteurs très bien modélisés, et à l'inverse des erreurs importantes concentrées sur certains tronçons. Les principales origines de ces erreurs (souvent communes aux trois méthodes) seront présentées en fin d'article.

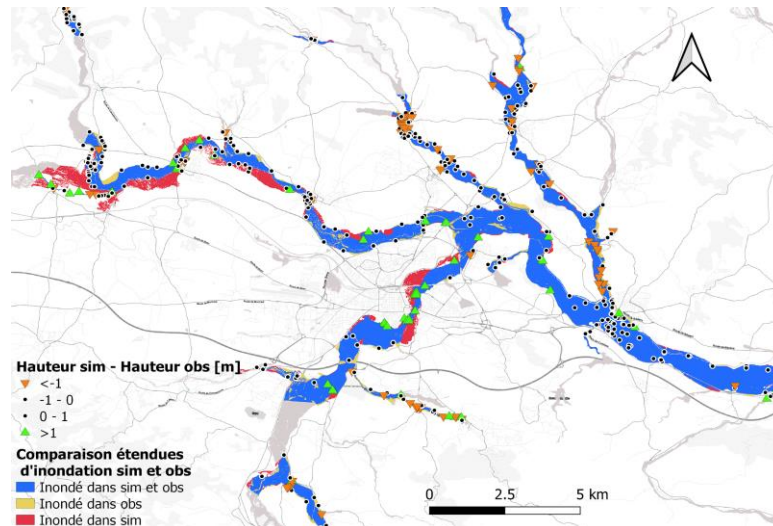


Figure 4. Résultat de la simulation de la crue de l'Aude avec le modèle Floodos (seule une partie du domaine simulé est représentée ici)

Une synthèse de l'évaluation à partir des emprises inondées est présentée sur la Figure 5. Cette figure illustre notamment les limites de l'approche HAND/MS par rapport aux modélisations hydrauliques 1D ou 2D. Les valeurs de CSI obtenues s'avèrent en effet sensiblement plus faibles avec cette méthode pour un nombre important de tronçons. Une analyse détaillée des résultats sur les tronçons concernés montre que les erreurs effectuées sont directement attribuables à plusieurs des simplifications introduites par cette méthode: géométrie hydraulique moyennée à l'échelle du tronçon, sans tenir compte des effets de resserrement/élargissement du lit; absence de représentation des effets de remous, en particulier ceux liés aux confluences qui peuvent avoir un effet important sur la zone inondée; impossibilité de représenter la continuité des débits (débit unique par tronçon) et des écoulements (débordement limité aux pixels HAND associés à chaque tronçon) entre tronçons et versants associés, notamment dans les secteurs plats. Ce dernier aspect est mieux traité avec les méthodes hydrauliques du fait d'un recouvrement des domaines de calcul entre les différents tronçons. Du point de vue des emprises inondées, les deux méthodes hydrauliques caRtino 1D et Floodos 2D donnent pour leur part des résultats relativement proches: les valeurs de CSI obtenues ne s'écartent de plus de 10% que pour un nombre limité de tronçons.

La comparaison des hauteurs d'eau simulées avec les relevés PHE est présentée sur la Figure 6. Ces résultats confirment la performance moindre de l'approche HAND/MS, avec notamment la présence d'un biais négatif (sous-estimations des hauteurs) de quelques dizaines de cm, dont l'importance varie d'une étude de cas à l'autre, mais que l'on ne retrouve pas avec les deux autres approches. La comparaison en hauteur permet également d'illustrer l'apport de l'approche 2D Floodos par rapport à l'approche 1D caRtino: les écarts en hauteurs s'avèrent sensiblement plus faibles avec Floodos, quelle que soit l'étude de cas considérée. Ceci est probablement attribuable aux limites de l'automatisation de l'approche 1D dans des secteurs hydrauliquement complexes tels que les lits majeurs très larges et/ou endigués, ainsi que les secteurs de confluences. Finalement, la méthode Floodos fournit donc la meilleure reconstitution de la ligne d'eau, avec des écarts qui s'avèrent le plus souvent inférieurs à 70 cm (cf. limites des intervalles à 70% sur la Figure 6).



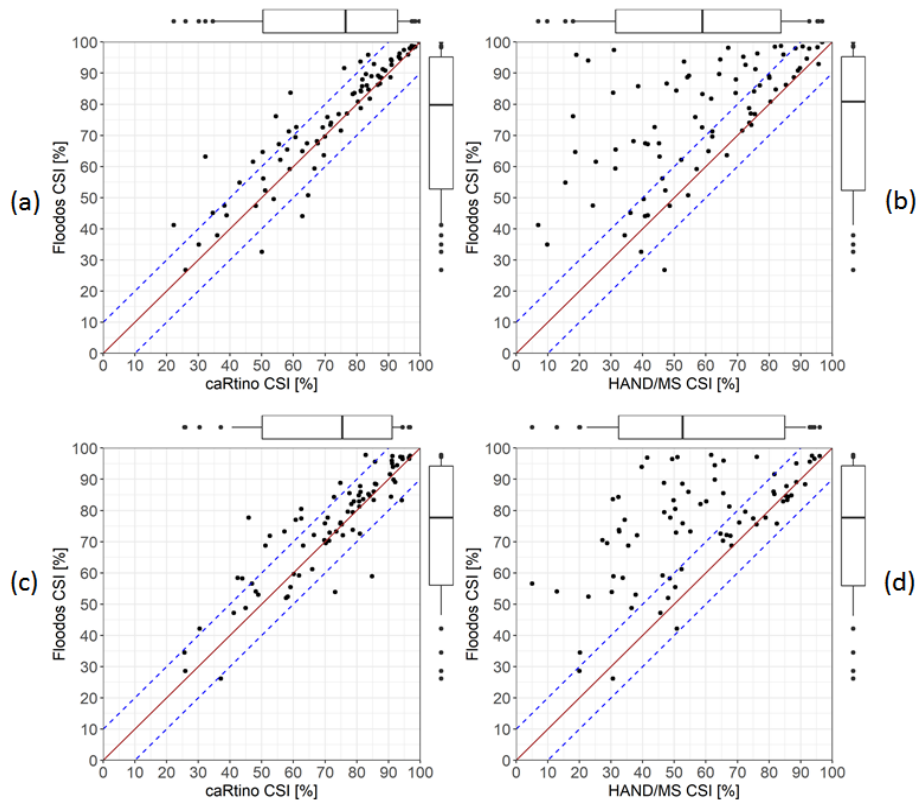


Figure 5. Comparaison des CSI à l'échelle des tronçons : a) Cartino vs Floodos, Argens 2010, b) HAND/MS vs Floodos, Argens 2010, c) Cartino vs Floodos, Aude 2018, d) HAND/MS vs Floodos, Aude 2018

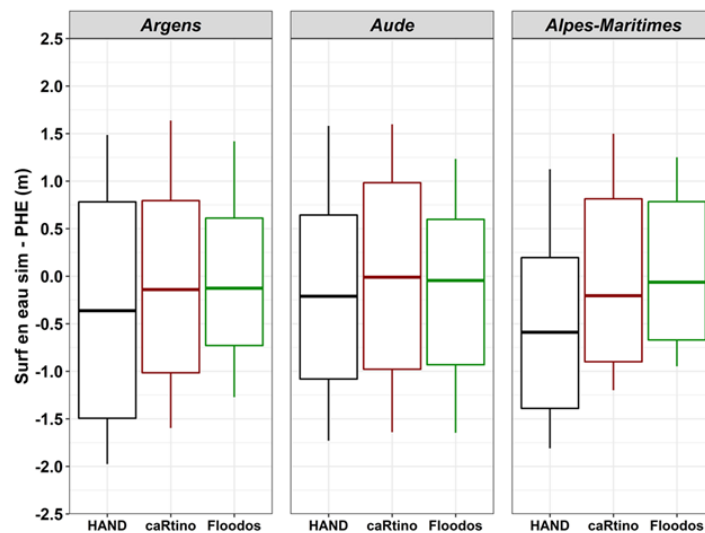


Figure 6. Comparaison des hauteurs d'eau simulées et observée (relevés PHE) pour les 3 méthodes et les 3 événements étudiés. Les boîtes représentent les quantiles 15% et 85% (70% des valeurs dans l'intervalle), et les moustaches les quantiles 5% et 95% (90% des valeurs dans l'intervalle)

Comme l'illustrent les figures Figure 4 et Figure 5, des erreurs importantes de modélisation sont constatées sur certains tronçons, avec des valeurs de CSI inférieures à 50 % traduisant une mauvaise représentation de la zone inondée, ainsi que des erreurs sur les hauteurs d'eau pouvant parfois largement dépasser 1 voire 2 m. Ces erreurs se retrouvent généralement avec les trois méthodes appliquées et sont donc dues à des sources d'erreurs communes. L'examen des tronçons concernés fait apparaître trois sources principales:

- L'absence de représentation de la bathymétrie et l'interpolation réalisée au niveau des zones en eau dans le MNT, peuvent ponctuellement occasionner une grande surestimation de la zone inondée. Ceci est

particulièrement vrai pour les tronçons qui ont été en limite de débordement, la bathymétrie pouvant dans ce cas représenter une part significative de la section d'écoulement.

- Les tronçons endigués peuvent concentrer de fortes erreurs, avec notamment des débordements trop larges. Ceci peut être associé aux limites de certaines des méthodes appliquées (HAND/MS et caRtino), qui par construction s'avèrent moins adaptées pour traiter ces secteurs. Néanmoins, ces erreurs sont également rencontrées avec Floodos, du fait de l'arasement de la crête des digues dans les MNT à 5m utilisés.
- Enfin, les crues simulées étant particulièrement intenses sur certains tronçons, elles ont occasionné la mise en charge d'un nombre important d'ouvrages de franchissement des cours d'eau. Ces mises en charge génèrent une surélévation importante de la ligne d'eau qui ne peut pas être représentée dans les modèles appliqués ici. Dans ces secteurs les hauteurs d'eau et emprises inondées s'avèrent assez nettement sous-estimés (Figure 6).

## CONCLUSIONS

Les résultats présentés ici permettent d'illustrer la performance d'approches de cartographie automatisée des inondations, destinées à combler les lacunes existantes en termes de cartographie des zones inondables sur les petits cours d'eau secondaires soumis aux crues éclair (environ 100.000 km de cours d'eau concernés en France).

Les méthodes présentées sont appliquées directement à partir d'un MNT de 5 m de résolution, sans calage ni mobilisation d'expertise dans la construction des modélisations. Elles sont évaluées ici à partir de leur capacité à représenter les zones inondées et hauteurs d'eau pour 3 crues-éclair majeures observées au cours des 10 dernières années.

Les résultats illustrent une performance nettement supérieure des deux approches caRtino et Floodos basées sur des modèles hydrauliques. L'approche HAND/MS semble sensiblement moins adaptée au contexte des crues éclair étudié ici. Le modèle 2D Floodos est finalement celui qui permet la reconstitution la plus précise des hauteurs d'eau sur les études de cas présentées.

Ces résultats illustrent également les principales sources d'erreur occasionnant localement des écarts importants entre modélisation et observations: absence de bathymétrie dans le MNT, mauvaise représentation des digues avec une résolution de 5 m, et absence de représentation des remous importants liés à la mise en charge des ponts.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche PICS (<http://pics.ifsttar.fr>), financé par l'ANR (convention n°ANR-17-CE03-0011). Les données de débits ont été obtenues dans le cadre du programme de recherche HyMeX (<http://hymex.org>), avec le soutien financier du programme MISTRALS du CNRS, et du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (DGPR/SCHAPI). Les données pluviométriques ont été fournies par Météo France, les données MNT ont été obtenues auprès de l'IGN.

## RÉFÉRENCES

- Afshari, S., Tavakoly, A.A., Rajib, M.A., Zheng, X., Follum, M.L., Omranian, E., Fekete, B.M., 2018. Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. *Journal of Hydrology* 556, 539–556. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.036>
- Alfieri, L., Salamon, P., Bianchi, A., Neal, J., Bates, P., Feyen, L., 2014. Advances in pan-European flood hazard mapping. *Hydrological Processes* 28, 4067–4077. <https://doi.org/10.1002/hyp.9947>
- ARNAUD, P., EGLIN, Y., JANET, B., PAYRASTRE, O., 2013. BASES DE DONNEES SHYREG-DEBIT 35.

- Cea, L., Bladé, E., 2015. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research* 51, 5464–5486. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Chiffre, E., Mathis, D., Mathis, A., 2014. Les inondations à Nancy – Anciennes et nouvelles problématiques. *developpementdurable*. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.10665>
- Choi, C.C., Mantilla, R., 2015. Development and Analysis of GIS Tools for the Automatic Implementation of 1D Hydraulic Models Coupled with Distributed Hydrological Models. *Journal of Hydrologic Engineering* 20, 06015005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001202](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001202)
- Davy, P., Croissant, T., Lague, D., 2017. A precipiton method to calculate river hydrodynamics, with applications to flood prediction, landscape evolution models, and braiding instabilities. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 122, 1491–1512. <https://doi.org/10.1002/2016JF004156>
- Dottori, F., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Hirpa, F.A., Feyen, L., 2016. Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources* 94, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.002>
- Ducrocq, V., Boudevillain, B., Bouvier, C., Braud, I., Fourrie, N., Lebeau-pin-Brossier, C., Javelle, P., Nuissier, O., Payrastré, O., Roux, H., Ruin, I., Vincendon, B., 2019. Le programme HYMEX – Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne. *La Houille Blanche* 5–12. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019048>
- Fleischmann, A., Paiva, R., Collischonn, W., 2019. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *Journal of Hydrology X* 3, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100027>
- Follum, M.L., Tavakoly, A.A., Niemann, J.D., Snow, A.D., 2017. AutoRAPID: A Model for Prompt Streamflow Estimation and Flood Inundation Mapping over Regional to Continental Extents. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 53, 280–299. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12476>
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, M.J., Formella, A., 2018. An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on Iber. *Water* 10. <https://doi.org/10.3390/w10101459>
- Lumbroso, D. and Gaume, E., 2012. Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges, *Journal of Hydrology*, 414, 16–30, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048>
- Lamichhane, N., Sharma, S., 2018. Effect of input data in hydraulic modeling for flood warning systems. *Hydrological Sciences Journal* 63, 938–956. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1464166>
- Le Bihan, G., Payrastré, O., Gaume, E., Moncoulon, D., Pons, F., 2017. The challenge of forecasting impacts of flash floods: test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 5911–5928. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5911-2017>
- Neal, J., Dunne, T., Sampson, C., Smith, A., Bates, P., 2018. Optimisation of the two-dimensional hydraulic model LISFOOD-FP for CPU architecture. *Environmental Modelling & Software* 107, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.011>
- Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Sanders, B., Koren, V., Cui, Z., Smith, M., 2016. A high resolution coupled hydrologic–hydraulic model (HiResFlood-UCI) for flash flood modeling. *Journal of Hydrology* 541, 401–420. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.047>
- Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Hodnett, M., Rennó, C.D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., Saleska, S., 2011. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology* 404, 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Pappenberger, F., Dutra, E., Wetterhall, F., Cloke, H.L., 2012. Deriving global flood hazard maps of fluvial floods through a physical model cascade. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 4143–4156. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4143-2012>
- Payrastré, O., Gaume, E., Javelle, P., Janet, B., Fourmigué, P., Lefort, P., Martin, A., Boudevillain, B., Brunet, P., Delrieu, G., Marchi, L., Aubert, Y., Dautrey, E., Durand, L., Lang, M., Boissier, L., Douvinet, J., Martin, C., l'équipe « enquêtes post-événements » d'HyMeX, 2019. Analyse hydrologique de la crue-éclair catastrophique du 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (VAR, France). *La Houille Blanche* 140–148. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019057>
- Pons, F., Laroche, C., Fourmigue, P., Alquier, M., 2014. Cartographie des surfaces inondables extrêmes pour la directive inondation : cas de la Nartuby. *La Houille Blanche* 34–41. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014014>
- Rebolho, C., Andréassian, V., Le Moine, N., 2018. Inundation mapping based on reach-scale effective geometry. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 5967–5985. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5967-2018>

- Rennó, C.D., Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Soares, J.V., Hodnett, M.G., Tomasella, J., Waterloo, M.J., 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment* 112, 3469–3481. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- Sampson, C.C., Smith, A.M., Bates, P.D., Neal, J.C., Alfieri, L., Freer, J.E., 2015. A high-resolution global flood hazard model: A HIGH-RESOLUTION GLOBAL FLOOD HAZARD MODEL. *Water Resour. Res.* 51, 7358–7381. <https://doi.org/10.1002/2015WR016954>
- Sanders, B.F., Schubert, J.E., 2019. PRIMo: Parallel raster inundation model. *Advances in Water Resources* 126, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.02.007>
- Speckhann, G.A., Borges Chaffe, P.L., Fabris Goerl, R., Abreu, J.J. de, Altamirano Flores, J.A., 2017. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model. *Hydrological Sciences Journal* 1–14. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1409896>
- Teng, J., Jakeman, A.J., Vaze, J., Croke, B.F.W., Dutta, D., Kim, S., 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software* 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- Xia, X., Liang, Q., Ming, X., Hou, J., 2017. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations. *Water Resources Research* 53, 3730–3759. <https://doi.org/10.1002/2016WR020055>
- Zheng, X., Maidment, D.R., Tarboton, D.G., Liu, Y.Y., Passalacqua, P., 2018. GeoFlood: Large-Scale Flood Inundation Mapping Based on High-Resolution Terrain Analysis. *Water Resources Research* 0. <https://doi.org/10.1029/2018WR023457>