



**HAL**  
open science

# Évaluation de méthodes automatisées de cartographie des zones inondables adaptées à la prévision des crues soudaines

Nabil Hocini

► **To cite this version:**

Nabil Hocini. Évaluation de méthodes automatisées de cartographie des zones inondables adaptées à la prévision des crues soudaines. Hydrologie. Nantes université, 2022. Français. NNT : 2022NANU4015 . tel-04158913

**HAL Id: tel-04158913**

**<https://theses.hal.science/tel-04158913>**

Submitted on 20 Jul 2023

**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.

# THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 600

*Ecole doctorale Ecologie, Géosciences, Agronomie et Alimentation*

*Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Environnement*

Par

**Nabil HOCINI**

**« Evaluation de méthodes automatisées de cartographie des zones inondables adaptées à la prévision des crues soudaines »**

Thèse présentée et soutenue à Bouguenais, le 18/03/2022

Unité de recherche : Université Gustave Eiffel, GERS-EE

## Rapporteurs avant soutenance :

Hélène ROUX  
Roger MOUSSA

Professeur des universités, Toulouse INP / ENSEEIHT  
Directeur de recherche HDR, INRAE

## Composition du Jury :

Présidente : Agnès BALTZER  
Examineurs : Bruno JANET

Professeur des universités, Université de Nantes  
Ingénieur en Chef des Ponts des Eaux et Forêts, Ministère de la  
Transition Ecologique

Directeur de thèse : Éric GAUME

Ingénieur Général des Ponts Eaux et Forêts (HDR), Université  
Gustave Eiffel

Co-encadrant de thèse : Olivier PAYRASTRE

Ingénieur divisionnaire des Travaux Publics de l'Etat, Université  
Gustave Eiffel

## Invité(s)

Mathieu RIBATET

Professeur des universités, Université de Nantes / Ecole Centrale de  
Nantes

Philippe DAVY

Directeur de recherche CNRS, Géosciences Rennes





## Résumé

Les crues soudaines 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, avec des conséquences souvent catastrophiques. Compte tenu du grand nombre de petits cours d'eau pouvant être touchés, l'utilisation de méthodes de cartographie automatisée des zones inondées peut être d'une grande aide pour l'identification des impacts potentiels de ce type de crues. Ce travail de thèse a permis d'automatiser et de tester trois approches de cartographie des zones inondées, adaptées aux petits cours d'eau, et d'un degré de complexité croissant : HAND/MS, caRtino 1D, et Floodos 2D. Dans un premier temps, ces méthodes ont été comparées à des modélisations expertisées de référence issues de la mise en œuvre de la directive européenne inondation, sur plusieurs cours d'eau du sud de la France, en reprenant des hypothèses et données d'entrée identiques à ces modélisations de référence. Par la suite, les trois approches ont été évaluées sur leur aptitude à reproduire trois crues majeures récentes, toujours dans le sud de la France, et pour lesquelles de larges jeux de données d'observations des étendues et hauteurs d'inondation sont disponibles. Finalement, cette double évaluation a permis d'identifier certaines limites de l'approche HAND/MS, dont le niveau de simplification peut être à l'origine d'erreurs importantes. La plus-value de l'approche hydrodynamique 2D (Floodos) a également été mise en évidence, notamment dans les situations de plaines inondables très larges. Ces évaluations ont également confirmé la possibilité de cartographier les inondations de façon automatisée sur les petits cours d'eau, avec des niveaux d'erreurs acceptables et des vitesses de calcul adaptées à la couverture de grands domaines spatiaux. Enfin, les principales sources d'erreur subsistantes, comme la qualité des informations topographiques et/ou la connaissance des débits, ont été identifiées, et leurs poids relatifs ont pu être évalués.

**mots clés :** *Crue rapide, cartographie automatisée, hydraulique*

## Abstract

Flash floods cause important material and human damage all over the world. In France, they frequently hit small rivers in the Mediterranean area, often with catastrophic consequences. Given the large number of small watercourses which may be affected, the use of automated inundation mapping methods can be of great help to identify the areas at risk. This PhD work offered the opportunity to test and compare three automated flood inundation mapping approaches, suitable for small streams and of increasing level of complexity : HAND/MS, caRtino 1D, and Floodos 2D. At first, the three methods were compared to reference expert-based simulation results elaborated for the implementation of the European Flood Directive, for several rivers in south-eastern France. In this first step, the comparison was performed using identical assumptions and input data as for the reference simulations. Then, the three approaches were evaluated based on their ability to reproduce three recent flood events observed in South-Eastern France, and for which particularly rich observation datasets are available about flood extents and water depths. Finally, this twofold evaluation allowed identifying some limits of the HAND/MS approach, which can exhibit important errors directly related to its higher level of simplification. The added value of the 2D hydrodynamic approach (Floodos) has also been illustrated, especially for stream reaches with wide flood plains. The evaluation also confirmed the feasibility of automated flood mapping for small rivers with acceptable error levels, and computation times compatible with the coverage of large areas. Finally, the main remaining sources of error were identified, such as the quality of the input topographic data or the knowledge of the flood discharges, and their relative importance could be evaluated.

cm **keywords** : *flash flood, automated flood mapping, hydraulics*

# Remerciements

Ces travaux sont le fruit de collaborations étroites, d'un travail en amont de la thèse avec de nombreux acteurs, je les remercie ici.

Je remercie Geosciences Rennes, en particulier Dimitri LAGUE et Philippe DAVY, qui m'ont aidé dans la prise en main et dans la compréhension de la méthode Floodos, et Philippe DAVY pour les améliorations apportées au code au cours de la thèse.

Je remercie le CEREMA, et plus particulièrement Frédéric PONS pour l'aide apportée sur la prise en main de la méthode CARTINO.

Je remercie Stan NOMIS pour son excellent travail de stage effectué sur la méthode HAND/MS en amont de la thèse.

Je remercie les équipes du projet ANR PICS pour les données fournies, notamment Météo France pour les données pluviométriques et le CEREMA pour les emprises inondées de référence.

Je remercie les membres du comité de suivi de thèse : Vazken ANDREASSIAN (INRAE), Olivier DELESTRE (Polytech Nice Sophia Antipolis), Dimitri LAGUE (Géosciences Rennes), Jean-Philippe NAULIN (CCR), Frédéric PONS (CEREMA) et Félicien ZUBER (SCHAPI), pour leur orientation, la pertinence des échanges qui m'ont permis d'aller dans la bonne voie et les encouragements.

Je remercie les membres du Jury, Agnès BALTZER Professeur des universités, Université de Nantes, Hélène ROUX Professeur des universités, Toulouse INP / ENSEEIHT, Roger MOUSSA Directeur de recherche HDR, INRAE, Bruno JANET Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et Forêts, Ministère de la Transition Écologique, Philippe DAVY Directeur de recherche CNRS et Mathieu RIBATET Professeur des Universités, Université de Nantes/École Centrale de Nantes, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma thèse à leur lecture détaillée du manuscrit et leurs remarques et questions lors de la soutenance.

Mes remerciements et reconnaissance à François BOURGIN, mon encadrant en première année de thèse que je considère comme un modèle à suivre, j'ai beaucoup appris à ses côtés.

Mes remerciements et reconnaissance à Olivier PAYSRASTRE, mon encadrant durant toutes ces années de thèse et à Eric GAUME, mon directeur de thèse, pour tout le temps qu'ils m'ont consacré, leurs encouragements, leurs conseils et leurs investissements m'ont permis de structurer et de restituer mes travaux de recherche de la meilleure manière.

Je remercie ma collègue de bureau Maryse pour la bonne humeur et les encouragements

durant ces années de thèse, et Pierre pour son implication et son aide précieuse dans la dernière année de ma thèse et avant la soutenance.

Je remercie Les collègues doctorants au Laboratoire Eau et Environnement Tho, Jérôme, Emmanuel, Alice, Florian, Elisabeth, Clarisse ainsi que les autres doctorants de l'Université Gustave Eiffel pour tous les moments conviviaux partagés.

Je remercie mes collègues au laboratoire Eau et Environnement pour la bonne ambiance qui est toujours présente et les moments partagés à la salle café.

Enfin, je dédie ces travaux à mes parents, ma famille et mes amis et les remercie pour leur important soutien durant ces années de thèse.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Résumé</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>ii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>viii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>xvi</b>
<b>1 INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
1.1 LES INONDATIONS EN FRANCE ET DANS LE MONDE . . . . .	1
1.2 LE CAS PARTICULIER DES CRUES SOUDAINES . . . . .	2
1.3 L'ÉMERGENCE DE SYSTÈMES DE PRÉVISION ET D'AVERTISSEMENT DÉDIÉS AUX CRUES SOUDAINES . . . . .	6
1.3.1 Les systèmes de prévision mis en place sur les cours d'eau principaux . . . . .	6
1.3.2 L'apparition de systèmes de prévision couvrant les petits cours d'eau . . . . .	7
1.4 LA CONNAISSANCE ENCORE LIMITÉE DES ZONES INONDABLES EXPOSÉES AUX CRUES SOUDAINES . . . . .	9
1.5 L'ÉVOLUTION RAPIDE DES MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE DES ZONES INON- DABLES . . . . .	10
1.6 LES OBJECTIFS DE LA THÈSE . . . . .	13
<b>2 CARTOGRAPHIE ADAPTÉE AUX PETITS COURS D'EAU</b>	<b>17</b>
2.1 LA CARTOGRAPHIE DES INONDATIONS : GÉNÉRALITÉS . . . . .	18
2.1.1 Principe de l'approche hydrogéomorphologique . . . . .	18
2.1.2 Principe des approches hydrodynamiques basées sur le système d'équations de Saint Venant . . . . .	19
2.1.3 Typologie des modèles hydrauliques utilisés pour la cartographie des inondations	22
2.2 DÉVELOPPEMENT DE LA CARTOGRAPHIE AUTOMATISÉE DES INONDATIONS .	26
2.2.1 Approches géomorphologiques . . . . .	27
2.2.2 Les méthodes de remplissage direct du MNT . . . . .	28
2.2.3 Les modèles hydrauliques . . . . .	29
2.2.4 Quelques exemples d'approches de cartographie automatisée appliquées à grande échelle . . . . .	29
2.3 LES PREMIÈRES APPLICATIONS D'APPROCHES DE CARTOGRAPHIE AUTOMA- TISÉE AU CAS DE PETITS COURS D'EAU . . . . .	32
2.4 PRÉSENTATION DES MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE RETENUES . . . . .	35

2.4.1	La méthode HAND/MS . . . . .	37
2.4.2	La méthode caRtino 1D . . . . .	42
2.4.3	Floodos 2D . . . . .	46
<b>3</b>	<b>MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES OUTILS DE CARTOGRAPHIE AUTOMATISÉE</b>	<b>51</b>
3.1	DONNÉES DE RÉFÉRENCE DISPONIBLES POUR L'ÉVALUATION . . . . .	52
3.1.1	Les données d'observation relatives aux crues . . . . .	52
3.1.2	Les cartes d'inondation simulées et expertisées . . . . .	59
3.1.3	Données de référence choisies dans le cadre des travaux de thèse . . . . .	64
3.2	MÉTHODES ET SCORES RETENUS POUR L'ÉVALUATION . . . . .	65
3.2.1	Les critères les plus utilisés dans la littérature pour la comparaison d'emprises inondées . . . . .	66
3.2.2	Critère retenu pour l'évaluation des étendues d'inondation . . . . .	67
3.2.3	Critère retenu pour l'évaluation des hauteurs d'eau simulées . . . . .	67
<b>4</b>	<b>ÉVALUATION À PARTIR DE CARTOGRAPHIES DE RÉFÉRENCE EXPERTISÉES</b>	<b>73</b>
4.1	CHOIX DES ZONES D'ÉTUDES ET DES CARTOGRAPHIES DE RÉFÉRENCE UTILISÉES	74
4.1.1	Choix et localisation des zones d'études . . . . .	74
4.1.2	Caractéristiques des cartographies DI utilisées comme référence . . . . .	75
4.2	PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DES SECTEURS D'ÉTUDE . . . . .	76
4.2.1	Secteur du TRI du Gard . . . . .	77
4.2.2	Secteur du TRI de Nice-Cannes-Mandelieu . . . . .	78
4.2.3	Secteurs des TRI Est Var et de Toulon . . . . .	81
4.3	RÉSULTATS OBTENUS ET DISCUSSION . . . . .	82
4.3.1	Modalités d'application des trois méthodes de cartographie évaluées et critère d'évaluation . . . . .	82
4.3.2	Performances générales des trois méthodes évaluées . . . . .	84
4.3.3	Cas de la méthode HAND/MS . . . . .	87
4.3.4	caRtino 1D . . . . .	87
4.3.5	Floodos 2D . . . . .	90
<b>5</b>	<b>ÉVALUATION À PARTIR D'INONDATIONS RÉELLEMENT OBSERVÉES</b>	<b>97</b>
5.1	INTRODUCTION . . . . .	98
5.2	PERFORMANCE OF AUTOMATED METHODS FOR FLASH FLOOD INUNDATION MAPPING . . . . .	99
5.2.1	Introduction . . . . .	99
5.2.2	Description of selected flood mapping approaches . . . . .	102
5.2.3	Evaluation approach . . . . .	105
5.2.4	Results . . . . .	110
5.2.5	Discussion . . . . .	112
5.2.6	Conclusion and perspectives . . . . .	117
<b>6</b>	<b>ANALYSE DE SENSIBILITÉ AUX PRINCIPALES SOURCES D'INCERTITUDE</b>	<b>121</b>

6.1	PRINCIPE GÉNÉRAL D'UNE ANALYSE DE SENSIBILITÉ . . . . .	122
6.2	CHOIX EFFECTUÉS POUR LA MISE EN ŒUVRE DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ	122
6.2.1	Les différentes sources d'incertitudes examinées . . . . .	122
6.2.2	Principes retenus pour l'analyse de sensibilité aux données topographiques .	124
6.2.3	Principes retenus pour l'analyse de sensibilité au coefficient de rugosité (Stickler)	125
6.2.4	Principes retenus pour l'analyse de sensibilité aux débits . . . . .	126
6.3	RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ . . . . .	128
6.3.1	Sensibilité aux données topographiques . . . . .	128
6.3.2	Sensibilité aux variations du coefficient de Strickler . . . . .	131
6.3.3	Sensibilité aux débits . . . . .	135
7	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	<b>143</b>
7.1	CONCLUSIONS CONCERNANT LES PERFORMANCES DES MÉTHODES DE CAR- TOGRAPHIE ÉTUDIÉES . . . . .	144
7.2	PERSPECTIVES . . . . .	147
7.2.1	Comment aller plus loin sur les approches de cartographie automatisée? . .	147
7.2.2	Quel intérêt des méthodes étudiées dans un contexte de prévision des crues soudaines? . . . . .	149
	BIBLIOGRAPHIE	<b>151</b>
A	PRISE EN MAIN DU MODÈLE 2D FLOODOS	<b>171</b>
A.1	FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DU MODÈLE FLOODOS . . . . .	171
A.2	MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE DANS LA THÈSE . . . . .	174



# LISTE DES FIGURES

1.1	Histogramme du nombres de communes reconnues CatNat inondation entre 1982 et 2019 en France. (CCR 2020)	2
1.2	Histogramme du montant des dommages assurés (hors automobile) au titre des catastrophes naturelles de 1982 à 2019 en millions d’euros(CCR 2020)	2
1.3	Différentes origines des crues : a) Crue d’origine pluviale (Gard 2002, Pont de Sommières),b) Crue causée par la fonte des neiges (Etats du Nevada et du Wyoming en février 2017, fonte rapide des neiges accompagnée de fortes pluies, source : CatNat.net), c) Crue due à une rupture d’embâcle (rupture soudaine d’embâcle sur la rivière Chaudière à Québec en avril 2019, source : lactualite.com)	3
1.4	Nombre d’arrêtés de reconnaissance Cat Nat inondation par commune entre 1982 et 2019 (CCR 2020)	4
1.5	Nombre moyen annuel de décès liés aux crues entre 1940 et 2015 dans les pays du pourtour méditerranéen selon la base de données EM-DAT (Gaume et al. 2016)	5
1.6	Exemples de dégâts engendrés par les inondations du 3 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes (source : LeMonde.fr)	5
1.7	Fonctionnement du système EFAS (source : <a href="http://www.efas.eu">www.efas.eu</a> )	6
1.8	Schéma de principe des Zones d’Inondation Potentielle (ZIP, à gauche), et des Zones Inondées par Classes de Hauteurs d’eau (ZICH, à droite) (Vigicrues 2021)	7
1.9	Fonctionnement du système ERICHA produisant des prévisions de précipitations et de risques de crues éclair (source : <a href="http://www.efas.eu/en/flash-flood-indicators">www.efas.eu/en/flash-flood-indicators</a> )	8
1.10	Principe de fonctionnement du système Vigicrues Flash (source : SCHAPI)	9
1.11	Enveloppe approchée des inondations potentielles cours d’eau : exemple des Alpes maritimes.	10
1.12	Estimation des pertes économiques directes dans la zone urbaine du village de Pajares de Pedraza en Espagne, pour une crue éclair de période de retour de 50 ans. La cartographie est réalisée avec le modèle Iber 2D basé sur une information topographique Lidar de 1m de résolution. (Garrote et al. 2016)	12
1.13	Exemple d’utilisation d’un catalogue de scénarios d’inondation (Le Bihan 2016) : Carte des étendues inondées estimées pour des débits $Q_n$ et $Q_{n+1}$ encadrant le débit $Q_{sim}$ prévu par le modèle hydrologique, pour la crue des 8 et 9 septembre 2002 sur le Gardon d’Alès à Alès. L’étendue inondée réelle est représentée en rouge.	12

1.14	Schéma organisationnel présentant les différentes tâches du projet ANR PICS. source : <a href="https://pics.ifsttar.fr">https://pics.ifsttar.fr</a> . . . . .	14
2.1	Carte hydrogéomorphologique de la vallée de l'Orbieu (Aude) (Delorme-Laurent et Ballais 2006) . . . . .	19
2.2	Plaine alluviale fonctionnelle (Ballais et al. 2011) . . . . .	19
2.3	Profil en long de la ligne d'eau obtenu d'un calcul hydraulique en utilisant HecRAS 1D en régime permanent . . . . .	22
2.4	discrétisation d'un tronçon de cours d'eau en utilisant des profils en travers . . . . .	22
2.5	principe des cellules de stockage et leur interaction avec le cours d'eau (Nicole GOUTAL et Fabrice ZAOUI 2020) . . . . .	23
2.6	Discretisation en éléments finis Telemac 2D (Horritt et Bates 2002) . . . . .	25
2.7	Simulation de la crue de la Brague d'octobre 2015 avec le modèle Basilisk, avec l'évolution des hauteurs d'eau et le raffinement des mailles de calcul (Stage Maryse Charpentier-Noyer) . . . . .	26
2.8	Description de l'indice géomorphologique d'inondation $GFI = \ln(h_r/H)$ . Représentation des paramètres H et $h_r$ en plan (A) et en profil en travers (B) (Samela et al. 2017) . . . . .	27
2.9	Fonctionnement général du modèle AutoRoute pour calculer les profondeurs en eau et les zones inondées (Follum et al. 2017) . . . . .	28
2.10	Exemple de cartes d'inondation générées avec CaMa-Flood sur l'Europe : a) Carte d'inondation de résolution 25 km pour une période de retour de 50 ans. b) Carte d'inondation de résolution de 1 km pour une période de retour de 50 ans. 1 signifie que la cellule est inondée à 100 %, 0,5 signifie que la cellule est inondée à 50 % et 0 signifie que la cellule n'est pas du tout inondée. Les Principaux fleuves européens sont représentés par des lignes bleues. Toutes les zones blanches indiquent un pourcentage d'inondation inférieur à 5 %. (Pappenberger et al. 2012) . . . . .	30
2.11	Schéma du système d'évaluation des risques d'inondation à l'échelle globale (Winsemius et al. 2013) . . . . .	31
2.12	Carte panafricaine des étendues d'inondation pour la période de retour de référence de 100 ans obtenue avec la méthode proposée par Dottori et al. (2016)	32
2.13	Exemple de résultats de la simulation des hauteurs d'eau maximales du modèle HiResFlood-UCI pour le bassin versant ELDO2 dans l'Oklahoma aux États Unis. Le MNT utilisé est de 10 m de résolution (Nguyen et al. 2016) . . . . .	33
2.14	Comparaison de l'étendue de l'inondation centennale Geoflood et de l'étendue d'inondation centennale de la FEMA (Federal Emergency Management Agency) sur plusieurs bassins versants aux États Unis : Onion Creek (a), Boggy Creek (b), Marble Creek (c), Onion Creek (d), Slaughter Creek (e) et Williamson Creek (f). Les chiffres le long des rivières indiquent la hauteur d'eau moyenne attribuée à chaque tronçon de cours d'eau (Zheng et al. 2018)	34

2.15	Illustration de la mise en œuvre du modèle d'impact sur un tronçon de cours d'eau : (a) catalogue des zones inondées obtenues avec CARTINO PC, (b) courbe interpolée débit-impact Le Bihan et al. (2017) . . . . .	35
2.16	Découpage du domaine de calcul mis en oeuvre par Sanders et Schubert (2019). Le domaine de calcul représenté ici contient 608 mailles. Le niveau de l'océan a été spécifié le long de la frontière côtière (bleu clair), et une condition de sortie libre a été utilisée sur toutes les frontières terrestres du domaine de calcul. (Sanders et Schubert 2019) . . . . .	36
2.17	Schéma du principe de construction de carte d'inondation avec la méthode HAND/MS. Ce schéma présente les données d'entrée dans les cases blanches, les principales de calcul en orange et bleu et les informations de sortie en vert.	38
2.18	Schéma de la méthode HAND (Nobre et al. 2016) . . . . .	38
2.19	Modèle conceptuel de la géométrie de la rivière utilisé par HAND (Zheng et al. 2018) . . . . .	41
2.20	Algorithme simplifié du fonctionnement de l'outil caRtino 1D . . . . .	43
2.21	Sorties obtenues pour 3 étapes intermédiaires de la méthode caRtino 1D : a) premier positionnement des profils en travers avec largeur et espacement fixes, b) repositionnement des profils, c) post-traitement des hauteurs d'eau . . . . .	43
2.22	Exemple de courbe d'interpolation des largeurs au miroir . . . . .	44
2.23	Schéma explicatif de l'équation d'énergie de Bernoulli utilisée dans HEC-RAS	45
2.24	évolution de la hauteur d'eau dans une cellule lors des passages de précipitons (Davy et al. 2017) . . . . .	47
2.25	Convergence de la méthode Floodos (Davy et al. 2017) . . . . .	48
3.1	Cartes d'inondation produites sur la base de données satellitaires RSO (Rahman 2018) . . . . .	53
3.2	Données de hauteur d'eau enregistrées par les stations hydrométriques dans (A) Saragosse, Espagne (vallée de l'Ebre); (B) Alexandrie, Italie (fleuve Tanaro); et (C) Carignan, Italie (fleuve Pô) et dates de passage des différents satellites (Notti et al. 2018) . . . . .	54
3.3	Illustrations des relevés des plus hautes eaux (Cerema 2016) . . . . .	56
3.4	Inondation de septembre 2007 dans le Gard. Carte des niveaux de risque maximum prévus et des routes inondées signalées en bleu (observations).(Naulin et al. 2013) . . . . .	57
3.5	Évolution temporelle du pourcentage de répondants par type d'activité et de l'intensité surfacique des précipitations et de l'heure des débits de pointe correspondants sur la zone d'étude de l'événement de l'Argens de juin 2010. Le pas de temps est de 15 minutes (Ruin et al. 2014) . . . . .	58
3.6	Distribution variable de la mortalité, fortement dépendante de la localisation des événements d'inondation sur le bassin méditerranéen occidental (Catalogne, sud de la France et îles Baléares) avec une grille hexagonale de 20 × 20 km (Vinet et al. 2019) . . . . .	58

3.7	Répartition des victimes d'inondations en fonction de l'altitude dans le sud de la France (n = 274)(Vinet et al. 2019) . . . . .	59
3.8	Nombre de dommages liés aux événements d'inondations par type d'élément touché depuis 2011 dans le sud de la France (Saint-Martin et al. 2018) . . . . .	59
3.9	(a) Classes de sévérité de l'impact dans et autour de la ville de Mandra (Grèce), en comparaison avec (b) la carte de profondeur d'eau maximale reconstituée à partir des marques des plus hautes eaux. Le bleu clair désigne les eaux peu profondes, tandis que le violet désigne les eaux plus profondes(Diakakis et al. 2020) . . . . .	60
3.10	Carte de zones inondées prévues superposée aux données de sinistres géocodées avec précision du numéro de rue. Focus sur la plaine inondable aval de l'Argens près de Fréjus, Saint-Raphaël et Roquebrune (Moncoulon et al. 2014) . . . . .	61
3.11	Carte de comparaison des zones d'inondation simulées et des sinistres d'assurance à Nidwald (Suisse). (Zischg et al. 2018) . . . . .	61
3.12	Comparaison du nombre estimé de polices touchées par l'inondation (modèle) et du nombre de sinistres associés pour chaque tronçon de rivière : (a) événement d'Alès 2002 et (b) événement de Draguignan 2010. Les lignes bleues correspondent à la relation binomiale moyenne sinistres = polices et à l'intervalle de confiance associé de 90 %, les barres verticales représentent l'incertitude du nombre de sinistres liés à l'inondation de la rivière.(Le Bihan et al. 2017) . . . . .	62
3.13	Carte des Aléas du PPRi de la commune de Limoux dans l'Aude (DDTM de l'Aude 2016) . . . . .	62
3.14	Une partie de la carte des surfaces inondables pour les trois scénarios de fréquence forte, moyenne et faible retenus dans le TRI d'Alès (DREAL Languedoc Roussillon 2013) . . . . .	64
3.15	Exemple de carte de comparaison de l'étendue d'inondation simulée à l'étendue de référence . . . . .	68
3.16	Exemple de carte de différences (m) entre les niveau d'eau simulés et les PHE observées. les niveaux d'eau fortement surestimés apparaissent en rouge et les niveaux d'eau sous-estimés en jaune. Les PHE situées en dehors des secteurs d'emprises cartographiées (bassins versant amont d'au moins 5 km <sup>2</sup> dans ce cas) ont été ignorées (losanges bleus). . . . .	69
4.1	Secteurs d'application des méthodes . . . . .	74
4.2	Carte de synthèse des trois scénarii d'inondation établis par le Cerema sur le cours d'eau de la Brague (DREAL PACA 2013), en application de la Directive Inondation . . . . .	76
4.3	Secteur du Gard . . . . .	78
4.4	Secteur de Nice . . . . .	80
4.5	Secteur Est Var : Giscle et Bourrian . . . . .	81
4.6	Secteur Est Var : Agay et Pédégat . . . . .	82
4.7	Secteur de Toulon . . . . .	82

4.8	scores de CSI obtenus pour les 3 méthodes de cartographie évaluées. 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) . . . . .	84
4.9	Rapport entre les surfaces inondées simulées et les surfaces inondées de référence pour les 3 méthodes évaluées. 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) . . . . .	85
4.10	Comparaison des résultats de Floodos et de caRtino (graphiques à gauche), de Floodos et de HAND/MS (graphiques à droite) : les figures a) et b) représentent le scénario fréquent, c) et d) le scénario moyen et e) et f) le scénario rare . . . . .	86
4.11	Carte d'évaluation de l'approche HAND/MS sur la Siagne pour la période de retour $T = 100$ ans. Les trois profils en travers (a), (b), et (c) illustrent des limites de la méthode conduisant à une sous-estimation de l'inondation. . . . .	88
4.12	Carte d'évaluation de l'approche caRtino sur la Siagne pour la période de retour $T = 30$ ans. Le profil en travers illustre la problématique d'obstacles à l'élargissement des profils dans le lit majeur. . . . .	89
4.13	Carte d'évaluation de l'approche caRtino sur le Pédégal pour la période de retour $T = 30$ ans. Les limites des bassins versants associés à chaque tronçon sont représentées en noir. Les chiffres en rouge représentent les scores CSI obtenus sur chaque tronçon. . . . .	90
4.14	Carte d'évaluation de l'approche Floodos sur le Pédégal pour la période de retour $T = 30$ ans. Les limites des bassins versants associés à chaque tronçon sont représentées en noir. Les chiffres en rouge représentent les scores CSI obtenus sur chaque tronçon. . . . .	91
4.15	Carte d'évaluation de l'approche Floodos sur le Gardon d'Alès pour la période de retour $T = 30$ ans, sans nettoyage des obstacles à l'écoulement. Les limites des bassins versants associés à chaque tronçon sont représentées en noir. Les chiffres en rouge représentent les scores CSI obtenus sur chaque tronçon. . . . .	92
4.16	Carte d'évaluation de l'approche Floodos sur le Gardon d'Alès pour la période de retour $T = 30$ ans, avec nettoyage des obstacles à l'écoulement. Les limites des bassins versants associés à chaque tronçon sont représentées en noir. Les chiffres en rouge représentent les scores CSI obtenus sur chaque tronçon. . . . .	92
5.1	Synthetic representation of the simulation workflow for the 3 selected flood mapping methods . . . . .	103
5.2	Presentation of the 3 considered areas and flood events : a) location of watersheds, b) Argens 2010, c) Alpes Maritimes 2015, d) Aude 2018 (Map data : © IGN, © Météo France) . . . . .	107
5.3	Observed versus simulated peak discharges with the Cincicar rainfall-runoff model for the three simulated flood events . . . . .	109
5.4	Simulated and observed flood areas and water levels, for the Aude 2018 event and the Floodos simulation approach . . . . .	110

5.5	Comparison of CSIs computed for the river reaches : a) HAND/MS vs Floodos, Argens 2010 event, b) caRtino 1D vs Floodos, Argens 2010 event, c) HAND/MS vs Floodos, Aude 2018 event, d) caRtino 1D vs Floodos, Aude 2018 event. The boxplots represent respectively the 5% and 95% (whiskers), and the 15% and 85% quantiles (boxes) . . . . .	112
5.6	Comparison of simulated water levels and observed high water marks (HWM), for the three methods and the three events. The boxplots represent respectively the 5% and 95% (whiskers), and the 15% and 85% quantiles (boxes) . . . . .	113
5.7	Simulation results on the Argent-Double river at Le Redorte, showing large differences between the three tested approaches : a) HAND/MS, b) caRtino 1D, c) Floodos, d) cross-section 1, comparing water surface and terrain elevations, and the HAND profile (addition of the HAND height values and the elevation of the drainage point in the section), e) cross-section 2 (same information as cross-section 1) . . . . .	114
5.8	Illustration of errors induced by the limitations of the DTM : a) Aude river at Carcassone, simulation results (Floodos model), b) Aude river at Carcassone, cross-sections and simulated water level, c) Fresquel river at Pezens, simulation results(Floodos model), d) Fresquel river at Pezens, cross-sections and simulated water level . . . . .	115
5.9	Illustration of large water levels underestimations : a) Trapel river at Villegailhenc, simulation results (Floodos model) and picture of the bridge destroyed by the flood, b) Fount Guilhen river at Cazilhac, simulation results (Floodos model) with the initial discharge value ( $84.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ corresponding to a CN value of 70 in the Cinecar rainfall-runoff model), c) Fount Guilhen river at Cazilhac, simulation with a modified discharge ( $116.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , CN value of 90)	116
6.1	Hauteurs d'eau moyennes et surfaces inondées moyennes obtenus avec le modèle HecRas 1D avec des résolutions de MNT différentes pour les cours d'eau de : (a) Strouds Creek ; (b) Tippecanoe ; et (c) Saint Joseph aux USA (Saksena et Merwade 2015) . . . . .	123
6.2	Illustration de l'identification du lit mineur et des digues qui ont servi pour le ré-échantillonnage des MNT et pour la distinction du coefficient de rugosité entre lit mineur et lit majeur . . . . .	126
6.3	Evaluation des débits de pointe obtenus avec le modèle hydrologique Cinecar pour la crue de l'Aude d'octobre 2018 : a) avec les lames d'eau Antilope J+1, b) avec la lame d'eau Antilope réanalysée (Caumont et al. 2021), c) comparaison des débits pour les deux lames d'eau. . . . .	128
6.4	Evaluation comparée des emprises d'inondation simulées (score CSI) pour la crue de l'Aude d'octobre 2018, pour différentes données topographiques d'entrée. . . . .	129
6.5	Comparasion des altitudes des lignes d'eau simulées avec les relevés PHE, pour les 5 différents MNT utilisés en entrée . . . . .	130

6.6	Comparaison des profils en travers et des étendues d'inondation obtenus au niveau du tronçon de l'Argent Double à Terssan, avec les MNT 5m moyenne et 5m min-max : a) carte d'évaluation de l'étendue d'inondation pour le MNT 5m moyenne (score CSI en rouge), b) profil en travers 1, c) carte d'évaluation de l'étendue d'inondation pour le MNT 5m min-max (score CSI en rouge), d) profil en travers 2. . . . .	131
6.7	Comparaison des évaluations des emprises d'inondation simulées pour la crue de l'Aude d'octobre 2018 (score CSI), pour différentes valeurs de coefficients de Strickler retenues en lit mineur et lit majeur. . . . .	132
6.8	Comparaison des étendues d'inondation (scores CSI en rouge) et des hauteurs d'eau au niveau du tronçon du Trapel à Villegailhenc : a) Strickler 15 , b) Strickler 10 . . . . .	133
6.9	Comparaison des étendues d'inondation (score CSI en rouge) au niveau du tronçon de l'Argent Double à Terssan : a) Strickler 15, b) Strickler 10 . . . . .	133
6.10	Comparaison des évaluations sur les relevés de PHE avec différentes rugosités en entrée . . . . .	134
6.11	Comparaison des évaluations des emprises d'inondation simulées pour la crue de l'Aude d'octobre 2018 (score CSI), pour différentes valeurs des débits d'entrée utilisées dans les modélisations Floodos : a) et b) variations de +- 20 % du débit initial Q, c) et d) variations de +- 40 %, et e) utilisation de la lame d'eau Antilope réanalysée. . . . .	136
6.12	Comparaison des évaluations effectuées à partir des relevés de PHE, pour la crue de l'Aude d'octobre 2018, pour différentes variations des débits injectés dans le modèle Floodos . . . . .	137
6.13	Comparaison des étendues d'inondation et des scores de CSI (en rouge) obtenus au niveau du tronçon de l'Argent Double à Terssan : a) débit Q de référence, b) Q-20 %, c) Q+20 % et d) Q+40 % . . . . .	138
6.14	Comparaison des étendues d'inondation et des scores de CSI (en rouge) obtenus sur le tronçon de l'Aude sur le vieux pont de Carcassonne : a) débit Q de référence, b) Q-20 %, c) Q-40 % . . . . .	138
6.15	Comparaison des étendues d'inondation et scores de CSI (en rouge) obtenus sur le tronçon du Fresquel à Pezens : a) calcul MNT 5m moy, Strickler = 15, b) MNT 1m, c) Q-40 %, d) Strickler = 30 . . . . .	139
A.1	Convergence vers différentes solutions avec des volumes de précipitations différents (Davy et al. 2017) . . . . .	172
A.2	Fichier .alt avec le mur à l'amont du tronçon : Les points rouges représentent les points d'injection de débit sur le tronçon de cours d'eau . . . . .	175
A.3	Création du fichier .rain . . . . .	176
A.4	Vérification de la stabilisation de la hauteur d'eau pour chaque valeur de précipitation . . . . .	177
A.5	Exemple de niveau d'eau moyen bruité . . . . .	178

A.6	Distribution des scores RMSE mesurant l'écart entre les solutions des calculs Floodos, pour les volumes de précipitation $Vp1$ et $Vp2$ , puis $Vp2$ et $Vp3$ , pour les études de cas de l'Argens, de l'Aude et des Alpes Maritimes . . . . .	178
A.7	Pics de hauteur observés lors de la reprise des calculs . . . . .	179
A.8	Distributions des temps de calcul et du nombre d'itérations (reprises du calcul) sur les tronçons des " études de cas traitées . . . . .	179



# Liste des tableaux

3.1	Table de contingence . . . . .	66
4.1	Tableau récapitulatif des caractéristiques des trois cours d'eau étudiés dans le secteur du Gard . . . . .	78
4.2	Linéaire simulé et données de simulation dans le secteur du Gard. Pour les débits, l'intervalle indique la gamme des débits injectés d'amont en aval du secteur modélisé . . . . .	79
4.3	Tableau récapitulatif des caractéristiques des sept cours d'eau étudiés dans le secteur de Nice . . . . .	79
4.4	Linéaire simulé et données de simulation du secteur de Nice . . . . .	80
4.5	Tableau récapitulatif des caractéristiques des trois cours d'eau étudiés dans les secteurs Est Var et Toulon . . . . .	83
4.6	Linéaire simulé et données utilisées dans la simulation secteur Est Var. Pour les débits, l'intervalle indique la gamme des débits injectés d'amont en aval du secteur modélisé . . . . .	83
4.7	Tableau récapitulatif des avantages et des limites des méthodes à partir des résultats de comparaison aux cartographies DI . . . . .	93
5.1	Comparison of computation times . . . . .	117
A.1	Tableau (partiel) des paramètres définis dans le fichier .arg ou .dat du modèle Floodos . . . . .	173

# Chapitre 1

## Introduction Générale

### 1.1 Les inondations en France et dans le monde

Au cours de l'année 2017, plusieurs épisodes de précipitations intenses, dans différentes régions du monde, ont mis en évidence la vulnérabilité des territoires de plus en plus urbanisés face aux inondations. Houston a par exemple subi d'importantes inondations en raison des fortes précipitations qui ont accompagné l'ouragan Harvey. En Chine, de fortes pluies ont provoqué une crue du Yangtze, avec des inondations pluviales et fluviales dans 11 provinces, inondant plus de 400 000 foyers. Les pertes économiques ont été estimées à 6 milliards de dollars, ce qui en fait la catastrophe la plus coûteuse de l'année 2017 en Asie. Pendant la mousson, des pluies très abondantes et de longue durée ont causé d'énormes dégâts et des pertes en vies humaines en Inde, au Népal et au Bangladesh. Les pertes économiques dues à une série d'inondations dans le Bihar, l'Assam, le Bengale occidental et d'autres États de l'Inde se sont élevées à environ 2,5 milliards de dollars, et à 0,6 milliard de dollars dans la région du Teraï au Népal (SwissRe 2018).

La France n'est pas épargnée par ce phénomène, comme on peut le constater sur la figure 1.1 où est présentée l'évolution du nombre de communes reconnues en état de catastrophe naturelle (Cat Nat) au titre des inondations entre 1982 et 2019. Sur la seule année 1999 par exemple, 28679 communes ont été reconnues en état de catastrophe naturelle pour un phénomène d'inondation, ce qui constitue le record enregistré à ce jour. Sur la figure 1.2, on constate que les coûts des dommages liés aux inondations représentent une proportion importante des coûts liés aux catastrophes naturelles en France, en fait la grande majorité si l'on fait abstraction du cas particulier des dommages rattachés aux sécheresses.

Une grande partie des inondations dommageables dans le monde sont causées par les crues des cours d'eau. Une crue est un phénomène hydrologique qui correspond à l'augmentation temporaire du débit d'un cours d'eau, et par conséquent des niveaux d'eau. En France, l'une des crues récentes les plus remarquables est la crue de la Seine de mai-juin 2016, qui a été la première à dépasser la cote de 6 mètres à l'échelle du pont d'Austerlitz à Paris depuis la crue de janvier 1982. Contrairement à la plupart des crues historiques de la Seine depuis le 17<sup>ème</sup> siècle, celle-ci s'est produite au printemps, ce qui est inhabituel, et a été caractérisée par une montée rapide (une durée de montée de 7 jours) comparée à la montée de crue habituelle

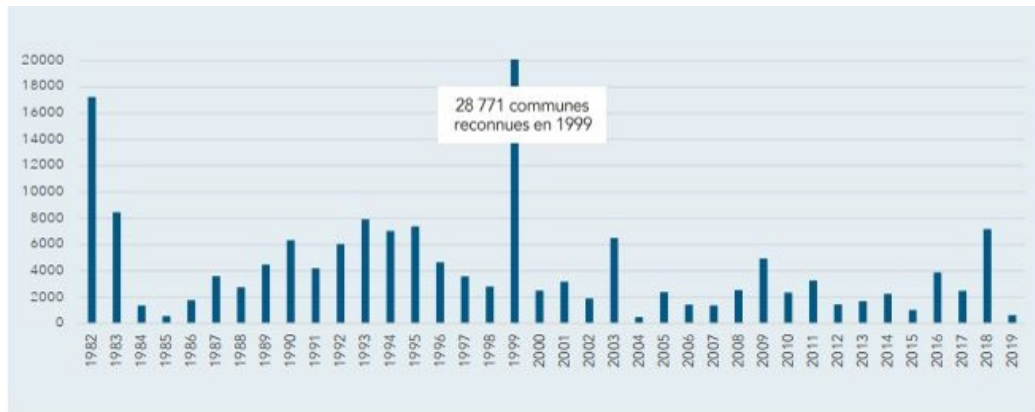


FIGURE 1.1 – Histogramme du nombre de communes reconnues CatNat inondation entre 1982 et 2019 en France. (CCR 2020)

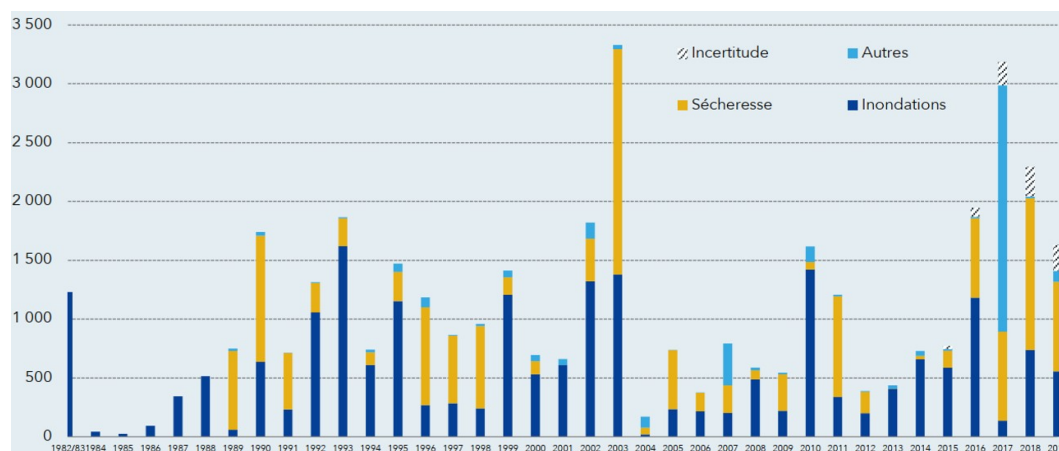


FIGURE 1.2 – Histogramme du montant des dommages assurés (hors automobile) au titre des catastrophes naturelles de 1982 à 2019 en millions d'euros (CCR 2020)

de la seine qui est de l'ordre de 15 jours. (CCR 2017). Cette crue a causé le débordement de plusieurs cours d'eau dont la Seine, le Loing, l'Yvette, l'Yerres et la Bièvre qui ont été à l'origine de nombreux dommages. Au 26 décembre 2017, la CCR estimait que le coût de cet événement se situait entre 900 M€ et 1 000 M€ pour les assureurs, et par ailleurs 1 387 communes étaient reconnues en état de Catastrophe Naturelle à cette date (CCR 2017).

## 1.2 Le cas particulier des crues soudaines

Les crues peuvent être regroupées selon les causes qui les engendrent : les crues liées à des événements pluvieux exceptionnels, qu'il s'agisse de pluies de faible intensité et de longue durée sur un vaste territoire, ou bien de pluies localisées de forte intensité et de courte durée (figure 1.3.a) ; les crues de fonte nivale, généralement engendrées par une augmentation de la température accompagnée de précipitations (figure 1.3.b) ; et enfin, plus rarement, les crues d'embâcle et de débâcle, l'embâcle correspondant à une obstruction temporaire du lit du cours d'eau, qui lors de sa rupture (débâcle) peut engendrer une montée de crue violente mais brève (figure 1.3.c). Les embâcles peuvent être causées par des blocs de glace sur un cours d'eau gelé, ou bien par des amoncellements de troncs d'arbre sous un pont par exemple.



FIGURE 1.3 – *Différentes origines des crues : a) Crue d'origine pluviale (Gard 2002, Pont de Sommières), b) Crue causée par la fonte des neiges (Etats du Nevada et du Wyoming en février 2017, fonte rapide des neiges accompagnée de fortes pluies, source : CatNat.net), c) Crue due à une rupture d'embâcle (rupture soudaine d'embâcle sur la rivière Chaudière à Québec en avril 2019, source : lactualite.com)*

Selon la nature du cours d'eau considéré, la dynamique temporelle des crues peut s'avérer très différente. Les caractéristiques des crues dépendent en effet directement du régime hydrologique du cours d'eau et de la taille de son bassin versant. On oppose classiquement les crues fluviales, relativement lentes, et les crues soudaines. Les crues fluviales affectent généralement les grands cours d'eau qui drainent des bassins versants de surfaces importantes, typiquement plusieurs milliers de  $km^2$ . Les crues soudaines peuvent affecter n'importe quelle partie du réseau hydrographique, mais le plus souvent ce sont les petits cours d'eau et les cours d'eau de tête de bassins versants qui sont concernés. Sur ces cours d'eau, les crues sont souvent dues à des pluies à caractère convectif de très forte intensité et d'extension spatiale limitée, qui provoquent une montée brutale et très rapide des eaux. Lorsque le délai entre le maximum d'intensité des pluies et le pic de crue est inférieur à 6 heures, la crue est généralement qualifiée de crue-éclair ou crue soudaine. Certains cours d'eau peuvent toutefois avoir des comportements hybrides. Le bassin versant du Var est par exemple soumis à un régime hydrologique dit « nivo-pluvial », ce qui signifie que le cours d'eau du Var peut connaître des crues liées à la fois à des pluies intenses méditerranéennes et à des phénomènes de fonte des neiges.

En Europe et en France, les crues soudaines s'avèrent beaucoup plus fréquentes et causent des dégâts très importants dans les régions proches de la Méditerranée (Gaume et al. 2009). La figure 1.4, qui représente de façon cartographique le nombre cumulé de reconnaissances "Cat Nat" par commune entre 1982 et 2019, montre assez clairement que les communes du littoral méditerranéen sont touchées plus fréquemment par des inondations. Cela est dû au climat

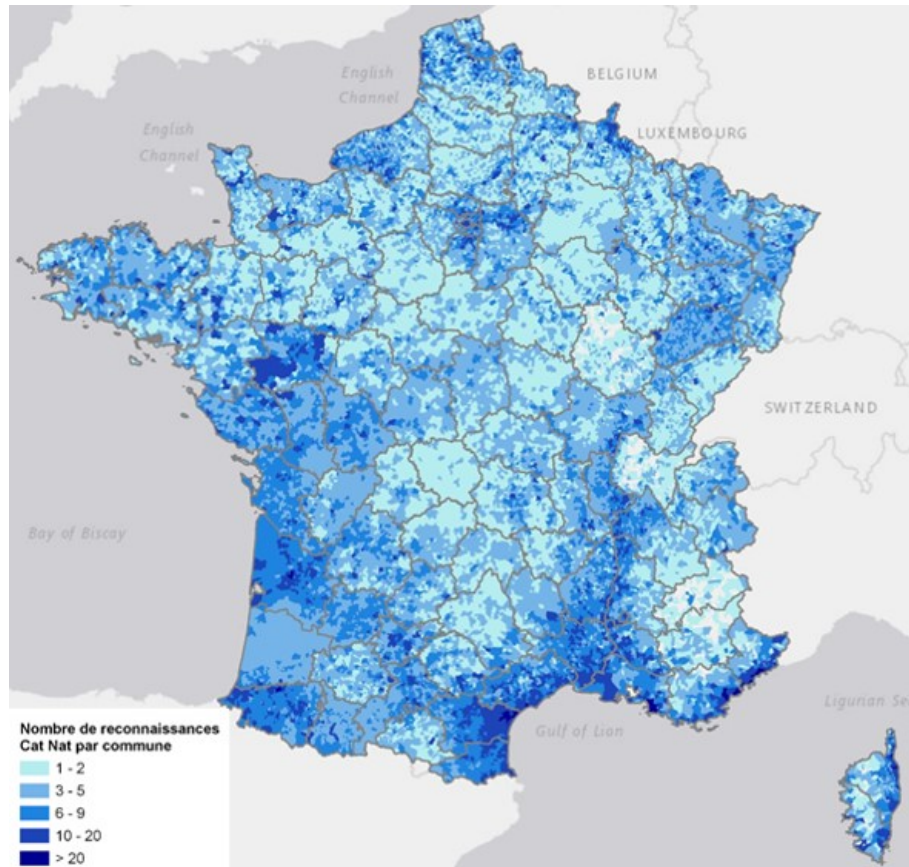


FIGURE 1.4 – Nombre d'arrêtés de reconnaissance Cat Nat inondation par commune entre 1982 et 2019 (CCR 2020)

local, qui est favorable à la formation de précipitations brèves et intenses. Les reliefs entourant la mer Méditerranée forcent la convergence des flux atmosphériques de basse altitude et le soulèvement des masses d'air chaud et humide provenant de la mer Méditerranée, favorisant ainsi des phénomènes de convection intense (Gaume et al. 2016). Les fortes accumulations locales de pluie qui peuvent en résulter favorisent la formation des crues soudaines et intenses, à l'origine d'inondations et des dégâts importants, que ce soit en termes de pertes de vies humaines (figure 1.5) ou de pertes économiques. L'arc méditerranéen français fait finalement partie des régions du monde exposées aux crues soudaines les plus fréquentes et violentes (Gaume et al. 2009; 2016).

Les crues qui se sont produites le 3 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes sont un exemple caractéristique de crues soudaines ayant touché de très petits cours d'eau, mais ayant néanmoins causé de très importants dégâts. Ces crues ont été causées par des pluies particulièrement intenses sur des durées d'une à deux heures, dont la période de retour estimée dépasse 100 ans pour les deux stations de Cannes et Mandelieu. Une intensité de 115 mm/h a été enregistrée à Mandelieu, et constitue à ce jour le record d'intensité horaire mesuré dans la région. Lors de cet événement, ce sont de petits cours d'eau côtiers (Brague, Grande Frayère, Riou d'Argentière) qui ont le plus réagi, car situés sous la cellule des pluies intenses. Les surfaces des bassins versants de ces cours d'eau n'excèdent pas  $70\text{km}^2$ . Les crues de ces cours d'eau ont entraîné la mort de vingt personnes et de très importants dégâts matériels (figure 1.6), en raison du caractère fortement urbanisé de la partie aval des bassins



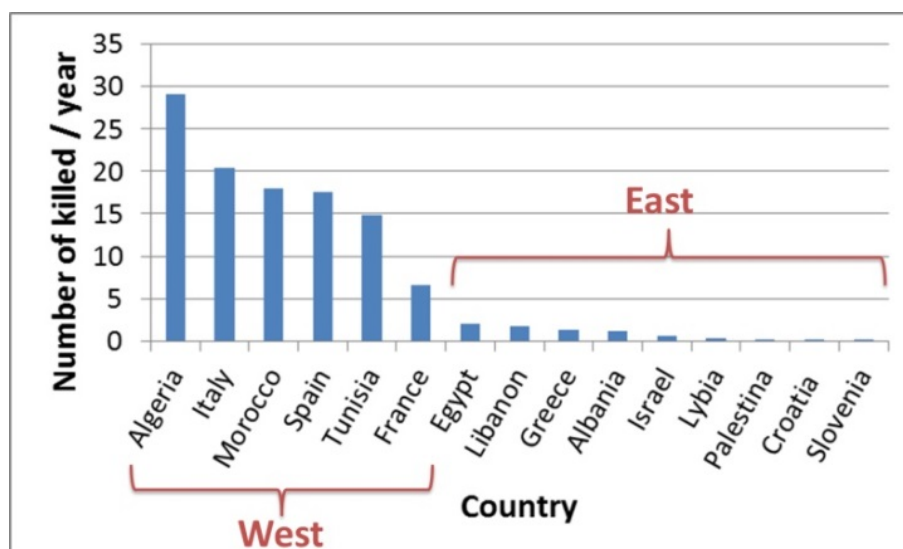


FIGURE 1.5 – Nombre moyen annuel de décès liés aux crues entre 1940 et 2015 dans les pays du pourtour méditerranéen selon la base de données EM-DAT (Gaume et al. 2016)

versants (Prefet des Alpes Maritimes 2016). Les cours d'eau traversent en effet les villes de Mandelieu, Cannes, et Antibes. Avec un coût estimé par la CCR situé entre 500 et 650 millions d'euros (CCR 2017), cet événement, malgré sa faible extension géographique, se plaçait en 2017 en quatrième position des catastrophes naturelles survenues en France, en termes de coûts économique et humain (Saint-Martin et al. 2018).

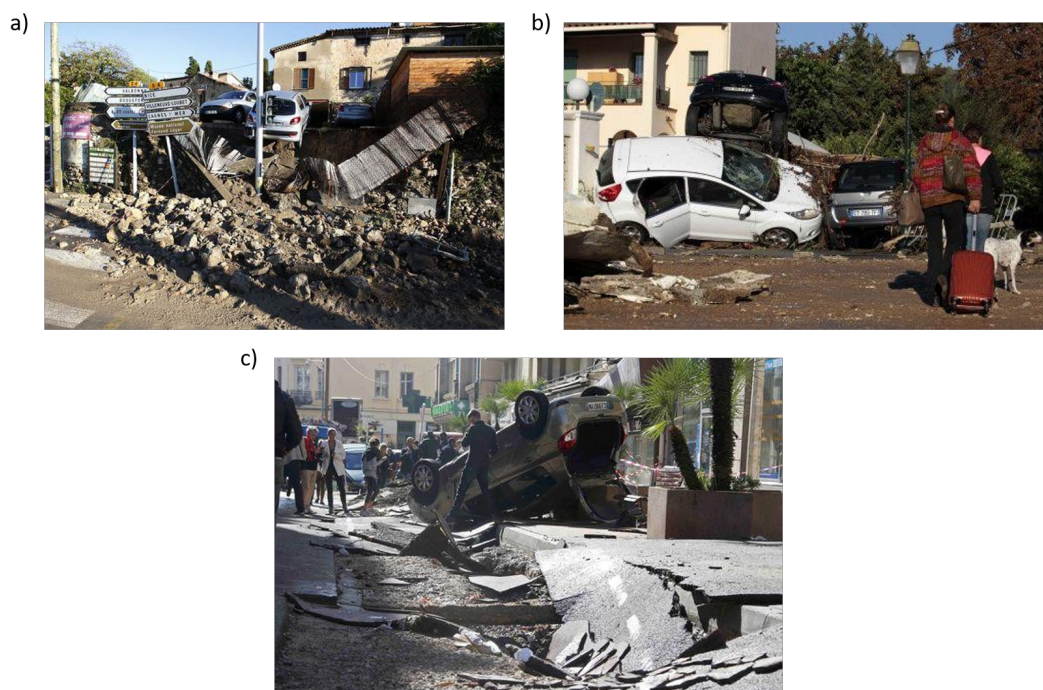


FIGURE 1.6 – Exemples de dégâts engendrés par les inondations du 3 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes (source : LeMonde.fr)

Pour faire face à ces phénomènes de crues soudaines, qui constituent une menace importante et dont la fréquence pourrait encore augmenter dans les années à venir du fait du changement climatique (Ribes et al. 2019, Tramblay et al. 2019), il est nécessaire de mieux

comprendre et anticiper leur formation, et de progresser dans la connaissance des secteurs exposés à ces crues. Au cours des dernières années, de nombreux moyens ont été mis en œuvre afin de progresser dans cette voie.

## 1.3 L'émergence de systèmes de prévision et d'avertissement dédiés aux crues soudaines

### 1.3.1 Les systèmes de prévision mis en place sur les cours d'eau principaux

De nombreux systèmes d'avertissement précoce dédiés aux risques d'inondation existent dans le monde. On peut citer notamment le système Européen EFAS (European Flood Awareness System, figure 1.7) et son homologue mondial GLOFAS (Global Flood Awareness System) qui fournissent des avertissements précoces plusieurs jours à l'avance. Ces systèmes combinent généralement des prévisions de pluie et des modèles hydrologiques, et intègrent de plus en plus souvent des modèles ou des scénarios d'inondation permettant d'estimer les impacts. En France, le système actuel de vigilance dédié aux crues (Vigicrues) a été mis en place en 2006<sup>1</sup>, de façon à anticiper 24 h à l'avance les risques de crues dommageables. Tous ces systèmes intègrent peu à peu une représentation des inondations et des risques associés. Le point commun de tous ces systèmes opérationnels est néanmoins qu'ils ne couvrent généralement que les cours d'eau principaux, et ne sont donc pas adaptés aux phénomènes de crues soudaines. En France, le réseau Vigicrues du Ministère de la Transition Ecologique, qui est en

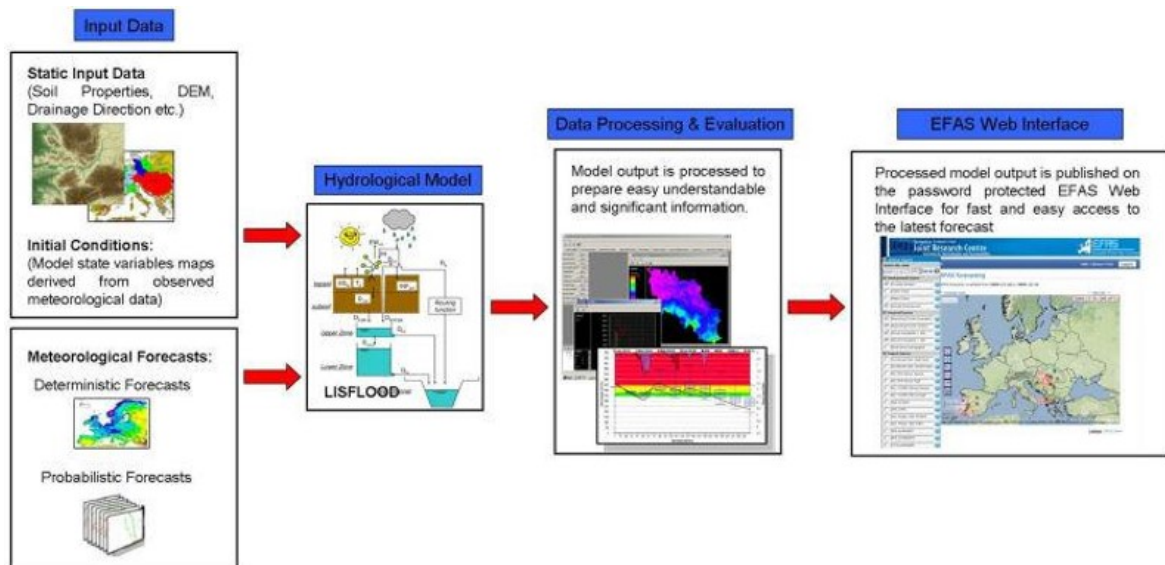


FIGURE 1.7 – Fonctionnement du système EFAS (source : [www.efas.eu](http://www.efas.eu))

charge de la prévision des crues, cherche actuellement à relever deux défis majeurs que sont le passage à la prévision des inondations, et le développement de la prévision des crues soudaines. Au cours des prochaines années, la prévision des inondations va progressivement être mise en œuvre sur les cours d'eau réglementaires (21700 km de cours d'eau principaux), en

1. À noter que les premiers services de surveillance et de prévision des crues ont été créés dès le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle en France (Roche et al. 2012)

s'appuyant sur des catalogues de cartes d'inondations rattachées aux hauteurs mesurées aux stations. Ces cartographies sont établies en amont et représentent des scénarios théoriques, mais elles constituent un outil essentiel d'aide à la gestion de crise pour les acteurs en leur permettant de visualiser les zones susceptibles d'être inondées en fonction des hauteurs d'eau prévues aux stations hydrométriques (DGPR 2017). Deux types de cartographies sont disponibles (figure 1.8) : la zone d'inondation potentielle (ZIP), carte unique qui indique la surface maximale pouvant être recouverte par les eaux ; et la zone inondée par classes de hauteurs d'eau (ZICH), qui distingue également les hauteurs de submersion et les types d'inondation. Néanmoins, cet important travail de cartographie ne concerne que les cours d'eau principaux et jaugés (DGPR 2017). En parallèle, un premier service d'avertissement dédié aux crues

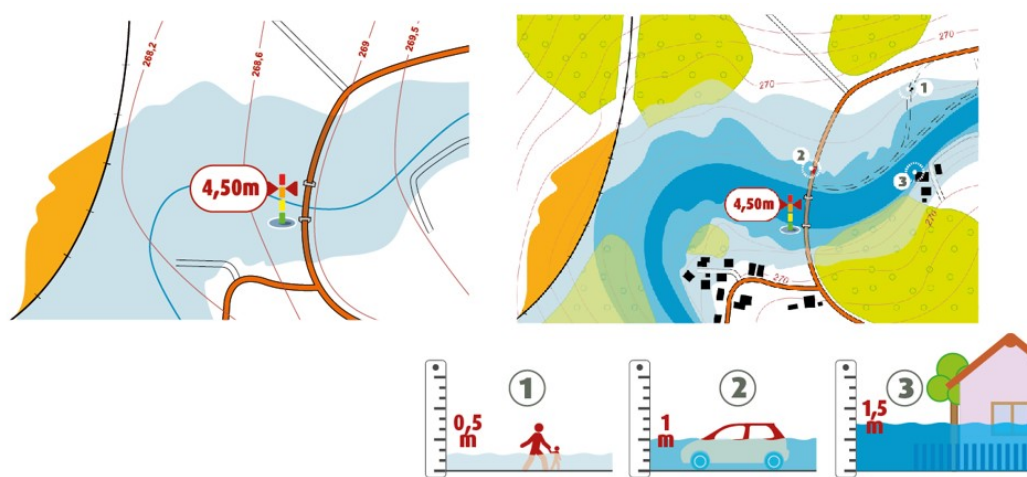


FIGURE 1.8 – Schéma de principe des Zones d'Inondation Potentielle (ZIP, à gauche), et des Zones Inondées par Classes de Hauteurs d'eau (ZICH, à droite) (Vigicrues 2021)

soudaines, dénommé "Vigicrues Flash", a été déployé en 2017 sur plusieurs milliers de petits cours d'eau situés hors du réseau réglementaire. Ce système sera décrit plus en détails au paragraphe suivant.

### 1.3.2 L'apparition de systèmes de prévision couvrant les petits cours d'eau

Les systèmes d'anticipation dédiés aux crues soudaines sont apparus assez récemment, aux États-Unis et en Europe. Les premiers systèmes mis en œuvre se sont généralement basés sur le principe des Flash Flood Guidances (FFG), qui est utilisé dans un grand nombre de régions du monde (Modrick et al. 2014). Cette approche est basée sur la comparaison en temps réel des précipitations observées ou prévues, avec le volume seuil de précipitations sur une durée donnée, suffisant pour produire une inondation mineure à l'exutoire d'un bassin versant donné (Georgakakos 2006). Ce volume seuil de précipitations est appelé Flash Flood Guidance et est déterminé en tenant compte de l'état de saturation actuel du sol du bassin versant (Modrick et al. 2014).

Plus récemment, des systèmes plus avancés s'appuyant sur des modèles hydrologiques distribués mis en œuvre en temps réel, sont apparus d'abord aux États Unis (projets FLASH et FFMP Flash Flood Monitoring and Prediction Program (Gourley et al. 2017)), puis en Europe (Zanchetta et Coulibaly 2020) avec les systèmes ERIC (European Runoff Index based



on Climatology) et ERICHA (European Rainfall-Induced Hazard Assessment, figure 1.9). Des systèmes plus locaux ont également émergé en Europe, comme le système Flood-PROOFS en Ligurie (Laiolo et al. 2014), le Surface Water Flooding Decision Support Tool (SWFDST) au Royaume-Uni (Ochoa-Rodríguez et al. 2018), et le système Vigicrues Flash en France. Ces systèmes sont tous basés sur l'observation et la prévision des pluies à courte échéance (0 à 6 h), combinée à des modèles hydrologiques. En France, le système Vigicrues Flash a été

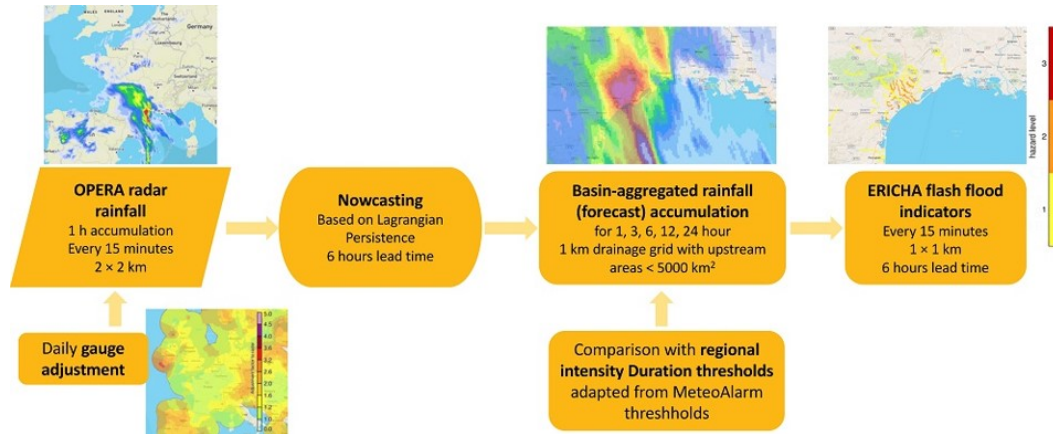


FIGURE 1.9 – Fonctionnement du système ERICHA produisant des prévisions de précipitations et de risques de crues éclair (source : [www.efas.eu/en/flash-flood-indicators](http://www.efas.eu/en/flash-flood-indicators))

mis en service en 2017 (figure 1.10). Il couvre aujourd'hui environ 30.000 km de cours d'eau supplémentaires, par rapport aux 21700 km du réseau réglementaire surveillés par Vigicrues. Ce premier service dédié aux crues soudaines fonctionne de façon entièrement automatique. Il utilise en entrée les lames d'eau radar Panthere de Météo-France, qui alimentent le modèle hydrologique distribué GRd. Le système permet d'émettre automatiquement des messages d'avertissement lorsque le modèle hydrologique anticipe le dépassement de seuils de débits prédéfinis. Les messages émis sont du type "risque de crue forte", ou "risque de crue très forte". En revanche, le système n'est pas en mesure de fournir des informations temporelles sur l'évolution des niveaux et des débits, ni d'indications concernant l'ampleur des impacts possibles ou de l'extension possible des zones inondées. Sa couverture géographique reste également incomplète à ce jour, en raison des limites liées à la fiabilité des lames d'eau radar, et à la représentation des bassins versants ayant un comportement hydrologique particulier.

Les limites actuelles du système Vigicrues Flash se retrouvent dans tous les systèmes d'anticipation des crues soudaines. Ceux-ci se contentent généralement de qualifier l'intensité des crues en cours de formation, ou d'avertir sur les risques de dépassements de seuils de débits correspondant à des risques de débordement. Mais aucun d'entre eux ne représente et n'intègre à ce stade les zones inondées prévues et les risques associés, faute de moyens appropriés pour la connaissance et/ou la simulation des zones inondables associées aux très petits cours d'eau. Les progrès futurs des systèmes d'anticipation et d'avertissement dédiés aux crues soudaines dépendent donc beaucoup aujourd'hui de la capacité à développer la connaissance des zones inondables associées aux petits cours d'eau.

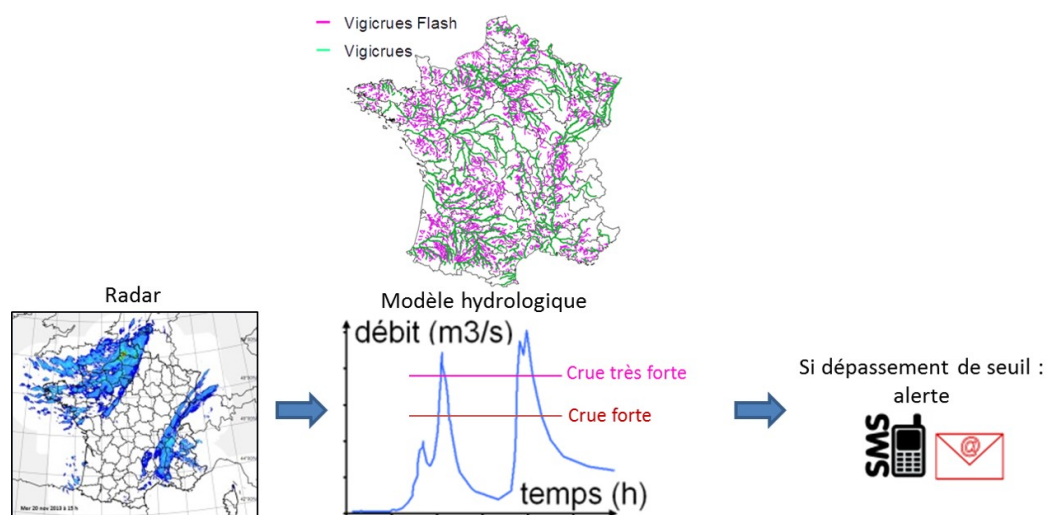


FIGURE 1.10 – Principe de fonctionnement du système Vigicrues Flash (source : SCHAPI)

## 1.4 La connaissance encore limitée des zones inondables exposées aux crues soudaines

Malgré le développement déjà ancien de méthodes permettant de réaliser des cartographies des zones inondables, la connaissance des zones exposées aux inondations des petits cours d'eau reste paradoxalement encore très limitée aujourd'hui. La couverture des petits cours d'eau implique en effet à la fois de réaliser des calculs hydrauliques à une résolution très fine, en rapport avec la largeur limitée du lit des cours d'eau à couvrir (donc de l'ordre de quelques mètres), mais également d'être en mesure de réaliser ces calculs sur un linéaire très important de cours d'eau. À titre d'exemple, on estime que le linéaire de cours d'eau de plus de 1 m de large dépasse les 120.000 km en France, et certaines bases de données donnent des chiffres encore supérieurs : la Base Nationale de Bassins Versants (BNBV) qui décrit les cours d'eau et fonds de talwegs drainant plus de  $5 \text{ km}^2$  de surface, représente un réseau hydrographique de près de 300.000 km de linéaire. Une cartographie complète des zones inondables associées aux petits cours d'eau, à une échelle relativement large, nécessite donc à la fois des approches optimisées en temps de calcul, et des capacités de calcul importantes. Se pose aussi rapidement la question des sources de données disponibles (emprises inondées et niveaux d'eau observés) permettant de valider et d'évaluer la précision des cartes produites. Malgré ces difficultés importantes, une première tentative de cartographie des zones inondables associées aux petits cours d'eau a été conduite en France lors de la première mise en œuvre de la Directive Européenne Inondation (DI). Une Enveloppe Approchée des Inondations Potentielles (EAIP) a en effet été établie en tenant compte des phénomènes liés aux débordements de cours d'eau (EAIPce) et à la submersion marine (EAIPsm) (DGPR 2012). L'EAIPce représente l'emprise potentielle des débordements de tous les cours d'eau (figure 1.11), y compris les petits cours d'eau à réaction rapide et les intermittents (thalwegs secs). Elle a été construite en combinant :

- l'ensemble des connaissances cartographiques sur les zones inondables des cours d'eau principaux disponibles au sein des services de l'Etat (AZI, PPRI, données historiques, études locales...),

- les informations sur les couches d'alluvions récentes des cartes géologiques (dans la plupart des cas, ces alluvions témoignent de l'inondabilité des terrains concernés)
- et enfin une méthode permettant de détecter les zones proches d'un fond de talweg, appliquée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain à 25 m (méthode EXZECO).

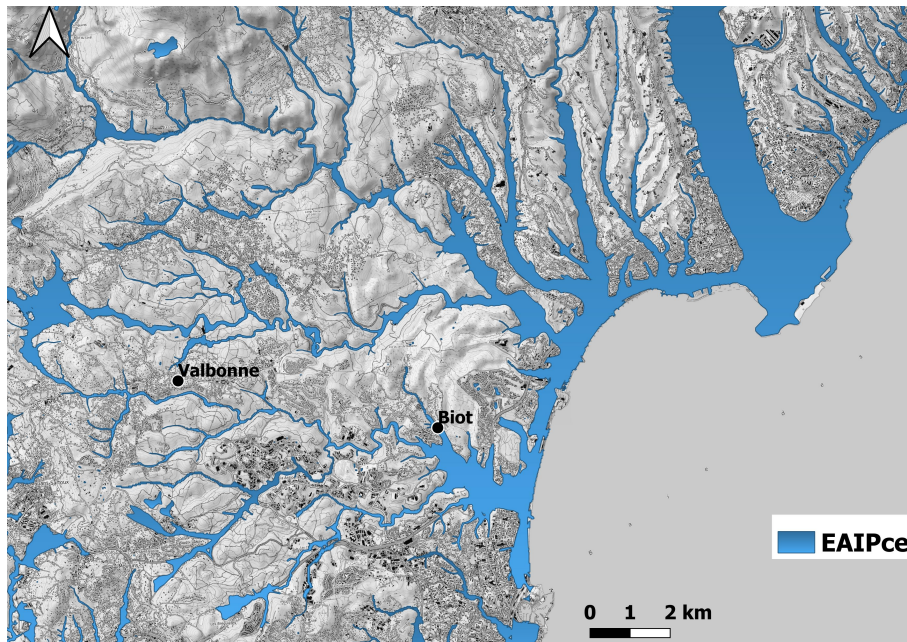


FIGURE 1.11 – *Enveloppe approchée des inondations potentielles cours d'eau : exemple des Alpes maritimes.*

Cette EAIP couvre les surfaces drainées supérieures à  $1 \text{ km}^2$  et offre donc une couverture très complète des petits cours d'eau. Elle ne fournit cependant qu'une empreinte et pas de hauteurs de submersion. Elle reste par ailleurs une information approximative et majorante, basée sur un traitement numérique du MNT et qu'il n'est pas possible d'associer à un débit ou à une fréquence d'occurrence. Ceci rend son exploitation dans des systèmes de prévision assez délicate. En effet, il est souhaitable pour cet usage de disposer d'une gamme complète de scénarios d'inondations, couvrant des intensités et fréquences d'événements variées.

## 1.5 L'évolution rapide des méthodes de cartographie des zones inondables

La cartographie des zones inondables à l'aide de modèles (hydrauliques notamment) est longtemps restée une application lourde à mettre en œuvre, nécessitant un long processus de collecte et de mise en forme de données de terrain, la construction souvent en partie manuelle et la calibration d'un modèle hydraulique, et qui ne pouvait être conduite que localement. Cette difficulté d'utilisation était renforcée par les ressources de calcul importantes qu'exigeaient la mise en œuvre de ces approches de modélisation et à la quantité de données nécessaires pour les alimenter, qui n'étaient disponibles que localement (Dottori et al. 2016). Ces données pouvaient être notamment des relevés topographiques et bathymétriques. Par ailleurs, la mise

en œuvre relativement complexe des modèles, leur calibration nécessaire, nécessitait dans la plupart des cas le recours à des modélisateurs experts. Tout ceci explique en très grande partie le développement tardif de la cartographie des zones inondables associées aux petits cours d'eau.

Cependant, la situation a fortement évolué au cours des dernières années, essentiellement grâce à l'évolution rapide de la puissance de calcul des ordinateurs, et à la généralisation des données topographiques détaillées sous la forme de Modèles Numériques de Terrain (MNT). L'application automatisée de modèles hydrauliques à grande échelle pour le calcul d'emprises inondées est devenue possible (Wood et al. 2011), dans un premier temps à des résolutions relativement faibles (de 100 m à 1 km). De nombreuses études de ce type ont été publiées dans la littérature depuis une dizaine d'années, proposant des applications couvrant, selon les cas, des continents entiers (Pappenberger et al. 2012, Alfieri et al. 2014, Dottori et al. 2017) voire l'ensemble de la planète (Winsemius et al. 2013, Yamazaki et al. 2013, Hirabayashi et al. 2013, Sampson et al. 2015, Dottori et al. 2016).

Plus récemment, grâce au développement des MNT Lidar, combinant une très haute résolution (quelques mètres) et une meilleure précision (quelques centimètres), des applications de cartographie à des résolutions nettement plus fines ont été proposées à des échelles régionales à continentales. Un système de cartographie des inondations a par exemple été déployé à l'échelle des États-Unis, avec un MNT de 10 m de résolution (Liu Yan Y. et al. 2018). D'autres études ont été effectuées à des échelles régionale ou locale à des résolutions encore plus fines, généralement comprises entre 5 m et 10 m (Neal et al. 2011, Pedrozo-Acuña et al. 2012, Garrote et al. 2016, de Almeida et al. 2018, Tavares da Costa et al. 2019). Une illustration des résultats de ces approches est présentée sur la figure 1.12, qui montre notamment que la résolution des calculs permet d'obtenir une information sur le risque d'inondation à l'échelle du bâtiment. Quelques applications en temps réel de ces méthodes ont également été proposées (Neal et al. 2011, de Almeida et al. 2018). L'apparition de ces approches, permettant de réaliser des cartographies des zones inondables de façon automatique à partir de MNTs, associée à l'apparition des MNTs Lidar de résolution métrique, ouvre aujourd'hui l'espoir de pouvoir cartographier de façon systématique et relativement précise les zones inondables associées aux petits cours d'eau.

Le Bihan (2016) a par exemple récemment démontré que, compte tenu des progrès récents des méthodes de cartographie des zones inondables, il était envisageable de produire des catalogues de scénarios d'inondation sur de petits cours d'eau soumis aux crues soudaines (figure 1.13), et d'intégrer ces scénarios dans des chaînes de prévision de façon à représenter directement les impacts possibles des crues prévues. La chaîne de prévision automatisée des impacts mise en œuvre a montré des résultats prometteurs pour deux événements marquants de crues éclair observées en France au cours des dernières décennies : les crues de septembre 2002 dans le Gard et de juin 2010 sur l'Argens.



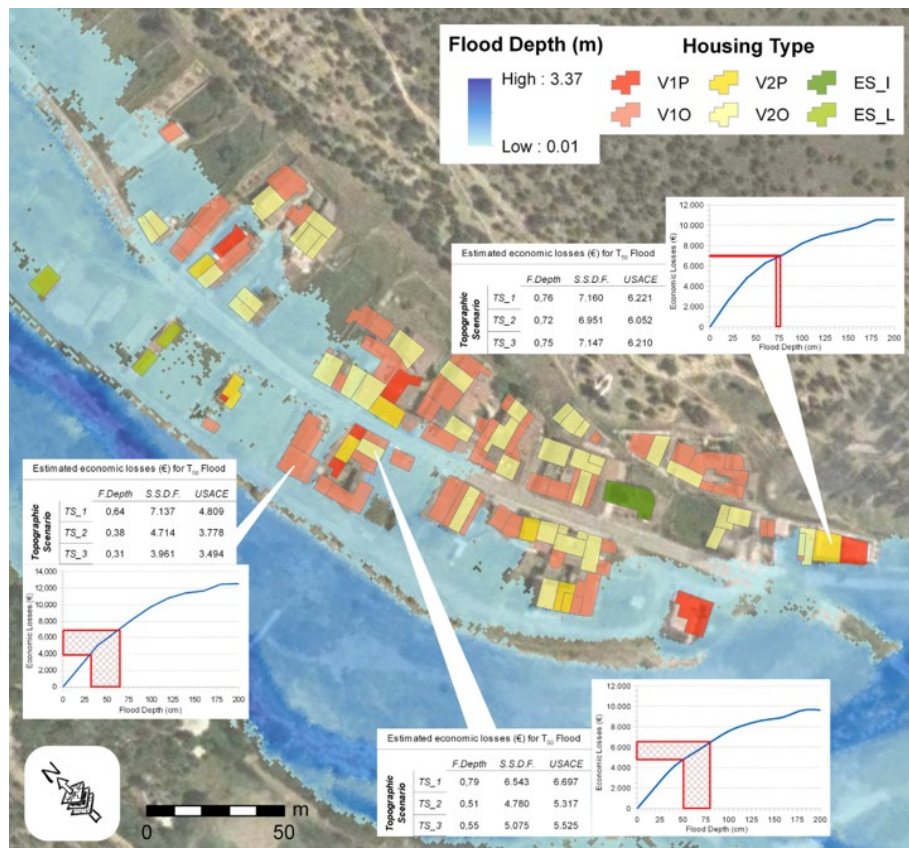


FIGURE 1.12 – Estimation des pertes économiques directes dans la zone urbaine du village de Pajares de Pedraza en Espagne, pour une crue éclair de période de retour de 50 ans. La cartographie est réalisée avec le modèle Iber 2D basé sur une information topographique Lidar de 1m de résolution. (Garrote et al. 2016)

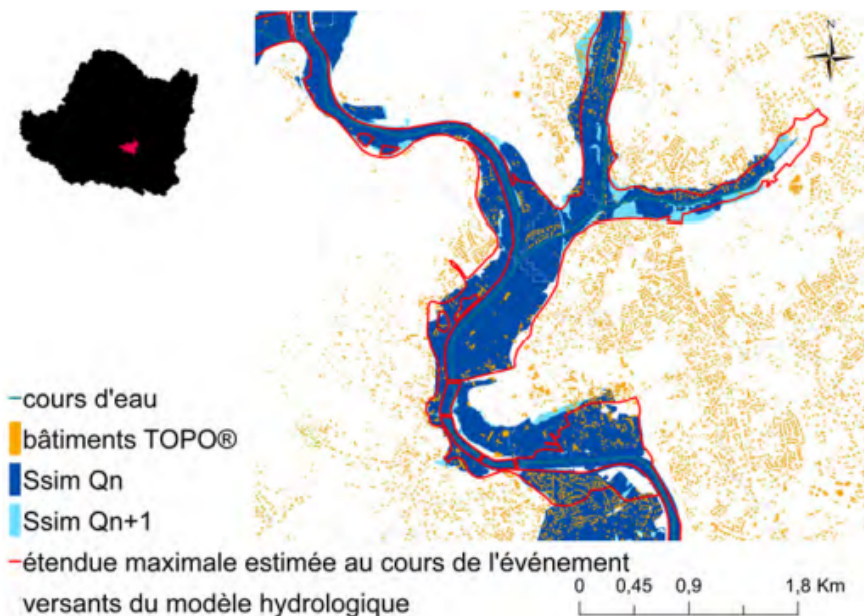


FIGURE 1.13 – Exemple d'utilisation d'un catalogue de scénarios d'inondation (Le Bihan 2016) : Carte des étendues inondées estimées pour des débits  $Q_n$  et  $Q_{n+1}$  encadrant le débit  $Q_{sim}$  prévu par le modèle hydrologique, pour la crue des 8 et 9 septembre 2002 sur le Gardon d'Alès à Alès. L'étendue inondée réelle est représentée en rouge.

## 1.6 Les objectifs de la thèse

Les différents éléments qui précèdent laissent penser qu'il est possible aujourd'hui de produire des cartographies relativement précises des zones inondables associées aux petits cours d'eau soumis aux crues soudaines, en appliquant des modèles hydrauliques automatisés sur de vastes territoires. Cette idée est largement étayée par les éléments suivants :

- l'apparition des MNT à haute résolution, et l'augmentation de leur précision d'année en année,
- l'essor des méthodes de cartographie automatisées des inondations,
- Le développement des capacités de calcul,
- Les études menées récemment en Europe et dans le monde concernant la cartographie des inondations à grande échelle, et à haute résolution, et les résultats positifs de la plupart de ces études.

Par ailleurs, il semble envisageable d'intégrer cette connaissance des zones inondables dans des chaînes de prévision existantes, de façon à produire des prévisions des zones inondées et d'impacts, comme en témoignent l'expérience en cours de déploiement sur le réseau "Vigicrues" et la démonstration de la faisabilité d'une chaîne de prévision des impacts crues rapides proposée par Le Bihan (2016). Afin de répondre à ce défi d'anticipation de l'impact des crues rapides, le projet de recherche ANR PICS (Prévision Immédiate Intégrée des Impacts des Crues Soudaines) a vu le jour en 2018. Le but principal de ce projet est de concevoir et tester des chaînes de prévision des crues rapides offrant jusqu'à 6 h d'anticipation et permettant d'estimer les impacts des crues. Le projet est porté par des équipes scientifiques ayant des compétences variées, et est conduit en interaction avec plusieurs acteurs professionnels de la gestion du risque inondation. Le projet PICS vise à coupler différents modèles (Hydrologique, hydraulique, modèles d'impacts), à estimer leurs incertitudes et complémentarité, et à évaluer la capacité des chaînes de prévision proposées à répondre aux besoins des utilisateurs finaux, à partir d'études de cas pertinentes et permettant une réelle évaluation des performances. Le projet est structuré en quatre tâches scientifiques principales (figure 1.14). La deuxième de ces tâches concerne l'évaluation de méthodes automatisées de cartographie des zones inondables adaptées aux petits cours d'eau.

Le travail conduit dans cette thèse a permis d'alimenter cette deuxième tâche du projet. Malgré les progrès récents, de nombreuses questions se posaient encore en effet au début de ce travail, portant notamment sur le degré de simplification à introduire dans les méthodes de cartographie appliquées aux petits cours d'eau, de façon à limiter les temps de calcul, et sur le niveau de précision possible selon l'approche de cartographie retenue.

Le travail de thèse a donc consisté à proposer et évaluer des méthodes de cartographie automatisée des champs d'inondation, adaptées aux petits cours d'eau et offrant des temps de calcul aussi limités que possible, et permettant de produire des catalogues de cartes d'inondation dans la continuité des travaux de Le Bihan (2016). Ces catalogues de cartes, une

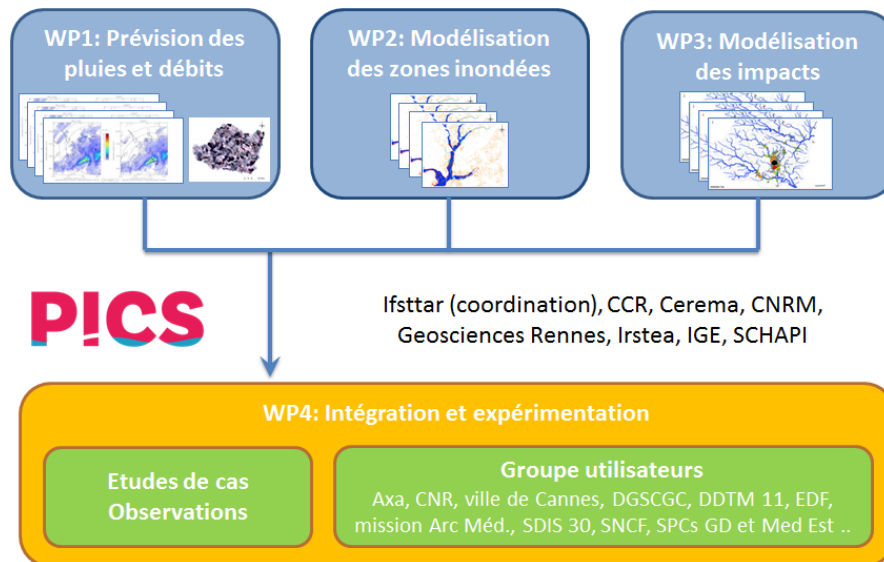


FIGURE 1.14 – Schéma organisationnel présentant les différentes tâches du projet ANR PICS.  
source : <https://pics.ifsttar.fr>

fois générés et évalués, devraient permettre d'intégrer aux systèmes d'anticipation des crues soudaines une véritable prévision des inondations et des impacts associés.

Pour être adaptées au contexte de la prévision des crues rapides, les méthodes de cartographie appliquées devaient remplir trois critères essentiels :

- Permettre la cartographie des zones inondables associées aux petits cours d'eau qui ont généralement des lits mineurs peu larges<sup>2</sup>, et pour bien les représenter, il faut mobiliser des données topographiques à haute résolution (MNT à 5 m ou 1 m),
- Permettre une couverture à échelle régionale, ce qui représente un grand linéaire de cours d'eau à modéliser, et ce qui implique que les calculs soient entièrement automatisés, sans effectuer de calage.
- Et enfin, offrir la possibilité d'une intégration dans une chaîne de prévision en temps réel, soit sous la forme de catalogue de scénarios d'inondation, soit en effectuant des calculs en temps réel, selon les possibilités ouvertes par les temps de calcul.

Trois approches de cartographie répondant aux objectifs mentionnés ci-dessus, ont été sélectionnées et évaluées dans cette thèse :

- La méthode HAND/MS (Height Above Neirest Drainage/ Manning Strickler)
- La méthode CARTINO 1D (fondée sur les logiciels HecRas et Flutor)
- Une méthode innovante de modélisation hydraulique 2D simplifiée (Floodos)

2. Le lit mineur joue un rôle déterminant dans le transfert des débits. Sa représentation dans le MNT et sa prise en compte dans les modélisations sont essentielles pour réaliser des calculs hydrauliques pertinents comme nous aurons l'occasion de l'illustrer dans la suite de cette thèse.

Ces approches ont fait l'objet d'une évaluation détaillée, en comparant leurs résultats à des données de référence déjà disponibles. Cette évaluation a notamment permis une identification des sources principales d'incertitudes liées aux paramètres et données d'entrée, et aux différentes simplifications intégrées dans les trois méthodes.

Dans la suite de ce manuscrit seront présentés les différents travaux menés pour répondre aux objectifs de la thèse. Le chapitre 2 est une étude bibliographique sur les méthodes de cartographie des inondations, adaptées aux petits cours d'eau et une présentation des trois méthodes de cartographie sélectionnées. Le chapitre 3 présente les données de référence utilisées pour l'évaluation des méthodes appliquées, ainsi que la méthodologie et les critères d'évaluation utilisés. Le chapitre 4 présente une première évaluation des méthodes à partir de cartographies de référence expertisées, produites dans le cadre de la directive européenne inondations sur quatre territoires à risque important (TRI) : TRI du Gard, TRI de Nice-Cannes-Mandelieu, TRI Est Var et TRI de Toulon. Le chapitre 5 présente une deuxième évaluation des méthodes par comparaison à crues observées récentes : crue de l'Argens en juin 2010, des Alpes-Maritimes en octobre 2015 et de l'Aude en octobre 2018. Sur la base des enseignements tirés de ces évaluations, le chapitre 6 présente une étude de sensibilité de la méthode Floodos 2D aux paramètres et données d'entrée, afin de préparer le terrain à son application opérationnelle et aux travaux de recherche qui feront suite à cette thèse. Le chapitre 7 reprend les principales conclusions de ce travail et dresse quelques perspectives de recherche.





## Chapitre 2

# Choix de méthodes de cartographie des inondations adaptées aux petits cours d'eau

### *Objectifs du chapitre :*

*Ce chapitre décrit dans un premier temps les méthodes utilisées aujourd'hui pour la cartographie des inondations, avec un focus sur les méthodes basées sur la modélisation hydraulique. Ensuite seront décrits les développements récents dans ce domaine, qui portent notamment sur l'application de méthodes de cartographie à grande échelle, ainsi que sur l'automatisation de ces approches, avec différents degrés de précision. Quelques exemples d'études récentes réalisées sur des petits cours d'eau seront également présentés. Enfin, les approches de cartographie retenues dans le cadre de la thèse seront décrites en détail.*

## 2.1 La Cartographie des inondations : généralités

La cartographie des inondations consiste à produire des cartes informatives qui peuvent simplement délimiter les étendues d'inondation, ou bien porter d'autres informations telles que la hauteur d'eau, le débit, ou encore les vitesses d'écoulement. Selon l'utilisation visée, les travaux de cartographie des inondations peuvent reproduire le scénario d'une crue réelle, ou bien représenter un ou plusieurs scénarios fictifs, correspondant par exemple à des débits de périodes de retour fixée, ou à l'enveloppe d'inondation maximale pouvant être atteinte par un cours d'eau. Les travaux de cartographie réalisés en France dans le cadre de la directive européenne inondations correspondent par exemple à des scénarios fictifs relatifs à trois périodes de retour différentes.

Trois approches sont largement utilisées pour la cartographie des inondations et notamment pour la réalisation d'atlas des zones inondables :

- L'approche historique qui consiste à établir une carte basée sur les retours d'expérience d'évènements de crues passés (laisses de crues, repères de crue, témoignages, photos de l'évènement...);
- L'approche hydrogéomorphologique qui est basée sur l'observation et l'analyse morphologique et sédimentologique permettant d'identifier les différentes unités de la plaine alluviale : lit mineur, lit moyen, lit majeur ;
- L'approche hydraulique qui se base sur des méthodes de calcul numériques résolvant généralement le système des équations de Saint Venant en une ou en deux dimensions. Cette approche utilise en entrée les caractéristiques géométriques du cours d'eau et des plaines, le débit de la crue et un coefficient de rugosité du lit.

### 2.1.1 Principe de l'approche hydrogéomorphologique

Les études hydrogéomorphologiques sont des approches géographiques qui étudient le fonctionnement naturel des cours d'eau en analysant la structure des vallées et en particulier les formes fluviales mises en place au fur et à mesure des crues successives. Le cours d'eau structure en effet la vallée en trois sous-entités qui se distinguent par la formation de talus (morphologie) et par la nature des sédiments déposés dans chacune de ces entités (sédimentologie). Ces trois entités hydrogéomorphologiques sont les lits mineur, moyen et majeur (cf. figures 2.1 et 2.2). La délimitation de ces trois entités constitue la base de la méthode hydrogéomorphologique. Cette approche identifie et délimite les zones inondables, mais sans leur associer une fréquence. C'est une des méthodes recommandées par le ministère en charge de la prévention des inondations pour la réalisation des Atlas des Zones Inondables (AZI). La zone inondable déterminée correspond dans ce cas à la superficie de la plaine alluviale fonctionnelle susceptible d'être affectée par des inondations fréquentes à exceptionnelles.

L'identification se fait en deux étapes complémentaires, la première étant la photo-interprétation qui consiste à interpréter des vues stéréoscopiques de la vallée afin de déterminer les limites des 3 lits, qui correspondent souvent à des secteurs de ruptures de

pentés. Ensuite vient l'étape des missions de terrain qui consiste à vérifier la réalité de la séparation des entités hydrogéomorphologiques ainsi que la cohérence entre ces entités, notamment par l'étude des sédiments en place.

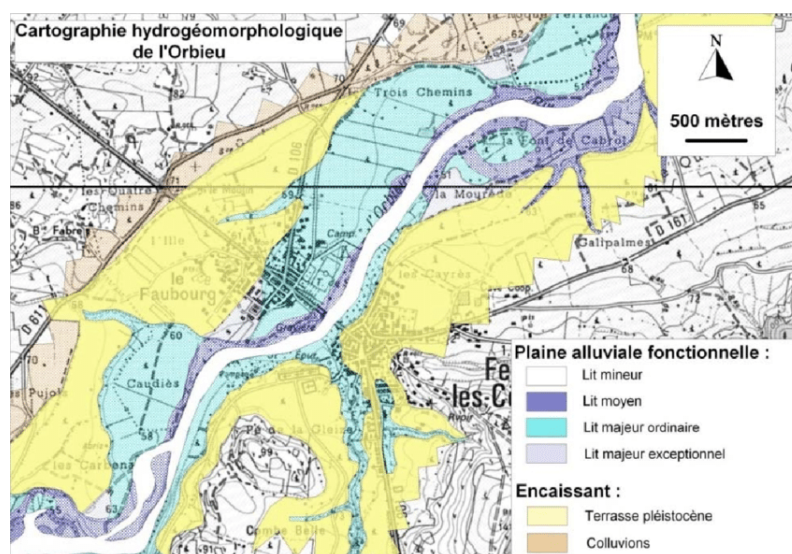


FIGURE 2.1 – Carte hydrogéomorphologique de la vallée de l'Orbieu (Aude) (Delorme-Laurent et Ballais 2006)

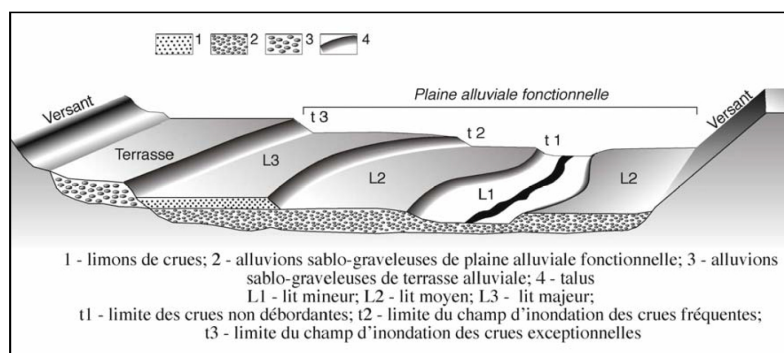


FIGURE 2.2 – Plaine alluviale fonctionnelle (Ballais et al. 2011)

### 2.1.2 Principe des approches hydrodynamiques basées sur le système d'équations de Saint Venant

Les approches hydrauliques utilisées pour la cartographie des inondations reposent sur une modélisation de la physique des écoulements dans le lit du cours d'eau. Les modèles mobilisés peuvent parfois être des modèles réduits physiques, qui sont très utilisés par exemple dans le dimensionnement d'aménagements maritimes. Néanmoins, dans le cas de la cartographie des inondations, les modèles utilisés sont majoritairement des modèles numériques, qui résolvent le système des équations de Barré de Saint Venant.

#### 2.1.2.1 Les équations de Barré de St Venant

En 1871, Barré de Saint Venant a proposé une représentation mathématique simplifiée de l'écoulement à surface libre des eaux peu profondes, à l'aide d'un système d'équations aux

dérivées partielles. Ces équations peuvent être déduites des équations plus générales de Navier-Stokes décrivant l'écoulement des fluides Newtoniens.

Le système d'équations de Saint Venant pour l'hydraulique fluviale comporte deux équations, l'équation de continuité et l'équation de la quantité de mouvement.

Dans le cas particulier d'un écoulement unidimensionnel, leur formulation est la suivante :

Équation de continuité :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

Équation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (hu^2) + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = gh(S_0 - S_f) \quad (2.2)$$

où  $h$  représente le tirant d'eau ou hauteur d'eau moyenne,  $v$  la vitesse d'écoulement,  $q$  le débit linéique qui est égal à  $hu$ , et  $g$  la constante de gravité.  $S_0 = -\frac{\partial Z}{\partial x}$  représente l'opposée de la pente du lit ( $Z$  étant l'altitude du fond), et  $S_f$  le terme de frottement (pente d'énergie). Ce dernier terme peut être relié aux paramètres de l'écoulement par les équations de perte de charge de Manning-Strickler ou de Chézy-Darcy Weisbach :

Formulation de Chézy-Darcy :

$$S_f = \frac{1}{C^2} \frac{u^2}{h} = \frac{1}{C^2} \frac{q^2}{h^3} \quad (2.3)$$

où  $C$  représente le coefficient de Chézy

Formulation de Manning-Strickler :

$$S_f = n^2 \frac{u^2}{h^{4/3}} = n^2 \frac{q^2}{h^{10/3}} \quad (2.4)$$

où  $n$  représente le coefficient de Manning, qui est aussi égal à l'inverse du coefficient de Strickler  $k$  :  $n = \frac{1}{k}$ .

Dans l'équation 2.2, les deux premiers termes de gauche représentent l'inertie. Le premier terme est l'inertie locale, qui disparaît à l'état stationnaire, et le deuxième terme représente l'inertie convective : il est important dans le cas de grandes variations spatiales du débit, et souvent négligeable lorsque le débit varie graduellement. Le troisième terme de gauche est le terme de pression du fluide. Les termes du côté droit représentent la contribution des forces gravitaires et de résistance.

Dans un écoulement bidimensionnel, la formulation des équations de Saint Venant devient :

Équation de continuité :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

Équations de la quantité de mouvement :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (hu^2) + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hlv}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (hv^2) + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{array} \right. \quad (2.6)$$

ou  $u$  et  $v$  représentent les vitesses d'écoulement dans les deux directions considérées (par exemple la direction longitudinale et la direction transversale à l'axe du lit mineur),  $S_{0x}$  et  $S_{0y}$  sont les pentes du lit, et  $S_{fx}$  et  $S_{fy}$  les termes de frottement dans les directions  $x$  et  $y$ .

### 2.1.2.2 Formes simplifiées des équations de Barré de Saint Venant

Les équations de St Venant ont servi de base à d'autres modèles correspondant à différentes formes de l'équation de la quantité de mouvement : modèles d'onde dynamique, d'onde gravitationnelle, d'onde de diffusion et d'onde cinématique.

Le modèle d'onde dynamique conserve tous les termes de l'équation de quantité de mouvement. Le modèle d'onde de gravité néglige les effets de la pente du lit et les pertes par frottement. Les ondes de gravité se propagent à la célérité de l'onde dynamique et décrivent des écoulements dominés par l'inertie.

Les approximations de l'onde de diffusion et de l'onde cinématique ont été largement utilisées dans les études d'écoulement des crues, car elles nécessitent beaucoup moins d'efforts de calcul que le système complet de Saint-Venant. Le modèle de l'onde de diffusion néglige l'inertie, et le modèle de l'onde cinématique néglige à la fois l'inertie et le terme de pression. Ces deux types d'ondes se déplacent à une célérité régie par la rugosité du lit de la rivière.

Néanmoins, à l'heure actuelle, une grande partie des modèles utilisés pour la cartographie des inondations résolvent les équations de St Venant complètes. Les équations de l'onde de diffusion et de l'onde cinématique restent toutefois utilisées pour représenter la propagation des crues dans les modèles hydrologiques pluie-débit.

### 2.1.2.3 Cas des régimes transitoire et permanent

Une autre simplification possible du système d'équations de St Venant est liée à la façon dont sont considérées les évolutions temporelles des écoulements. On distingue ainsi classiquement le régime transitoire du régime permanent

Le cas du régime transitoire correspond au cas où les caractéristiques de l'écoulement évoluent dans le temps. Les dérivées par rapport au temps dans le système de Saint Venant ne disparaissent donc pas, ce qui correspond au cas le plus générique.

En régime permanent, on fait l'hypothèse que les caractéristiques de l'écoulement ne changent pas dans le temps. La hauteur d'eau, le débit et la vitesse moyenne de l'écoulement sont donc constants et leurs dérivées par rapport au temps s'annulent dans le système de Saint Venant. Ceci résulte en une forme simplifiée des équations de St Venant, qui est assez fréquemment utilisée en cartographie des inondations.

### 2.1.3 Typologie des modèles hydrauliques utilisés pour la cartographie des inondations

#### 2.1.3.1 Les modèles hydrauliques 1D

La modélisation hydraulique 1D consiste à résoudre les équations de Barré – Saint-Venant en se basant sur trois hypothèses principales : l'écoulement est unidimensionnel, la répartition des vitesses est uniforme dans une section transversale donnée, et la répartition des pressions sur une verticale est hydrostatique qui est une hypothèse générale de Barré de St Venant.

Dans les modèles 1D, la représentation de la géométrie du lit est réalisée à partir de profils en travers espacés de façon régulière le long du cours d'eau (cf. figure 2.4). Ces profils en travers peuvent être extraits automatiquement d'un modèle numérique de terrain par exemple. La résolution permet d'obtenir pour chaque profil en travers, les hauteurs d'eau associées à un débit ou à un hydrogramme transitant dans le cours d'eau (cf. figure 2.3).

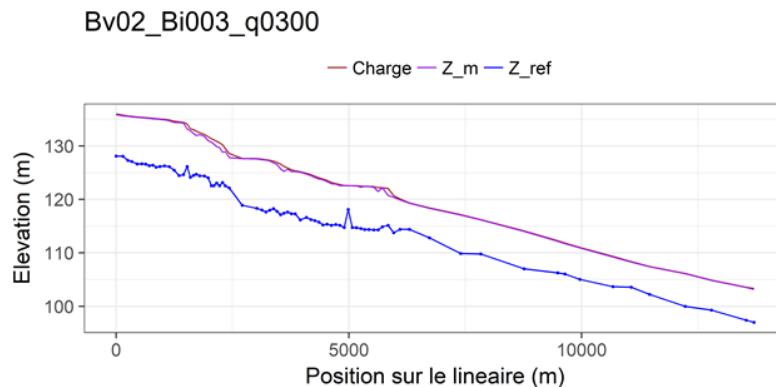


FIGURE 2.3 – Profil en long de la ligne d'eau obtenu d'un calcul hydraulique en utilisant HecRAS 1D en régime permanent

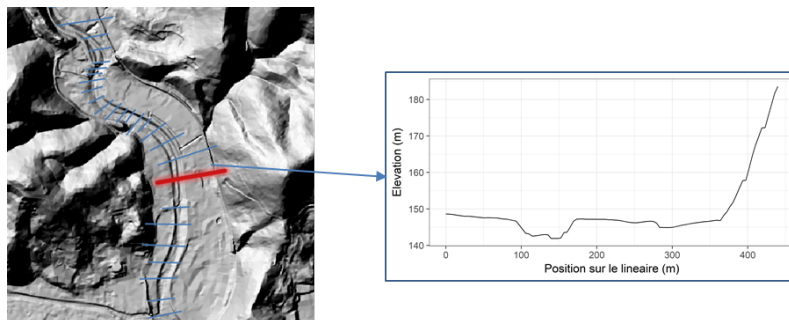


FIGURE 2.4 – discrétisation d'un tronçon de cours d'eau en utilisant des profils en travers

Dans le cas d'un débordement de l'écoulement dans le lit majeur, l'écoulement dans la plaine d'inondation fait partie de l'écoulement unidimensionnel du cours d'eau et la solution

des équations de Saint-Venant concerne un profil unique intégrant les lits mineur, moyen et majeur. Cela présente au moins deux inconvénients : l'écoulement dans la plaine d'inondation est supposé être dans une direction parallèle au cours d'eau principal, ce qui n'est souvent pas le cas, et la vitesse moyenne calculée a une signification physique moindre dans une situation où de grandes variations de la vitesse peuvent être constatées entre les lits mineur et majeur.

Les modèles hydrauliques 1D à casiers apportent une solution partielle à ce problème : le lit mineur est modélisé avec un modèle hydraulique 1D et les plaines inondables sont modélisées comme des cellules de stockage qui sont définies uniquement par une relation niveau d'eau/volume (cf. figure 2.5). Le flux entre le lit mineur et ces cellules de stockage est modélisé en utilisant une formule de calcul du débit (formule de déversoir par exemple)

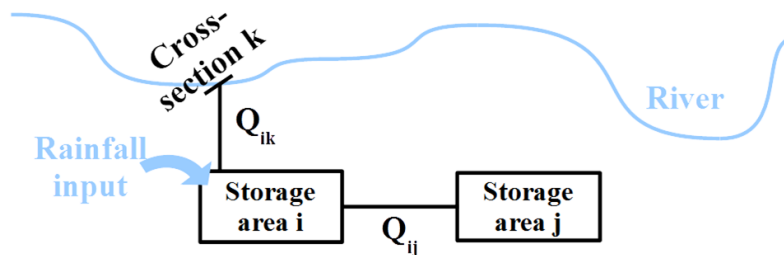


FIGURE 2.5 – principe des cellules de stockage et leur interaction avec le cours d'eau (Nicole GOUTAL et Fabrice ZAOUÏ 2020)

Quelques exemples de modèles hydrauliques 1D couramment utilisés sont présentés ci-après :

- Hec Ras 1D :

Hec Ras est un logiciel de calcul hydraulique développé par le US Army Corps of Engineers (HydrologicEngineeringCenter 2020). Pour un écoulement non permanent, HEC-RAS résout le système de Saint Venant complet unidimensionnel à l'aide d'un schéma numérique implicite aux différences finies. Dans le cas d'écoulement permanent, la procédure de calcul de HEC-RAS est basée sur la résolution de l'équation d'énergie unidimensionnelle (Bernoulli généralisé), qui exprime simplement que la variation de la charge hydraulique est égale à la perte de charge, et donc la perte de charge linéaire est identique à la pente de la ligne de charge. L'équation de quantité de mouvement peut également être utilisée dans des situations où le profil de la surface de l'eau varie rapidement (ressaut hydraulique). Les pertes d'énergie sont évaluées par les lois de frottement type Manning et la contraction/expansion.

- MASCARET (1D) :

Le logiciel MASCARET est un ensemble de codes numériques simulant des phénomènes hydro-environnementaux unidimensionnels (1D) dans un réseau de canaux à surface libre. MASCARET a été développé par Électricité de France-Recherche & Développement (EDF-R&D) en collaboration avec le Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) pendant plus de 25 ans. MASCARET possède plusieurs noyaux de calculs, du calcul de simples courbes de remous à la modélisation d'hydraulique fluviale incluant des plaines d'inondation et des zones de stockage. Les applications



comprennent l'évaluation et la cartographie des risques d'inondation, l'élaboration de plans de gestion, la conception de dispositifs d'atténuation des inondations, les simulations de rupture de barrage et la gestion de la pollution de l'eau. Depuis juillet 2011, le logiciel est distribué sous licence ouverte au profit des étudiants, des ingénieurs et des chercheurs.

Le modèle possède trois noyaux de calculs pour la résolution du système de St Venant suivant le type de l'écoulement. Pour les écoulements permanents, les équations sont résolues à l'aide d'un schéma numérique aux différences finies. Les écoulements non permanents subcritiques sont résolus avec un schéma numérique aux éléments finis, couplé avec un algorithme de zones de stockage (casiers) afin de prendre en compte les débordements en lit majeur. Enfin, un schéma numérique aux volumes finis est utilisé dans la modélisation des cas de rupture de barrage ou la modélisation des confluences où un simple couplage 1D 2D est réalisé.

### 2.1.3.2 Les modèles hydrauliques 2D

Les modèles hydrauliques 2D calculent les écoulements à surface libre dans les eaux peu profondes en se basant sur les équations de Saint Venant en 2D sur un maillage structuré ou non structuré de l'espace horizontal. Ces équations expriment la conservation de la masse d'eau (équation de continuité) et de la quantité de mouvement dans les deux directions de l'espace horizontal (équations dynamiques) en tout point du domaine de calcul. Ce système est résolu à l'aide de méthodes numériques, généralement des schémas aux éléments finis ou aux volumes finis, et les résultats produits comprennent la hauteur d'eau, les composantes horizontales de la vitesse moyenne, et la direction d'écoulement en chaque nœud de la grille (cf. figure 2.6).

Des conditions aux limites sont requises à chaque bord de la grille de calcul. Pour les modèles hydrauliques 2D où les conditions d'écoulement sur la limite du domaine de calcul sont subcritiques, deux conditions aux limites sont requises aux frontières amont et aval de la grille de calcul. Sur les limites du domaine où aucun écoulement n'est prévu, la condition aux limites est simplement une condition de flux nul. Pour un écoulement supercritique, deux conditions aux limites sont requises à la limite amont. Les conditions aux limites peuvent être des valeurs de débit ou de niveau d'eau obtenues à partir de données mesurées, d'une analyse hydrologique.

Quelques exemples de modèles hydrologiques 2D très couramment utilisés sont présentés ci-dessous :

- Telemac 2D :

TELEMAC-2D est un code de calcul hydraulique initialement développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), un département de la division recherche et développement d'EDF. Il est maintenant disponible en open source, et est développé par le consortium Open Telemac-Mascaret. Il résout les équations de Saint-Venant 2D en utilisant la méthode des éléments finis ou des volumes finis et un

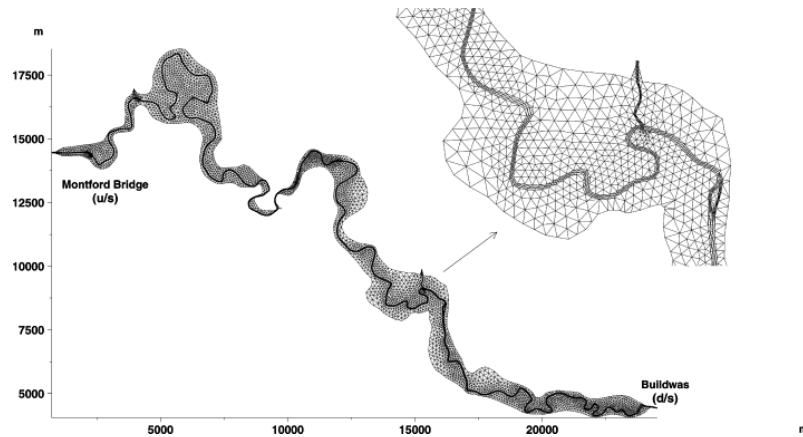


FIGURE 2.6 – *Discretisation en éléments finis Telemac 2D (Horritt et Bates 2002)*

maillage triangulaire non structuré. Il peut effectuer des simulations en régimes transitoire et permanent. TELEMAC-2D est utilisé dans de nombreux domaines d'application. Dans le domaine maritime, on peut citer notamment la conception de structures portuaires, l'étude de l'effet de la construction de brise-lames submersibles ou de travaux de dragage, l'impact des rejets d'émissaires en mer. En ce qui concerne les rivières, l'impact de divers types de construction (ponts, seuils, épis), les ruptures de barrages, la modélisation des crues, le transport de traceurs.

- Basilisk 2D :

Basilisk est un environnement de calcul développé initialement par Stéphane POPINET (Université de la Sorbonne), qui a été rejoint par d'autres chercheurs. Ce logiciel est destiné à la résolution numérique d'une multitude d'équations mathématiques représentant des phénomènes physiques connus telles que les équations de Navier Stokes. Il présente un module B-flood dédié à la résolution des équations de St Venant (Geoffroy Kirstetter 2020). Sa principale caractéristique par rapport à d'autres logiciels de modélisation est la possibilité d'utiliser un maillage adaptatif. La résolution du schéma numérique se fait par une discrétisation de l'espace en utilisant la méthode des volumes finis. Le modèle a été récemment testé pour simuler la crue de la Brague d'octobre 2015, et montre des résultats prometteurs en termes de reconstitutions des hauteurs d'eau et des étendues d'inondations (cf. figure 2.7), tout en présentant un gain remarquable en temps de calcul par rapport aux modèles 2D classiques (Geoffroy Kirstetter 2020).

- LISFLOOD-FP :

LISFLOOD-FP est un modèle hydraulique 2D initialement développé par Bates et al. (2010). Il est basé sur un modèle numérique de terrain et utilise directement le maillage de ce dernier pour la résolution numérique des équations de Saint Venant. Le modèle possède plusieurs schémas numériques pour simuler la propagation des ondes de crue le long des canaux et à travers les plaines d'inondation en utilisant des dérivations simplifiées des équations de Saint Venant. Le module le plus utilisé dans la cartographie des zones inondées est la version 2D qui résout une formulation inertielle des équations de Saint Venant sous forme explicite par le biais d'un schéma de différences finies.

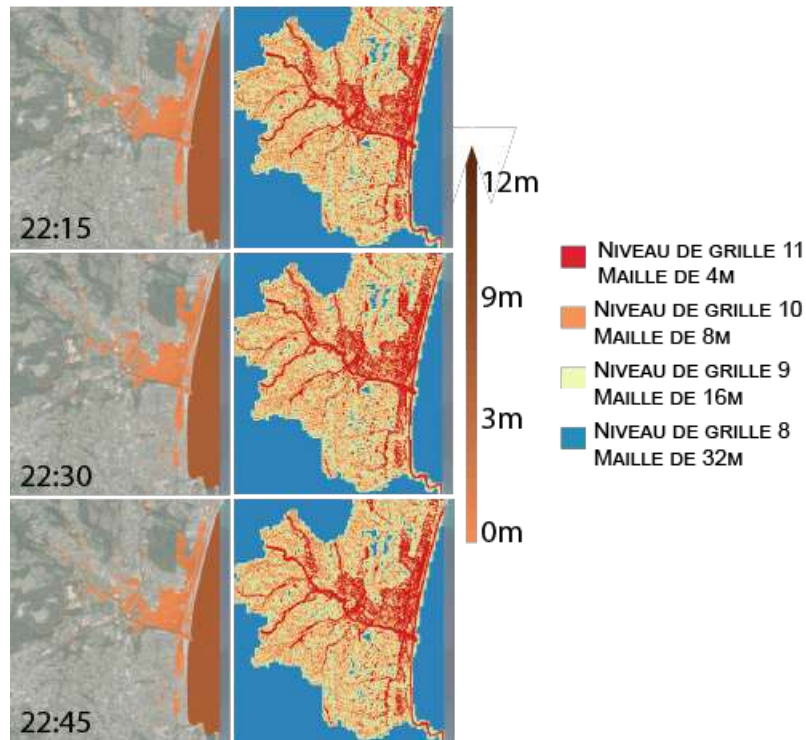


FIGURE 2.7 – Simulation de la crue de la Brague d'octobre 2015 avec le modèle Basilisk, avec l'évolution des hauteurs d'eau et le raffinement des mailles de calcul (Stage Maryse Charpentier-Noyer)

## 2.2 Développement de la cartographie automatisée des inondations

Jusqu'au début des années 2000, les outils de cartographie et de prévision des inondations n'étaient disponibles que dans quelques régions du globe, étant donné les ressources de calcul et la quantité de données requises (Dottori et al. 2016). Cependant, la situation a largement évolué au cours des 10 dernières années : grâce à l'augmentation de la puissance de calcul et de la précision des données topographiques, l'application de modèles d'inondation à grande échelle et à haute résolution (1 km ou moins) est devenue possible (Wood et al. 2011). Et pour accompagner cette tendance, des approches de cartographie automatisée des inondations ont progressivement émergé. L'objectif commun de ces approches est de faciliter l'implémentation des modèles de cartographie des inondations et de limiter le travail d'expertise dans la construction et l'application de ces modèles. Les modèles obtenus peuvent être simples et rapides en temps de calcul, pour permettre une application à très grande échelle, ou parfois plus complexes et lents pour une utilisation à plus petite échelle. Ces méthodes peuvent être classées en trois catégories principales

- i) les approches géomorphologiques basées seulement sur l'analyse des caractéristiques des bassins versants et des lits des cours d'eau
- ii) les approches de remplissage direct du MNT basées sur la récupération/estimation préliminaire de la relation débit local/hauteur d'eau

- iii) les approches hydrauliques résolvant les équations de Saint Venant en 1 ou 2 dimensions.

### 2.2.1 Approches géomorphologiques

Il est possible d'identifier les zones géomorphologiquement sujettes aux inondations à partir d'un MNT, en extrayant directement de la topographie les caractéristiques géomorphologiques des cours d'eau (Manfreda et al. 2014, Jafarzadegan et al. 2018). Des études récentes réalisées à partir de données topographiques ont en effet souligné le potentiel d'un descripteur morphologique, appelé indice géomorphologique d'inondation (GFI : Geomorphic Flood Index ; Samela et al. (2017)). Cet indice compare en chaque point du bassin une profondeur d'eau variable  $h_r$  avec la différence d'altitude  $H$  entre le point considéré et le réseau de drainage. Il est calculé comme suit :  $GFI = \ln(h_r/H)$  (figure 2.8). La profondeur  $h_r$  est calculée en fonction de la surface contributive  $A_r$  dans le point r du réseau de drainage relié hydrologiquement au point considéré. Le GFI peut être utilisé pour développer une procédure de classification binaire linéaire capable d'identifier les zones inondables. Cette méthode s'est avérée fiable et efficace dans plusieurs zones en Europe, aux États-Unis et en Afrique (Manfreda et al. 2015, Samela et al. 2017).

Pour entraîner ce classificateur, une carte d'inondation obtenue à partir de modèles hydrauliques (ou observée par satellite) pour une partie du bassin est nécessaire (Manfreda et Samela 2019). Récemment, la procédure complète a été mise en œuvre dans un plugin QGIS open source appelé outil GFA (Geomorphic Flood Area) (Samela et al. 2018), permettant aux utilisateurs de calculer facilement et automatiquement le GFI et de le transformer en un classificateur capable de détecter les zones inondables sur l'ensemble d'un bassin (Manfreda et Samela 2019).

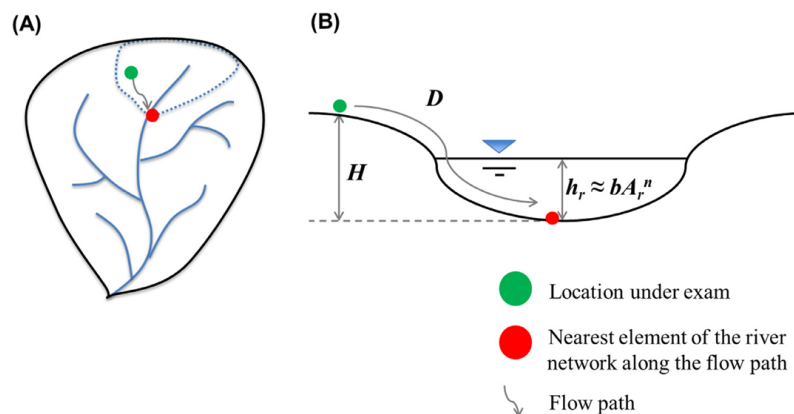


FIGURE 2.8 – Description de l'indice géomorphologique d'inondation  $GFI = \ln(h_r/H)$ . Représentation des paramètres  $H$  et  $h_r$  en plan (A) et en profil en travers (B) (Samela et al. 2017)

Grâce à leur simplicité, ces méthodes présentent l'avantage d'être très rapides en termes de temps de calcul et offrent donc une capacité de cartographie à haute résolution sur de vastes zones géographiques. Par ailleurs, elles permettent de traiter indifféremment des bassins versants jaugés ou non jaugés (Manfreda et Samela 2019), car elles ne nécessitent pas ou peu de mesures de débits. En revanche, la phase d'apprentissage nécessite de disposer ou de réaliser des modélisations hydrauliques sur une partie du domaine à simuler.

## 2.2.2 Les méthodes de remplissage direct du MNT

Les méthodes de remplissage direct du MNT sont basées sur une relation locale entre le débit et la hauteur d'eau. Cette relation est établie à partir i) d'une estimation de la géométrie du lit du cours d'eau à partir du MNT, et ii) d'une formule hydraulique locale : Manning Strickler (Zheng et al. 2018, Zheng Xing et al. 2018, Johnson et al. 2019, Garousi-Nejad et al. 2019) ou Debord (Rebolho et al. 2018). La géométrie du lit est obtenue soit localement à partir de profils en travers extraits du MNT pour la méthode AutoRoute (figure 2.9) (Follum et al. 2017; 2020), soit de façon moyennée à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau, en utilisant une grille HAND (Height Above Neirest Dainage, Nobre et al. (2011)) de hauteur par rapport au drainage le plus proche, elle même dérivée du MNT : f2HAND (Speckhann et al. 2017); Geoflood (Zheng et al. 2018); MHYST (Rebolho et al. 2018); FHM (Tavares da Costa et al. 2019). Ces approches sont très efficaces en termes de temps de calcul, et peuvent donc être intégrées à des chaînes de prévision des inondations en temps réel à l'échelle continentale (Liu Yan Y. et al. 2018), ou être utilisées pour de la modélisation probabiliste ou multi-scénario (Teng et al. 2017).

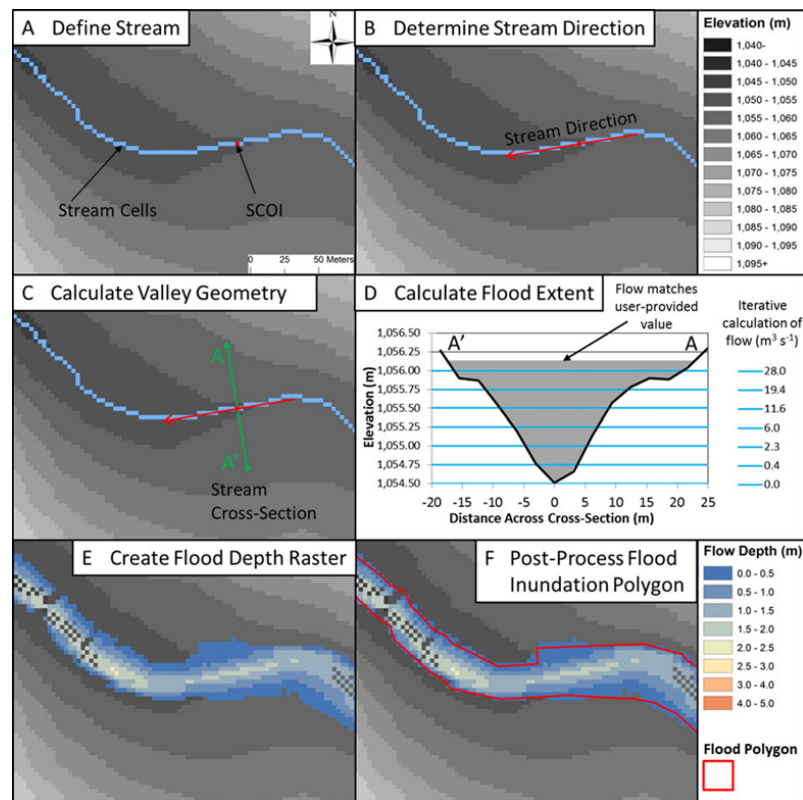


FIGURE 2.9 – Fonctionnement général du modèle AutoRoute pour calculer les profondeurs en eau et les zones inondées (Follum et al. 2017)

Ces méthodes présentent néanmoins un degré de simplification important, lié principalement au fait que la relation hauteur-débit ne tient pas compte des effets de remous liés aux variations longitudinales de pente et de géométrie du lit, et que les calculs ne peuvent être effectués qu'en régime permanent, ce qui peut conduire à surestimer l'inondation en cas de larges débordements en lit majeur, représentant d'importants volumes d'eau.

### 2.2.3 Les modèles hydrauliques

Des modèles hydrauliques Saint-Venant 2D ont été appliqués de façon automatisée depuis une dizaine d'années, avec dans un premier temps un objectif de cartographie des zones inondables à l'échelle régionale et continentale (Pappenberger et al. 2012, Alfieri et al. 2014, Sampson et al. 2015, Dottori et al. 2016, Schumann et al. 2016). Ces applications ont été dans un premier temps effectuées à des résolutions assez faibles (100 m à 1 km), et incompatibles avec la représentation des petits cours d'eau (Fleischmann et al. 2019). Les principaux facteurs limitant la résolution étaient à la fois la disponibilité de MNT mondiaux à haute résolution (Schumann et Bates 2018), mais aussi les capacités de calcul. Par exemple, Savage et al. (2016) concluent que les résolutions plus fines que 50 m offrent un gain de précision limité au regard de la forte augmentation des temps de calcul ; Teng et al. (2017) confirment que les modèles hydrodynamiques 2D ont longtemps été non adaptés à la simulation de zones de plus de 1000  $km^2$  à des résolutions inférieures à 10 m.

Cependant, les progrès en matière d'efficacité des algorithmes et de calcul parallèle permettent désormais des applications régionales à continentales à une résolution de 30 m (Morsy et al. 2018). Plusieurs exemples d'applications de cartographie des inondations à des résolutions plus fines (mailles < 10 mètres) ont également été présentés récemment (Cea et Bladé 2015, Davy et al. 2017, Xia et al. 2017, Neal et al. 2018, Sanders et Schubert 2019).

En plus des modèles 2D haute résolution, des modèles Saint-Venant 1D peuvent également être appliqués sur la base de sections transversales extraites des MNTs de haute résolution (Pons et al. 2014, Choi et Mantilla 2015, Le Bihan et al. 2017, Lamichhane et Sharma 2018). Ces modèles fournissent également des résultats intéressants en termes de précision, tout en offrant des temps de calcul nettement plus courts que les modèles 2D.

### 2.2.4 Quelques exemples d'approches de cartographie automatisée appliquées à grande échelle

Depuis une dizaine d'années, différentes études des zones inondables à l'échelle continentale et mondiale ont été proposées dans la littérature. Une synthèse de ces travaux est présentée dans la suite de ce paragraphe.

Les premières expériences conduites ont utilisé des formes simplifiées des équations de St Venant en 2D ou 1D. Par exemple, Pappenberger et al. (2012) ont les premiers couplé un modèle de ruissellement de la pluie en surface avec le modèle CaMa-Flood qui est un algorithme de routage en rivière qui simule et représente les plaines d'inondation à l'échelle globale. Le résultat de ce modèle de routage est le volume d'eau stocké, la hauteur d'eau et le débit routé dans chaque cellule de grille de 25 km. Les débits ont été obtenus à partir de données de forçage météorologique sur 30 ans à l'échelle européenne : les maxima annuels ont été utilisés pour calculer les périodes de retour des débits de pointe sur une grille de 25×25 km, qui a ensuite été reprojctée sur une grille de 1×1 km pour obtenir des cartes d'inondation de plus haute résolution (figure 2.10). Yamazaki et al. (2013) ont apporté une amélioration au modèle CaMa-Flood en remplaçant l'équation de l'onde de diffusion par une équation d'onde d'inertie locale obtenue à partir de l'équation de Saint Venant 1D, et en

utilisant un réseau hydrographique sous format vecteur, ce qui leur a permis d'améliorer les cartes mondiales des risques d'inondation établies par Pappenberger et al. (2012) et de gagner environ 60 % en rapidité de calcul. Hirabayashi et al. (2013) ont appliqué le même modèle pour produire des estimations globales des risques d'inondation à partir des données de 11 modèles climatiques. Winsemius et al. (2013) ont également proposé un système d'évaluation des risques d'inondation à l'échelle globale appelé GLOFRIS (GLObal Flood Risk with IMAGE Scenarios, cf. figure 2.11). Ce système est composé d'une chaîne de simulation incluant un forçage par des données climatiques, un modèle hydrologique qui simule les débits, puis un modèle hydraulique qui calcule les champs d'inondation. Cette fois, les débits ont donc été obtenus en amont et de façon indépendante du modèle hydraulique. Le modèle hydraulique utilisé est appelé DynRout, il utilise l'approximation de l'onde cinématique. Les sorties de ce système ont une résolution de 1 km.

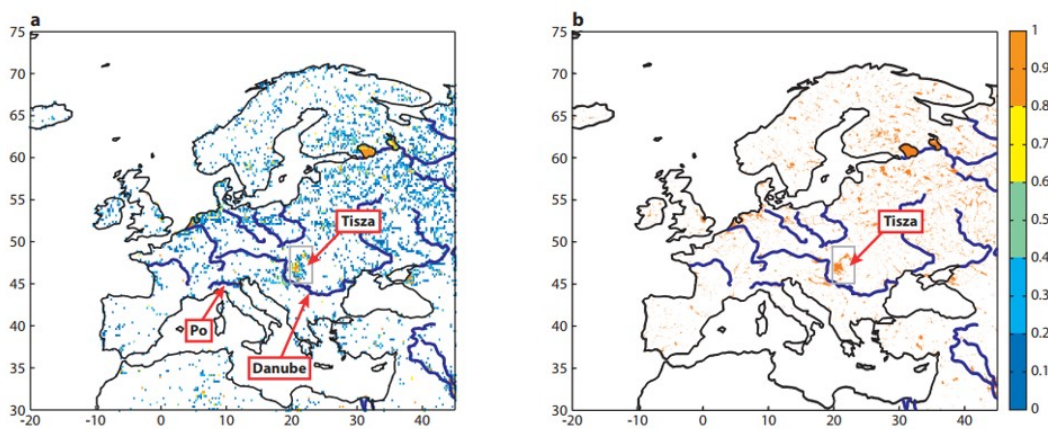


FIGURE 2.10 – Exemple de cartes d'inondation générées avec CaMa-Flood sur l'Europe : a) Carte d'inondation de résolution 25 km pour une période de retour de 50 ans. b) Carte d'inondation de résolution de 1 km pour une période de retour de 50 ans. 1 signifie que la cellule est inondée à 100 %, 0,5 signifie que la cellule est inondée à 50 % et 0 signifie que la cellule n'est pas du tout inondée. Les Principaux fleuves européens sont représentés par des lignes bleues. Toutes les zones blanches indiquent un pourcentage d'inondation inférieur à 5 %. (Pappenberger et al. 2012)

Un peu plus récemment, de nombreuses approches ont été développées à partir du modèle 2D LISFLOOD-FP (Bates et al. 2010, Neal et al. 2012) qui permet une résolution plus complète, bien que restant simplifiée, des équations de St Venant. Schumann et al. (2013) ont par exemple utilisé des données de prévision d'ensemble pour forcer un modèle hydrologique et produire des conditions limites d'écoulement pour le modèle LISFLOOD-FP. Le système de modélisation a été calibré et appliqué avec succès sur un tronçon du fleuve Zambèze en Zambie en se basant sur un MNT de la SRTM à 90 m de résolution. Sampson et al. (2015) ont ensuite appliqué une démarche de modélisation des inondations similaire pour produire des cartes mondiales des risques d'inondation, toujours avec une résolution d'environ 90 m. Les données hydrologiques d'entrée ont été obtenues par une analyse régionalisée de la fréquence des crues basée sur un ensemble de données globales de stations de mesure dans les cours d'eau. Ces données de débits ont permis l'application d'une version modifiée du modèle LISFLOOD-FP, qui a été utilisé pour établir des cartes mondiales des aléas pour plusieurs périodes de retour (approche "catalogue"). Alfieri et al. (2014) ont également établi une carte



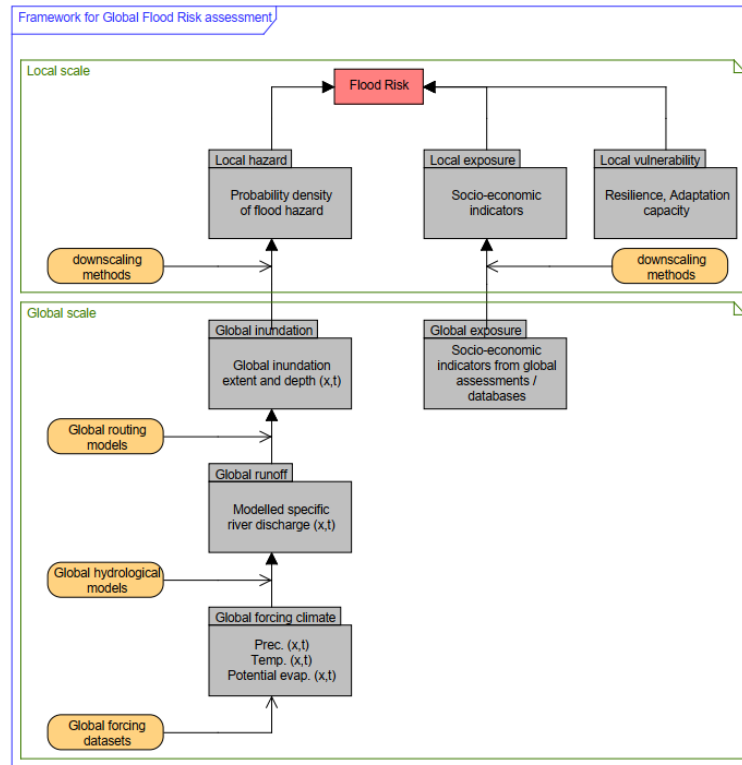


FIGURE 2.11 – Schéma du système d'évaluation des risques d'inondation à l'échelle globale (Winsemius et al. 2013)

des risques d'inondation pour l'Europe en utilisant LISFLOOD-FP. Cette fois, les données hydrologiques d'entrée ont été obtenues par la simulation à long terme du débit (23 ans) élaborée pour le système européen de surveillance des crues et des inondations (EFAS). Les données obtenues sur les débits des cours d'eau ont subi une descente de résolution de 5 km à 100 m et ont été utilisées comme données d'entrée afin de calculer les cartes d'inondation locales, qui ont ensuite été fusionnées dans une carte européenne des risques de crue. En 2016, Dottori et al. ont appliqué une approche similaire pour produire et évaluer pour la première fois une approche "catalogue" de cartographie des inondations (simulations pour plusieurs périodes de retour) à l'échelle globale. Ils ont pour cela utilisé les débits quotidiens des cours d'eau issus des simulations hydrologiques du système mondial de surveillance des inondations (GloFAS) avec une résolution d'environ 11 km, pour obtenir à la fin des cartes d'inondations continentales d'environ 1 km de résolution. Les données sur les débits des cours d'eau ont ensuite été projetées sur un réseau fluvial à haute résolution et traitées pour fournir les données d'entrée pour les simulations locales d'inondation, réalisées avec le modèle hydraulique 2D Lisflood-FP, pour différentes périodes de retour et à une résolution de 90 mètres. En reprenant la même approche (catalogue de scénarios d'inondation), Dottori et al. (2017) ont proposé un modèle simplifié de cartographie en temps réel des zones inondables à l'échelle européenne, en utilisant un MNT de 100 m de résolution. Plus récemment encore, un système de cartographie des inondations basé cette fois sur une approche de remplissage de MNT a été déployé à l'échelle des États-Unis, avec un MNT de 10 m de résolution Liu Yan Y. et al. (2018). Dans cette étude, un supercalculateur a été utilisé et a permis de calculer un raster HAND en un jour et demi pour tous les États-Unis, avec un forçage de la méthode



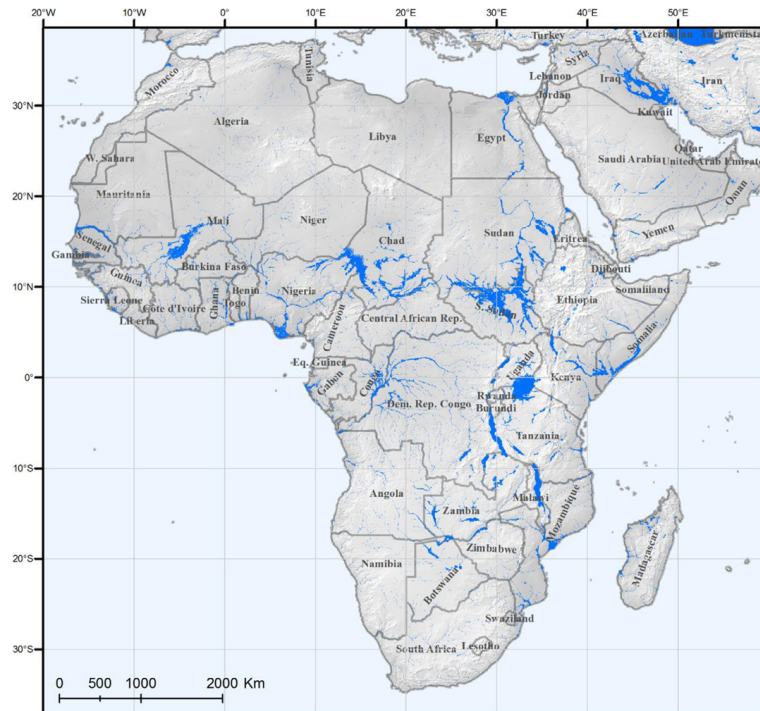


FIGURE 2.12 – Carte panafricaine des étendues d'inondation pour la période de retour de référence de 100 ans obtenue avec la méthode proposée par Dottori et al. (2016)

en utilisant un réseau hydrographique à haute résolution. Le calcul des courbes de tarage simulées à l'aide de la formule de Manning-Strickler pour chaque tronçon de cours d'eau a pris 2 h 30 min et le calcul des cartes d'inondations prend 45 min pour simuler 15 heures d'inondations en temps réel. Cette approche s'avère très similaire à la méthode HAND/MS qui a été testée au cours de cette thèse (cf. paragraphe 2.4.1).

### 2.3 Les premières applications d'approches de cartographie automatisée au cas de petits cours d'eau

Les études de cartographie des inondations à grande échelle, présentées au paragraphe précédent, ne prennent généralement en compte que les cours d'eau principaux, pour des raisons évidentes de capacité de calcul, mais également parce que la résolution des MNT utilisées s'avère souvent incompatible avec la représentation des petits cours d'eau. Néanmoins, en parallèle au développement de ces approches de cartographie à échelle globale ou continentale, plusieurs applications ont été proposées à des échelles plus régionales et à des résolutions (<10 mètres) permettant de représenter les petits cours d'eau. Ces applications reposent sur une grande variété de modèles : DHD-Iber (Cea et Bladé 2015), Floodos (Davy et al. 2017), LISFLOOD-FP (Neal et al. 2018), PRIMo (Sanders et Schubert 2019), SRM (Xia et al. 2017). Des applications plus spécifiques aux crues éclair ont également été proposées, en utilisant des modèles hydrauliques ou des approches de remplissage du MNT. Ces quelques expériences sont détaillées dans la suite de ce paragraphe.

García-Feal et al. (2018) ont par exemple utilisé le modèle Iber, qui est un modèle hydraulique 2D résolvant les équations de St Venant via un schéma de volumes finis non structuré.

Dans cette étude, une nouvelle version de Iber, nommée Iber+, a été mise en œuvre. Elle tire parti de différentes stratégies de parallélisation à la fois sur les CPU et les GPU pour accélérer les calculs, tout en conservant la même précision que le modèle original. Iber+ a été appliqué à une crue éclair extrême qui a eu lieu dans les Pyrénées espagnoles en octobre 2012. Iber+ a été capable de simuler 24 heures de temps réel en moins de 10 minutes, sur une surface de  $240 \text{ km}^2$ , en utilisant un maillage numérique de près d'un demi-million de mailles triangulaires avec des longueurs caractéristiques allant de 5m près du lit mineur à 40 m. Le même cas exécuté avec la version standard nécessite plus de 15 h de temps CPU.

Nguyen et al. (2016) ont développé une chaîne de simulation hydrologique-hydraulique pour la modélisation des crues éclair, appelé HiResFlood-UCI. Le modèle hydraulique utilisé est BreZo, qui résout les équations de St Venant en 2D en utilisant la méthode des volumes finis, à partir d'un maillage non structuré de cellules triangulaires. Une technique semi-automatique de génération de maillage non structuré a été développée pour générer une densité adéquate de cellules de calcul le long des lits mineurs des cours d'eau, de telle sorte que les erreurs numériques soient négligeables par rapport aux autres sources d'erreur, et que les temps de calcul du modèle hydraulique soient maintenus au strict minimum. Brezo a été testé aux États-Unis sur un bassin d'une surface de  $808 \text{ km}^2$  avec un maillage de plus de 800000 cellules d'une longueur caractéristique allant de 10 m près du lit mineur à 200 m. Le temps de calcul pour ce cas d'études est de 1 h CPU pour une simulation de 7 h en temps réel (figure 2.13).

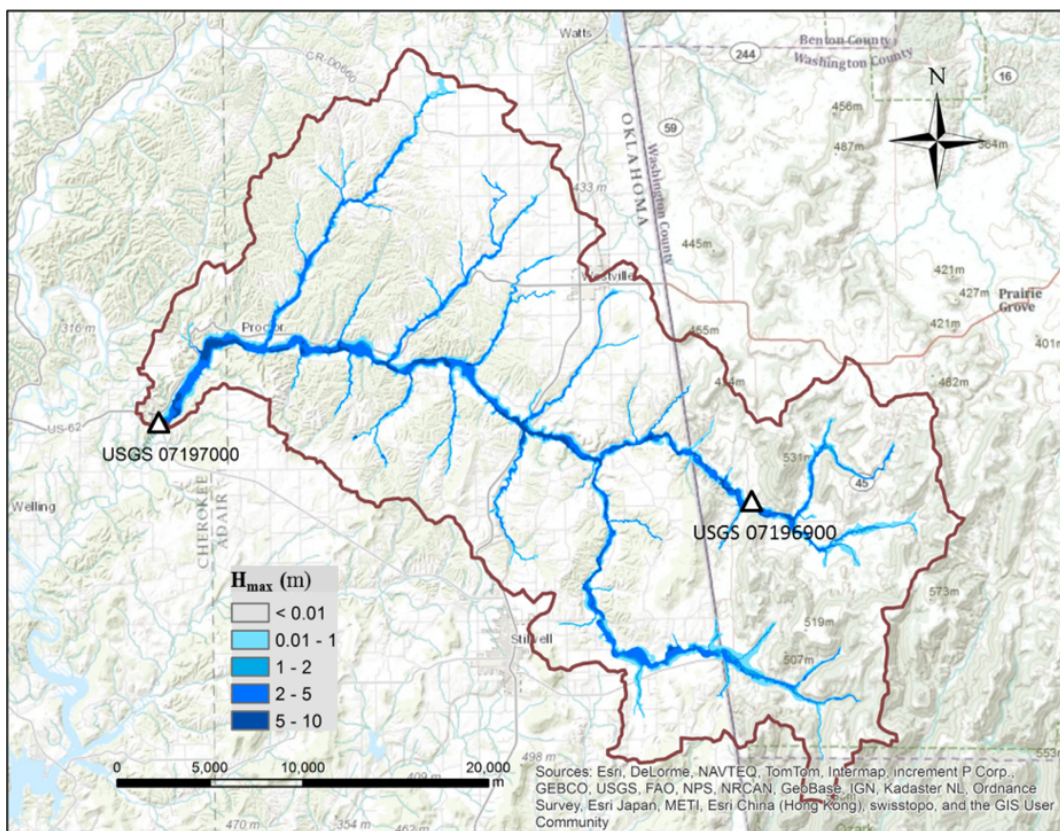


FIGURE 2.13 – Exemple de résultats de la simulation des hauteurs d'eau maximales du modèle HiResFlood-UCI pour le bassin versant ELDO2 dans l'Oklahoma aux États Unis. Le MNT utilisé est de 10 m de résolution (Nguyen et al. 2016)

Zheng et al. (2018) ont proposé Une méthode de remplissage direct du MNT appelée GeoFlood, qui repose sur l'application de la méthode HAND à des MNT haute résolution issus de levés lidar. La méthode proposée extrait un réseau hydrographique très précis avec une structure et une densité prédéfinies, déduit les caractéristiques hydrauliques moyennes de chaque tronçon à partir du raster HAND obtenu et simule les courbes de tarage sur des tronçons de cours d'eau de longueur constante en utilisant la formule de Manning-Strickler. Elle produit ensuite des cartes d'inondation pour chaque tronçon en fonction du débit en entrée, avec des temps de calcul très limités qui s'avèrent facilement compatibles avec une application en temps réel. L'approche a été évaluée à partir d'une application au bassin versant d'Onion Creek, dans le centre du Texas, en comparant l'étendue des inondations simulées aux étendues d'inondation d'une crue centennale obtenues avec des études hydrauliques locales détaillées. L'étendue d'inondation calculée par GeoFlood reproduit 60 % à 90 % de la zone inondable des cartes de référence (figure 2.14).

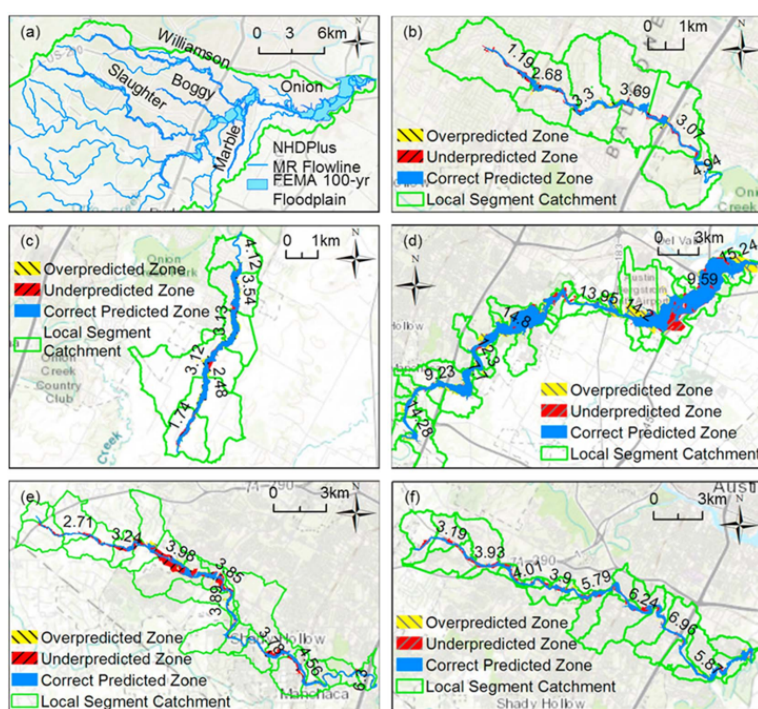


FIGURE 2.14 – Comparaison de l'étendue de l'inondation centennale GeoFlood et de l'étendue d'inondation centennale de la FEMA (Federal Emergency Management Agency) sur plusieurs bassins versants aux Etats Unis : Onion Creek (a), Bogy Creek (b), Marble Creek (c), Onion Creek (d), Slaughter Creek (e) et Williamson Creek (f). Les chiffres le long des rivières indiquent la hauteur d'eau moyenne attribuée à chaque tronçon de cours d'eau (Zheng et al. 2018)

Le Bihan et al. (2017) a également proposé une chaîne de modélisation intégrée des inondations permettant l'évaluation directe des impacts des crues rapides sur les zones urbanisées, et potentiellement applicable en temps réel. L'approche proposée combine le modèle distribué pluie débit CINECAR (Gaume et al. 2004, Naulin et al. 2013), et une approche hydraulique 1D nommée CARTINO PC (Pons et al. 2014) pour la cartographie des champs d'inondation. CARTINO PC permet d'appliquer un modèle hydraulique 1D de façon entièrement automatisée et s'avère adapté au calcul des cartes d'étendue des inondations à grande échelle sur un réseau hydrographique dense, prenant en compte les petits cours d'eau. Le modèle



hydraulique appliqué est Mascaret (Goutal et al. 2012) et est utilisé en régime permanent. Les calculs hydrauliques ont été effectués selon une approche catalogue, pour des périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500 et 1000 ans, en utilisant les quantiles de débit fournis par la base de données SHYREG sur une grande partie du réseau hydrographique français (Aubert et al. 2014).

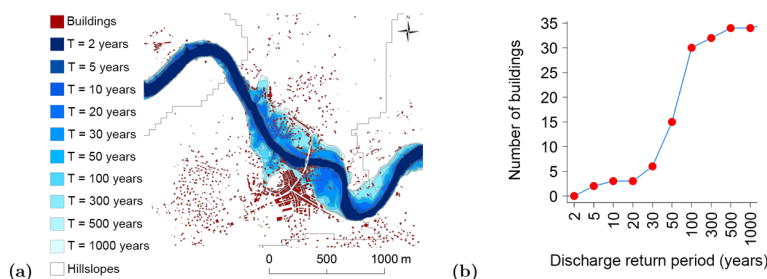


FIGURE 2.15 – Illustration de la mise en œuvre du modèle d'impact sur un tronçon de cours d'eau : (a) catalogue des zones inondées obtenues avec CARTINO PC, (b) courbe interpolée débit-impact Le Bihan et al. (2017)

Sanders et Schubert (2019) ont utilisé le modèle de cartographie des inondations PRIMo, qui résout les équations de St Venant 2D par un algorithme innovant en volumes finis. PRIMo a été conçu pour effectuer des calculs en parallèle sur un nombre de processeurs pouvant aller jusqu'à 1024 (le plus grand nombre testé dans l'étude). Il permet la réalisation de simulations à résolution métrique sur de grandes surfaces (milliers de  $km^2$ ) et à des échelles de temps horaires en quelques secondes à quelques minutes, selon les conditions d'écoulement (profondeur et vitesse) qui contrôlent le pas de temps de calcul maximal autorisé. Cette capacité du modèle le rend bien adapté à la prise en charge d'applications sensibles aux temps de calcul, telles que les prévisions immédiates exécutées en temps réel. La résolution est faite sur une grille à grande échelle à plus basse résolution que le MNT utilisé, et utilise une approche de modélisation sous-maille afin que la solution bénéficie des informations topographiques à la résolution du MNT. PRIMo a été appliqué sur la ville de Los Angeles sur une superficie de  $5652km^2$  afin de tester ses capacités en temps réel, sans aucun calage du modèle. Le modèle a tourné sur un MNT de 3 mètres de résolution et le domaine de calcul a été partitionné en 608 mailles de calcul composées chacune de  $10^3 \times 10^3$  cellules (figure 2.16). Ceci a permis une exécution en parallèle avec un processeur dédié à chaque maille de calcul.

## 2.4 Présentation des méthodes de cartographie retenues

Ce paragraphe présente les trois approches de cartographie qui ont été retenues pour être évaluées et comparées dans la suite de ce travail, en s'appuyant sur la revue bibliographique présentée précédemment. Ces trois méthodes ont été sélectionnées parce qu'elles remplissent les principales conditions permettant de répondre aux objectifs de la prévision des crues éclair :

- L'application de ces méthodes est suffisamment simple pour être entièrement automatisée (y compris les phases de maillage et découpage du domaine de calcul)

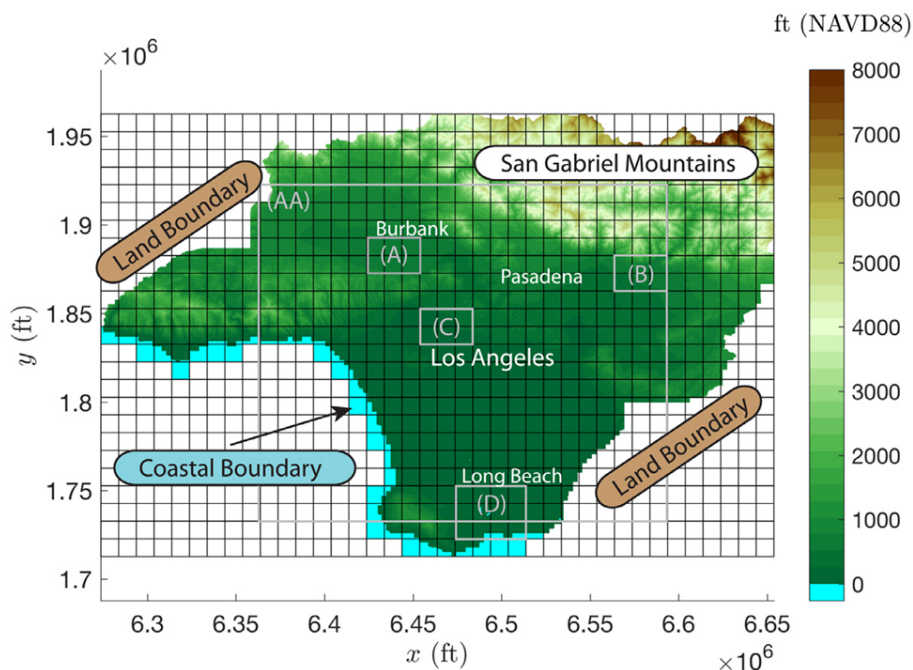


FIGURE 2.16 – Découpage du domaine de calcul mis en oeuvre par Sanders et Schubert (2019). Le domaine de calcul représenté ici contient 608 mailles. Le niveau de l'océan a été spécifié le long de la frontière côtière (bleu clair), et une condition de sortie libre a été utilisée sur toutes les frontières terrestres du domaine de calcul. (Sanders et Schubert 2019)

- Il s'agit de méthodes offrant des temps de calcul rapides permettant leur application sur des zones géographiques étendues, voire en temps réel,
- Ces méthodes s'avèrent applicables à haute résolution (MNT de 5 m à 1 m de résolution) pour prendre en compte facilement la description des lits des petits cours d'eau.

Ces méthodes incluent :

- une méthode de remplissage du MNT, basée sur un couplage d'un descripteur de terrain HAND (altitude par rapport au drainage le plus proche ou Height Above Nearest Drainage) et de la formule de Manning-Strickler qui sera appelée dans ce qui suit "HAND/MS". Cette approche est très analogue à l'approche GeoFlood proposée par (Zheng et al. 2018).
- une approche basée sur le modèle hydraulique Hecras 1D appliqué en régime permanent, la construction du modèle étant automatisée en appliquant l'approche caRtino. Cette deuxième approche est directement dérivée de celle appliquée par (Le Bihan et al. 2017). Elle sera dénommée par la suite "caRtino 1D".
- et enfin une approche basée sur l'utilisation du modèle hydraulique 2D Floodos proposé par (Davy et al. 2017), lui aussi appliqué en régime permanent.

Ces trois méthodes ont également été sélectionnées de façon à couvrir le spectre des méthodes de cartographie actuellement proposées et de pouvoir évaluer l'intérêt et les limites des approches les plus simplifiées (HAND/MS), par rapport à la mise en oeuvre de modèles

numériques en 1D ou en 2D. L'objectif de limitation des temps de calcul a également conduit au choix de n'effectuer que des modélisations en régime permanent.

### 2.4.1 La méthode HAND/MS

#### 2.4.1.1 Présentation de la méthode

La méthode HAND/MS (ou HAND/Manning-Strickler) est une méthode de remplissage de MNT permettant d'estimer l'étendue des zones inondées à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau pour une valeur de débit donnée. Cette méthode présente l'avantage d'une grande rapidité, car elle ne nécessite pas la résolution des équations différentielles de Barré de St Venant régissant les écoulements. À partir du MNT, la méthode calcule une géométrie hydraulique moyenne sur le tronçon de cours d'eau considéré, ce qui permet d'obtenir une courbe de tarage (relation débit-hauteur) par application de la formule de Manning-Strickler. À une valeur de débit correspond ainsi une valeur de hauteur d'eau qui, associée au descripteur HAND (Height Above Nearest Drainage), permet de délimiter les zones inondées sur le tronçon étudié. L'application de cette méthode comporte les principales étapes suivantes (cf. figure 2.17) :

- Génération du raster HAND
- Estimation de la géométrie moyenne du lit
- Estimation de la courbe de tarage
- Création de la carte d'inondation.

Ces étapes sont détaillées dans les paragraphes qui suivent.

#### 2.4.1.2 Génération du raster HAND

Le raster HAND est un descripteur de la topographie d'une zone (Rennó et al. 2008) directement dérivé du MNT, et dans lequel l'altitude de chaque point est définie relativement à celle du réseau de drainage le plus proche. Le principe du calcul de ce raster est présenté sur la Figure 2.18. Les directions de drainage local (DDL) et le réseau de drainage (a) sont dans un premier temps extraits du modèle numérique de terrain (c). Les DDL et le réseau de drainage (a) sont utilisés pour générer la carte du drainage le plus proche (b) (chaque cellule de drainage est spatialement associée à toutes les cellules du MNT qui s'y déversent), puis le MNT original (c) est traité en calculant la hauteur au-dessus de l'opérateur de drainage le plus proche (l'altitude de la cellule MNT de drainage correspondante est soustraite de l'altitude de chaque cellule du MNT). Cette combinaison produit le modèle HAND (d), dans lequel à chaque cellule est affectée la différence de niveau par rapport à la cellule de drainage la plus proche. Le réseau de drainage devient la référence topographique (altitude 0 mètre) pour le modèle HAND alors que sur un MNT les altitudes sont référencées par rapport au niveau de la mer (Nobre et al. 2016).

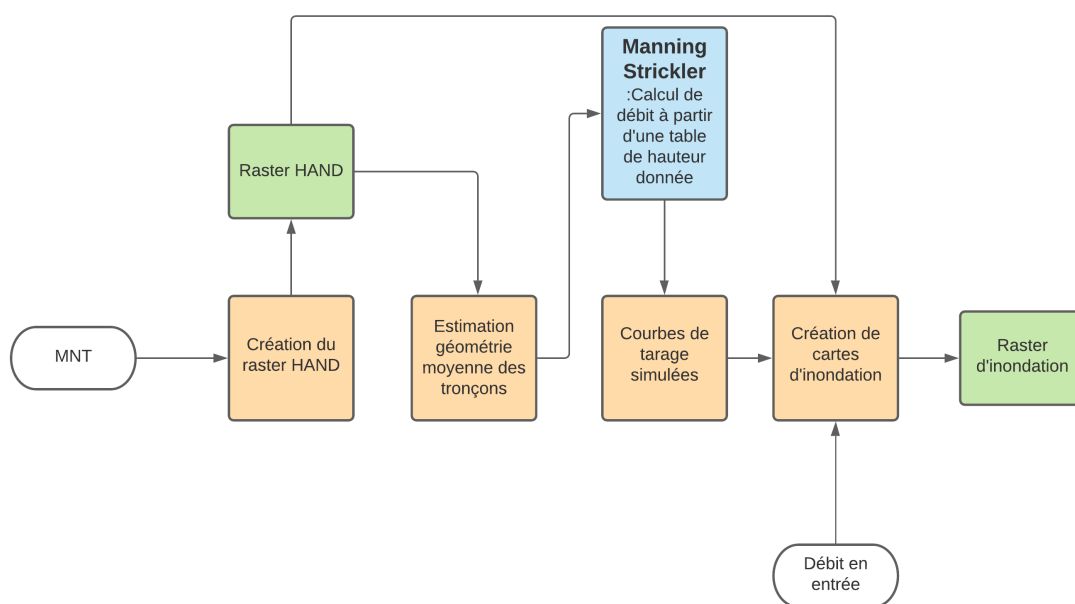


FIGURE 2.17 – Schéma du principe de construction de carte d'inondation avec la méthode HAND/MS. Ce schéma présente les données d'entrée dans les cases blanches, les principales de calcul en orange et bleu et les informations de sortie en vert.

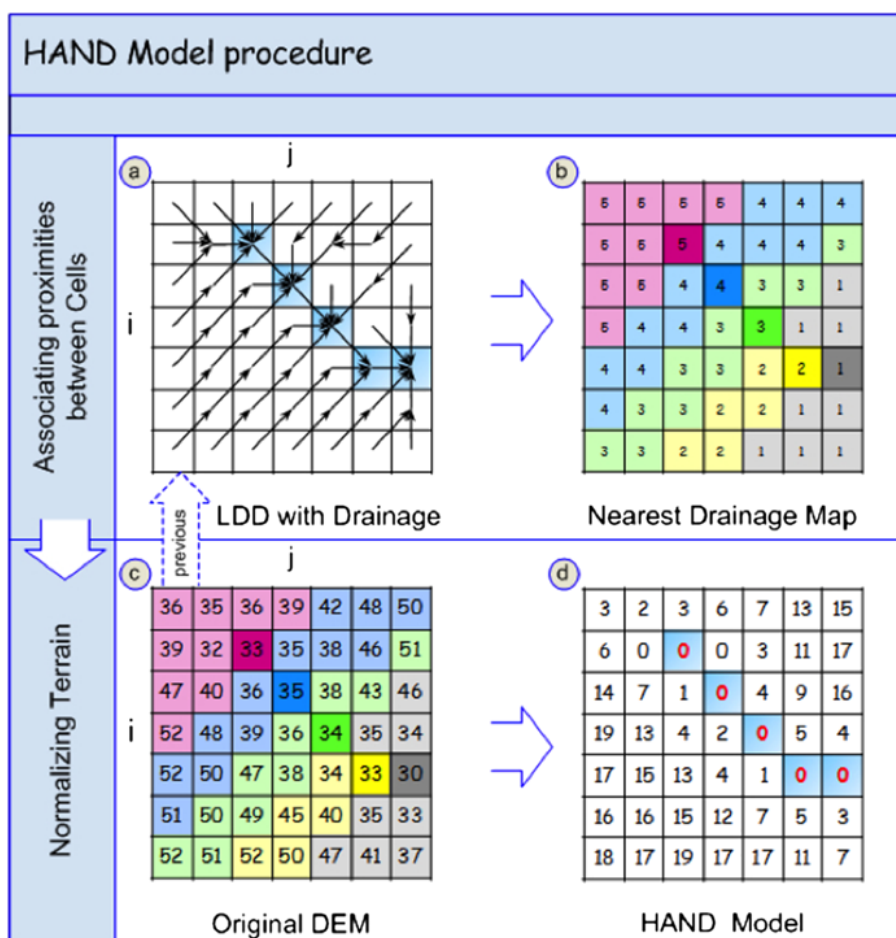


FIGURE 2.18 – Schéma de la méthode HAND (Nobre et al. 2016)

La création d'un raster HAND s'avère très rapide à réaliser, en utilisant un logiciel open source appelé TauDEM (Tarboton et al. 2015). Ce logiciel, écrit en C ++, comprend une série de fonctions permettant de fournir des analyses hydrologiques de terrain (Fan et al. 2014). À l'aide de ces fonctions, il est très simple de créer les différents fichiers raster essentiels au calcul du raster HAND. Nous pouvons ainsi déterminer les directions d'écoulement (a) et créer le réseau de drainage (b) présentés dans la figure 2.18, ainsi qu'un découpage en sous-bassins versants alimentant chaque tronçon de cours d'eau. Il est également possible de paramétrer le seuil de surface drainée utilisé pour créer le réseau de drainage, et ainsi de réduire ou augmenter la taille des sous bassins-versants.

### 2.4.1.3 Estimation de la géométrie moyenne du lit du cours d'eau

Une fois le raster HAND créé, il est possible de déterminer un profil en travers moyen du lit du cours d'eau pour un bief considéré (Figure 2.19), d'après la méthode expliquée dans l'article de Zheng et al. (2018). Pour un tronçon de cours d'eau TR, et une hauteur d'eau  $h$ , toutes les cellules  $s$ , ayant une valeur HAND inférieure à  $h$ , composent une zone inondée  $F(h)$ , qui est une sous-zone du bassin versant  $C$  associé au tronçon TR. La hauteur d'eau  $d(s, h)$  des cellules  $s$  situées dans la zone inondée  $F(h)$ , est obtenue par la différence entre la hauteur  $h$  et la valeur HAND de chaque cellule :

$$d(s, h) = h - H(s), s \in F(h) \quad (2.7)$$

Comme une hauteur d'eau moyenne  $h$  uniforme est appliquée pour vérifier l'inondation des cellules dans le bassin versant  $C$ , la géométrie de la zone inondée  $F(h)$  doit être interprétée au niveau du tronçon. La superficie de la surface du plan d'eau  $S(h)$ , peut être calculée comme suit :

$$S(h) = \sum_{s \in F(h)} A(s) \quad (2.8)$$

où  $A(s)$  est la surface de la cellule  $s$ . La superficie du fond du lit  $B(h)$  dans la zone inondée, peut être calculée comme suit :

$$B(h) = \sum_{s \in F(h)} A(s) \sqrt{(1 + slp(s)^2)} \quad (2.9)$$

Où  $slp(s)$  est la pente de surface de la cellule  $s$ . Le volume dans le tronçon est :

$$V(h) = \sum_{s \in F(h)} A(s) d(s, h) \quad (2.10)$$



Avec les équations précédentes, il est possible de déterminer les caractéristiques de la géométrie hydraulique « moyenne » du tronçon. La surface mouillée  $S_m(h)$ , le périmètre mouillé  $P(h)$ , et la largeur au miroir  $l_m(h)$ , sont obtenus en divisant respectivement le volume, la superficie du fond et la surface du plan d'eau par la longueur  $L$  du tronçon considéré :

$$l_m(h) = S(h)/L \quad (2.11)$$

$$S_m(h) = V(h)/L \quad (2.12)$$

$$P(h) = B(h)/L \quad (2.13)$$

On en déduit le rayon hydraulique  $R(h)$  :

$$R(h) = S_m(h)/P(h) \quad (2.14)$$

#### 2.4.1.4 Estimation de la courbe de tarage

Une fois que les caractéristiques de la géométrie hydraulique du tronçon sont déterminées, le débit  $Q(h)$  correspondant à la hauteur  $h$  peut être estimé en utilisant la formule de Manning-Strickler (équation 2.15).

$$Q(h) = K S_m(h) R(h)^{2/3} i^{1/2} \quad (2.15)$$

où

- $Q(h)$  : débit moyen [ $m^3/s$ ]
- $K$  : coefficient de rugosité (ou de Strickler) dont il faut fixer la valeur [ $m^{1/3}/s$ ]
- $S_m(h)$  : section mouillée [ $m^2$ ]
- $R(h)$  : rayon hydraulique  $R = S_m/P$  [ $m$ ]
- $i$  : pente du tronçon de cours d'eau [—]

En reproduisant la procédure pour plusieurs valeurs de  $h$ , on obtient une estimation de la courbe de tarage associée au tronçon TR. Cette courbe de tarage permet d'associer une hauteur d'eau à n'importe quel débit simulé.

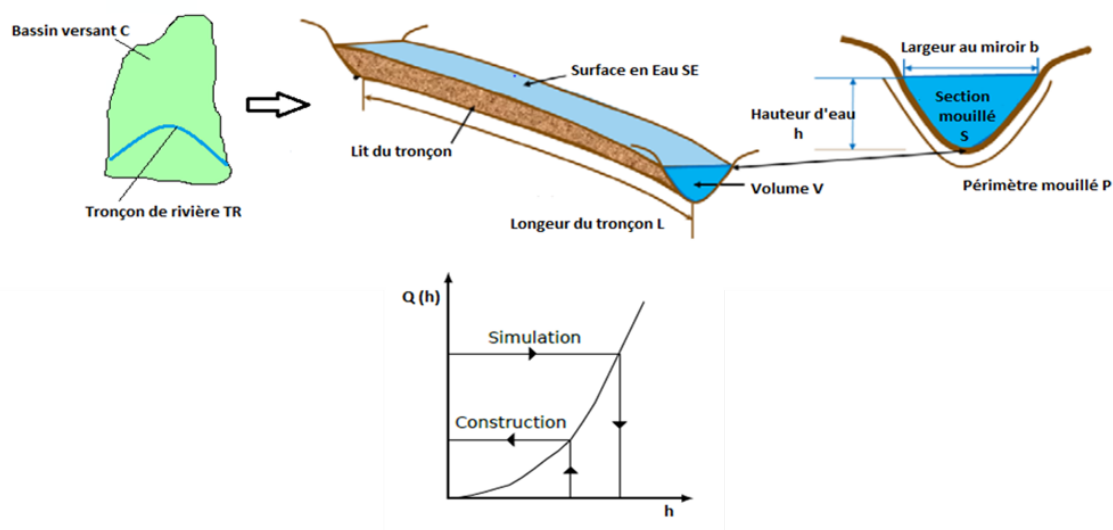


FIGURE 2.19 – *Modèle conceptuel de la géométrie de la rivière utilisé par HAND (Zheng et al. 2018)*

#### 2.4.1.5 Création de la carte d'inondation

Pour obtenir la carte d'inondation associée à un débit  $Q$ , la courbe de tarage estimée précédemment est utilisée de façon à obtenir la hauteur d'eau correspondante  $h$  sur le tronçon. Il faut ensuite mettre en relation cette hauteur  $h$  avec le raster HAND pour obtenir la carte d'inondation. Pour cela, nous utilisons les valeurs de hauteur HAND ( $H$ ) et les comparons à l'information de hauteur d'eau sur le tronçon de cours d'eau associé ( $h$ ). Si, sur une cellule donnée d'un bassin-versant, la hauteur  $h$  d'inondation du tronçon associé est supérieure ou égale à la hauteur HAND  $H$  de cette cellule, alors cette cellule prend une valeur  $h - H$  correspondant à la hauteur supposée de submersion (cf. équation 2.7). Dans le cas contraire, la cellule prend une valeur nulle (pas de submersion). Grâce à cette comparaison, nous obtenons ainsi le champ d'inondation estimé de la zone d'étude.

#### 2.4.1.6 Intérêt et limites de l'approche pour traiter les crues soudaines

Globalement, la méthode HANS/MS permet de produire rapidement des cartes d'inondation. Cependant, elle est basée sur plusieurs hypothèses importantes. Premièrement, la géométrie du lit du cours d'eau et la hauteur d'eau sont moyennés et supposés être uniformes pour chaque tronçon de rivière. Par conséquent, les effets de remous dus aux variations de la pente longitudinale et de la forme de la section transversale le long d'un tronçon de cours d'eau, et/ou dus aux conditions aux limites en aval, ne sont pas représentés. Deuxièmement, les variations de débit longitudinal le long de chaque tronçon de rivière ne peuvent pas être prises en compte. Troisièmement, la profondeur d'inondation en chaque point de la plaine d'inondation dépend uniquement de son élévation relative au-dessus de son point de drainage aval le plus proche (c'est-à-dire la valeur du raster HAND), indépendamment des connexions hydrauliques réelles. Cela peut entraîner des discontinuités : des pixels voisins ayant des altitudes similaires peuvent être liés à des points de drainage différents et donc se voir attribuer des valeurs HAND très différentes. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de plaines d'inondation plates et larges et aux confluences où des pixels voisins peuvent

être reliés à différents tronçons de rivière. Dans ce dernier cas, les niveaux d'eau considérés pour la cartographie des inondations seront également différents pour les deux points voisins. Johnson et al. (2019) concluent qu'avec cette famille de méthodes, des erreurs significatives peuvent être observées à la fois pour les cours d'eau de tête de bassin et pour les plaines d'inondation avec peu de relief.

## 2.4.2 La méthode caRtino 1D

### 2.4.2.1 Présentation générale

caRtino 1D est une nouvelle version reprogrammée sous R du code Cartino initialement développé par le Cerema DTerMed (Pons et al. 2014). Cet outil permet d'appliquer une modélisation hydraulique 1D de manière automatisée à partir d'un MNT à haute résolution et d'un réseau hydrographique au format vecteur. L'approche a déjà été appliquée avec succès pour la modélisation de champs d'inondations dans un contexte de crues éclair par Le Bihan et al. (2017).

La méthode comporte trois principales étapes. Dans un premier temps, l'étape de prétraitement positionne automatiquement des profils en travers sur le réseau hydrographique et extrait la géométrie de ces profils en travers à partir du MNT, de façon à construire les fichiers d'entrée du modèle hydraulique. Ensuite, l'étape de calcul lance le modèle hydraulique 1D en régime permanent afin d'évaluer le profil en long de la ligne d'eau. Enfin, une étape de post-traitement permet d'interpoler sur le MNT les hauteurs d'eau de façon à délimiter la zone inondée et les hauteurs d'eau atteintes à l'intérieur de cette zone.

Le fonctionnement du code permettant d'appliquer ces étapes de calcul est décrit sur la figure 2.20 et dans les paragraphes qui suivent.

### 2.4.2.2 Pré-traitement : positionnement et extraction de la géométrie des profils

Lors de cette étape, les profils en travers sont dans un premier temps positionnés le long du réseau vectoriel d'un bief avec des largeurs égales et un espacement fixe (cf. figure 2.21(a)). Une fois les profils positionnés, la géométrie de chaque profil en travers est extraite à partir du MNT, et les débits d'entrée à injecter au niveau de chaque profil sont extraits à partir d'un raster des données de débit.

Un premier calcul hydraulique est ensuite lancé de façon à déterminer la largeur au miroir sur chaque profil en travers initialement positionné. Une courbe d'interpolation des largeurs au miroir en fonction du linéaire du bief est ensuite créée (cf. figure 2.22). Les profils en travers sont ensuite repositionnés le long du tronçon, avec cette fois un espacement proportionnel à la largeur au miroir (2.21(b)). L'espacement entre les profils est régi par plusieurs paramètres ajustables par l'utilisateur : des espacements minimum (20 mètres dans les applications présentées par la suite) et maximum (50 mètres dans la suite) sont définis, ainsi qu'un ratio (0.75 dans la suite) qui détermine l'espacement entre deux profils en fonction de la largeur au miroir. Un test qui vérifie le croisement des profils est finalement appliqué. Si nécessaire, les profils en travers sont décroisés en jouant sur leur orientation.

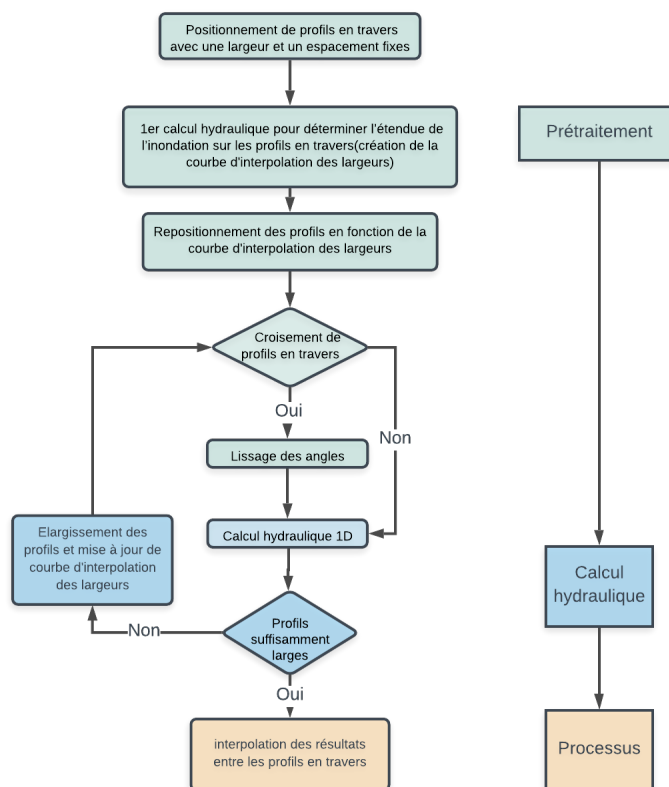


FIGURE 2.20 – Algorithme simplifié du fonctionnement de l'outil caRtino 1D

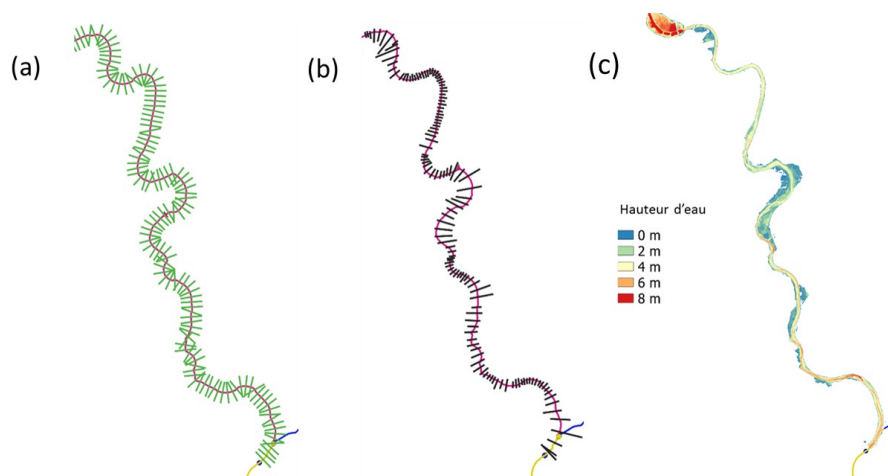


FIGURE 2.21 – Sorties obtenues pour 3 étapes intermédiaires de la méthode caRtino 1D : a) premier positionnement des profils en travers avec largeur et espacement fixes, b) repositionnement des profils, c) post-traitement des hauteurs d'eau

Comme lors du 1er positionnement, les informations de débit et de topographie au niveau de chaque profil en travers sont ensuite extraites des données d'entrée, de façon à réécrire les fichiers d'entrée du modèle hydraulique.

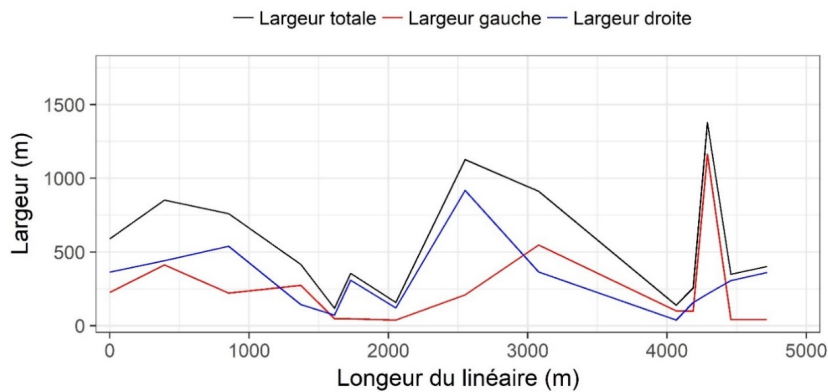


FIGURE 2.22 – Exemple de courbe d'interpolation des largeurs au miroir

### 2.4.2.3 Calcul hydraulique

Dans cette étape, les informations générées lors du prétraitement (profils en travers, débits) sont utilisées pour lancer un calcul hydraulique et récupérer l'altitude des lignes d'eau et de charge.

CaRtino 1D permet le choix entre deux codes hydrauliques 1D pour réaliser les calculs hydrauliques : Mascaret et HEC-RAS. C'est le modèle HEC-RAS qui a été utilisé dans les applications présentées dans la suite de ce mémoire.

HEC-RAS est capable de réaliser des calculs de profils en long de la ligne d'eau en régime permanent, pour un écoulement graduellement varié, fluvial ou torrentiel. Grâce à l'hypothèse d'écoulement graduellement varié, ce modèle utilise l'équation de Bernoulli (équation 2.16), qui est directement dérivée de l'équation de quantité de mouvement du système de Saint Venant (équation 2.2), elle est obtenue en intégrant cette dernière en espace entre  $x_1$  et  $x_2$ , ce qui permet de calculer les lignes d'eau et d'énergie entre deux profils en travers :

$$Z_2 + h_2 + \frac{u_2^2}{2g} = Z_1 + h_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \Delta H \quad (2.16)$$

où :

- $Z_1, Z_2$  : Altitudes du fond du cours d'eau aux sections en travers 1 et 2 [m]
- $h_1, h_2$  : Hauteurs d'eau aux sections en travers 1 et 2 [m]
- $u_1, u_2$  : vitesses moyennes d'écoulement [ $m.s^{-1}$ ]
- $g$  : constante de gravité [ $m.s^{-2}$ ]
- $\Delta H$  : Perte de charge (linéaire et singulière) entre les deux profils en travers [m].

$\Delta H$  peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\Delta H = LS_f + C \left| \frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} \right| \quad (2.17)$$

où :

- $L$  : Longueur du tronçon [m]
- $C$  : Coefficient de perte de charge singulière (rétrécissement ou élargissement du cours d'eau) [-]
- $S_f$  : Pente due aux frottements[-]

Le terme  $LS_f$  représente les pertes de charge linéaires et le terme  $C \left| \frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} \right|$  représente les pertes de charges singulières si elles existent. Le coefficient  $C$  varie selon les singularités présentes dans le calcul.

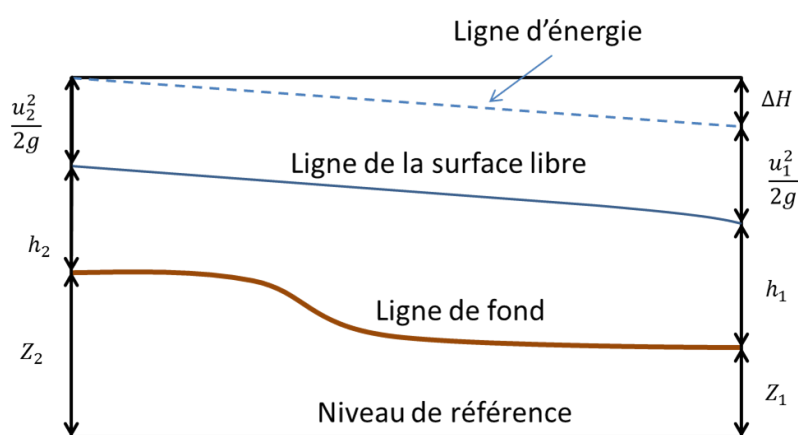


FIGURE 2.23 – Schéma explicatif de l'équation d'énergie de Bernoulli utilisée dans HEC-RAS

La procédure de calcul nécessite de définir une hauteur d'eau (condition à la limite) à l'aval (régime fluvial) ou à l'amont (régime torrentiel). Dans nos applications, la condition limite a été définie comme la hauteur d'eau normale déterminée à partir de la loi de Manning-Strickler et de la pente du tronçon. La pente due aux frottements  $S_f$  est également calculée avec la formule de Manning.

L'équation 2.16 est résolue avec une méthode numérique itérative. L'hypothèse d'un écoulement graduellement varié facilite donc le calcul dans HEC-RAS, mais elle présente néanmoins un inconvénient : les ouvrages (cas d'un écoulement varié) ne sont pas pris en compte, ce qui peut représenter une limite.

A l'issue de chaque calcul hydraulique, quel que soit le modèle utilisé, la méthode caRtino 1D effectue un test pour vérifier que les profils sont suffisamment larges : si la charge hydraulique obtenue dépasse l'altitude de l'une des extrémités d'un des profils en travers, celui-ci est considéré comme trop étroit. Les profils qui le nécessitent sont alors élargis selon un pourcentage de leur largeur initiale, défini dans les paramètres d'entrée. Ils sont également décroisés si nécessaire, puis le calcul hydraulique est relancé jusqu'à ce que l'ensemble des profils soient suffisamment larges. La courbe d'interpolation des largeurs au miroir est mise à jour à chaque calcul hydraulique.

#### 2.4.2.4 Post-traitement

L'étape de post-traitement permet d'obtenir l'information sur les hauteurs d'eau dans l'emprise inondée. Elle consiste dans un premier temps à générer un raster de la charge hydraulique ou de l'altitude de la ligne d'eau à partir des sorties du modèle hydraulique. Ceci est réalisé en créant des profils en travers intermédiaires très peu espacés de façon à permettre l'interpolation des altitudes de la ligne d'eau entre les profils en travers ayant servi au calcul hydraulique (une altitude de la ligne d'eau est obtenue pour chaque profil en travers à l'issue du calcul hydraulique). Dans un deuxième temps, les altitudes du MNT sont soustraites de celles de la ligne d'eau pour obtenir un raster des hauteurs d'eau (figure 2.21(c)).

#### 2.4.2.5 Intérêt et limites de l'approche pour traiter les crues soudaines

Le Bihan et al. (2017) ont proposé une évaluation détaillée des performances de l'approche Cartino pour une utilisation à des fins de prévision des crues éclaircies. L'évaluation a porté sur les crues du Gard en septembre 2002 et celles de l'Argens en juin 2010. Les conclusions de ce travail montrent que la méthode présente une capacité intéressante à reproduire les inondations observées. Il a notamment été observé un excellent comportement de la méthode sur les cours d'eau à topographie bien encaissée, et sur les lits majeurs bien délimités. En revanche, la méthode a montré des limites quand elle est confrontée à une situation de lit perché ou à un lit majeur très large et plat, et la nécessité de passer à des modèles hydrauliques 2D dans ces situations a été soulignée.

### 2.4.3 Floodos 2D

#### 2.4.3.1 Présentation générale

Floodos est un code de calcul hydrodynamique 2D développé par Géosciences Rennes (Davy et al. 2017), et permettant de représenter la hauteur et la vitesse des écoulements sur un domaine de calcul découpé en mailles carrées. Le modèle a été programmé en C++, et représente le module de calcul hydrodynamique du code Eros, destiné à représenter les phénomènes d'érosion liés aux écoulements. Floodos a été comparé dans le cadre de l'étude de Davy et al. (2017) à un autre modèle 2D, LISFLOOD-FP, qui est l'un des modèles numériques les plus utilisés pour la prévision automatisée des inondations sur de grands domaines. Sur les cas tests utilisés, les résultats obtenus ont été similaires avec les deux modèles pour un temps de calcul divisé par deux environ avec Floodos.

La particularité de cette méthode est qu'elle est basée sur une approche lagrangienne, contrairement à la majorité des modèles hydrauliques 2D couramment utilisés. La méthode permet de calculer de façon originale à la fois la profondeur de l'eau et la vitesse des écoulements. Elle résout pour cela partiellement les équations de Saint Venant, les termes inertiels dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement étant négligés (termes de gauche dans l'équation 2.6).

La méthode de résolution est celle du "précipiton". Il s'agit d'une approche particulière (basée sur l'évolution d'une particule dans l'espace et dans le temps), qui consiste à propager

des volumes d'eau élémentaires en fonction de la topographie en utilisant directement la grille d'un MNT à haute résolution. La méthode ne nécessite donc pas de réaliser un maillage spécifique du domaine de calcul.

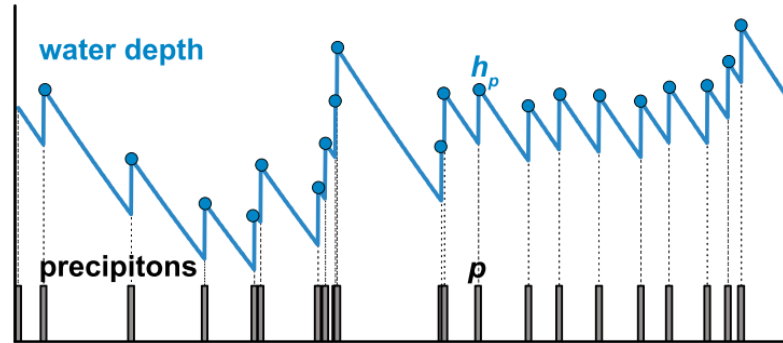


FIGURE 2.24 – évolution de la hauteur d'eau dans une cellule lors des passages de précipitons (Davy et al. 2017)

La méthode permet un calcul rapide de la solution stationnaire. Ceci est accompli par le fait que le volume d'eau déposé par le précipiton sur chaque maille parcourue ne change pas le long de son cheminement vers l'aval. Un seul précipiton peut donc apporter un important volume d'eau sur le domaine, favorisant ainsi une convergence rapide de la ligne d'eau vers la solution stationnaire. La figure 2.24 illustre l'évolution de la ligne d'eau au niveau d'une maille de calcul (ou maille du MNT) : le débit entrant dans la maille est fixé par la fréquence de passage des précipitons, chaque passage de précipiton apportant un volume d'eau identique ; le débit sortant et donc la diminution du niveau entre deux passages de précipitons est pour sa part fixée par l'équation de conservation de la quantité de mouvement. La conservation du volume (équation 2.5) n'est donc pas assurée en cours de calcul, et n'est obtenue qu'une fois la stabilisation de la ligne d'eau au niveau de la solution stationnaire.

D'après Davy et al. (2017), le temps CPU nécessaire pour atteindre la solution stationnaire évolue à peu près linéairement avec le nombre de pixels  $N$ . La méthode n'est pas encore parallélisée, et une nouvelle version avec des précipitons gérés en parallèle est en cours de développement. La méthode présente néanmoins une petite difficulté d'application. En effet, un choix inapproprié du volume d'eau déposé par les précipitons  $V_p$  peut conduire à converger vers une solution erronée, le niveau de la ligne d'eau étant dans ce cas surestimé (cf. figure 2.25). Davy et al. (2017) a proposé une condition sur le volume de précipiton  $V_p$  de façon à permettre une convergence optimale :

$$S_t = \frac{V_p}{S_0 \Delta x^2 \Delta y} < 0.75 \quad (2.18)$$

où

- $S_t$  : critère de convergence
- $S_0$  : pente de la surface libre



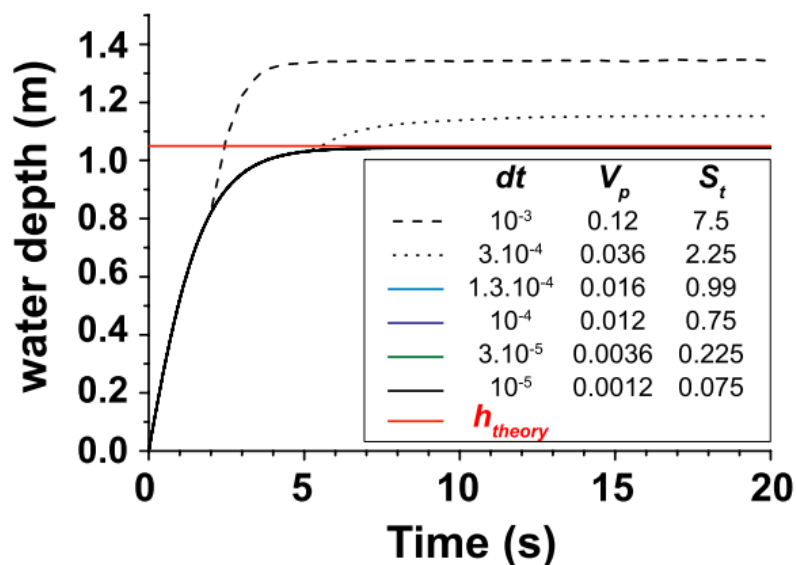


FIGURE 2.25 – Convergence de la méthode Floodos (Davy et al. 2017)

- $\Delta x$  : résolution du calcul selon x
- $\Delta y$  : résolution du calcul selon y

La diminution des volumes de précipitations peut avoir pour effet d'allonger le temps de calcul, et dans le cadre de l'application réalisée ici, une vérification rigoureuse de la convergence a donc été réalisée de façon à garantir la convergence vers la bonne solution, tout en essayant de limiter au maximum les temps de calcul. L'ensemble des tests réalisés et la procédure mise en œuvre pour l'application de Floodos sont détaillés en annexe 1.

## Synthèse

Dans ce chapitre ont été décrites les principales méthodes utilisées dans la cartographie des inondations, dont les approches basées sur les équations de St Venant qui ont été davantage détaillées. Les études et développements récents dans la cartographie des inondations ont été cités et quelques études détaillées, notamment sur la cartographie des inondations à grande échelle, l'automatisation des approches et les études récentes sur les petits cours d'eau. Enfin, les approches de cartographie sélectionnées pour être appliquées dans la thèse ont été présentées en détail : HAND/MS, caRtino 1D et Floodos 2D. Ces trois approches ont un degré de complexité croissant. Elles ont été retenues, car elles remplissent les critères recherchés pour répondre à la problématique de cartographie des inondations sur petits cours d'eau soumis aux crues soudaines : la possibilité d'application à haute résolution (5 m ou 1 m) et à grande échelle (échelles régionale, continentale), la rapidité d'exécution et possibilité d'automatiser leur mise en œuvre. Ces trois approches ont fait preuve d'excellents résultats sur la base des études récentes réalisées précédemment. Ces trois approches vont être évaluées et comparées dans les chapitres 4 et 5.



## Chapitre 3

# Méthodologie d'évaluation des outils de cartographie automatisée

### *Objectifs du chapitre :*

*Ce chapitre présente les données de référence et les méthodes d'évaluation retenues pour la comparaison des approches de cartographie automatisée utilisées dans le cadre de la thèse.*

*Ce travail d'évaluation dépend fortement de la disponibilité de données pouvant être utilisées comme référence et comparées aux résultats de modélisation. La première partie du chapitre propose par conséquent un rapide inventaire des données mobilisables dans un objectif d'évaluation des méthodes de cartographie automatisée et dans un contexte de crues soudaines, et présente les jeux de données qui ont finalement été utilisés dans le cadre de la thèse.*

*Dans un deuxième temps, le chapitre présente les critères utilisés pour comparer les résultats des méthodes de cartographie automatisée aux données de référence sélectionnées. Ces critères permettent d'une part la comparaison de l'emprise inondée simulée à une emprise de référence, et une comparaison des hauteurs d'eau simulées et observées.*

### 3.1 Données de référence disponibles pour l'évaluation

Il existe plusieurs types de données de référence à partir desquelles les approches de cartographie peuvent être évaluées. Ces données peuvent se répartir en deux grandes catégories. Tout d'abord, il peut s'agir d'observations réalisées suite à une crue réelle. Ces données peuvent être obtenues grâce à des images satellites, aéroportées ou à des campagnes de relevés de terrain, et peuvent porter sur différentes caractéristiques comme l'extension de la zone inondée, les hauteurs d'eau maximales observées, ou encore le recensement des impacts occasionnés. La deuxième catégorie de données de référence correspond à des résultats de simulations, dont les données d'entrée, les modalités et les hypothèses ont été validées par des experts en hydraulique, ce qui permet d'avoir une bonne confiance dans les résultats obtenus. Ces deux familles d'informations sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

#### 3.1.1 Les données d'observation relatives aux crues

Les données d'observation sur les crues sont le plus souvent constituées de cartes de l'extension des inondations observées, et de données sur les niveaux d'eau maximum atteints ponctuellement (généralement appelés relevés de Plus Hautes Eaux). De façon moins courante, il peut également s'agir de recensement des impacts occasionnés par l'inondation, comme c'est le cas par exemple des données de sinistralité des assurances. Les jaugeages réalisés en cours de crue, pour la construction des courbes de tarage des stations hydrométriques, peuvent également donner une information intéressante sur le débit et le niveau de la crue à un instant donné. Néanmoins, ces jaugeages sont rares dans le cas des crues soudaines de petits cours d'eau, qui sont en majorité non jaugés, et dont les crues sont souvent trop rapides pour permettre la mobilisation de moyens de jaugeage.

##### 3.1.1.1 Les cartes d'inondations observées

Lors d'une crue, les étendues d'inondation maximales peuvent s'observer par deux moyens distincts : tout d'abord par la mobilisation d'images satellite prises en cours de crue ; ensuite, par la réalisation de campagnes de terrain post-crue permettant de repérer la limite de la zone submergée.

La télédétection par satellite est un outil puissant pour cartographier les zones inondées. Ces dernières années, la disponibilité de données satellitaires gratuites a considérablement augmenté en termes de type et de fréquence, permettant la production de cartes d'inondation (figure 3.1) à faible coût dans le monde entier (Elkhrachy 2015, Tangdamrongsub et al. 2016, Cai 2017, Rahman 2018, Ovando 2018).

Par exemple, les satellites Sentinel du programme Copernicus de l'Union européenne fournissent des données de capteur radar à synthèse d'ouverture (RSO) et de capteur multispectral avec une couverture mondiale, un passage à haute fréquence qui va de 6 jours pour Sentinel 1 A et B à 60 minutes pour Sentinel 4 lancé en 2019. Les capteurs de ces satellites proposent des données à haute résolution spatiale (10 mètres) (Berger 2012). D'autres exemples de programmes de télédétection gratuits sont Landsat, qui fournit des données depuis 1972 (Hansen

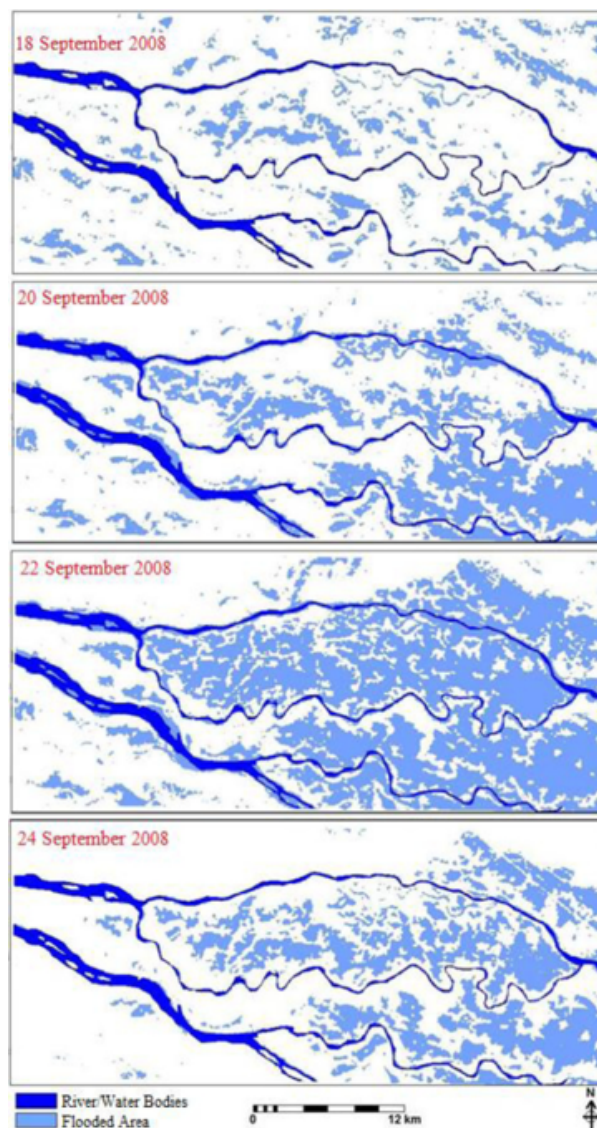


FIGURE 3.1 – Cartes d'inondation produites sur la base de données satellitaires RSO (Rahman 2018)

2012) et les satellites à fréquence de passage journalière MODIS qui fournissent des images multispectrales (Justice et al. 1998).

Cependant, la capacité des satellites à capturer les zones inondées dépend de plusieurs facteurs :

- l'instant du passage du satellite par rapport au pic d'inondation : comme on peut le constater sur la figure 3.2, les temps de passage des différents satellites sont différents et pas toujours proches du moment du pic de l'inondation.
- la résolution spatiale du satellite
- le type de capteurs : par exemple les satellites Sentinel-1 (A/B), qui comportent des capteurs RSO dont le principal avantage réside dans leur capacité à acquérir des images de nuit et dans toutes les conditions météorologiques, ce qui permet de combler les lacunes résultant souvent de données optiques détériorées par la présence de nuages.

- les conditions météorologiques au moment du passage : qui pose problème que dans le cas d'acquisition réalisée avec des capteurs optiques ou multispectraux.
- l'occupation des sols (couvert végétal pouvant masquer la surface notamment) et la morphologie de la zone inondée (effets de masque liés au relief).
- le type de traitement des données qui dépend du type de données d'acquisition issues de capteurs différents, et du type d'information visé en sortie (Notti et al. 2018).

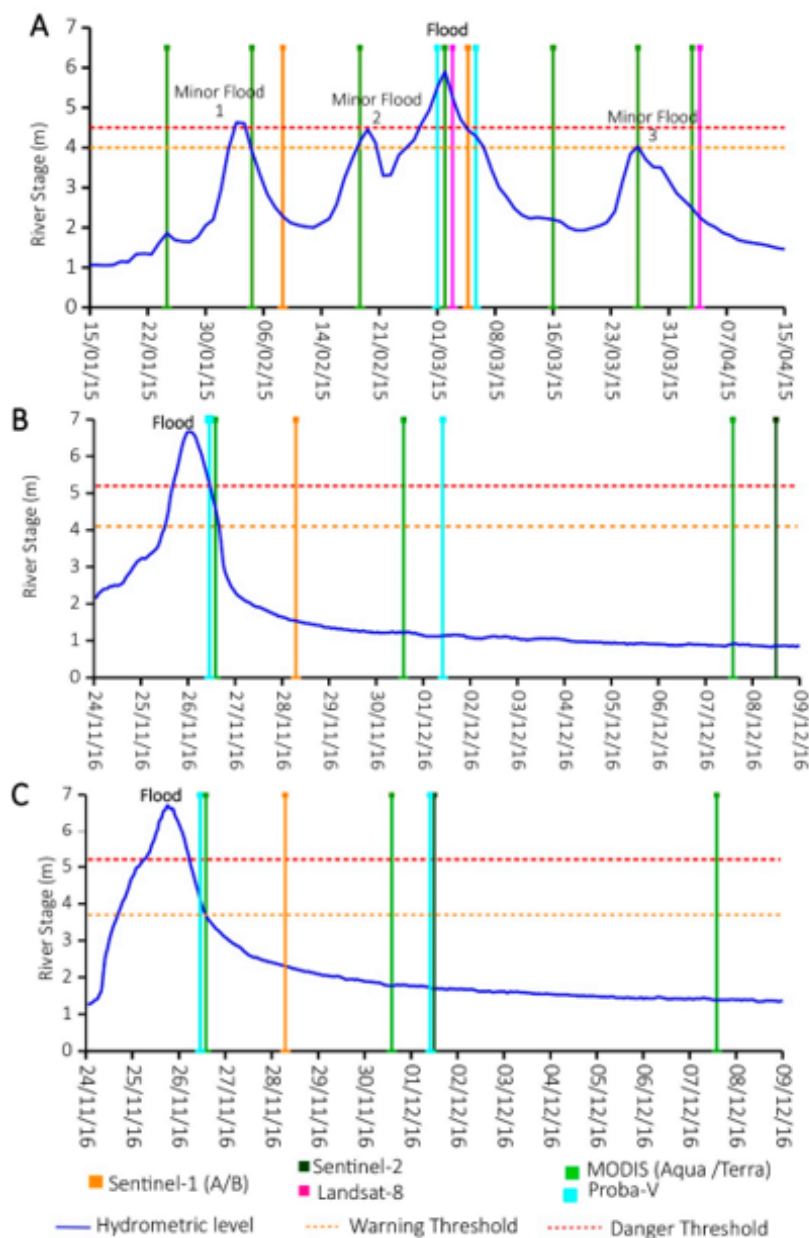


FIGURE 3.2 – Données de hauteur d'eau enregistrées par les stations hydrométriques dans (A) Saragosse, Espagne (vallée de l'Ebre); (B) Alexandrie, Italie (fleuve Tanaro); et (C) Carignan, Italie (fleuve Pô) et dates de passage des différents satellites (Notti et al. 2018)

Tous ces facteurs peuvent engendrer des incertitudes importantes et ainsi diminuer la qualité des observations et les possibilités d'utiliser des cartes reconstituées en se basant sur des données satellites comme moyen d'évaluation. Malgré ces incertitudes, plusieurs études

portant sur des méthodes de cartographie des inondations ont utilisé les étendues d'inondations maximales obtenues à partir de données satellites comme référence (Horritt et Bates 2002, Schumann et al. 2013, Ongdas et al. 2020). Néanmoins, dans le cas des crues soudaines qui sont étudiées dans la thèse, la rapidité du phénomène d'inondation rend très improbable la possibilité d'acquérir des images satellites au moment des pics de crue, qui surviennent très rapidement et ne se maintiennent généralement pas plus que quelques dizaines de minutes à quelques heures. Les images sont souvent acquises après la crue et peuvent néanmoins s'avérer utiles pour recenser certains dégâts.

De façon alternative aux images satellites, des campagnes de terrain post-crue peuvent être réalisées afin de relever directement les étendues d'inondation maximales à partir des laisses de crues. En France elles sont généralement réalisées à la suite d'événements importants et susceptibles de devenir des événements de référence pour l'établissement des PPRi par exemple. Au cours des dernières années, de tels relevés ont par exemple été organisés suite aux crues du Gard en septembre 2002, de l'Argens en juin 2010 et de l'Aude en octobre 2018. Le Bihan et al. (2017) ont par exemple comparé les étendues d'inondations maximales relevées après les crues du Gard en 2002 et de l'Argens en 2010, à des résultats de modélisations obtenus avec la méthode CARTINO.

Ces relevés sont, la plupart du temps, réalisés conjointement au recensement de marques de plus hautes eaux (repères de crue).

### 3.1.1.2 Les relevés des plus hautes eaux (PHE)

Les relevés des Plus Hautes Eaux, souvent notés PHE, sont coordonnés par les services de l'État ou des collectivités territoriales après chaque crue importante, dans le but de conserver une trace pérenne de l'étendue de l'inondation et des hauteurs d'eau associées. Ces levés sont réalisés de façon quasi-systématique lors des retours d'expérience d'inondations récentes. Ces données sont ensuite utilisées pour comparer l'inondation en question aux événements précédents, puis pour la mise en place de repères de crues qui sont essentiels dans la politique de prévention des risques en France. L'inventaire, la pose et l'entretien de repères de crues associés aux crues historiques et aux nouvelles crues exceptionnelles a en effet été rendue obligatoire en France par la loi « Risques » de 2003 (article L563.3 du Code de l'Environnement), pour les collectivités territoriales exposées au risque d'inondation.

Les relevés de PHE regroupent toutes les marques de la hauteur maximale atteinte par les eaux. Elles sont identifiées sur les murs par des traces d'humidité ou de matières solides. Sur le terrain, il s'agit d'identifier les traces physiques laissées par les eaux après l'inondation sur des bâtiments publics ou privés, des habitations, des ouvrages, des murs de clôture, de la végétation fixe, etc. L'analyse de la fiabilité des laisses est importante, il faut donc s'assurer que les traces correspondent à des hauteurs de plus hautes eaux et non à des marques de dépôts de matière solide en dessous de cette ligne ou à des marques d'humidité liée à une remontée par capillarité (Figure 3.3) (USGS 2016, Cerema 2016).

Depuis septembre 2016, les relevés de PHE sur le territoire français sont répertoriés et





Illustration 1 : Levés de PHE – Traces d'humidité  
(Cerema Ouest, Xynthia, La Faute-sur-Mer, 2010)



Illustration 2 : Levés de PHE – dépôts de matières solides  
(Cerema Ouest, Xynthia, L'Aiguillon-sur-Mer, 2010)



Illustration 3 : Levés de PHE – dépôts sur une haie  
(Cerema Ouest, Xynthia, La Tranche-sur-Mer, 2010)



Illustration 4 : Trace d'humidité  
(La Midouze à Tartas, SCHAPI, 29/01/2009)

FIGURE 3.3 – Illustrations des relevés des plus hautes eaux (Cerema 2016)

regroupés dans une base de données nationale des repères de crues<sup>1</sup>. Cette base de données collaborative en ligne permet à la fois un accès grand public aux informations, une possibilité de contribution au recensement des repères de crues par différents acteurs (dont le simple citoyen), et la gestion des données par les services référents. L'existence de cette base de données, qui regroupe déjà plus de 59000 relevés PHE et repères de crues, facilite grandement l'accès aux informations existantes. Un outil d'interrogation associé au logiciel SIG QGIS a été créé pour faciliter davantage l'accès aux données et pouvoir les extraire en sélectionnant les dates des événements souhaités.

### 3.1.1.3 Les données d'impacts et de pertes financières

La disponibilité des données d'observation des impacts liés aux événements d'inondation n'a cessé d'augmenter au cours des dix dernières années. En parallèle, la collecte d'informations sur les impacts des inondations s'avère de plus en plus structurée et organisée (Saint-Martin et al. 2018). Elle peut s'appuyer par exemple sur les médias (y compris les réseaux sociaux), l'observation sur le terrain ou les bases de données alimentées par les opérateurs d'infrastructures critiques, les autorités de protection civile ou les compagnies d'assurance. Les ensembles de données disponibles peuvent inclure par exemple :

1. [www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr](http://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr)

- les fermetures de routes : Naulin et al. (2013), Debionne et al. (2016) ont utilisé une base de données sur les inondations des routes pour des événements de crue rapides dans le Gard entre 2002 et 2008, et évalué un système de prévision des coupures de routes dues aux inondations sur la base de ces données (figure 3.4).

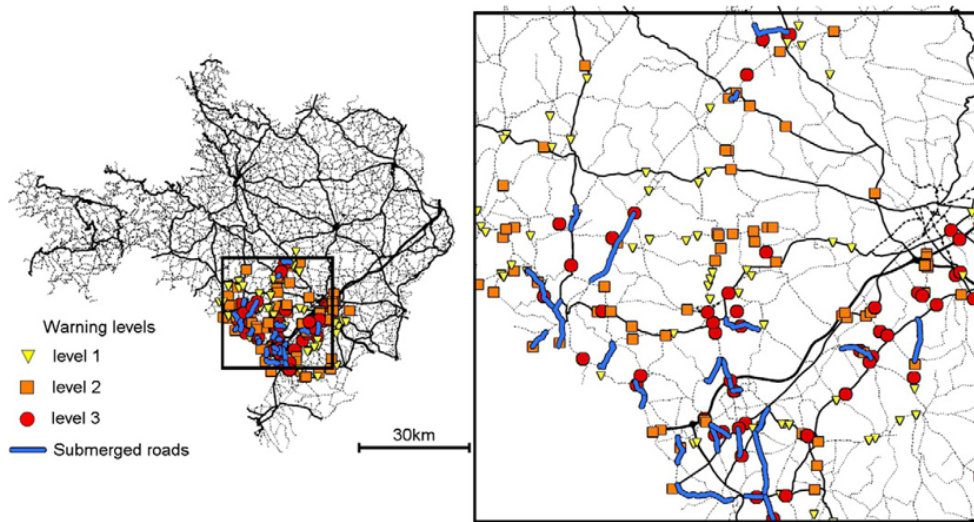


FIGURE 3.4 – Inondation de septembre 2007 dans le Gard. Carte des niveaux de risque maximum prévus et des routes inondées signalées en bleu (observations). (Naulin et al. 2013)

- les appels d'urgence, les situations de danger et les opérations de sauvetage. Ruin et al. (2014), Papagiannaki et al. (2017) ont par exemple proposé des méthodologies d'enquêtes de terrain post-inondation, explorant le lien entre la réponse comportementale des individus à la crise et la dynamique hydrométéorologique de l'événement dans l'espace et le temps (figure 3.5).
- les décès : Terti et al. (2017), Petrucci et al. (2019), Vinet et al. (2019) proposent des analyses de la base de données européennes de la mortalité liée aux crues en méditerranée (MEFF DB) et les possibilités d'utilisation de ces données (figure 3.6 et 3.7).
- les dommages aux infrastructures et aux bâtiments : Saint-Martin et al. (2018) proposent une base de données "Damagis" pour la classification des types d'impact et de leur gravité et leur fréquence (figure 3.8). Diakakis et al. (2020) proposent une approche qui fournit une vue d'ensemble cohérente des effets des crues rapides à travers la classification des types d'impacts (différents types d'infrastructures) et de leur gravité et la cartographie de leur étendue spatiale de manière continue reconstituée à partir des données des plus hautes eaux observées (figure 3.9).
- les déclarations de sinistres aux assurances et les montants indemnisés : Moncoulon et al. (2014) ont utilisé les données de sinistres d'assurances répertoriés par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) afin d'évaluer un modèle d'impacts (figure 3.10) et Zischg et al. (2018) ont utilisé le même type de données de référence afin d'évaluer les performances du modèle hydraulique 2D "BASEMENT" (figure 3.11).

Les données d'impacts, lorsqu'elles sont correctement géolocalisées, fournissent une indication indirecte sur l'extension des zones inondées, qui peut être utilisée pour l'évaluation de

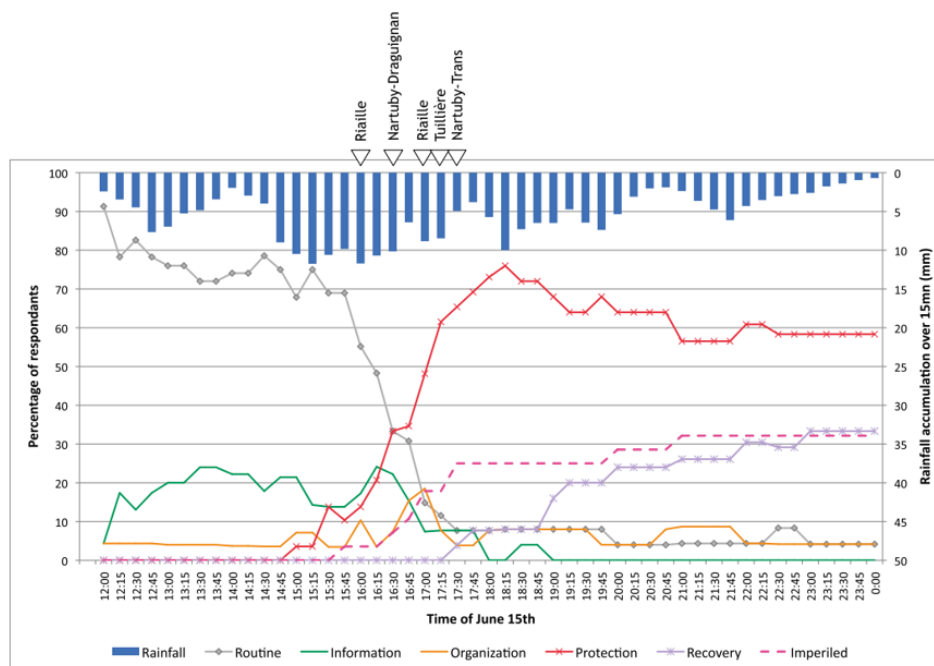


FIGURE 3.5 – Évolution temporelle du pourcentage de répondants par type d'activité et de l'intensité surfacique des précipitations et de l'heure des débits de pointe correspondants sur la zone d'étude de l'événement de l'Argens de juin 2010. Le pas de temps est de 15 minutes (Ruin et al. 2014)

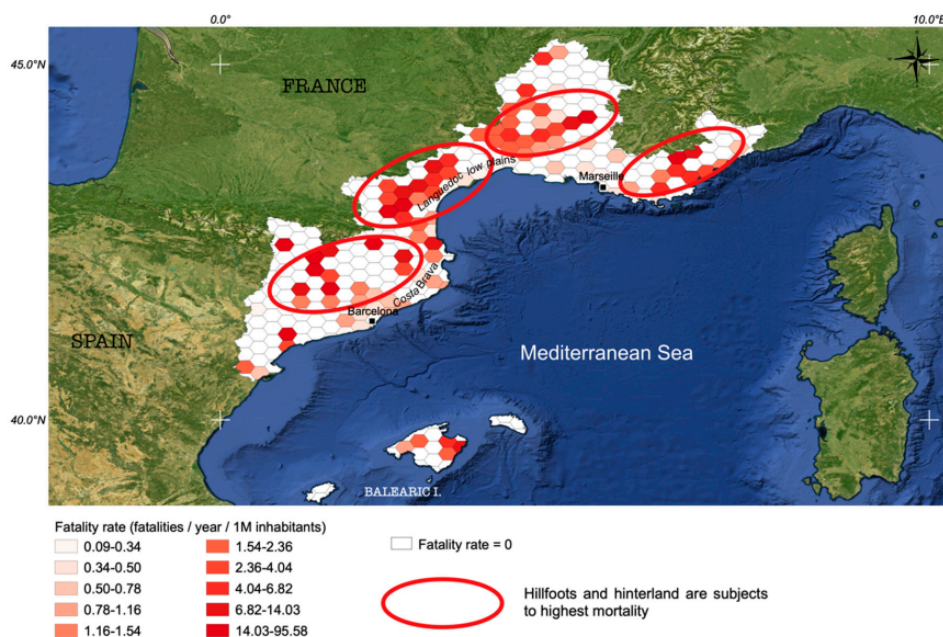


FIGURE 3.6 – Distribution variable de la mortalité, fortement dépendante de la localisation des événements d'inondation sur le bassin méditerranéen occidental (Catalogne, sud de la France et îles Baléares) avec une grille hexagonale de 20 x 20 km (Vinet et al. 2019)

modèles d'inondation. Le Bihan et al. (2017) ont par exemple validé les résultats d'une chaîne de modélisation combinant un modèle hydrologique pluie-débit et un modèle hydraulique 1D, en comparant les impacts estimés dans le champ d'inondation modélisé, aux sinistres recensés dans la base de données de la CCR (caisse centrale de réassurance). Cette base de données est probablement la source d'information la plus complète sur les pertes assurantielles liées

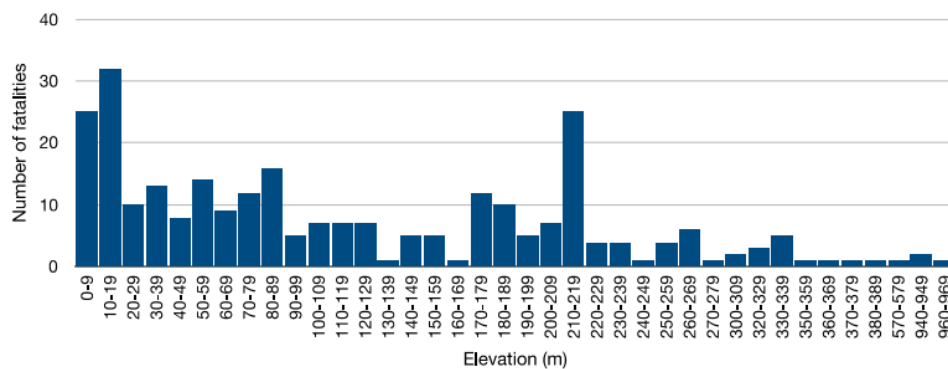


FIGURE 3.7 – Répartition des victimes d'inondations en fonction de l'altitude dans le sud de la France ( $n = 274$ )(Vinet et al. 2019)

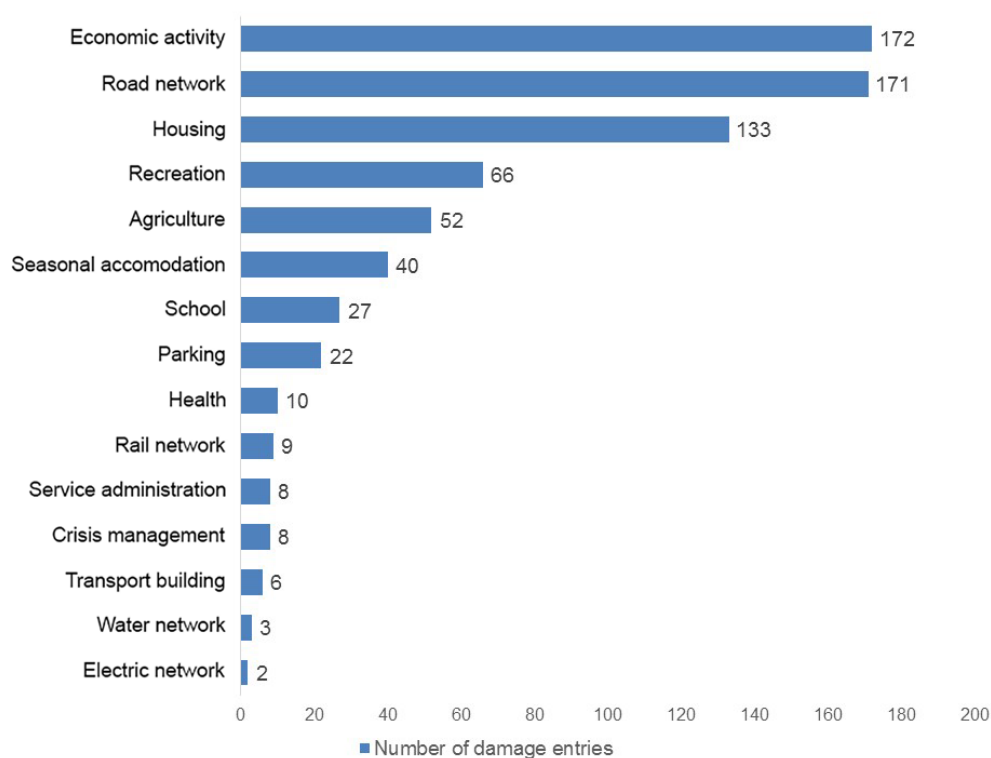


FIGURE 3.8 – Nombre de dommages liés aux événements d'inondations par type d'élément touché depuis 2011 dans le sud de la France (Saint-Martin et al. 2018)

aux inondations en France. Ce travail de validation à partir de données de sinistralité a été conduit pour les événements d'inondation extrêmes du Gard en 2002, et de l'Argens en 2010, fournissant des informations supplémentaires intéressantes sur la précision de l'ensemble de la chaîne de simulation proposée (figure 3.12).

### 3.1.2 Les cartes d'inondation simulées et expertisées

#### 3.1.2.1 Les cartographies des Plans de prévention des risques d'inondation

Les Plans de prévention des risques naturels (PPRN) ont été créés par la loi du 2 février 1995 (loi Barnier), ce sont des instruments essentiels de la politique de l'État en matière de prévention et de contrôle des risques naturels. Le PPRi (Plan de prévention des risques



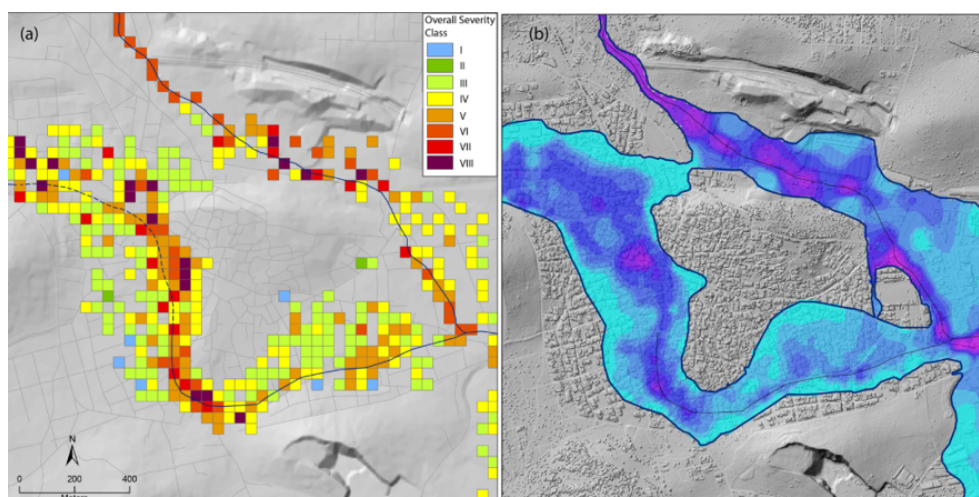


FIGURE 3.9 – (a) Classes de sévérité de l'impact dans et autour de la ville de Mandra (Grèce), en comparaison avec (b) la carte de profondeur d'eau maximale reconstituée à partir des marques des plus hautes eaux. Le bleu clair désigne les eaux peu profondes, tandis que le violet désigne les eaux plus profondes (Diakakis et al. 2020)

d'inondation) est un outil de gestion des risques qui vise à maîtriser l'urbanisation en zone inondable afin de réduire la vulnérabilité des biens et des personnes.

Le PPRI a pour objectifs :

- l'identification des zones à risque et du niveau d'aléa,
- l'interdiction de toute nouvelle construction dans les zones d'aléas les plus forts,
- la réduction de la vulnérabilité de l'existant et des constructions futures,
- la préservation des zones d'expansion de crue afin de ne pas aggraver le risque.

L'élaboration d'un PPRI comporte une étape systématique de cartographie de l'aléa inondation. L'aléa inondation peut se définir comme le niveau de danger associé à une crue de probabilité d'occurrence donnée. Cette caractérisation de l'aléa se base généralement sur des variables permettant de décrire en tout point l'intensité du phénomène d'inondation, et peut par exemple intégrer les hauteurs d'eau, les vitesses des écoulements et les durées de submersion.

La qualification de l'aléa inondation est souvent réalisée dans un premier temps en utilisant une approche hydrogéomorphologique et/ou historique. Elle est ensuite complétée par une approche hydraulique permettant de décrire le champ d'inondation pour un scénario correspondant à un débit de pointe d'une période de retour d'au moins 100 ans (figure 3.13). Lorsqu'il existe une crue historique dont la période de retour du débit observé dépasse les 100 ans, cette crue est prise en compte et simulée à la place de la crue de période de retour de 100 ans.

Les cartographies d'aléa des PPRI incluent donc souvent des résultats de simulations hydrauliques. Ces simulations sont réalisées au niveau local, par des bureaux d'études mandatés

### Claims due to flooding || CCR Probabilistic Hazard

Côte d'Azur : Fréjus / Saint-Raphaël / Roquebrune

Rate of claims inside hazard areas : 81 %

Claims costs inside hazard areas : 96 %

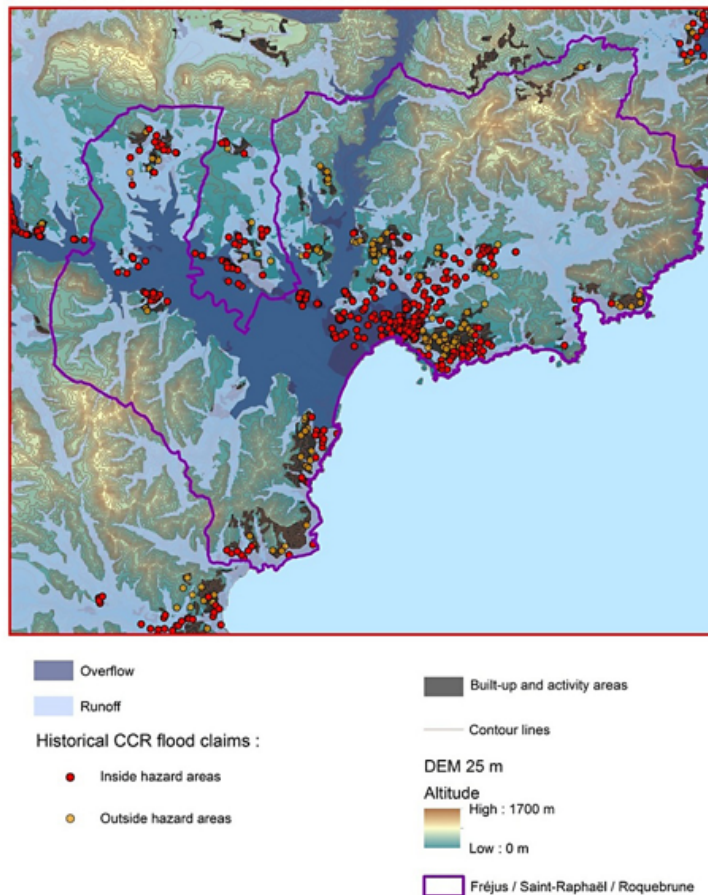


FIGURE 3.10 – Carte de zones inondées prévues superposée aux données de sinistres géocodées avec précision du numéro de rue. Focus sur la plaine inondable aval de l'Argens près de Fréjus, Saint-Raphaël et Roquebrune (Moncoulon et al. 2014)

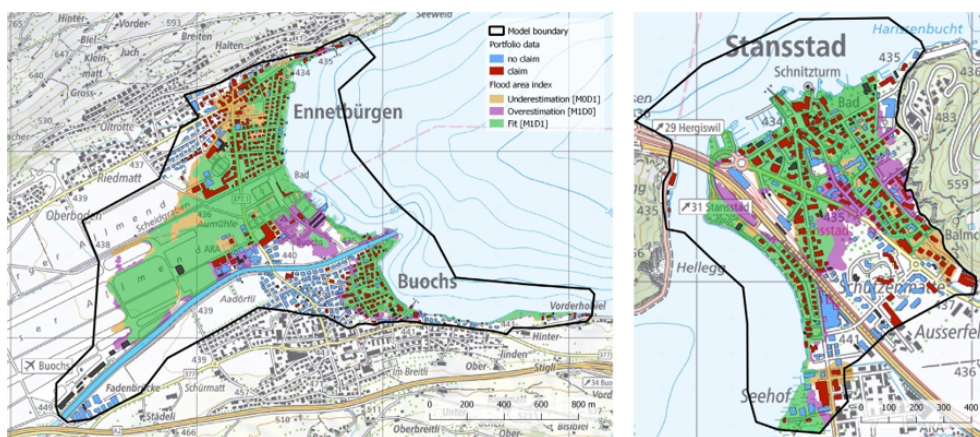


FIGURE 3.11 – Carte de comparaison des zones d'inondation simulées et des sinistres d'assurance à Nidwald (Suisse). (Zischg et al. 2018)

par les services départementaux de l'État, et des moyens importants sont généralement mis en œuvre pour obtenir des études de terrain et des cartographies de très bonne qualité. Ces



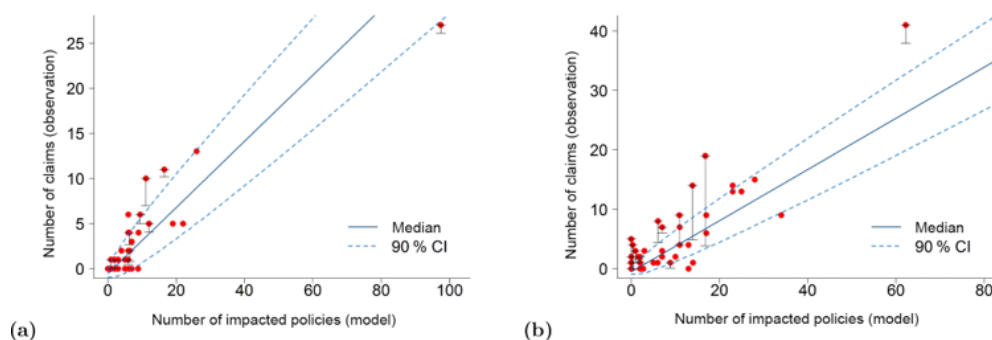


FIGURE 3.12 – Comparaison du nombre estimé de polices touchées par l'inondation (modèle) et du nombre de sinistres associés pour chaque tronçon de rivière : (a) événement d'Alès 2002 et (b) événement de Draguignan 2010. Les lignes bleues correspondent à la relation binomiale moyenne  $\text{sinistres} = \text{polices}$  et à l'intervalle de confiance associé de 90 %, les barres verticales représentent l'incertitude du nombre de sinistres liés à l'inondation de la rivière. (Le Bihan et al. 2017)

données peuvent donc constituer des références intéressantes pour l'évaluation d'approches de cartographie automatisées. Néanmoins, les données d'entrée (débits d'entrée, données topographiques, coefficients de rugosité) prises en compte dans ces études ne sont souvent pas connues dans le détail. Il est donc souvent difficile d'appliquer d'autres outils de modélisation dans des conditions similaires à celles utilisées pour établir les cartographies PPRi.

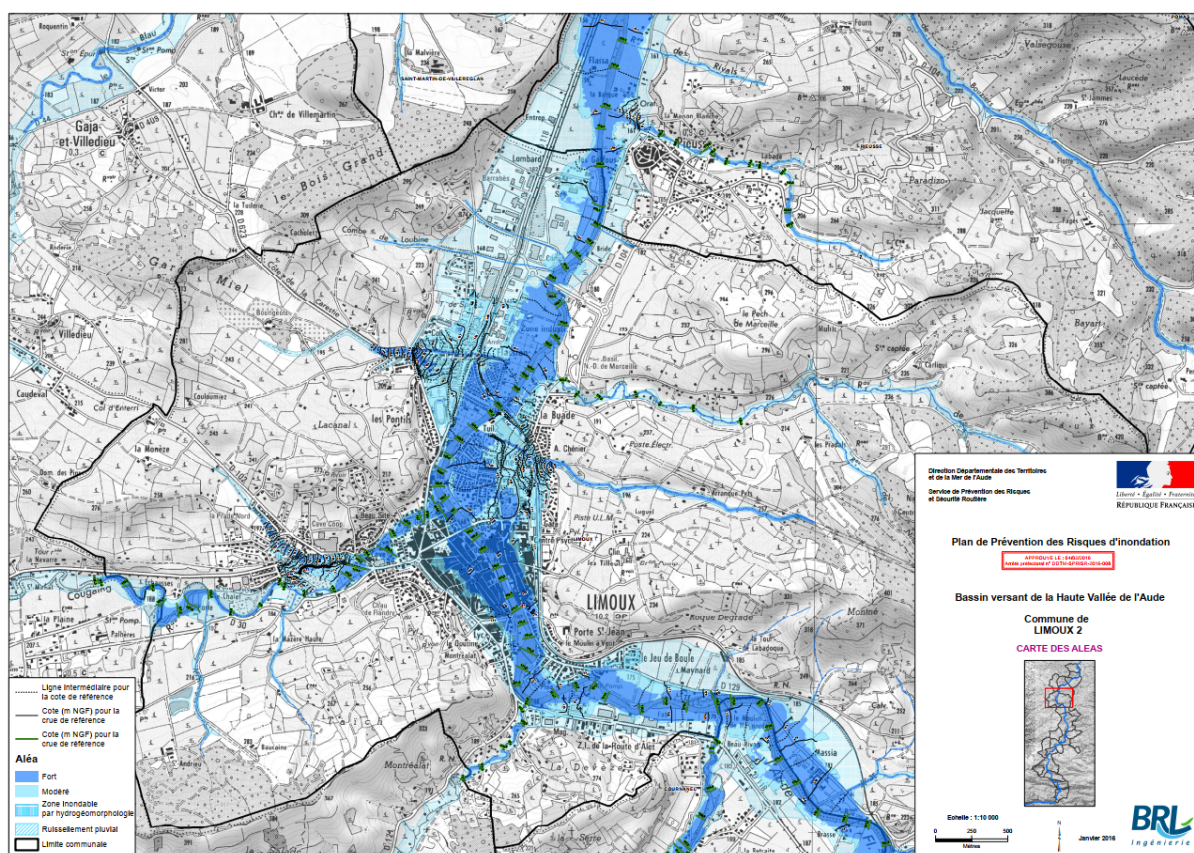


FIGURE 3.13 – Carte des Aléas du PPRi de la commune de Limoux dans l'Aude (DDTM de l'Aude 2016)

### 3.1.2.2 Les cartographies de la Directive Européenne Inondation

La directive européenne n° 2007/60/CE du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, communément appelée directive européenne inondation, a pour objectif de limiter les conséquences négatives des inondations pour la santé humaine, l'activité économique, le patrimoine culturel et l'environnement. Elle a notamment exigé le recensement des différents Territoires à Risque Important d'inondation (TRI) par les états membres de l'union européenne (DGPR 2012). En France, l'application de cette directive a également été l'occasion pour l'État de réaffirmer ses priorités d'actions et les moyens mis en œuvre dans sa stratégie de gestion des inondations (DGPR 2014).

La directive inondation (DI) est mise en œuvre par les États membres au niveau de chaque district hydrographique (14 en France incluant les départements d'outre-mer). Son application comporte 3 étapes successives :

- La première étape est l'évaluation préliminaire des risques (EPRI), qui a pour objectifs le recensement d'évènements historiques marquants et la production d'indicateurs caractérisant les enjeux exposés à l'échelle du bassin, concernant notamment la population et les emplois. Une fois ce recensement réalisé, il sert de support au choix des territoires à risques importants d'inondation (TRI) qui seront l'objet d'un traitement particulier lors des étapes suivantes. En France, 124 territoires à risque d'inondation important (TRI) ont été arrêtés sur l'ensemble du territoire national. Ces TRI possèdent une grande densité de population urbaine, ils font donc l'objet d'une attention particulière des pouvoirs publics afin d'y réduire le coût des dommages liés aux inondations.
- La deuxième étape est la cartographie des surfaces inondables et des risques d'inondation sur les TRI sélectionnés. Les TRI font ainsi l'objet d'un diagnostic poussé du risque, qui est adopté par le préfet coordonnateur de bassin, et qui repose sur une cartographie précise des zones inondables. Cette cartographie a pour principaux objectifs la connaissance des spécificités du territoire, des aléas auxquels il peut être soumis, et de la localisation des enjeux en rapport avec les événements d'inondations, pour identifier les outils de gestion à privilégier. Cette cartographie donne un premier accès à l'analyse des vulnérabilités et du fonctionnement socio-économique du TRI. Une fois le territoire à risque d'inondation important identifié et analysé en termes de risques d'inondation, l'étape suivante consiste à mettre en place une gestion ciblée des risques auxquels il est soumis pour anticiper et réduire l'impact des inondations.
- La troisième et dernière étape consiste en la mise en place de Plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) à l'échelle de chaque bassin hydrographique, en déclinaison de la stratégie nationale, sur la base de l'EPRI et des cartographies effectuées sur les TRI. Ces PGRI sont déclinés au niveau local sur chaque TRI par une stratégie locale de gestion des risques d'inondation (SLGRI).

La réalisation de la cartographie des zones inondables, exigée par la directive sur chacun des TRI, comporte obligatoirement trois scénarios d'inondation différents, correspondant à des crues de probabilité forte, moyenne et faible (figure 3.14). En France, les périodes de



retour associées à ces scénarios ont généralement été de 10 à 30 ans pour le scénario de probabilité forte, 100 à 300 ans pour le scénario de probabilité moyenne, et 1000 ans pour le scénario de probabilité faible. Une part importante des cartographies de zones inondables sur les TRIs ont été produites par le Cerema. Ces cartes ont souvent été produites à l'aide de l'outil CARTINO 1D permettant une mise en œuvre rapide de modélisations hydrauliques. Néanmoins, la structure des modèles hydrauliques appliqués a systématiquement été examinée et adaptée par des experts en hydraulique, et les résultats de cartographie ont été critiqués avec l'aide des services locaux de l'état. Ces cartographies peuvent donc être considérées comme des données de référence expertisées, qui peuvent servir à l'évaluation d'outils de cartographie automatisée des inondations.

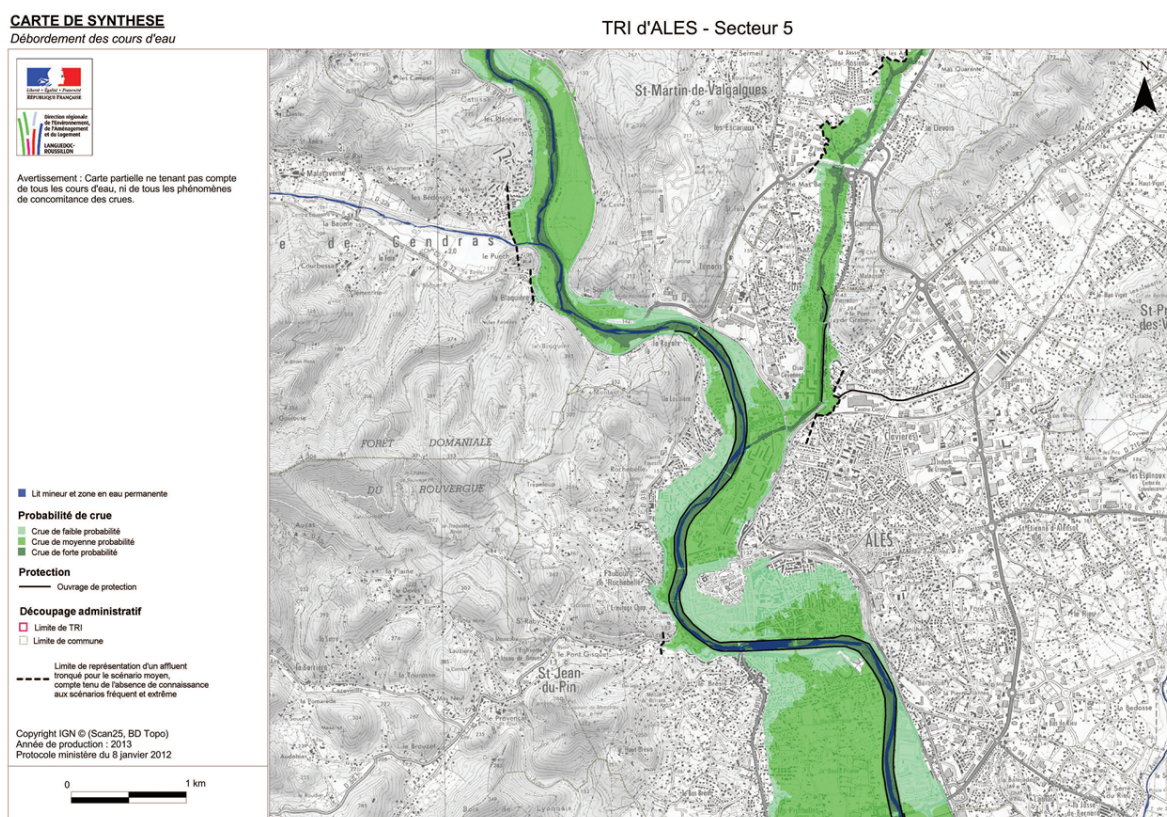


FIGURE 3.14 – Une partie de la carte des surfaces inondables pour les trois scénarios de fréquence forte, moyenne et faible retenus dans le TRI d'Alès (DREAL Languedoc Roussillon 2013)

L'avantage de ces données de référence est que les données d'entrée utilisées par le Cerema pour la cartographie des TRIs sont plus facilement accessibles que dans le cas des PPRi : dans un souci de traçabilité, les MNT, les coefficients de rugosité du lit appliqués et les valeurs des débits utilisés ont été archivées. Cette disponibilité des données d'entrée permet d'évaluer d'autres outils de cartographie des inondations en reprenant les mêmes conditions et les mêmes hypothèses que pour la cartographie de référence.

### 3.1.3 Données de référence choisies dans le cadre des travaux de thèse

Dans le cadre de la thèse, nous avons finalement choisi de retenir trois sources de données de référence différentes pour l'évaluation des approches de cartographie automatisée des inon-

dations. Ces données regroupent à la fois des résultats de modélisations expertisées et des données d'observations directes. Elles incluent :

- Les cartographies de la DI effectuées par le Cerema Méditerranée sur différents TRI de l'Arc Méditerranéen. Comme indiqué précédemment, il s'agit là de cartes simulées expertisées dont on maîtrise les entrées : MNT, débits et rugosité, ce qui limite les incertitudes. Par ailleurs, ces cartographies sont disponibles sur des territoires de configurations différentes et pour 3 scénarios d'intensité variable : périodes de retour de 10 à 30 ans, 100 à 300 ans et 1000 ans. Ces données offrent donc un cadre d'évaluation relativement varié. On peut néanmoins reprocher à ces cartes leur caractère relativement ancien (elles datent de 2013), à une époque où les MNT étaient encore loin des standards de qualité atteints aujourd'hui avec le développement du Lidar. Néanmoins, sachant que le même MNT peut être utilisé dans la référence et dans la simulation, l'impact de la qualité médiocre du MNT sur l'évaluation des performances des méthodes de cartographie automatisée n'est pas forcément déterminant.
- Les étendues maximales d'inondation observées pour deux événements majeurs observés au cours des 10 dernières années : les crues de l'Aude en octobre 2018, et les crues de l'Argens en juin 2010. Ces cartes ont été reconstituées lors de campagnes de terrain post-crue pour les deux événements. Elles permettent d'évaluer les méthodes de cartographie sur des événements réels à partir de véritables observations. L'évaluation sur des événements réels permet également d'utiliser des MNT récents de très bonne qualité. En revanche, le rejeu d'événements réels introduit des incertitudes dans l'évaluation lié au fait que les débits à injecter dans les simulations hydrauliques, ainsi que les coefficients de Strickler à retenir, ne sont pas connus.
- Les relevés des plus hautes eaux (PHE) réalisés à la suite des deux mêmes événements de crues (Aude en octobre 2018, et Argens en juin 2010) et de l'événement des Alpes-Maritimes en octobre 2015 : cette donnée nous permettra d'aller plus en détail dans l'évaluation, en comparant de larges échantillons de PHE aux hauteurs simulées correspondantes (figure 3.16). Les inconvénients de travailler sur la reconstitution de crues réelles restent ceux évoqués précédemment.

Les résultats de l'évaluation conduite à partir des cartographies DI seront présentés dans le chapitre 4. Le chapitre 5 évoquera ensuite l'évaluation conduite pour les crues de l'Aude en octobre 2018, des Alpes-Maritimes en octobre 2015 et de l'Argens en juin 2010.

## 3.2 Méthodes et scores retenus pour l'évaluation

Les données de référence retenues dans ce travail de thèse, décrites au paragraphe précédent, fixent les variables ou informations qui vont pouvoir être évaluées pour les différentes approches de modélisation automatisée des inondations que nous souhaitons comparer. Ces variables ou informations évaluées comprennent d'une part les caractéristiques des étendues d'inondations (forme, surface), et les hauteurs d'eau simulées.

La suite de ce paragraphe présente dans un premier temps les scores classiquement utilisés dans la littérature pour la comparaison de deux cartographies d'inondation. Les scores finalement utilisés dans la thèse sont ensuite explicités, d'une part pour la comparaison des étendues d'inondation puis pour les hauteurs d'eau.

### 3.2.1 Les critères les plus utilisés dans la littérature pour la comparaison d'emprises inondées

La comparaison d'une emprise inondée calculée à une emprise de référence est généralement réalisée à partir d'une table de contingence permettant de distinguer quatre zones (Tableau 3.1) : une zone inondée commune entre la référence et la simulation (a), une zone en excès, inondée dans la simulation mais pas dans l'observation (b), une zone en défaut, inondée dans la référence mais pas dans la simulation (c) et une zone non inondée commune, aucune inondation dans les deux cartographies (d).

Tableau 3.1 – *Table de contingence*

		Référence	
		Inondé	Sec
Simulation	Inondé	Commun inondé (a)	Fausse alarme(excès) (b)
	Sec	Défaut (c)	Commun sec (d)

À partir de cette table, plusieurs critères d'évaluation peuvent être calculés de façon à caractériser la correspondance entre les deux cartes (simulation et référence). Les scores détaillés ci-dessous ont notamment été utilisés dans différentes études afin d'évaluer des cartographies d'inondations :

- Le biais : ce score permet de mesurer une tendance générale à la surestimation (s'il est supérieur à 1) ou à la sous-estimation (s'il en est inférieur à 1) (Sampson et al. 2015, Rebolho et al. 2018)

$$BIAS = \frac{a + b}{a + c} \quad (3.1)$$

- Le taux de faux positifs : donne la proportion de cellules inondées dans la carte simulée qui ne sont pas inondées dans la carte de référence. (Sampson et al. 2015, Dottori et al. 2016, Rebolho et al. 2018)

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad (3.2)$$

- La probabilité de détection : proportion des cellules inondées dans la référence qui sont retrouvées par la simulation. Le critère vaut 0 si la surface inondée commune est nulle, et

vaut 1 si la surface inondée simulée recouvre toute la surface inondée de référence (Alfieri et al. 2014, Sampson et al. 2015, Rebolho et al. 2018).

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad (3.3)$$

- La probabilité de fausse détection (POFD) qui rapporte le nombre de faux positifs au nombre total de cellules non inondées dans la référence et donne une idée de la lisibilité des alertes. référence (Manzato 2005, Naulin et al. 2013).

$$POFD = \frac{b}{b + d} \quad (3.4)$$

- Le Critical Success Index (CSI) : représente le ratio entre le nombre de cellules inondées dans la simulation et la référence et le nombre total de cellules inondées dans la simulation ou la référence (Bates et De Roo 2000, Sampson et al. 2015, Dottori et al. 2016, Rebolho et al. 2018, Archer et al. 2018, Fleischmann et al. 2019, Alfieri et al. 2014).

$$CSI = \frac{a}{a + b + c} \quad (3.5)$$

- Taux de surfaces incohérentes : ratio entre les surfaces incohérentes entre la simulation et la référence et la surface inondée de référence (Le Bihan et al. 2017)

$$TSI = \frac{b + c}{a + c} \quad (3.6)$$

### 3.2.2 Critère retenu pour l'évaluation des étendues d'inondation

Le critère retenu afin d'évaluer les étendues d'inondation produites dans le cadre de la thèse est le CSI. En effet, ce score présente l'avantage de tenir compte à la fois des fausses alarmes et des non détections sous la forme d'un score unique. C'est aussi le critère le plus utilisé dans la littérature pour cet exercice. Ce score a toutefois été complété par des représentations des cartes de comparaison des étendues d'inondation simulées et de référence afin de pouvoir aller dans le détail de l'évaluation visuelle des résultats (figure 3.15).

Les résultats de la table de contingence peuvent en effet être visualisés directement sur une carte superposant l'étendue d'inondation simulée et l'étendue d'inondation de référence. Dans la figure 3.15 le bleu représente la surface inondée dans la simulation et dans la référence (a), le rouge la surface inondée dans la simulation mais pas dans la référence (b), le jaune la surface inondée dans référence et pas dans la simulation (c). Cette carte permet de visualiser dans le détail les similitudes et les différences entre l'étendue d'inondation simulée et l'étendue d'inondation de référence qui conduisent au score de CSI retenu pour chaque tronçon.

### 3.2.3 Critère retenu pour l'évaluation des hauteurs d'eau simulées

Pour l'évaluation des hauteurs d'eau simulées, une différence simple est faite entre les altitudes de la ligne d'eau simulée (altitude MNT + hauteur d'eau simulée) et les altitudes des PHE

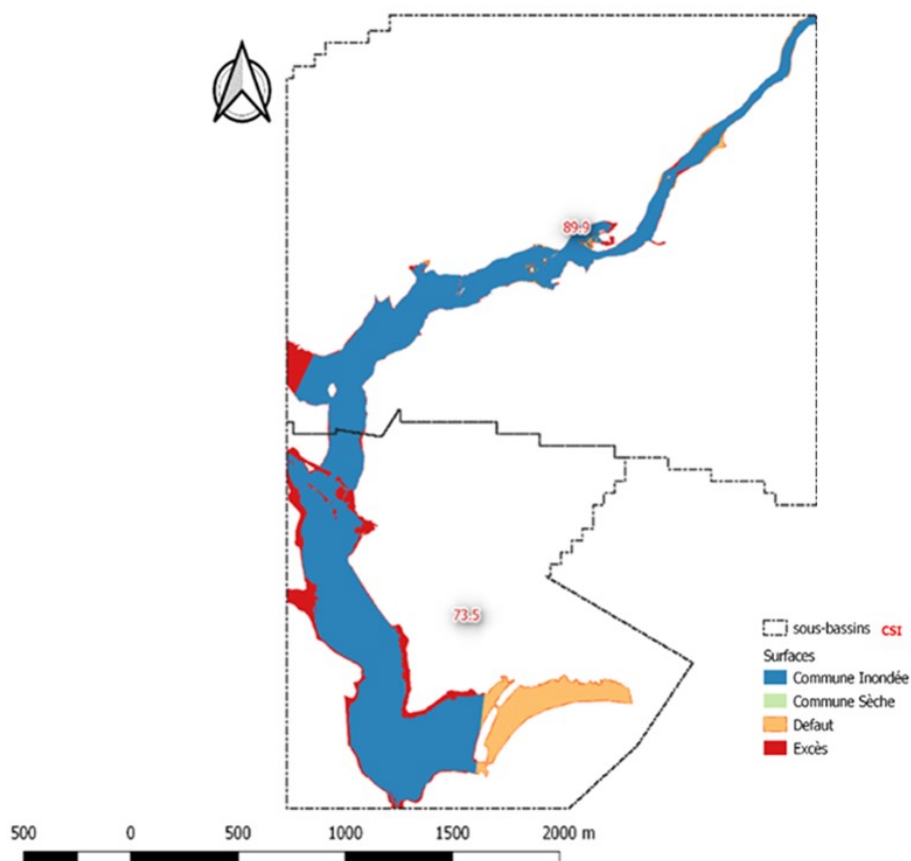


FIGURE 3.15 – Exemple de carte de comparaison de l'étendue d'inondation simulée à l'étendue de référence

relevées sur le terrain. Si la différence est négative, cela veut dire qu'il y a une sous estimation des hauteurs d'eau dans la simulation, et si au contraire la différence est positive, la hauteur d'eau est surestimée. Dans le cas particulier où la PHE relevée se situe en dehors du champ d'inondation simulé, on considère que la hauteur d'eau simulée est nulle, et que la ligne d'eau simulée se situe donc en surface du MNT.

Les différences d'altitudes calculées ponctuellement au niveau de chaque PHE peuvent ensuite être regroupées pour avoir une idée de la distribution générale des erreurs. Elles peuvent être représentées soit sur une carte (figure 3.16), soit sous forme de boîte à moustache par exemple, qui donne une vue très synthétique des erreurs.

Ce travail de comparaison, basé sur les hauteurs d'eau, nécessite néanmoins un travail préalable de sélection des PHE utilisées, de façon à éliminer certaines sources d'erreurs récurrentes. Il convient en premier lieu de ne retenir que les PHE correspondant effectivement au débordement des cours d'eau modélisés dans la simulation. Pour cette raison, les PHE sont filtrées une première fois en fonction de leur proximité aux tronçons de cours d'eau modélisés et à l'étendue d'inondation observée et simulée sur ces derniers. Ce travail de présélection est illustré dans la figure 3.16 sur laquelle les losanges bleus correspondent à des PHE finalement non prises en compte. Après une première comparaison des PHE aux hauteurs d'eau simulées, une seconde vérification est faite pour s'assurer qu'il n'y a pas d'erreurs systématiques importantes regroupées sur un ou plusieurs tronçons, qui pourraient être dus à des erreurs ponctuelles dans les relevés d'altitude et de position de certaines PHE. Ce

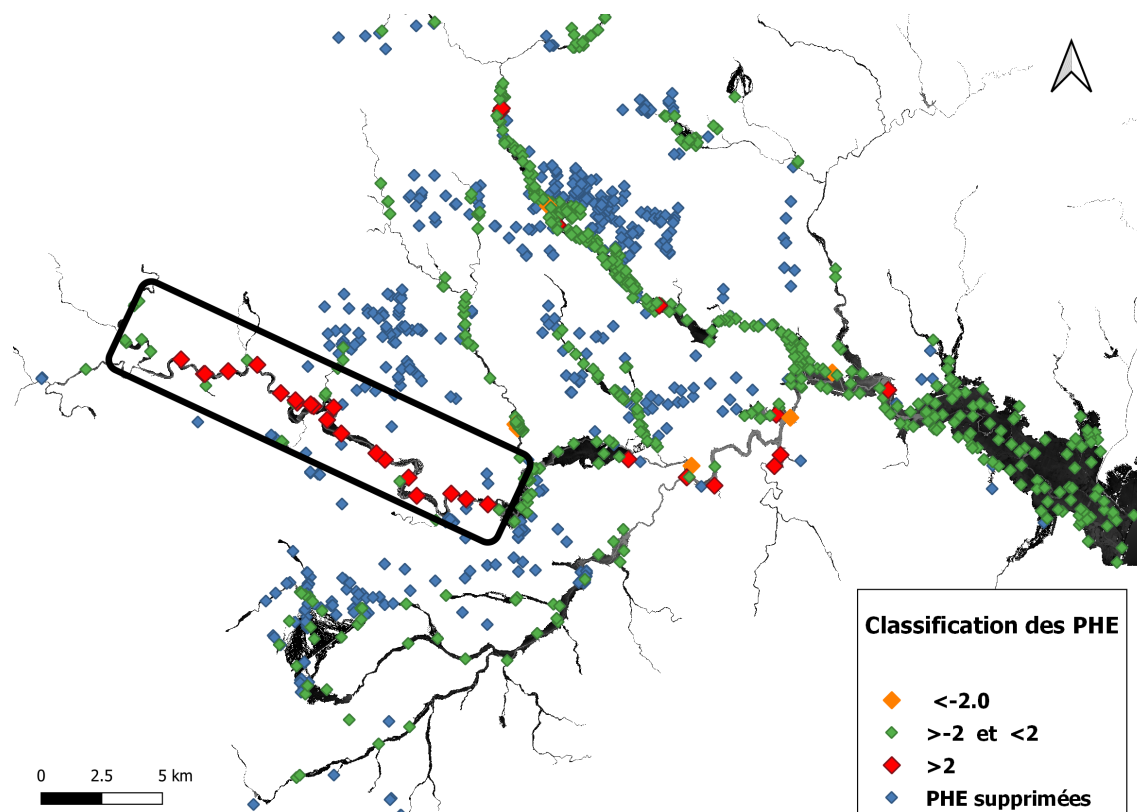


FIGURE 3.16 – Exemple de carte de différences (m) entre les niveau d'eau simulés et les PHE observées. les niveaux d'eau fortement surestimés apparaissent en rouge et les niveaux d'eau sous-estimés en jaune. Les PHE situées en dehors des secteurs d'emprises cartographiées (bassins versant amont d'au moins 5 km<sup>2</sup> dans ce cas) ont été ignorées (losanges bleus).

cas est illustré sur la figure 3.16, où l'on remarque dans le cadre noir des différences entre PHE et altitudes d'eau simulées dépassant les 2 mètres quasiment sur toutes les PHE disponibles. Après vérification, il s'est avéré que ces PHE présentent une erreur systématique de référencement altimétrique, certaines PHE étant situées clairement en dessous de la cote du terrain naturel. Elles n'ont donc pas été prises en compte pour l'évaluation de la méthode de cartographie automatisée.

## Synthèse

Dans ce chapitre ont été présentées les données de référence disponibles pour l'évaluation des méthodes de cartographie des inondations, et les critères d'évaluation de ces dernières.

Il existe plusieurs types de données de référence qui sont plus ou moins adaptées aux cas d'études présentés dans les chapitres 4 et 5 : Les cartes d'inondations observées, les relevés des plus hautes eaux (PHE), les données d'impact et de pertes financières et les cartes d'inondation simulées expertisées (cartes TRI, PPRI). Parmi ces données de référence, le choix s'est porté sur trois d'entre elles : les cartes TRI, les étendues d'inondation observées pour des événements de crues rapides, et les relevés des plus hautes eaux observées. Ce choix a été guidé par la disponibilité des données et leur pertinence par rapport aux objectifs de la thèse.

La comparaison avec les cartes de TRI permet d'avoir une connaissance parfaite des paramètres de modélisation (débits, rugosité, MNT) et de comparer donc, toutes choses égales par ailleurs, les méthodes de cartographie automatisées proposées, appliquées à grande échelle, à des cartographies locales expertisées.

La comparaison avec des cartes d'inondation observées pour des événements de crues rapides observés, donne une idée des performances à attendre de méthodes de cartographie automatisées lorsqu'elles sont utilisées comme information support à la prévision des inondations (cartes de zones d'inondations potentielles) ou à des évaluations post-événements. L'incertitude sur les débits réellement observés le long du réseau hydrographique considéré vient s'ajouter dans ce cas aux nombreuses autres sources d'incertitudes pouvant affecter les méthodes de cartographie automatisées : simplifications des modèles numériques hydrauliques, limitations du MNT, choix des coefficients de rugosité, traitement des singularités hydrauliques...

L'exploitation des relevés des plus hautes eaux permet de pousser plus loin l'évaluation des méthodes cartographiques en proposant des éléments de diagnostic souvent nombreux et distribués au sein des champs d'inondation. Elle complète utilement l'évaluation basée sur les emprises inondées, par exemple dans les secteurs affectés par des crues rares à exceptionnelles et au lit de cours d'eau encaissé, dans lesquels l'emprise calculée est contrainte et peu sensible aux paramètres du calcul au-delà d'un certain débit simulé. L'évaluation sur la base des PHE permet aussi, comme l'illustreront les prochains chapitres, de révéler certaines limites de la cartographie automatisée qui peuvent concerner des parties très localisées du réseau hydrographique : très forte sensibilité des résultats de simulation à la précision du MNT ou bien encore prise en compte des effets très locaux liés à l'existence de singularités hydrauliques.

Pour l'évaluation des cartographies d'inondations simulées, deux critères vont être pris en compte. Le CSI (critical success index) est utilisé pour l'évaluation numérique des étendues d'inondation. Le CSI présente l'avantage de tenir compte à la fois des fausses alarmes et des non détections sous la forme d'un score unique. C'est aussi le critère le plus utilisé dans la littérature pour cet exercice. Une différence simple entre l'altitude de la surface en eau simulée et l'altitude des PHE observées est utilisée pour évaluer la qualité de représentation des hauteurs d'eau. Les différences d'altitudes calculées ponctuellement au niveau de chaque PHE peuvent ensuite être regroupées pour avoir une idée de la distribution générale des erreurs.





## Chapitre 4

# Évaluation à partir de cartographies de référence expertisées

### *Objectifs du chapitre :*

*Ce chapitre présente une première évaluation des trois méthodes de cartographie automatisée présentées dans le chapitre 2. Les résultats obtenus à partir de ces trois approches sont comparés à des cartes de référence issues de simulations expertisées, et qui ont été produites dans le cadre de la directive européenne inondation (DI).*

*Comme c'était indiqué dans le chapitre 3, le choix de retenir les cartographies de la directive inondation comme référence d'évaluation est lié à la disponibilité de l'ensemble des données d'entrée utilisées (MNT, débits, ...) pour ces cartographies. Ceci nous offre un cadre d'évaluation dans lequel les entrées sont maîtrisées et identiques. Les cartographies DI ont par ailleurs été largement expertisées et critiquées. Elles permettent donc de mesurer la perte d'information liée à l'utilisation d'approches automatisées, et n'ayant pas recours à l'expertise. Enfin, les TRI sur lesquels ont été réalisées ces cartographies sont relativement nombreux, et ils offrent donc un cadre d'évaluation varié.*

*Dans la suite du chapitre, les zones d'études et les cartographies de référence sélectionnées seront présentées dans un premier temps. Les résultats de l'application des approches de cartographie automatisée sur ces zones d'étude seront ensuite analysés, en mettant l'accent sur la comparaison entre les trois méthodes appliquées.*

## 4.1 Choix des zones d'études et des cartographies de référence utilisées

### 4.1.1 Choix et localisation des zones d'études

En 2018, lors du stage de master qui a précédé cette thèse, un travail préparatoire a été réalisé pour essayer de regrouper un maximum de cartographies de référence simulées et expertisées, avec comme principal critère la disponibilité des données d'entrée et des paramètres utilisés pour produire ces cartographies.

Lors de ce travail, il est rapidement apparu qu'il était généralement très difficile de regrouper les données d'entrée à l'origine des cartographies des PPRi, qui ne font pas l'objet d'un archivage systématique dans les services instructeurs. Les travaux cartographiques conduits en 2013 par le Cerema lors de l'application de la directive inondation, offrent en revanche une très bonne traçabilité des données et hypothèses de modélisation. L'ensemble des informations utiles (MNTs, débits, structure et paramétrage des modèles) ont été systématiquement archivées par le Cerema pour chaque territoire à risque important (TRI) et restent donc aisément accessibles.

Logiquement, à l'issue de ce travail, l'inventaire des cartographies de référence jugées intéressantes pour l'évaluation des méthodes de cartographie automatisée, a finalement regroupé l'ensemble des TRI de l'Arc Méditerranéen sur lesquels des cartographies directive inondation ont été produites par le Cerema. Ce sont ces mêmes secteurs et données qui ont été réutilisés dans ce chapitre. Les trois méthodes de cartographie automatisée évaluées dans la thèse ont été appliquées, de façon à comparer leurs résultats avec les cartographies de référence obtenues par le Cerema, tout en garantissant des conditions d'application identiques en termes de données et hypothèses d'entrée.

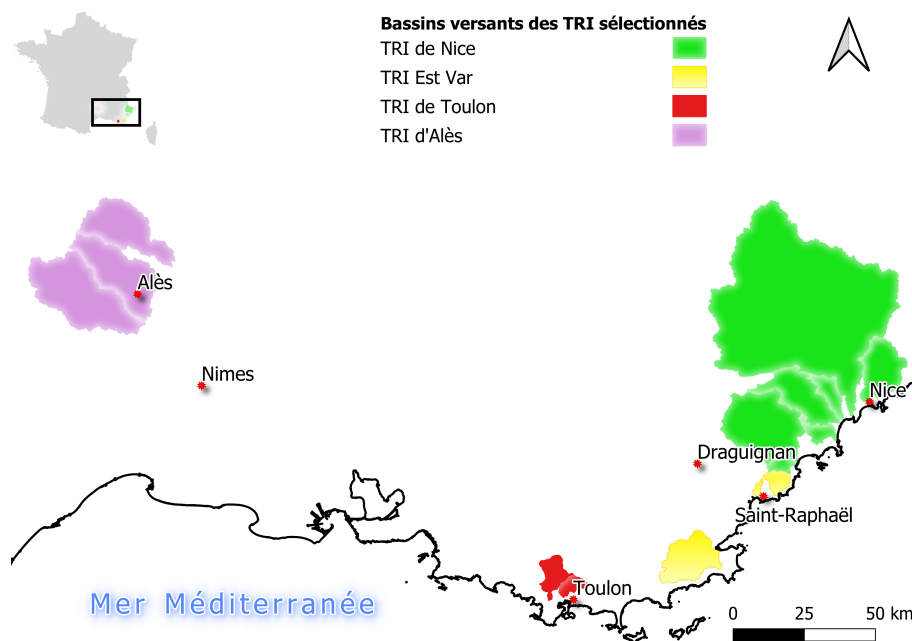


FIGURE 4.1 – Secteurs d'application des méthodes

Les zones d'étude retenues dans ce chapitre sont donc les suivantes (cf figure 4.1) :

- Le secteur du TRI du Gard couvrant les bassins versants des Gardons d'Alès et d'Anduze, et de la Cèze amont.
- Le secteur du TRI de Nice-Cannes-Mandelieu, qui se répartit sur 6 bassins versants différents : les Paillons, la Brague, la Cagne, la Siagne, le Loup, le Riou et le Var.
- Le secteur du TRI Est Var couvrant les bassins de la Giscle, du Pédégal et de l'Agay.
- Le secteur du TRI de Toulon couvrant les bassins de la Reppe et du Las.

Le linéaire total des cours d'eau étudiés est de 305 km sur ces 4 zones. Chacune d'entre elle sera présentée de façon plus détaillée dans les paragraphes qui suivent.

#### 4.1.2 Caractéristiques des cartographies DI utilisées comme référence

Dans les secteurs d'étude présentés sur la figure 4.1, les cartographies DI expertisées produites par le Cerema ont souvent été obtenues par modélisation hydraulique 1D avec le modèle Mascaret, à partir de MNTs de résolution 5 m. La structure des modèles hydrauliques Mascaret a généralement été produite à l'aide de l'outil CARTINO, permettant un premier positionnement automatique des profils. Néanmoins, cette structure initiale a systématiquement été critiquée et adaptée par des experts en hydraulique (ajout ou réorientation de profils, profils non rectilignes). Les coefficients de rugosité appliqués ont également été optimisés en fonction de la connaissance des cours d'eau modélisés et des crues historiques connues sur ces cours d'eau. Pour cette raison, ces cartographies ont été considérées comme des données de référence intéressantes pour l'évaluation des trois méthodes de calcul entièrement automatisées, qui pour leur part ne mobilisent aucune expertise.

Les données topographiques d'entrée de ces cartographies sont constituées des MNTs à la meilleure résolution (généralement 5 m) disponible à l'époque (2013). Ceux-ci sont de précision altimétrique variable. Ils n'ont en effet pas tous été produits à partir de relevés Lidar, certains d'entre eux étant issus de relevés photogrammétriques. Les débits utilisés sont pour leur part issus de la base de données SHYREG débits d'INRAE (Arnaud et al. 2013, Aubert et al. 2014). Cette méthode fournit une estimation des quantiles des débits de crue sur le territoire métropolitain, pour des périodes de retour allant de 2 ans à 1000 ans, en tout point du réseau hydrographique. La structure des modèles hydrauliques 1D appliqués et les coefficients de rugosité retenus sont également connus.

Ces cartographies de référence comportent trois scénarios différents :

- Un scénario de forte probabilité (faible débit), dont la période de retour se situe entre 10 et 30 ans selon les secteurs
- Un scénario de moyenne probabilité (débit moyen), dont la période de retour se situe entre 100 et 300 ans
- Un scénario de faible probabilité (débit fort), dont la période de retour est généralement de 1000 ans ou plus.

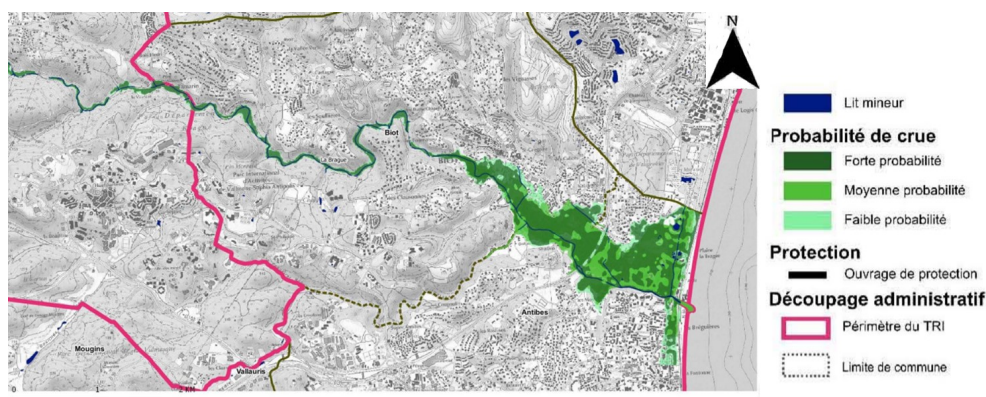


FIGURE 4.2 – Carte de synthèse des trois scénarii d'inondation établis par le Cerema sur le cours d'eau de la Brague (DREAL PACA 2013), en application de la Directive Inondation

La figure 4.2 présente un exemple d'une cartographie de synthèse de ces trois scénarii, pour le cours d'eau de la Brague situé dans le TRI de Nice-Cannes-Mandelieu.

## 4.2 Présentation détaillée des secteurs d'étude

Dans ce qui suit, nous allons présenter de façon détaillée les différents secteurs d'étude retenus, avec notamment quelques caractéristiques morphologiques des cours d'eau étudiés, ainsi que le détail des données d'entrée utilisées pour les cartographies DI de référence.

Pour ce qui concerne la morphologie des cours d'eau, les informations suivantes seront présentées :

- Surface du bassin versant amont.
- Largeur du lit mineur. Cette variable donne une indication de la largeur de la zone en eau permanente.
- Largeur du lit majeur. Cette variable caractérise la largeur de la surface pouvant être inondée.
- Pente moyenne du lit. Cette variable influe directement sur les vitesses d'écoulement, la vitesse de l'onde de crue et la hauteur d'eau.

Les pentes ont été calculées ici en utilisant le positionnement des cours d'eau donné par la BD Topo de l'IGN, ainsi que les MNT utilisés dans le cadre de l'application de la directive inondation. Les largeurs des lits mineurs et celles des lits majeurs sont issues de la base de données SYRAH-CE (Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau). Cette base nationale a été créée pour répondre aux objectifs fixés par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). En France, l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) a été chargé de décrire la morphologie de 230 000 km de linéaire de cours d'eau, et a développé une méthode permettant de disposer des caractéristiques théoriques moyennées de la morphologie des cours d'eau à l'échelle de tronçons (Valette et al. 2012). Néanmoins, par construction de

cette méthode, les largeurs de lit majeur (correspondant au fond de vallée topographique) sont limitées à 12 fois la largeur du lit mineur.

Pour ce qui concerne les données d'entrée des cartographies DI de référence, les informations suivantes ont été regroupées :

- Le linéaire simulé,
- Les valeurs des coefficients de rugosité  $K$  utilisées,
- La valeur du débit utilisé pour chaque scénario,
- Les propriétés des MNTs utilisés dans chaque cas.

### 4.2.1 Secteur du TRI du Gard

Les cours d'eau du TRI du Gard ont un régime hydrologique et hydraulique qui se caractérise par sa forte variabilité, en lien direct avec le climat régional. Souvent réduits à un simple filet d'eau, ils connaissent également des crues particulièrement intenses, ce qui explique des lits majeurs souvent très larges (cf. figure 4.3 et tableau 4.2), et une forte susceptibilité aux débordements.

Le tableau 4.2 présente les caractéristiques des trois cours d'eau étudiés dans le secteur. Ceux-ci drainent des bassins versants de taille moyenne (quelques centaines de  $\text{km}^2$ ), avec des lits peu larges en amont et des lits majeurs et plaines inondables très étendus à l'aval. On trouve ainsi quelques tronçons dont les lits mineurs ont une largeur égale ou inférieure au pas du MNT utilisé (5 mètres), sur l'amont du Gardon d'Alès et de la Cèze.

Ces cours d'eau sont exposés à des crues cévenoles ou méditerranéennes de forte intensité (crues très rapides). Les crues les plus majeures y ont eu lieu durant les mois de septembre et d'octobre. Il s'agit plus généralement de la période favorable à la formation des crues de grande ampleur dans le sud-est de la France. L'événement récent le plus marquant dans ce secteur correspond aux crues des 8 et 9 septembre 2002. Le Gardon d'Anduze a été le plus sévèrement touché lors de cet événement. A l'aval de ce bassin, la pluviométrie a dépassé ponctuellement les 650 mm sur la durée de l'événement (de l'ordre de 36 heures).

Dans ce secteur, le modèle numérique de terrain utilisé pour établir les cartographies de référence est le MNT produit en 2007 par le Conseil Général du Gard, qui possède une précision altimétrique inférieure à 20 cm en zone dégagée et de moins de 100 cm en zone boisée. La précision planimétrique de la donnée topographique est de 50 cm et la résolution du MNT produit est de 20 m (maille carrée). Ce MNT a été désagrégé à 5 m par le Cerema. Les coefficients de rugosité (Strickler) utilisés sont identiques pour les 3 cours d'eau. Ils prennent une valeur de 20, sans distinction entre lit mineur et lit majeur.

Enfin, les débits utilisés pour modéliser les trois scénarios fréquent, moyen et rare sont issus pour chaque cours d'eau de la base des débits SHYREG. Les périodes de retour retenues sont de 30 ans pour le scénario fréquent, 300 ans pour le scénario moyen, et plus de 1000 ans pour le scénario rare (cf. tableau 4.1).

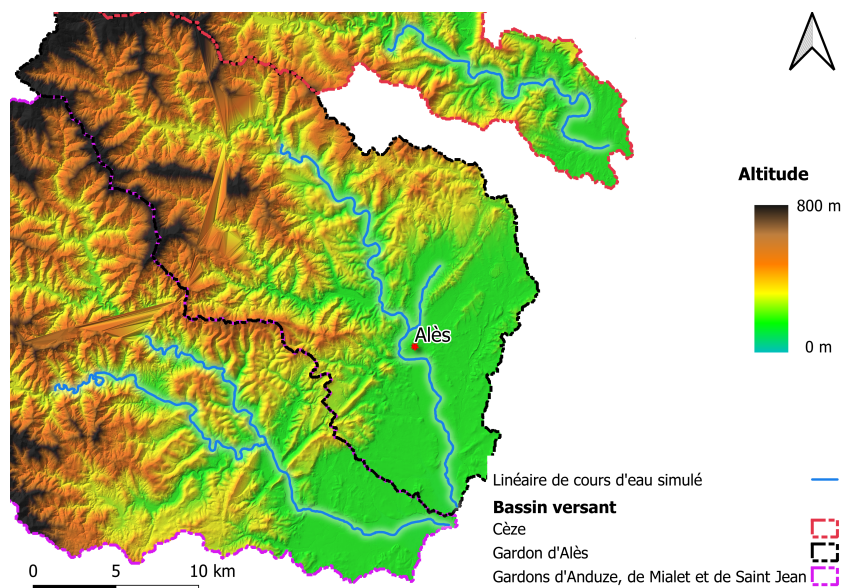


FIGURE 4.3 – Secteur du Gard

Tableau 4.1 – Tableau récapitulatif des caractéristiques des trois cours d'eau étudiés dans le secteur du Gard

Cours d'eau	Gardons d'Alès	Gardons d'Anduze	La Cèze
Surface bassin versant [ $km^2$ ]	423	612	381
Largeur lit mineur moy [min-max] [ $m$ ]	20.25[3-35]	45.5[25-85]	26[3-41]
Largeur lit majeur moy [min-max] [ $m$ ]	212[36-435]	230[100-833]	200[36-400]
Pente moyenne [%]	0.4	0.4	0.2

#### 4.2.2 Secteur du TRI de Nice-Cannes-Mandelieu

Les cours d'eau et les bassins versant de ce TRI sont représentés sur les figures 4.3, et leurs caractéristiques morphologiques sont détaillées dans le tableau 4.3. Les cours d'eau du TRI de Nice-Cannes-Mandelieu sont des cours d'eau côtiers au régime pluvial méditerranéen, caractérisé par des crues rapides.

La topographie varie fortement de l'amont vers l'aval de ces bassins versants : pentes fortes et topographie encaissée à l'amont, et pentes faibles et topographie peu marquée à l'aval (cf. figure 4.4 et tableau 4.4). Ceci induit des lits majeurs nettement plus larges à l'aval, et une plus forte susceptibilité au débordement dans ces secteurs. Parmi les sept cours d'eau du TRI, seul le Var fait partie du réseau réglementaire surveillé par Vigicrues. Ce secteur est donc principalement constitué de petits cours d'eau.

Les données et paramètres de modélisation utilisés dans le cadre de la cartographie DI sont listés dans le tableau 4.4. Le modèle numérique de terrain utilisé pour extraire la géométrie des lits des cours d'eau a été réalisé en 2009 pour le compte du Conseil Général des Alpes-

Tableau 4.2 – *Linéaire simulé et données de simulation dans le secteur du Gard. Pour les débits, l'intervalle indique la gamme des débits injectés d'amont en aval du secteur modélisé*

Cours d'eau	Gardon d'Alès	Gardon d'Anduze	Cèze
<b>Linéaire simulé [km]</b>	45.17	50.90	24.93
<b>Période de retour scénario fréquent [ans]</b>	30	30	30
<b>Période de retour scénario moyen [ans]</b>	300	300	300
<b>Période de retour scénario rare [ans]</b>	> 1000	> 1000	> 1000
<b>Débit scénario fréquent [<math>m^3/s</math>]</b>	646-1381	605-1519	640-988
<b>Débit scénario moyen [<math>m^3/s</math>]</b>	1192-2545	1278-2994	1343-1984
<b>Débit scénario rare [<math>m^3/s</math>]</b>	2765-5870	3102-7080	3244-4718
<b>Coefficient de Strickler</b>	20	20	20

Tableau 4.3 – *Tableau récapitulatif des caractéristiques des sept cours d'eau étudiés dans le secteur de Nice*

Cours d'eau	Paillon	Var	Cagne	Riou	Siagne	Brague	Loup
<b>Surface bassin versant [<math>km^2</math>]</b>	258	2812	96	48	512	68	289
<b>Largeur lit mineur [m]</b>	7.4	111.2	7.7	5	20.55	4.9	11
<b>moy</b>	4.5-11	110.9-111.4	3-11	3.5-5.5	20.5-20.6	3-11	11-11
<b>min-max</b>							
<b>Largeur lit majeur [m]</b>	78	547	71	57	171	55	100
<b>moy</b>	45-115	194-735	37-129	42-64	96-247	34-128	67-129
<b>min-max</b>							
<b>Pente moyenne [%]</b>	1.3	0.5	2.5	0.7	0.2	1.0	0.6

Maritimes. Il a été produit sur la base d'une reconstitution photogrammétrique, avec une précision altimétrique maximale de 1 mètre dans les zones urbanisées et de 5 mètres ailleurs, et possède une résolution spatiale de 5 m (maille carrée). Le coefficient de rugosité (Strickler K) choisi pour les sept cours d'eau est de 15, sans distinction entre le lit mineur et le lit majeur. Les débits pour les trois scénarios fréquent, moyen et rare sont issus pour chaque



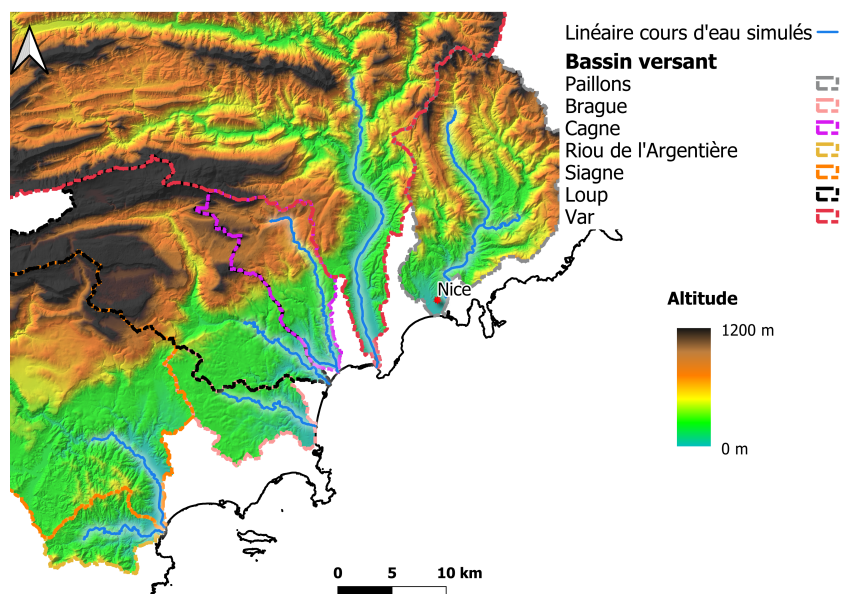


FIGURE 4.4 – Secteur de Nice

Tableau 4.4 – Linéaire simulé et données de simulation du secteur de Nice

Cours d'eau	Paillon	Var	Cagne	Riou	Siagne	Brague	Loup
<b>Linéaire simulé [km]</b>	28.07	30.61	25.54	10.96	14.27	12.43	13.61
<b>Période de retour scénario fréquent [ans]</b>	30	30	30	30	10	30	10
<b>Période de retour scénario moyen [ans]</b>	1000	300	300	300	100	300	100
<b>Période de retour scénario rare [ans]</b>	> 1000	> 300	> 300	> 300	1000	> 300	1000
<b>Débit scénario fréquent [<math>m^3/s</math>] amont-aval</b>	35-243	1152-1730	53-167	28-86	261-337	44-143	202-260
<b>Débit scénario moyen [<math>m^3/s</math>] amont-aval</b>	115-791	2383-3595	132-372	60-186	661-856	97-304	565-704
<b>Débit scénario rare [<math>m^3/s</math>] amont-aval</b>	230-1582	4766-7190	265-744	121-373	1370-1750	194-608	1170-1430
<b>Coefficient de Strickler</b>	15	15	15	15	15	15	15

cours d'eau de la base des débits SHYREG. Les périodes de retour retenues pour chaque scénario varient en fonction du cours d'eau considéré : elles sont listées dans le tableau 4.4.

### 4.2.3 Secteurs des TRI Est Var et de Toulon

Les cours d'eau des TRI Est Var et de Toulon présentent des caractéristiques similaires à ceux du TRI Nice-Cannes-Mandelieu. Leurs bassins versants sont présentés sur les figures 4.5 et 4.6, et leurs caractéristiques morphologiques dans le tableau 4.6. Il s'agit de cours d'eau côtiers dont le régime hydrologique est irrégulier, alternant de longs étiages avec de fréquentes périodes de crues très rapides. Ceci est lié d'une part à la pluviométrie généralement concentrée sur de courtes périodes, et d'autre part à la topographie qui varie fortement de l'amont (pentes fortes et topographie encaissée) vers l'aval (pentes faibles et topographie peu marquée). Ceci favorise des largeurs de lit majeur plus importantes à l'aval, associées à des débordements.

D'une façon générale, les largeurs des lits mineurs sont faibles dans ces secteurs, souvent inférieures ou du même ordre de grandeur que la résolution du MNT utilisé (5 m). On peut également retenir que les pentes des lits sont significativement plus fortes dans le cas des deux cours d'eau du TRI de Toulon (Las et Reppe).

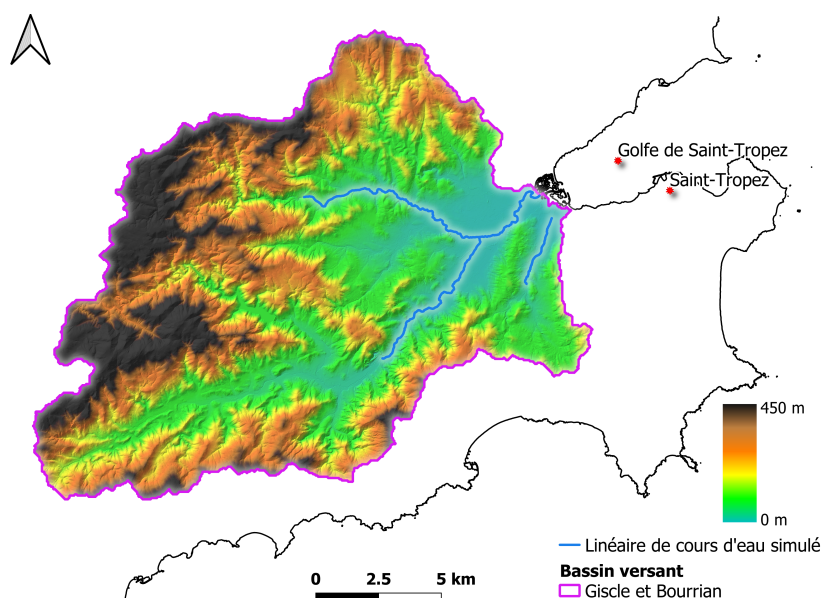


FIGURE 4.5 – Secteur Est Var : Gisle et Bourrian

Les données et paramètres de modélisation utilisés dans le cadre de la cartographie DI sur ces secteurs sont listés dans le tableau 4.5. Le modèle numérique de terrain utilisé est le MNT lidar du RGE-ALTI de l'IGN, d'une résolution horizontale de 1 mètre et ré-échantillonné à 5 mètres, et datant de 2013. La modélisation a été réalisée avec un coefficient de rugosité (Strickler K) de 15 en lit mineur et lit majeur. Les débits pour les trois scénarios fréquent, moyen et rare sont issus de la base des débits SHYREG, et les périodes de retour choisies pour chaque scénario sont listées dans le tableau 4.6.

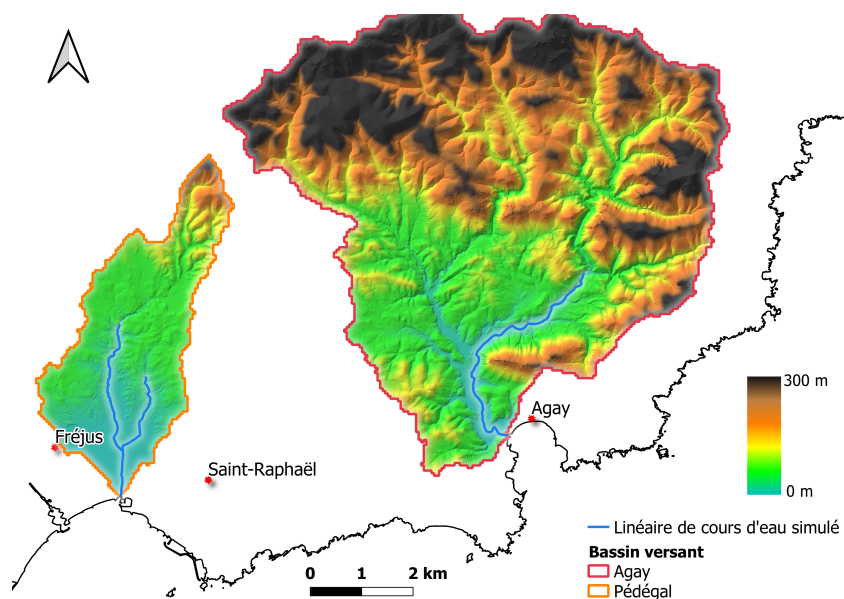


FIGURE 4.6 – Secteur Est Var : Agay et Pédégal

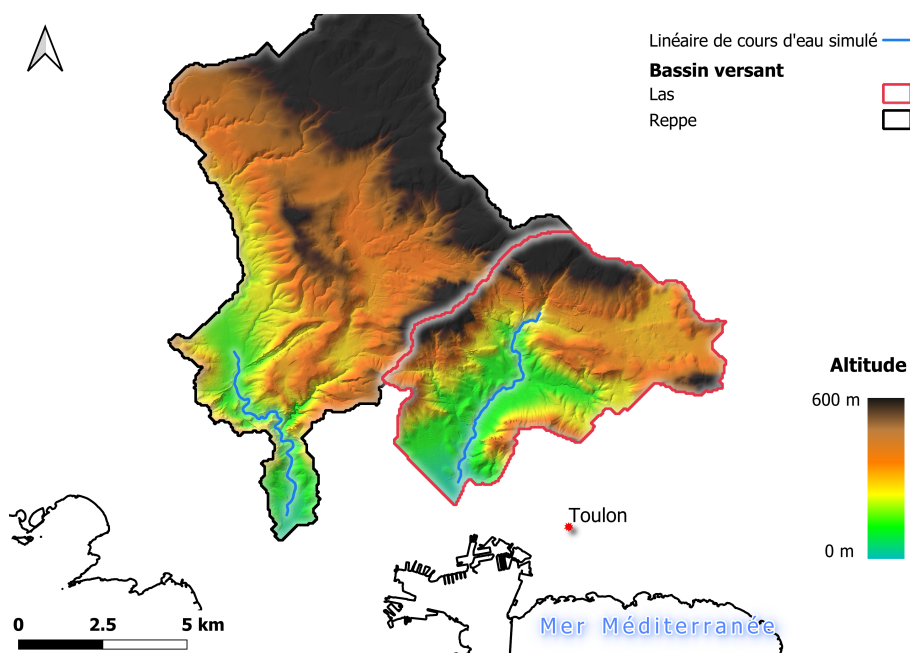


FIGURE 4.7 – Secteur de Toulon

## 4.3 Résultats obtenus et discussion

### 4.3.1 Modalités d'application des trois méthodes de cartographie évaluées et critère d'évaluation

Les trois méthodes de cartographie automatisée à évaluer ont pu être appliquées ici en reprenant exactement les mêmes données et paramètres d'entrée que ceux utilisés par le Cerema pour produire les cartographies DI de référence : MNTs, coefficients de rugosité des lits mineur et majeur, et valeurs des débits. Les résultats obtenus avec les trois méthodes ont ensuite été comparés aux cartographies de référence sur chaque secteur.

L'intérêt principal de cette première approche d'évaluation, est de pouvoir évaluer la perte

Tableau 4.5 – *Tableau récapitulatif des caractéristiques des trois cours d'eau étudiés dans les secteurs Est Var et Toulon*

Cours d'eau	Gisèle et Bourrian	Pédégal	Agay	Reppe	Las
<b>Surface bassin versant [<math>km^2</math>]</b>	251.37	11.39	54.05	88.11	44.86
<b>Largeur lit mineur [<math>m</math>]</b>	6.94	2.13	6.86	4.51	3.01
<b>moy</b>	3.51-9.52	1.00-5.51	5.51-9.54	4.51-4.51	3.01-3.01
<b>min-max</b>					
<b>Largeur lit majeur [<math>m</math>]</b>	82.27	25.86	75.01	52.45	35.55
<b>moy</b>	42.43-115.60	12.05-67.25	56.19-106.43	49.56-55.17	33.89-36.47
<b>min-max</b>					
<b>Pente moyenne [%]</b>	0.3	0.8	0.4	1.4	2.8

Tableau 4.6 – *Linéaire simulé et données utilisées dans la simulation secteur Est Var. Pour les débits, l'intervalle indique la gamme des débits injectés d'amont en aval du secteur modélisé*

Cours d'eau	Gisèle et Bourrian	Pédégal	Agay	Reppe	Las
<b>Linéaire simulé [<math>km</math>]</b>	23.51	5.42	5.27	7.36	6.87
<b>Période de retour scénario fréquent [ans]</b>	30	30	30	10	30
<b>Période de retour scénario moyen [ans]</b>	300	300	300	1000	300
<b>Période de retour scénario rare [ans]</b>	> 300	> 300	> 300	> 1000	> 300
<b>Débit scénario fréquent [<math>m^3/s</math>]</b>	51-268	18-44	28-75	27-55	10-57
<b>Débit scénario moyen [<math>m^3/s</math>]</b>	126-615	38-93	67-169	162-308	37-134
<b>Débit scénario rare [<math>m^3/s</math>]</b>	253-1231	76-186	134-338	324-617	74-268
<b>Coefficient de Strickler</b>	15	15	15	15	15

de précision liée à l'automatisation des méthodes et à l'absence d'expertise dans leur mise en œuvre. Ceci est notamment valable pour caRtino qui est une méthode de modélisation 1D analogue à celle utilisée pour établir les cartographies DI de référence, mais pour laquelle le positionnement des profils en travers est réalisé de façon entièrement automatisée.

L'évaluation a été réalisée en utilisant les critères présentés au chapitre 3. Les emprises simulées ont été comparées à celles de référence en utilisant les scores CSI, et le rapport des

surfaces inondées simulées et observées sur chaque tronçon de cours d'eau. En revanche, la comparaison des hauteurs d'eau n'a pas pu être effectuée car les hauteurs d'eau simulées ne sont pas disponibles dans les cartographies DI de référence utilisées.

Par la suite, les résultats de l'évaluation seront d'abord présentés de façon à mettre en évidence les différences globales de performances obtenues avec les trois méthodes évaluées. Le comportement de chacune de trois méthodes sera ensuite analysé de façon individuelle et illustrée.

### 4.3.2 Performances générales des trois méthodes évaluées

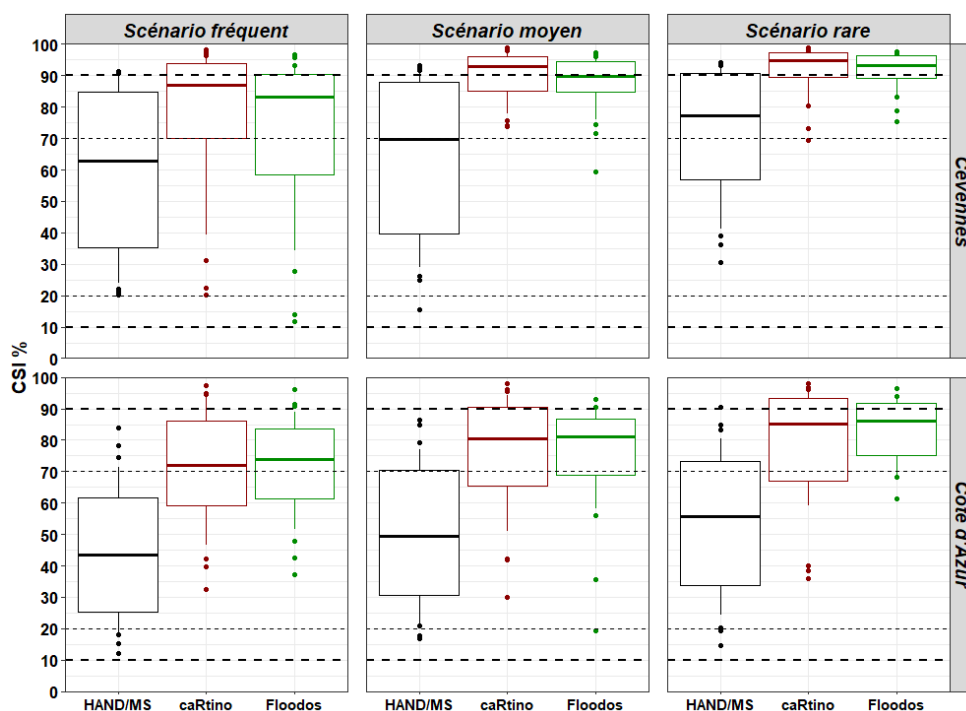


FIGURE 4.8 – scores de CSI obtenus pour les 3 méthodes de cartographie évaluées. Les boîtes représentent les quantiles 15% et 85% (70% des valeurs dans l'intervalle), et les moustaches les quantiles 5% et 95% (90% des valeurs dans l'intervalle)

La figure 4.8 présente une synthèse des scores de CSI obtenus sur chaque secteur étudié, et pour les différents scénarii de crues considérés (fréquent, moyen et rare). Les trois TRI situés sur la Côte d'Azur (TRIs de Nice-Cannes- Mandelieu, d'Est Var et de Toulon) ont été regroupés car ils comportent des cours d'eau aux caractéristiques similaires, et par ailleurs ils ne représentent pas individuellement un nombre suffisant de tronçons pour ce type de représentation en boîtes à moustaches. Le secteur des Cévennes correspond pour sa part au TRI du Gard. On remarque sur cette figure que les scores de CSI obtenus avec la méthode HAND/MS sont assez nettement inférieurs à ceux obtenus avec les méthodes caRtino et Floodos. Pour mémoire, d'après Fleischmann et al. (2019), les modèles hydrauliques dont les scores CSI sont supérieurs à 65 % à l'échelle du tronçon donnent des résultats satisfaisants. Ce seuil n'est pas souvent atteint avec la méthode HAND/MS. Le plus faible score enregistré avec cette méthode se situe autour des 10 % pour le cours d'eau du Pédégal (TRI Est Var). Les scores obtenus avec Floodos et caRtino dépassent en revanche très majoritairement le

seuil de 65 %. Les CSI se situent souvent dans les mêmes gammes avec ces deux méthodes, soit entre 60 % et 90 %. La différence la plus significative entre les deux méthodes est observée dans le cas du secteur des Cévennes (TRI du Gard), et pour le scénario fréquent, où les scores obtenus sont sensiblement plus faibles pour Floodos comparé à caRtino, pour un débit de période de retour de 30 ans. Ceci est principalement dû à des différences de résultats marquées sur le Gardon d'Anduze.

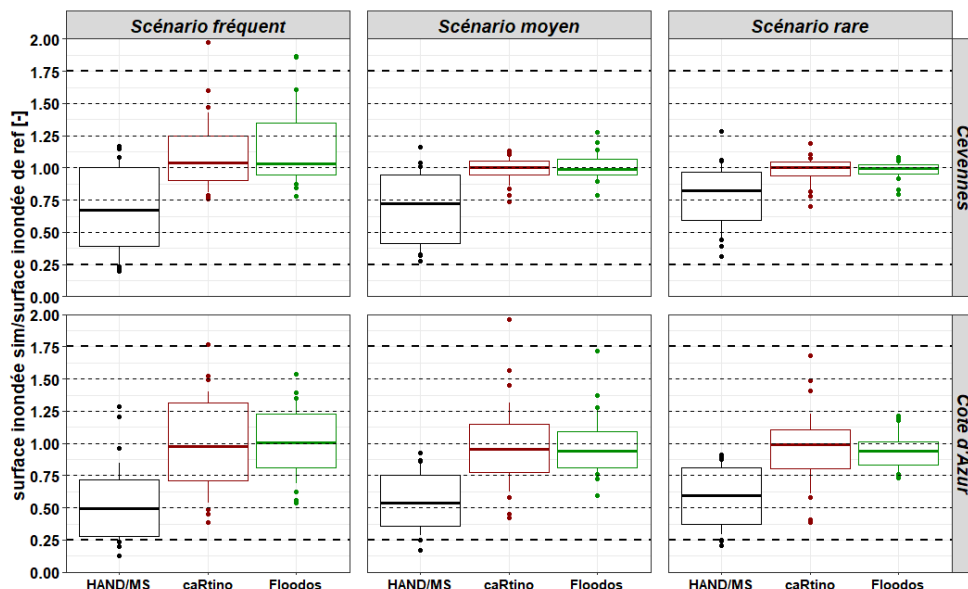


FIGURE 4.9 – Rapport entre les surfaces inondées simulées et les surfaces inondées de référence pour les 3 méthodes évaluées. Les boîtes représentent les quantiles 15% et 85% (70% des valeurs dans l'intervalle), et les moustaches les quantiles 5% et 95% (90% des valeurs dans l'intervalle)

La figure 4.9 présente une synthèse des rapports entre les surfaces inondées obtenues pour les 3 méthodes évaluées, et pour les cartographies de référence, sur chaque tronçon de cours d'eau. Ces résultats confirment les conclusions tirées de la figure 4.8, mais permettent également d'identifier la présence de biais, c'est-à-dire de tendances à la sous-estimation ou la surestimation des surfaces inondées. La méthode HAND/MS présente un biais négatif très marqué, sur les trois scénarii et les deux secteurs considérés. caRtino et Floodos montrent globalement des erreurs nettement plus équilibrées entre surestimation et sous-estimation. Le biais est parfois un peu plus prononcé pour Floodos, comme dans le cas du scénario fréquent dans les Cévennes ou du scénario rare sur la Côte d'Azur. Les erreurs semblent un peu plus prononcées dans le secteur de la côte d'Azur pour les deux méthodes, ce qui était également visible au travers des scores CSI.

La figure 4.10 présente une comparaison des scores de CSI obtenus pour chaque méthode, tronçon par tronçon. Les graphiques comparent d'une part les scores CSI de Floodos à ceux obtenus avec caRtino 1D, puis les scores CSI Floodos avec ceux de HAND/MS. Cette figure confirme en premier lieu les performances plus faibles de l'approche HAND/MS. Les scores CSI obtenus avec cette méthode ne s'avèrent que très ponctuellement supérieurs à ceux obtenus avec Floodos (Figures 4.10.b, d, et f). Les approches caRtino et Floodos donnent de leur côté des résultats assez proches. Comme indiqué précédemment, les CSI restent majoritairement supérieurs à 65 % avec ces deux méthodes, et ils augmentent en allant du scénario



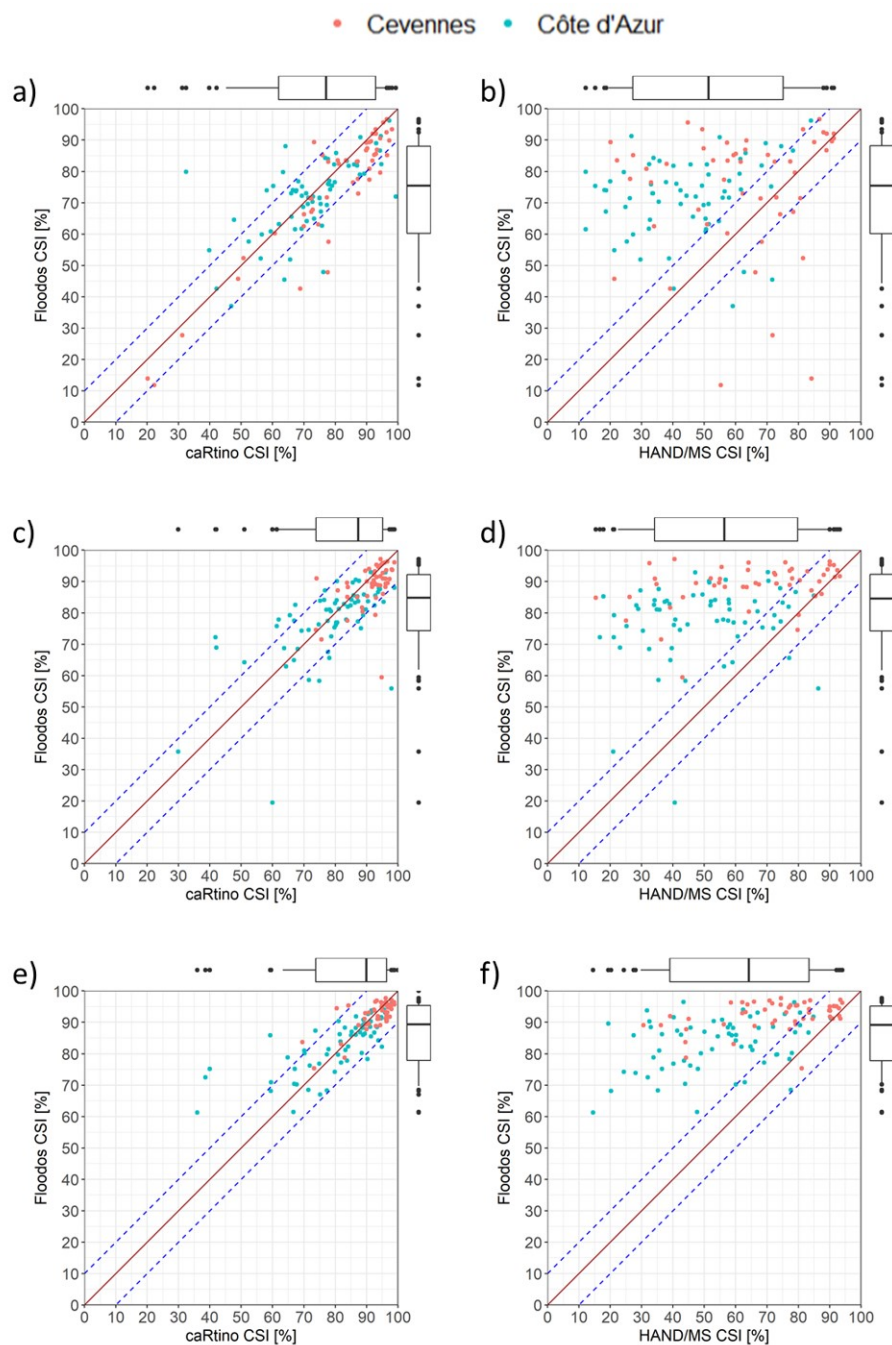


FIGURE 4.10 – Comparaison des résultats de Floodos et de caRtino (graphiques à gauche), de Floodos et de HAND/MS (graphiques à droite) : les figures a) et b) représentent le scénario fréquent, c) et d) le scénario moyen et e) et f) le scénario rare

fréquent au scénario rare. Les seules différences notables entre ces deux approches se situent sur des tronçons isolés qui ne sont pas représentatifs de la tendance globale. Ces écarts ponctuels sont dus à des sources d'erreurs localisées pouvant parfois affecter les résultats de l'une ou l'autre des approches. Quelques-unes de ces erreurs seront illustrées dans la suite.

### 4.3.3 Cas de la méthode HAND/MS

Une analyse détaillée des résultats de la méthode HAND/MS permet de montrer que la méthode donne de très bons résultats à l'amont des cours d'eau, où l'on trouve généralement des topographies encaissées. Ce type de configuration facilite la création d'un raster HAND qui présente une association cohérente entre les pixels du réseau de drainage, et les pixels drainés. L'application de l'algorithme HAND pose en revanche des difficultés dans les plaines à cause des faibles pentes transversales présentes dans le lit majeur. L'exemple présenté sur la figure 4.11 illustre cette limite de l'approche HAND. Cet exemple présente trois tronçons de la Siagne, découpés pour limiter leur longueur à environ 2500 mètres. Dans ce secteur, la plaine d'inondation est large et plane sur la rive gauche de la Siagne, avec une pente longitudinale significativement plus élevée que la pente transversale. Ceci amène à des directions d'écoulement théoriques quasi-parallèles au lit mineur, et les pixels du lit majeur se retrouvent donc connectés à des pixels de drainage situés bien plus à l'aval. Cet effet apparaît nettement sur les limites du sous-bassin versant associé au tronçon aval (délimité en noir, figure 4.11), qui remontent très à l'amont du tronçon en rive gauche. Dans ce secteur, les valeurs du raster HAND s'avèrent élevées en raison de la distance importante au réseau de drainage.

Les trois profils en travers de la figure 4.11 illustrent dans le détail l'effet obtenu sur la simulation de la zone inondée. Ces profils montrent la grande différence pouvant exister entre la forme du profil en travers du MNT, et la section reconstituée au même endroit à partir des valeurs du raster HAND. Les deux profils en travers (a) et (b) montrent notamment une augmentation soudaine des altitudes HAND en lit majeur rive gauche. Ces augmentations correspondent dans les deux cas à la transition entre les sous bassins-versants. Sur le profil (a), la hauteur d'eau simulée est inférieure à l'altitude du raster HAND au niveau du saut, ce qui limite logiquement l'extension de la zone inondée. Dans le cas du profil (b), le même effet est observé mais le saut d'altitude du raster HAND est moins marqué. La hauteur de la ligne d'eau simulée est cette fois supérieure à la valeur du raster HAND dans le sous-bassin contigu, mais il n'y a malgré tout aucun échange entre ces deux bassins limitrophes. Il s'agit là d'une autre limite de l'approche HAND qui considère chaque tronçon de cours d'eau comme une entité indépendante. Il résulte finalement de ces effets une forte sous-estimation de l'inondation en lit majeur rive gauche (zone de couleur jaune).

L'effet de sous-estimation de l'étendue de l'inondation présenté ici, dû à la forme inattendue des profils HAND, est fréquemment observé dans les simulations réalisées, ce qui explique en grande partie le biais négatif de l'approche HAND dans les figures 4.8 et 4.10. Cette problématique est rencontrée à l'aval de la plupart des cours d'eau côtiers et des cours d'eau ayant une plaine inondable avec de très faibles pentes transversales.

### 4.3.4 caRtino 1D

La méthode caRtino donne de très bons résultats à l'amont des cours d'eau où l'on trouve généralement des topographies encaissées, et où les modèles hydrauliques 1D sont logiquement plus performants. L'approche conduit aussi à de bons résultats sur les cours d'eau ayant un



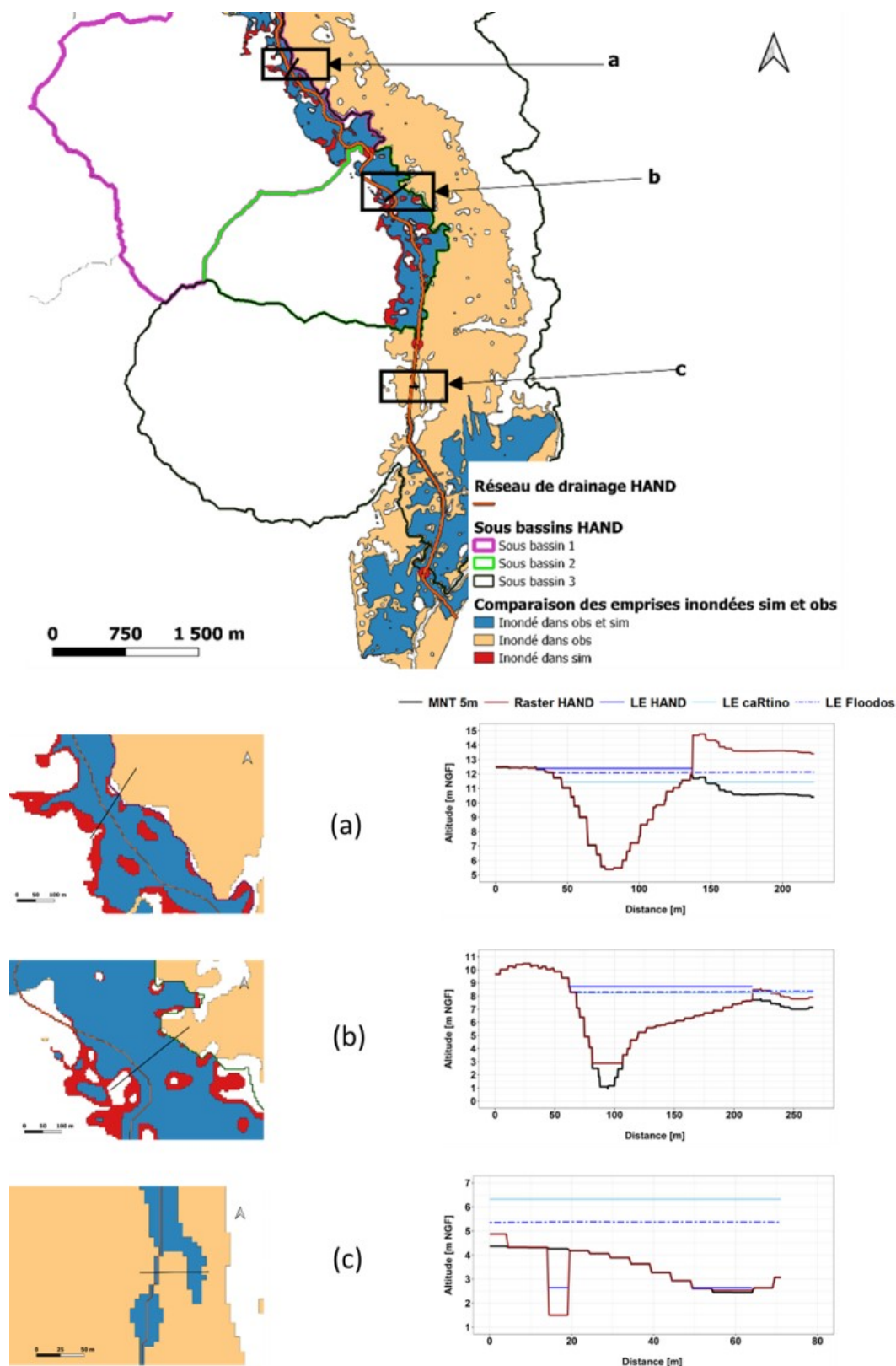


FIGURE 4.11 – Carte d'évaluation de l'approche HAND/MS sur la Siagne pour la période de retour  $T = 100$  ans. Les trois profils en travers (a), (b), et (c) illustrent des limites de la méthode conduisant à une sous-estimation de l'inondation.

lit majeur peu large. Néanmoins, l'application de caRtino pose nettement plus de difficultés dans les secteurs de plaines inondables très larges.

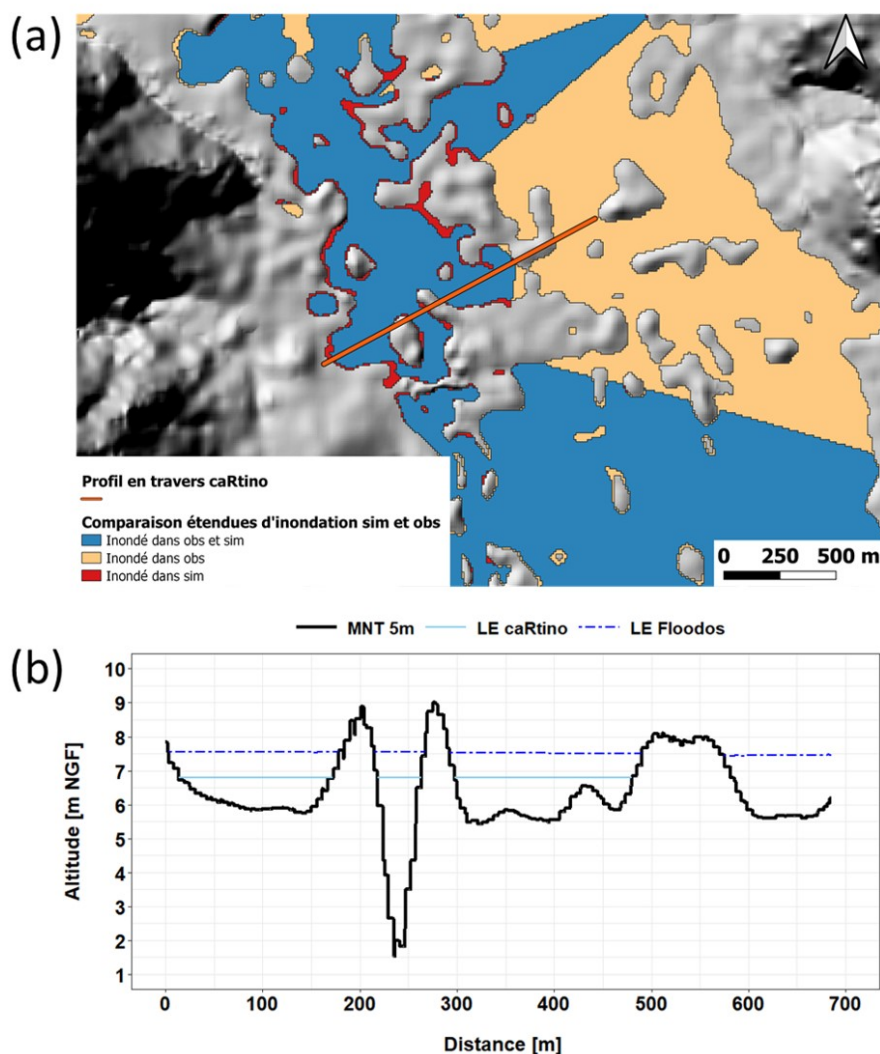


FIGURE 4.12 – Carte d'évaluation de l'approche caRtino sur la Siagne pour la période de retour  $T = 30$  ans. Le profil en travers illustre la problématique d'obstacles à l'élargissement des profils dans le lit majeur.

Les limites de la méthode caRtino sont essentiellement dues à la préparation des données d'entrées du modèle hydraulique et notamment à l'extraction des profils en travers et au processus itératif d'élargissement de ces derniers. Le but de cet élargissement est d'obtenir un profil en travers fermé pouvant contenir sans débordement l'écoulement considéré. La procédure de délimitation des profils ne permet pas en revanche de tenir compte des résultats d'extraction des profils amont ou aval. Un obstacle présent en lit majeur et permettant d'écouler le débit simulé sans élargir plus loin le profil en travers local, limitera de fait la largeur estimée du lit majeur (cf. figure 4.12). Or le lit majeur situé derrière cet obstacle local peut être inondé par un écoulement provenant de l'amont ou par un effet de remous issu d'un débordement aval. La continuité du lit majeur, et donc de la plaine inondable, ne peut donc pas être garantie par une modélisation hydraulique 1D, fondée sur des extractions locales et indépendantes des profils en travers. La figure 4.12 illustre finalement une des limites d'une approche complètement automatique telle que caRtino. Cette limite pourrait en partie être compensée par un post-traitement (interpolation spatiale du plan d'eau calculé), mais qui

introduit d'autres problèmes et biais potentiels : surestimation des niveaux d'eau dans les sections où la largeur du profil a été sous-évaluée notamment.

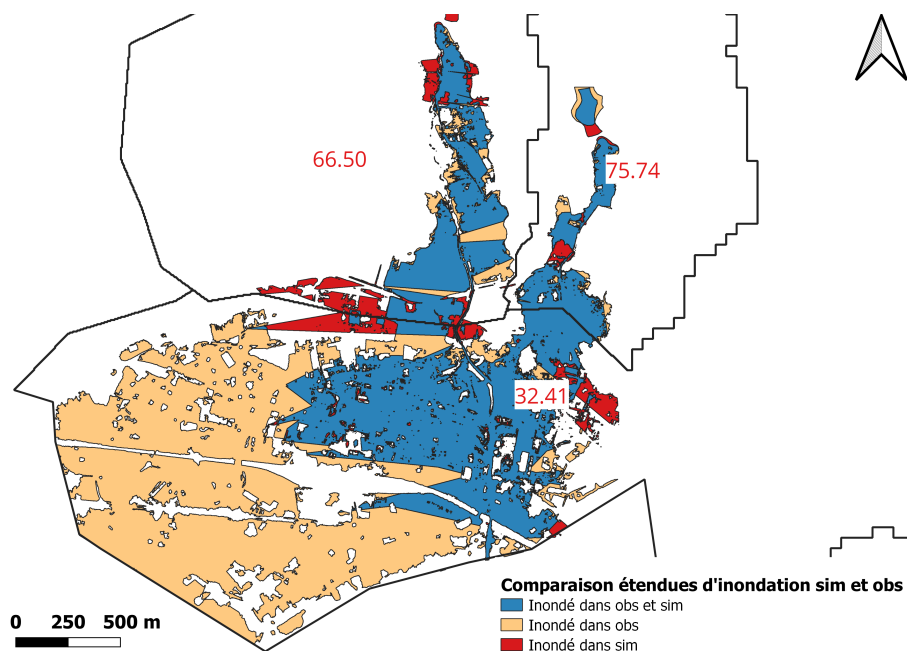


FIGURE 4.13 – Carte d'évaluation de l'approche caRtino sur le Pédégal pour la période de retour  $T = 30$  ans. Les limites des bassins versants associés à chaque tronçon sont représentées en noir. Les chiffres en rouge représentent les scores CSI obtenus sur chaque tronçon.

La figure 4.13 montre un autre exemple de débordement insuffisant obtenu avec la méthode caRtino (cas du Pédégal dans le TRI Est Var). D'autres cas similaires sont rencontrés sur plusieurs cours d'eau, notamment ceux dont le lit majeur est particulièrement large et chahuté, essentiellement dans des secteurs à faible pente. En complément de la question des obstacles présents dans le lit majeur, les problèmes de calcul de l'emprise d'inondation dans les plaines très larges, telle que celle du Pédégal, peuvent aussi être dus aux limites du modèle hydraulique 1D HecRas utilisé ici. Un profil en travers est défini dans HECRAS par 500 points au maximum. Pour une bonne définition des profils en travers extraits par la méthode caRtino, nous avons choisi de fixer un point topographique tous les deux mètres. La largeur maximale d'un profil en travers pouvant être représentée dans ces conditions est donc de 1000 mètres. Toutes ces difficultés, mettent clairement en évidence les limites des approches automatisées dont la mise en œuvre peut difficilement tenir compte de toutes les spécificités topographiques rencontrées sur le terrain.

#### 4.3.5 Floodos 2D

La méthode Floodos conduit à de très bons résultats, à la fois en topographie encaissée et dans les plaines très larges. Cependant, l'approche est très sensible à la qualité de la donnée topographique. Une définition médiocre du lit mineur peut, par exemple, engendrer des débordements excessifs (figure 4.15). Pour cette raison, l'application de modèles hydrauliques 2D nécessite souvent un prétraitement des MNTs Lidar afin de s'assurer d'une parfaite élimination des tabliers des ponts notamment, qui peuvent apparaître comme des obstacles à l'écoulement placés en travers du lit mineur.

La figure 4.14 montre le résultat de l'évaluation du modèle Floodos sur le Pédégal (TRI Est Var), pour le scénario fréquent. Avec un score de CSI de 79.85%, Floodos reproduit bien l'étendue d'inondation sur la partie aval, contrairement à caRtino (figure 4.13). Cet exemple démontre bien la plus-value d'un modèle hydraulique 2D dans ce genre de configuration où le lit majeur s'avère particulièrement large, avec des directions d'écoulements non uniformes.

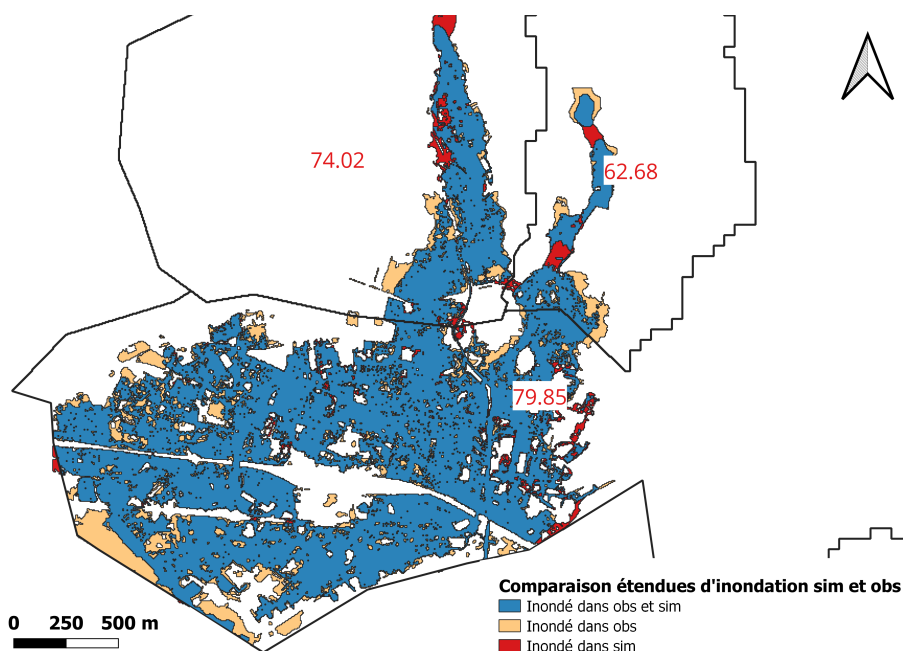


FIGURE 4.14 – Carte d'évaluation de l'approche Floodos sur le Pédégal pour la période de retour  $T = 30$  ans. Les limites des bassins versants associés à chaque tronçon sont représentées en noir. Les chiffres en rouge représentent les scores CSI obtenus sur chaque tronçon.

Les figures 4.15 et 4.16 illustrent le résultat d'évaluation du modèle Floodos sur le cas du Gardon d'Alès, pour le scénario fréquent. Les deux cas diffèrent simplement par l'application ou non d'un post-traitement du MNT afin d'éliminer certains des obstacles à l'écoulement. Un zoom sur le pont du 18 juin 1940 présente les directions d'écoulement obtenues dans les deux cas. Cet exemple illustre la sensibilité de Floodos à la donnée topographique utilisée en entrée, qu'il faut impérativement nettoyer au préalable pour éliminer les obstacles artificiels à l'écoulement (tabliers des ponts, remblais busés) sur le linéaire du cours d'eau (figure 4.15). Cependant, ce nettoyage ne permet pas toujours de corriger totalement l'excès de débordement simulé par le modèle, ce qui est bien illustré par la figure 4.16.

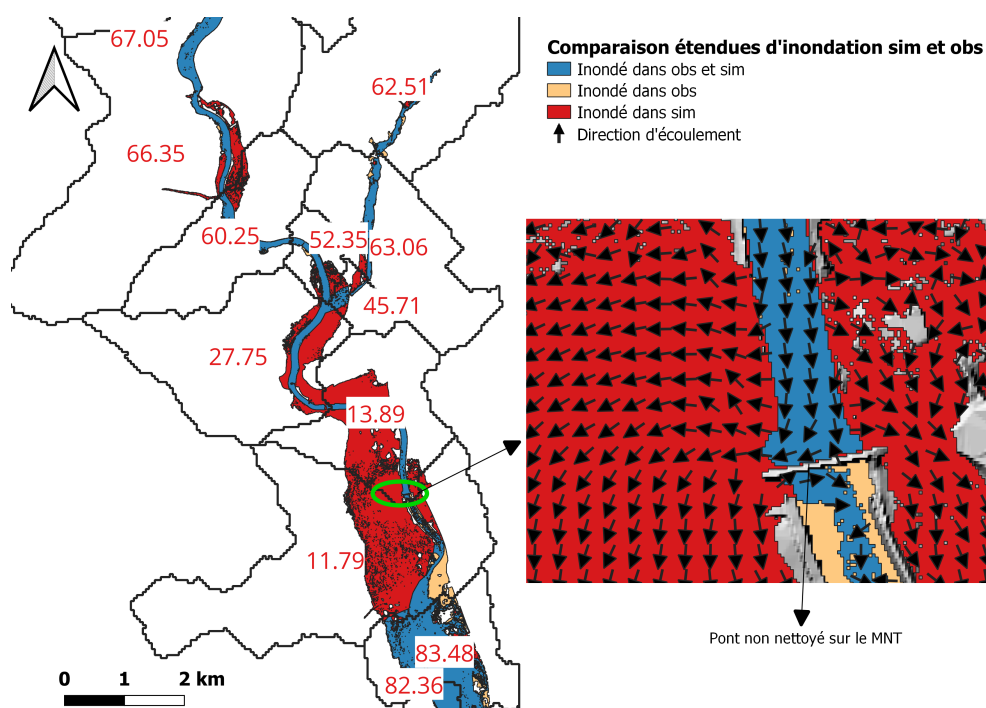


FIGURE 4.15 – Carte d'évaluation de l'approche Floodos sur le Gardon d'Alès pour la période de retour  $T = 30$  ans, sans nettoyage des obstacles à l'écoulement. Les limites des bassins versants associés à chaque tronçon sont représentées en noir. Les chiffres en rouge représentent les scores CSI obtenus sur chaque tronçon.

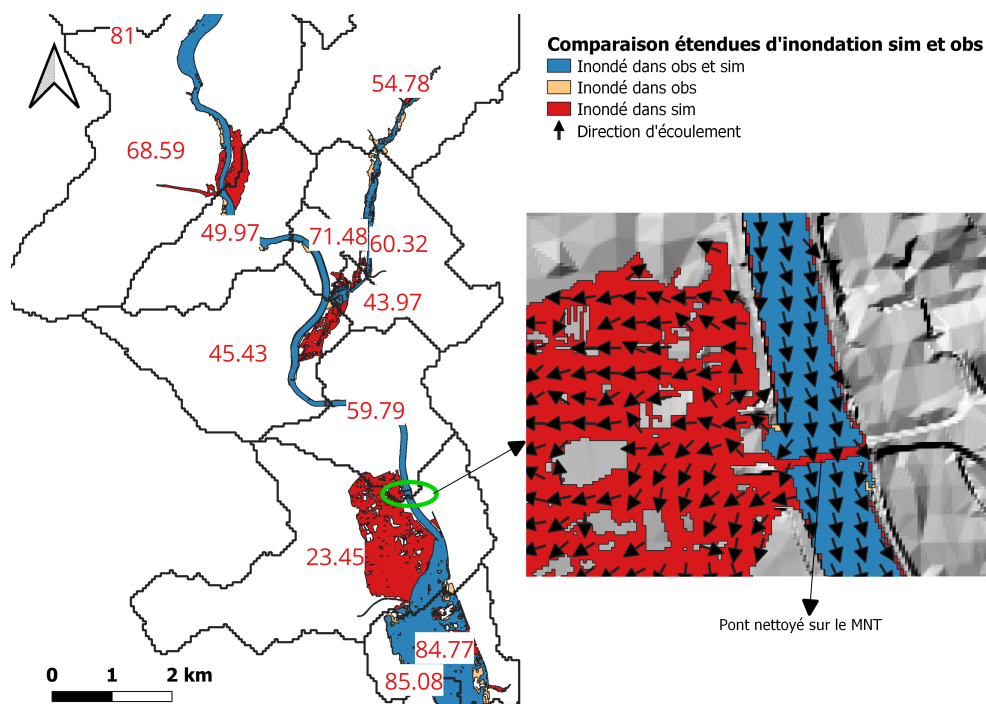


FIGURE 4.16 – Carte d'évaluation de l'approche Floodos sur le Gardon d'Alès pour la période de retour  $T = 30$  ans, avec nettoyage des obstacles à l'écoulement. Les limites des bassins versants associés à chaque tronçon sont représentées en noir. Les chiffres en rouge représentent les scores CSI obtenus sur chaque tronçon.

Tableau 4.7 – *Tableau récapitulatif des avantages et des limites des méthodes à partir des résultats de comparaison aux cartographies DI*

Approches	HAND/MS	caRtino 1D	Floodos 2D
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcul très rapide</li> <li>• Très bon résultats sur les cours d'eau à pente forte et bien encaissés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcul rapide</li> <li>• Très bon sur les topographies encaissées (vallées en V ou en U)</li> <li>• Bons résultats sur les cours d'eau ayant des plaines d'inondation bien définies et une topographie lisse sans obstacles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très bon sur les cours d'eau encaissés</li> <li>• Très bon sur les cours d'eau à faible pente et avec une large plaine d'inondation</li> </ul>
<b>Limites</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peine à représenter les connexions hydrauliques entre lit mineur et lit majeur dans les topographies planes</li> <li>• Pas d'échanges entre tronçons de cours d'eau limitrophes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sous-estimation de la largeur des profils en travers dans les zones à topographie complexe ou à faible pente, particulièrement pour des débits faibles</li> <li>• Difficultés de l'approche 1D à représenter la continuité hydraulique en lit majeur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Méthode plus gourmande en temps de calcul</li> <li>• Tendance à surestimer les étendues d'inondation, car une fois qu'un passage vers le lit majeur est trouvé, le lit majeur est rempli (régime permanent)</li> <li>• Forte sensibilité aux défauts de la topographie en entrée, ce qui nécessite un prétraitement sérieux des données topographiques</li> </ul>

## Synthèse et Conclusions

Dans ce chapitre, les approches HAND/MS, caRtino 1D et Floodos 2D ont été évaluées par comparaison à des cartographies de référence de zones inondables établies par le Cerema lors de l'application de la directive européenne inondations. Ces cartes de référence, bien qu'expertisées, ne peuvent pas être considérées comme des références parfaites. Elles restent des cartes simulées à l'aide d'un modèle hydraulique 1D, à partir de MNTs relativement anciens et parfois de mauvaise qualité. Néanmoins, les données et paramètres d'entrée étant ici identiques pour l'ensemble des simulations (référence et cartographies automatisées), le cadre d'évaluation permet de donner une idée des sources d'erreur liées à l'automatisation et à la simplification des approches de cartographie évaluées. À partir de ce premier travail d'évaluation et de comparaison des méthodes utilisées, quelques points forts et limites ressortent assez nettement pour chacune des approches évaluées (cf. tableau 4.7).

Pour ce qui concerne HAND/MS, la méthode permet de produire rapidement des cartes d'inondation capables de mettre en évidence des zones à enjeux, nécessitant des modélisations plus détaillées. Mais des limites importantes ont été révélées : la méthode ne permet pas de représenter correctement les connexions hydrauliques entre lit mineur et lit majeur, tout particulièrement dans le cas de lits majeurs très plats. Cette limite peut parfois conduire à une sous-estimation importante des emprises inondées.

La méthode caRtino montre un excellent comportement sur les topographies bien encaissées, généralement en amont des cours d'eau ou dans les secteurs dont le lit majeur est bien délimité. Les scores CSI obtenus dans ces cas sont globalement très bons, tout particulièrement pour des scénarios de fréquence moyenne et faible. En revanche, la méthode montre une tendance à la sous-estimation de la largeur des profils en travers, en particulier pour les scénarios de forte fréquence (débits faibles), sur les zones à topographie complexe ou dans les secteurs à pentes faibles avec un lit majeur très large. Les difficultés de délimitation du lit majeur et l'impossibilité de rendre compte de la cohérence amont-aval entre profils dans les modélisations hydrauliques 1D témoignent de l'intérêt du passage à une approche 2D dans ces secteurs.

Floodos présente à première vue des résultats très satisfaisants sur les secteurs aval à faibles pentes. Les résultats obtenus sur les topographies encaissées sont aussi très satisfaisants. Deux limites subsistent néanmoins sur ces premiers résultats : dans quelques cas, des surestimations sont constatées en raison des défauts de l'information topographique : lit mineur mal défini et présence d'obstacles artificiels en lit mineur correspondant aux tabliers des ponts ou à des remblais busés. Un traitement du MNT



peut aider à éliminer en partie ces sources d'erreurs, sans toutefois les supprimer totalement.

En termes de score CSI caractérisant la capacité des méthodes à reconstituer les emprises de référence, Floodos et caRtino se démarquent nettement par rapport à l'approche HAND/MS. Afin de confirmer ces premières conclusions, nous allons dans le chapitre suivant conduire des calculs sur des crues réelles, permettant de bénéficier d'un cadre d'évaluation plus large, et de références correspondant à de véritables données observées : étendues d'inondations observées, mais aussi altitudes des plus hautes eaux relevées.



## Chapitre 5

# Évaluation à partir d'inondations réellement observées

### *Objectifs du chapitre :*

*Ce chapitre présente une deuxième évaluation des méthodes de cartographie automatisée, effectuée cette fois en utilisant des données de référence correspondant à des crues réelles. Trois crues majeures qui ont touché la région méditerranéenne au cours des dernières années vont être étudiées. Par rapport à l'évaluation conduite au chapitre précédent, le fait de travailler sur des crues réelles va permettre de disposer de références portant à la fois sur les emprises inondées, mais également sur les hauteurs d'eau atteintes (relevés de plus hautes eaux). Par ailleurs, l'évaluation conduite ici intègre d'une part les erreurs dues aux différentes méthodes de calcul mobilisées, mais également les erreurs dues aux incertitudes sur les données et paramètres d'entrée des simulations : débits, topographie, et coefficients de rugosité. L'objectif est donc également ici d'obtenir une évaluation plus représentative de la capacité réelle des différentes approches à simuler des zones inondées observées.*

*Le contenu du chapitre reprend en grande partie un article publié dans la revue Hydrology and Earth System Sciences (HESS) en 2021 (Hocini et al. 2021).*

## 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, les 3 approches de cartographie automatisée étudiées, en l'occurrence HAND/MS, caRtino 1D et Floodos 2D, vont être de nouveau évaluées et comparées, mais cette fois du point de vue de leur capacité à reproduire des crues réelles récentes. Trois crues observées dans le sud-est de la France au cours des dernières années ont été retenues comme support à ce travail. Ces crues récentes sont :

- Les crues de l'Argens et de ses affluents en juin 2010
- Les crues des petits cours d'eau côtiers des Alpes-Maritimes (Brague, Riou de l'Argentière, et Grande Frayère) en octobre 2015
- Les crues de l'Aude et de ses affluents en octobre 2018

Le fait de travailler ainsi sur des événements réels et récents permet de bénéficier de la richesse et de la précision des données désormais disponibles pour décrire ces événements. Ceci concerne d'un part les données topographiques, dont la résolution et la précision (technologie Lidar) ont beaucoup évolué au cours des dernières années. Les MNT ont notamment beaucoup gagné en qualité par rapport à ceux disponibles en 2013 lors des travaux de cartographie de la directive européenne inondation (référence utilisée dans le chapitre 4). D'autre part, les observations disponibles pour les crues récentes étudiées intègrent non seulement les emprises inondées maximales, mais également les hauteurs d'eau atteintes en de nombreux points, au travers des relevés de Plus Hautes Eaux (PHE) effectués après chaque crue.

Le fait de travailler sur des crues réelles modifie toutefois également la nature des informations qui peuvent être tirées de l'évaluation. En effet, là où le chapitre 4 a permis d'évaluer de façon ciblée la perte de précision liée à la simplification et à l'automatisation des approches de cartographie appliquées, l'évaluation qui sera conduite ici comporte d'autres sources d'incertitude, qui peuvent éventuellement s'avérer dominantes. En effet, les incertitudes sur les données d'entrée utilisées (débits, et topographie), ainsi que sur les paramètres de modélisation retenus (coefficient de rugosité), auront ici un effet très direct sur le niveau d'incertitude final, et donc sur la capacité à reproduire les zones inondées observées.

Malgré l'intégration de ces incertitudes globales dans l'évaluation, et grâce au choix d'études de cas parfaitement documentées sur les débits des crues, et couvertes par des données topographiques issues de la technologie Lidar, les différences de performance entre les approches de cartographie évaluées ont néanmoins pu être largement confirmées ici. Des différences encore non identifiées dans le chapitre 4 sont mêmes apparues.

La suite de ce chapitre reprend un article publié en 2021 dans la *Revue Hydrology and Earth System Sciences* (Hocini et al. 2021). L'ensemble des données relatives à ce chapitre (emprises inondées modélisées, hauteurs d'eau modélisées, et leur évaluation à partir des observations) sont disponibles en téléchargement pour permettre une analyse détaillée des résultats (jeu de données intégré à la base de données du programme HyMex) : [doi.org/10.6096/mistralshymex.1598](https://doi.org/10.6096/mistralshymex.1598).

## 5.2 Article : Performance of automated methods for flash flood inundation mapping : a comparison of a DTM filling and two hydrodynamic methods

Cet article a été publié dans la revue HESS :

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, 2021 <https://doi.org/10.5194/hess-25-2979-2021>

### abstract

Flash floods observed in headwater catchments often cause catastrophic material and human damage worldwide. Considering the large number of small watercourses possibly affected, the use of automated methods for flood inundation mapping at a regional scale 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 is presented herein including a Digital Terrain Model (DTM) filling approach (Height Above Nearest Drainage/Manning Strickler or HAND/MS) and two hydrodynamic methods (caRtino 1D and Floodos 2D). These methods are used to estimate the flooded areas of three major flash floods observed during the last ten years in South-Eastern France : the 15th of June 2010 flood on the Argens river and its tributaries (585 km of river reaches), the 3rd of October 2015 flood on small coastal rivers of the French Riviera (131 km of river reaches) and the 15th of October 2018 floods on the Aude river and its tributaries (561 km of river reaches). The common features of the three mapping approaches are their high level of automation, their application based on a high-resolution (5m) DTM, and their reasonable computation times. Hydraulic simulations are run in steady-state regime, based on peak discharges estimated using a rainfall-runoff model preliminary adjusted for each event. The simulation results are compared with the reported flood extent maps and the high water level marks. A clear grading of the tested methods is revealed, illustrating some limits of the HAND/MS approach and an overall better performance of hydraulic models solving the shallow water equations. With these methods, a good retrieval of the inundated areas is illustrated by Critical Success Index (CSI) median values close to 80%, and the errors on water levels remain mostly below 80 cm for the 2D Floodos approach. The most important remaining errors are related to limits of the DTM such as the lack of bathymetric information, uncertainties on embankment elevation and to possible bridge blockages not accounted for in the models.

### 5.2.1 Introduction

Flash floods represent a significant part of flood related damages worldwide, particularly in regions prone to large rainfall accumulations over limited duration - typically several hundreds of mm in a few hours. For instance, in France eight floods caused insurance losses exceeding 500 million euros over the period 1989-2018, among which 4 were flash floods (CCR 2020).

Therefore, the development of efficient risk management policies for small upstream watercourses has become a particularly important issue. However, the capacity to face flash-flood related risks is still highly limited by the very large number of small rivers, and by the specific features of flash floods : high unit discharge values, fast evolution in time, high spatial heterogeneity, and low predictability.

One crucial aspect to mitigate the flash floods risks is to improve the flood hazard mapping on small watercourses, typically with upstream drainage areas starting at a few km<sup>2</sup>. Such information is essential for an appropriate development of prevention policies and crisis management plans. If available, it may be particularly helpful for stakeholders to : (i) facilitate risk identification and awareness, (ii) speed-up decision-making before and during the crisis.

The development of detailed flash flood hazard mapping still suffers from serious limitations due to the lack of descriptive data for small rivers (topography, bathymetry,...) and their flood regimes. However, a large increase in resolution and accuracy of Digital Terrain Models (DTMs) has been observed in the last few years, particularly with the development of Lidar, and DTMs with a resolution of less than 10 m are now widely available even if their accuracy remains heterogeneous (Schumann et Bates 2018). This evolution makes it possible to run hydraulic simulations on small rivers (Lamichhane et Sharma 2018). Even if information on bathymetry is still rarely available, recent advances have been achieved in estimating unknown bathymetry or river channel geometry based on remote sensing or local at-site surveyed data (Gleason et Smith 2014, Neal et al. 2015, Grimaldi et al. 2018, Brêda et al. 2019). Regionalized hydrological approaches also progressively help improve knowledge on flood regimes of upstream watercourses (Aubert et al. 2014).

The context is therefore increasingly favorable for the development of flood hazard mapping on small rivers prone to flash floods. However, this requires efficient mapping methods which can be easily applied on detailed river networks at regional scales. For instance, in France the entire stream network includes 120.000 km of rivers of more than 1 meter width, whereas flood hazard information is concentrated on the 23.000 km of main rivers, corresponding to the network covered by the Vigicrues national flood forecasting service. It can thus be estimated that about 100.000 km of small rivers should be documented with hazard information to ensure a comprehensive coverage. Hence, there is a need for automated and fast computing methods, which excludes both the mobilization of hydraulician's expert knowledge and thorough calibration of models. An appropriate representation of uncertainties requiring to run a diversity of scenarios with different boundary conditions and/or parameters, and/or the integration of mapping approaches in real-time forecasting chains, may make the question of computation times even more critical (Savage et al. 2016, Dottori et al. 2017, Morsy et al. 2018).

Several flood inundation mapping methods which meet the objective of a high level of automation have gradually been developed in the recent years. These methods can be classified into two main categories : i) hydraulic approaches solving the Saint-Venant shallow water equations (SWE) in 1 or 2 dimensions, ii) direct DTM filling approaches based on preliminary retrieving/estimation of the local discharge/water height relation.

Hydraulic 2D SWE models have been applied for a long time at regional and continental scales (Pappenberger et al. 2012, Alfieri et al. 2014, Sampson et al. 2015, Dottori et al. 2016, Schumann et al. 2016), but at resolutions (100 m to 1 km) incompatible with the representation of small rivers (Fleischmann et al. 2019). The main factors limiting the resolution were both the availability of global high-resolution DTMs (Schumann et al. 2018), but also the computation capacities. For instance, Savage et al. (2016) consider that resolutions finer than 50 m offer a limited gain due to other sources of uncertainties, while resulting in a large increase of computational expense; Teng et al. (2017) confirm that 2D hydrodynamic models have for a long time been unsustainable for areas larger than 1000 km<sup>2</sup> at resolutions of less than 10 m. However, the progress in efficiency of algorithms and in parallel computation now enable regional to continental applications at a 30 m resolution (Morsy et al. 2018, Wing et al. 2017; 2019). Several examples of flood mapping applications at finer resolutions (<10 meters) have also been recently presented, based on a large variety of models : DHD-Iber (Cea et al. 2015), Floodos (Davy et al. 2017), Lisflood FP (Neal et al. 2018), PRIMo (Sanders et al. 2019), SRM (Xia et al. 2017). Specific applications to flash floods have been proposed using Iber (García-Feal et al. 2018), BreZo (Nguyen et al. 2016), and B-flood (Kirstetter et al. 2021). Finally, in addition to high resolution 2D models, 1D SWE models may also be applied based on cross-sections extracted from high-resolution DTMs (Choi et al. 2015, Pons et al. 2014, Le Bihan et al. 2017, Lamichhane et al. 2018), also showing interesting results in terms of accuracy and offering lower computation times.

Direct DTM filling approaches have been developed more recently. All these methods are based on a local discharge/water height relationship determined from i) the cross-section and longitudinal profile geometries, and ii) a local hydraulic formula : Manning-Strickler (Zheng Xing et al. 2018, Zheng et al. 2018, Johnson et al. 2019, Garousi-Nejad et al. 2019) or Debord (Rebolho et al. 2018). The cross-section geometry is either extracted locally from the DTM for the AutoRoute method (Follum et al. 2017; 2020), or averaged at the river reach scale based on a Height Above Nearest Drainage (HAND) raster (Nobre et al. 2011) for the following methods : f2HAND (Speckhann et al. 2017); Geoflood (Zheng et al. 2018); MHYST (Rebolho et al. 2018); Hydrogeomorphic FHM (Tavares da Costa et al. 2019). These approaches are very efficient in terms of computation times, and can therefore be suitable for real time inundation forecasting at continental scales (Liu Yan Y. et al. 2018), or for probabilistic or multi-scenario modelling (Teng et al. 2017). However, because of their high level of simplification, these approaches may not reach the same level of accuracy as SWE 2D approaches (Afshari et al. 2018, Wing et al. 2019).

This paper proposes a new contribution to the question of flood hazard mapping, focused here on the specific context of flash floods observed in small headwater catchments. The main question addressed is the following : which performance in inundation mapping can be achieved for the small to intermediate rivers prone to flash floods (from 5 km<sup>2</sup> to 2000 km<sup>2</sup> catchment surface) ? The use of automated approaches based on very high resolution DTM (typically 5 meters or less) is considered here as a necessity considering the limited width of rivers to be covered, and their very large number at a regional scale. A simplification of mapping approaches can be considered as an advantage to limit the computation times and



facilitate the application at regional scales, while another objective is to remain as close as possible to an expert modelling in terms of accuracy.

Three approaches of increasing level of complexity are compared here : DTM filling (HAND/Manning Strickler), 1D SWE (caRtino 1D), and 2D SWE (Floodos). The tested Floodos 2D model remains simplified if compared to more conventional 2D SWE approaches (steady-state computation on the DTM mesh, inertial terms neglected in SWE). A comprehensive evaluation and validation exercise is proposed based on varied case studies, corresponding to three recently observed major floods in South-Eastern France. The three selected case studies are particularly well documented in terms of observation and validation data (peak discharges, observed inundation extent, high water level marks). The mapping methods are evaluated based on their ability to reproduce both the actual inundation extents and the high water levels.

The paper is organized as follows : section 2 presents the various tested mapping methods ; the evaluation approach and the selected case studies are presented in section 3 ; the results are presented in section 4 and discussed in section 5 ; section 6 summaries the main conclusions of this work.

## 5.2.2 Description of selected flood mapping approaches

### 5.2.2.1 Height Above Nearest Drainage/Manning-Strickler (HAND/MS) approach

Rennó et al. (2008) and Nobre et al. (2011) have introduced the height above nearest drainage concept, which is a terrain descriptor representing the height of each DTM grid cell in reference to the nearest stream cell along the drainage path. Nobre et al. (2016) first suggested to use HAND contours for flood hazard mapping. The approach has been recently improved by Zheng Xing et al. (2018) and Zheng et al. (2018), who proposed the GeoFlood method enabling flood mapping based on any input discharge value, by deriving a local height/discharge relation.

The HAND/MS approach applied here is similar to the GeoFlood method. A HAND raster derived from the DTM is used to estimate the average geometry of the river channel for each river reach, namely the evolution of wetted perimeter and wetted area as a function of water height. This information is then used to estimate a local rating curve (discharge/water height relation) based on the Manning-Strickler formula. Any river discharge can then easily be converted into a mean water height in the considered river reach, and into the corresponding inundation extent by comparison with the HAND raster values (Fig. 5.1). All this computation workflow was implemented here based on TAUDDEM libraries (<https://hydrology.usu.edu/taudem>). The main difference with the GeoFlood approach lies in the delineation of the stream network. A conventionnal approach based on  $D_{\infty}$  flow directions (Tarboton 1997) is used here instead of the Geonet approach used in GeoFlood (Zheng et al. 2018). Possible problems in the determination of the stream network are solved by a pre-treatment of the DTM to eliminate remaining obstacles such as bridges.

This HAND/MS approach is very fast in terms of computation times and has already been applied at a continental scale on very high resolution DTMs (Liu Yan Y. et al. 2018). However it is based on several important assumptions. First, the cross-sectional geometry and water level are averaged and supposed to be uniform for each river reach. Therefore, backwater effects due to longitudinal slope and cross section shape variations along one river reach, and/or due to downstream limit conditions, are not represented. Second, longitudinal discharge variations along each river reach cannot be accounted for. Third, the inundation depth at each point of the floodplain depends only on its relative elevation above its nearest downstream drainage point (i.e. the HAND raster value), independently of the real hydraulic connections. This may result in discontinuities : neighbour pixels having similar elevations may be related to different drainage points and hence be attributed different hand values. This is particularly true in the case of flat and wide floodplains and at confluences where neighbour pixels may be connected to different river reaches. In this latter case, the water levels considered for the inundation mapping will also be different for the two neighbour points. Johnson et al. (2019) conclude that significant errors may be observed for both low-order upstream river reaches, and downstream and flat floodplains.

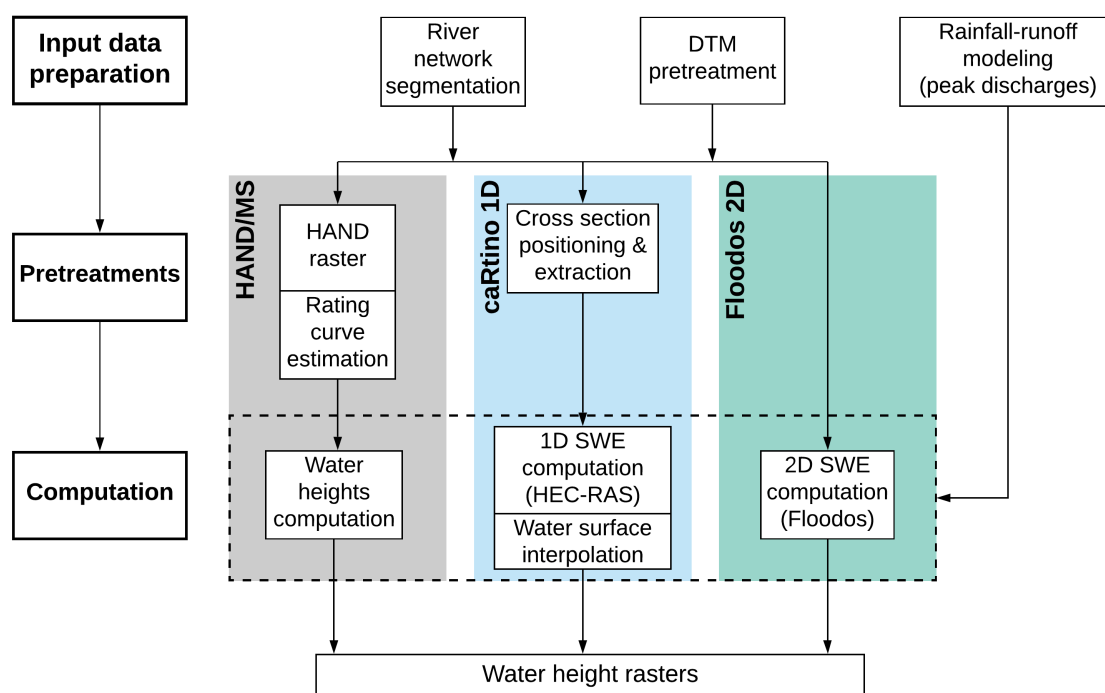


FIGURE 5.1 – Synthetic representation of the simulation workflow for the 3 selected flood mapping methods

### 5.2.2.2 caRtino 1D approach

The caRtino 1D method has initially been proposed by Pons et al. (2014). Based on the DTM, it automatically builds the input files for some standard 1D SWE hydraulic models such as HEC-RAS (Brunner 2016, Brunner et al. 2018) or Mascaret (Goutal et al. 2012). HEC-RAS 5.0.4 has been used herein (Brunner 2016, Brunner et al. 2018). The structure of the hydraulic model is defined by an automatic positioning of cross-sections at selected distances

along the river network, and then extracting the cross-sectional profiles from the DTM. Since the distances between cross-sections may have a significant impact on 1D hydraulic simulation results (Ali et al. 2014), the cross-sections are positioned with the double objective to limit their spacing and avoid overlapping. This is achieved in the following way : i) a constant distance between cross-sections is first used (50 meters in this application); ii) a first hydraulic run is conducted to estimate the width of the floodplain; iii) the distance between cross-sections is then set to a proportion of the floodplain width (here 30%), and the cross-sections are reoriented if crossing each other. Although the positions of cross-sections may be modified manually to improve the accuracy of local studies, this possibility was not considered here. A post-treatment of the simulated water longitudinal profiles enables to retrieve the water surface elevations and the water heights on the grid of the DTM. This method has already been evaluated for flash flood forecasting purposes, showing an interesting capacity to represent the observed inundations (Le Bihan et al. 2017). The caRtino 1D version used here corresponds to an evolution (reprogrammation in R) of the initial software.

Since this approach enables a full resolution of SWE equations, in steady state in the presented applications, it accounts for backwater effects and longitudinal channel geometry variations within river reaches. Its main limits, already identified by Le Bihan et al. (2017), lie in the 1D scheme which may not be adapted in areas with complex hydraulic features. The automated application may also be a source of significant errors. Cross-sections may not be positioned perpendicular to the stream main axis in meandering rivers, leading to cross-section shape distortions. Cross-sections may also be truncated leading to ignore locally part of the floodplain in the computations. Headwater losses due to hydraulic singularities such as bridges cannot be easily integrated. No distinction is made between the river bed and the floodplain and the floodplain continuity between successive cross-sections is not embedded in the model. These limits may have a particular importance in areas with very wide floodplains, perched river beds, or at river confluences.

### 5.2.2.3 Floodos approach

Floodos is a 2D SWE computation code developed by Davy et al. (2017). It represents the hydrodynamic module of the Eros program, aiming at simulating erosion processes. The SWE resolution method is running directly on the DTM grid, and is based on a particle-based so-called "precipiton" approach, which consists in propagating elementary water volumes on the water surface. The inertial terms are neglected in the SWE resolution scheme, which may result in errors in case of sudden changes in flow direction and in the vicinity of obstacles. However, the method enables a fast computation of the stationary solution thanks to the choice of a judicious numerical scheme. Davy et al. (2017) indicate the CPU time changes approximately linearly with the number of pixels of the computation domain. They compared Floodos with the widely used 2D LISFLOOD-FP model (Bates et al. 2010). They obtained similar results and faster computation times with Floodos, although they mention this comparison should not be considered as a benchmark.

The Floodos model requires a careful verification of the convergence, since the choice of a too large precipiton volume may result in a bad convergence and significant errors (ove-

restimation of water levels). The convergence verification has been automated here by using a new version of Floodos, enabling to reduce progressively the precipitation volume during the computation. Three decreasing precipitation volumes, defined in accordance with the criterion proposed by Davy et al. (2017), have been systematically applied within each run to ensure the convergence to the right solution.

### 5.2.3 Evaluation approach

#### 5.2.3.1 Principle of evaluation based on observed flood events

The capacities of the three mapping approaches to reproduce actually observed inundation patterns (i.e. inundated areas and high water level marks) are compared.

The main advantage of this approach is that actual observations are used as reference, when reference expert simulations, with their limits and uncertainties, have often been used in previous similar studies. Hence, a total uncertainty is measured here, including all uncertainties sources in the input data (DTM, but also actual discharge values that are only inaccurately known), parameters (roughness values), and simulation methods.

A possible drawback is that the uncertainties in the input data, particularly in the estimated discharges, may be relatively large and may dominate other sources of uncertainties associated with the simulation methods. For this reason, well documented case studies have been selected here, both in terms of peak discharges of the flood and observed inundation patterns. Particularly, extensive sets of peak discharge estimates on ungauged river sections, gathered within the HyMeX program (Ducrocq et al. 2019), are available for each selected event. These largely complement flood discharge data that are available for a generally limited number of stream gauging stations.

Additionally, a comprehensive knowledge of the inundation characteristics is available for the selected flood events, thanks to a high number of high water marks (HWM) and to field observations of the limits of the inundated areas. The HWM data was extracted from the french national HWM database (<https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr>). This data is systematically checked before incorporation in the database and therefore should not include large errors. However, errors up to 50 cm should be considered as common considering the accuracy of topographic surveys (HWM location and elevation), and/or possible inappropriate choice of HWMs locations (increase of water surface elevation in front of obstacles, capillary rise of moisture in walls, ..). Some larger errors may also remain for a very limited number of HWMs, and may result locally in large estimated simulation errors. But all these error sources are common to the 3 methods and should not affect the comparison results. The detailed mapping of inundation extents, available for the Argens 2010 and Aude 2018 events, was achieved by local authorities based on field surveys in the weeks following the floods. This data should have a good accuracy even if it may have been locally interpolated between field observation points.

### 5.2.3.2 Flood events selected

The rivers of Southern France are known to be prone to flash floods. This region has experienced a large number of catastrophic flash flood events in the past, including the three floods selected in this study, which are presented on Fig. 5.2.

The first selected flood occurred in the Argens river watershed ( $2750 \text{ km}^2$ ) on the 15<sup>th</sup> of June 2010. It is certainly one of the most catastrophic event observed in the last decades in this region : twenty-five victims and 450 million euros of insured losses were reported (source Caisse Centrale de Réassurance - CCR, vehicles excluded). The flood particularly affected the eastern part of the Argens catchment area, where the maximum accumulated rainfall locally exceeded 400 mm in 36 hours. Peak discharges were estimated at about  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  on the Nartuby tributary river ( $222 \text{ km}^2$ ),  $480 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  on the Florieye river ( $89 \text{ km}^2$ ), and  $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  on the downstream part of the Argens river (Payrastra et al. 2019). The length of the river network selected for the hydraulic simulations is 585 km. 557 high water marks are available for the evaluation, as well as the observed limits of inundated areas.

The second event occurred on the 3<sup>rd</sup> of October 2015 and hit several small rivers of the Alpes Maritimes coastline (French Riviera). A storm cell formed at the eastern edge of the Var river and ran along the coastline with a stationary regeneration lasting two hours. A maximum accumulated rainfall of 220 mm in 24 hours (150 mm in 2 hours) was observed in a 30km by 15km band along the coastline. The main rivers such as the Var and Loup rivers were hit only in their downstream part and had limited reactions, but major floods were observed on small coastal rivers such as the Brague river ( $66 \text{ km}^2$ , peak discharge  $>400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), the Riou de l'Argentière river ( $48 \text{ km}^2$ ,  $>300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) and the Grande Frayère river ( $22 \text{ km}^2$ ,  $>180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). These floods caused the death of 20 people and considerable material damage, insured losses being estimated at 520 million euros for this event (CCR, vehicles excluded). The river network selected for the hydraulic simulations is 131 km in length. 428 high water marks have been used for the evaluation.

The last event occurred on the 15<sup>th</sup> of October 2018 in the intermediate part of Aude river watershed ( $5050 \text{ km}^2$ ), where a accumulated rainfall of more than 300 mm in 24 hours was locally recorded (Caumont et al. 2020). Several tributaries of the Aude river had very strong flood reactions : Lauquet river ( $196 \text{ km}^2$ , peak discharge of about  $880 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), Trapel river ( $55 \text{ km}^2$ ,  $>300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), and Orbiel river ( $253 \text{ km}^2$ ,  $490 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). These tributaries caused a large flood of the Aude main river immediately downstream the town of Carcassonne. Numerous villages were heavily flooded and suffered large damages. 14 fatalities were reported, several bridges and roads were destroyed, and the insured losses exceeded 200 million euros (CCR, estimation still to be consolidated). The hydraulic simulations were performed on a 569 km river network. 1082 high water marks and the observed limits of inundated areas have been used for the evaluation.

### 5.2.3.3 Common input data and simulation workflow

The main steps of the simulation workflow are presented on Fig. 5.1. The mapping approaches are all implemented on segments of the computation domains (river reaches), the segmen-

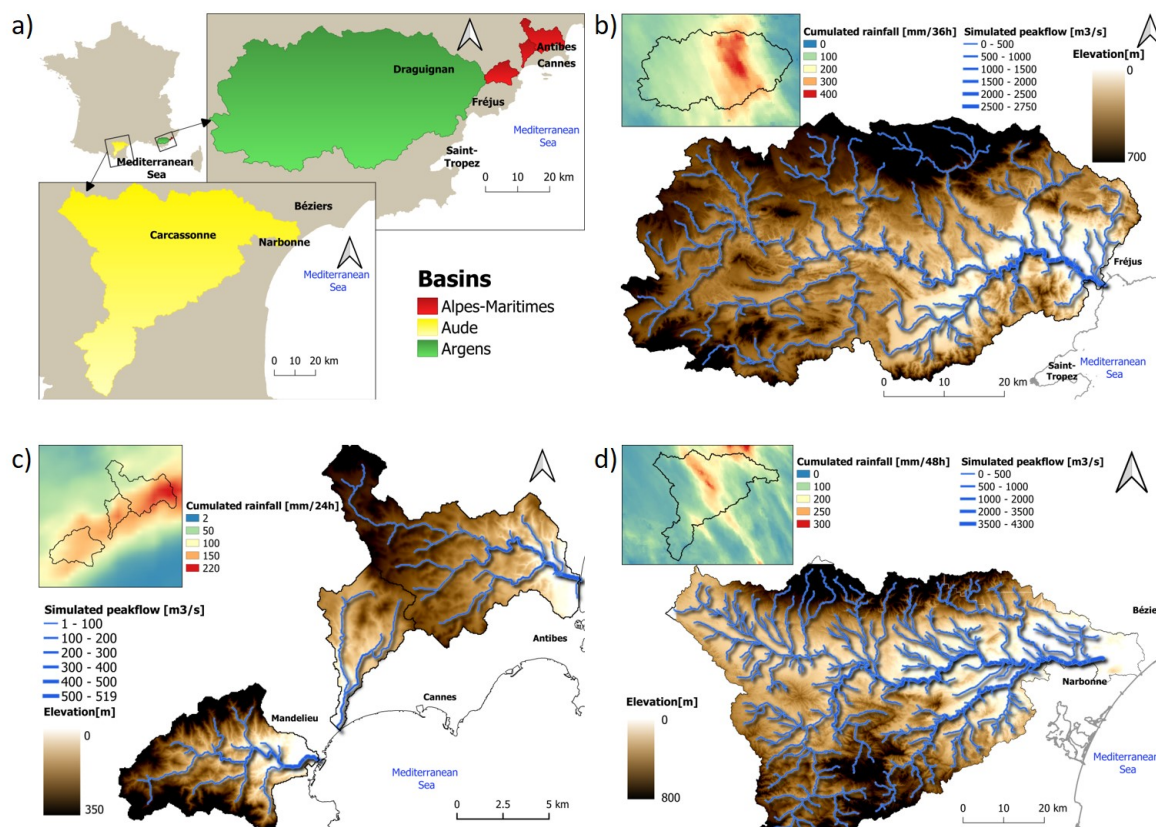


FIGURE 5.2 – Presentation of the 3 considered areas and flood events : a) location of watersheds, b) Argens 2010, c) Alpes Maritimes 2015, d) Aude 2018 (Map data : © IGN, © Météo France)

tation being based on the structure of the hydrographic networks (confluences). A 5 km<sup>2</sup> upstream catchment surface has been selected as a lower limit to define the river network (1 km<sup>2</sup> for the Alpes Maritimes case study). One independent computation is conducted on each river reach. This principle of segmentation of the computation domains facilitates the computation over large areas (several hundreds km of rivers in the case studies presented), and has the advantage to easily enable parallel computing if necessary (not implemented here). For SWE hydraulic approaches, the computation is extended 1 km downstream each river reach to limit the influence of the downstream boundary condition on the results (normal flow depth). The results are then combined, taking the maximum water height in areas where the results of several sections overlap - typically areas downstream confluences. For the HAND/MS approach, to avoid merging significantly different channel geometries, the river reaches have been subdivided to limit their length to a maximum of 1500 m, as recommended by Zheng et al. (2018).

The simulations are all run in steady state regime based on estimated flood peak discharges for each river reach. The steady state assumption may lead to an overestimation of the inundation extent and depths if the volume of the flood wave is limited in comparison with the storage capacity of the floodplain. This assumption is considered here as reasonable since the widths of the floodplains do not exceed several hundred meters, and therefore the corresponding floodplain storage capacities should remain limited. The computation based on flood peak discharges may also lead to an overestimation of backwater effects at confluences, because of the underlying assumption that maximum peak discharges occur simultaneously

for all river branches at a confluence. Lastly, the variations of peak discharges along each river reach are not represented, but these variations are limited since the delineated river reaches have a limited length.

To enable the comparison between mapping methods, the simulations are run using strictly identical inputs : DTMs, peak discharges, and friction coefficients.

The DTMs used are extracted from the IGN RGE Alti <sup>®</sup> product and have all a 5 m resolution. In the areas selected as case studies, they are mainly derived from Lidar data (20 cm mean elevation accuracy). However some parts of the areas are still covered with photogrammetry data (70 cm mean elevation accuracy). Bathymetric surveys are not available in the considered areas. The lidar campaigns are conducted in low flow periods, but in some places, the permanent water surface is captured in the DTM. Fortunately, the low flow discharges in the small Mediterranean rivers considered here are limited - some being ephemeral streams - and the existing DTM generally provide acceptable estimates of the river cross-sections. As the methods may be sensitive to some categories of errors present in DTMs, including for instance the presence of bridges or other structures crossing the rivers and not cleaned up, an automatic pre-treatment has been systematically applied to eliminate any remaining bridges in the river beds.

The peak discharges are estimated based on preliminary rainfall-runoff simulations obtained with the Cinecar distributed model (Naulin et al. 2013). The Antilope J+1 rainfall product of Météo-France (Champeaux et al. 2009), combining radar and point rainfall records, was used as input data. The model was calibrated for each event against available discharge observations to limit as far as possible the errors on peak discharges used as input of hydraulic simulations. Overall, the differences between simulated and observed peak discharge do not exceed  $\pm 20\%$  (see Fig. 5.3). However, observations are mainly based on post-flood surveys and may have large uncertainties, as indicated by error bars on Fig. 5.3. Moreover, observations are not available at each branch of the considered river networks. Therefore, the simulated peak discharges obtained from the rainfall-runoff model may locally differ significantly from the actual ones.

The same Manning's roughness coefficients are used in all computations and for all river reaches. They are fixed to  $n=0.066$ , which can be considered as a reasonable value for flash floods according to the analysis of available post event surveys data in the considered case studies (Lumbroso et Gaume 2012). Lower roughness values were also tested, but resulted in negative bias on water levels for the three case studies and the three methods.

#### 5.2.3.4 Evaluation criteria

##### Comparison of simulated vs. observed or reference flood extents.

The results are evaluated here by comparing the simulated flood extent and the observed one. Overlapping these two areas enables to distinguish four zones (see Fig. 5.4) : the hit zone (a) including areas flooded in both simulation and observation; the false alarm zone (b), corresponding to areas flooded only according to simulation results; the miss zone (c), which



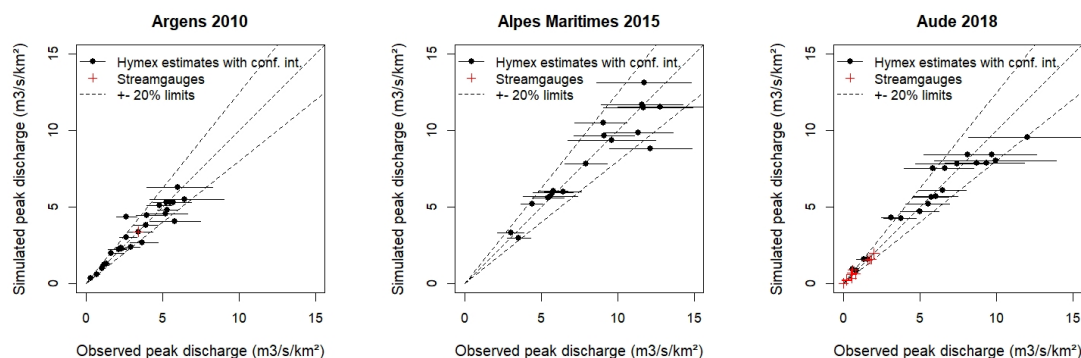


FIGURE 5.3 – *Observed versus simulated peak discharges with the Cinecar rainfall-runoff model for the three simulated flood events*

is included only in the observed flooded area; and the dry zone (d), corresponding to areas located outside the inundation extent for both simulation and observation. The respective areas of zones (a), (b), and (c) are finally synthesized in the form of a Critical Success Index (CSI), computed for each river reach :

$$CSI = \frac{a}{a + b + c} \quad (5.1)$$

CSI values range from 0% (no common area between simulation and observation) to 100% (perfect match). Since this metric cumulates overestimation (b) and underestimation (c), it may decrease significantly even for simulation results which appear visually to fit well the observations. Fleishmann et al. (2019) consider that hydrodynamic models with CSI scores greater than 65% at reach scale show satisfactory results.

A possible drawback of this metric is that observations of actual flood extents are generally gathered for major floods events, with the objective to establish historical references as support of flood risk management policies. These flood events are likely to be valley-filling, which is clearly the case for the three events considered here. This makes the retrieval of the flood extent much easier to achieve with modeling tools, and may mask the differences of performance between the different competing approaches.

### Comparison of water surface elevation with high water marks data.

The elevations of the simulated water surface and of available high water marks are compared here (see Fig. 5.4). This results in several hundreds of point differences between simulated and observed water levels. Negative values indicate an underestimation of water levels by the model, while positive values indicate an overestimation. If the model does not predict any inundation at the position of the high water mark, it is considered that the predicted water height is 0 m, and thus the computed error corresponds to the elevation of the high water mark above ground.

In situations where the geomorphologic floodplain is entirely filled, this metric may help to identify some differences between the modeling approaches even if the flood extent is similarly retrieved.

## 5.2.4 Results

Figure 5.4 illustrates the evaluation results obtained in the case of the Aude 2018 event with the Floodos method. This figure represents both the evaluation against observed flood areas (colored areas) and high water marks (colored points). It shows an overall good agreement between simulations and observations. Nevertheless, some clusters of large errors are observed locally (zones 2 to 5) : these correspond to external sources of errors, which are common to the 3 mapping methods and will be presented in the discussion section (see Sect. 5.2.5.2). Zone number 1 corresponds to an area for which the Floodos approach performs significantly better than the two other ones. This case will be discussed in Sect. 5.2.5.1.

Dynamic maps enabling a detailed visualisation of the simulation results for all the case studies and mapping methods are provided (Hocini et al. 2021), see the data availability section. The next sections provide a synthetic analysis of the evaluation results based on the CSI scores computed at the river reach scale, and on the differences between simulated and observed water surface elevations.

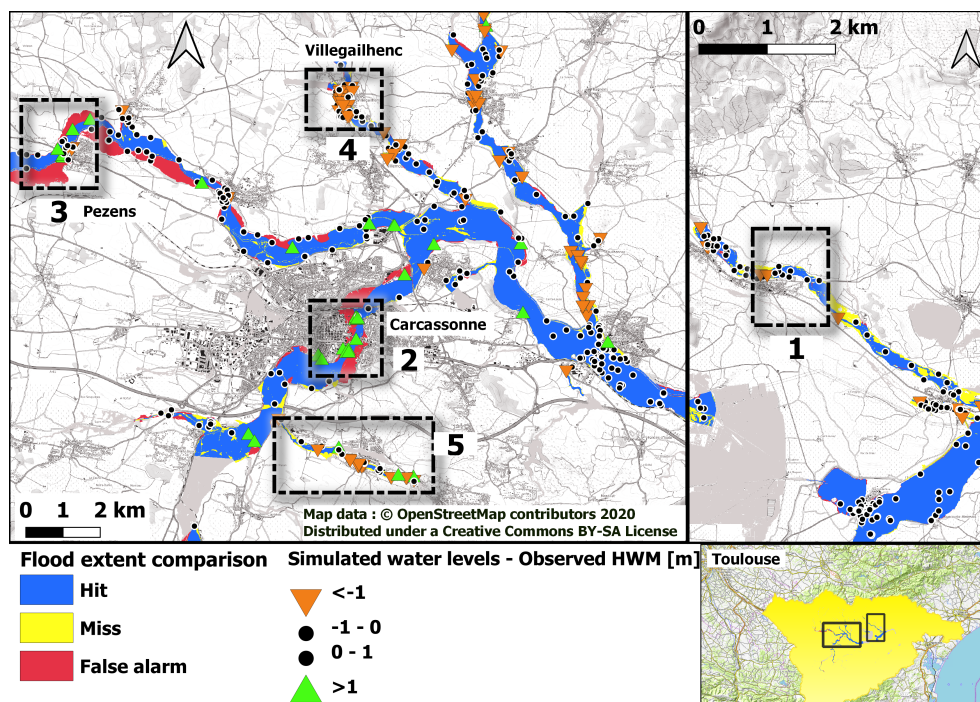


FIGURE 5.4 – *Simulated and observed flood areas and water levels, for the Aude 2018 event and the Floodos simulation approach*

### 5.2.4.1 Simulated flood areas

Figure 5.5 presents a comparison of the CSI scores obtained for the three mapping methods on the Argens and Aude case studies (observed inundation extent is not available for the Alpes Maritimes case study). This figure shows a clear grading in the ability of the methods to retrieve the extent of the inundated area. Particularly, the HAND/MS method seems to result in significantly lower performance (lower CSIs).

A detailed analysis of Fig. 5.5.a and c shows that the HAND/MS approach may perform

similarly to other approaches in some sections, but that very large errors are observed on specific rivers reaches. These differences may be attributed to the large level of simplification of the method, particularly : 1 - the fact that riverbed geometry is averaged at the river section scale, 2 - the "boundary" effects between sub-basins which may break the continuity of flow between river sections, particularly at confluences which number is increased here by the level of detail of the river network , and 3 - the absence of representation of backwater effects. However, the discussion section will also illustrate another important cause for these differences (see Sect. 5.2.5.1).

Overall similar and satisfactory results are observed for the caRtino 1D and Floodos 2D approaches, with a slight advantage for Floodos, for which the 15% quantiles of CSI values exceed 50 %, and the median CSI values are close to 80%. The largest observed differences between the two methods seem to be concentrated on a limited number of river reaches (Fig. 5.5.b and d). They are often observed in a context of wide and flat floodplains, sometimes with presence of dikes. In these cases, the complex connection between river bed and floodplain, and the non-uniform flow directions, may limit the validity of 1D approach and complexify its automatic adaptation in terms of width and orientation of the cross-sections. An example of such a situation is also presented in the discussion section.

Finally, Fig. 5.5 also shows that the lower CSIs values (below 50%) often occur in the same river sections for the three methods. These low values are mainly related to external error sources, which are not related to the computation method used, but rather to input data (peak discharges, DTM, ..., see Sect. 5.2.5.2).

#### 5.2.4.2 Simulated water levels

The comparison results with high water marks are presented on Fig. 5.6. This second evaluation includes the Alpes-Maritimes case study. Considering the possible errors on observed HWMs elevation (see section 5.2.3.1), simulation errors up to 50 cm may be considered as non significant. However, these error sources are common to the three mapping approaches and should not result in any differences in the results obtained with the three methods.

The results globally confirm the observations made for the inundation extents. Water levels are significantly better simulated with the 2D Floodos model, for which the 70% and 90% error limits shown on the boxplots do not exceed respectively  $[-0.9 \text{ m} , +0.7 \text{ m}]$  , and  $[-1.4 \text{ m} , +1.1 \text{ m}]$ . The dispersion of errors is significantly higher with the caRtino 1D method. The HAND/MS method results both in a higher dispersion of errors and a significant negative bias. This may be partly due to the choice of roughness coefficients, since a negative bias is also observed with the two other methods. However, the negative bias is systematically higher for the HAND/MS method than for the two other ones, suggesting a systematic tendency of the HAND/MS approach to underestimate water levels. An explanation for this phenomenon is presented in the discussion section.

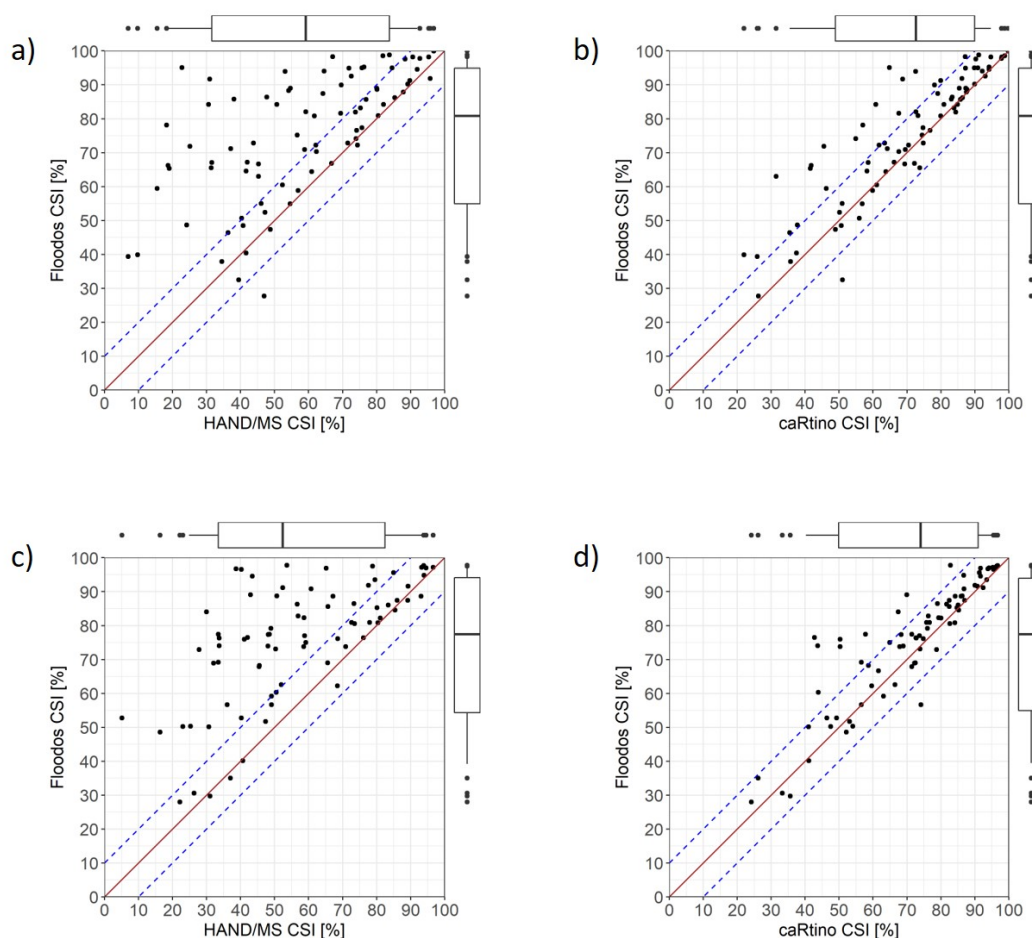


FIGURE 5.5 – Comparison of CSIs computed for the river reaches : a) HAND/MS vs Floodos, Argens 2010 event, b) caRtino 1D vs Floodos, Argens 2010 event, c) HAND/MS vs Floodos, Aude 2018 event, d) caRtino 1D vs Floodos, Aude 2018 event. The boxplots represent respectively the 5% and 95% (whiskers), and the 15% and 85% quantiles (boxes)

## 5.2.5 Discussion

### 5.2.5.1 Origin of the main differences between the three simulation approaches

The hierarchy observed is very similar and consistent between the three case studies. It also appears fully consistent with the level of simplification of the three methods used : logically, the SWE hydraulic methods outperform the HAND/MS approach, and the 2D SWE resolution scheme provides slightly better results than the 1D one, despite the fact that inertial terms are neglected. The results also illustrate that the HAND/MS approach can locally have very similar performance than the two other approaches, but largely fails to retrieve the inundation extent in some cases where the two other approaches perform very well. To a lesser extent, the caRtino 1D approach also shows a significantly lower performance than Floodos for a limited number of reaches (see Fig. 5.5).

Figure 5.7 shows an example of a river section for which the three methods lead to significantly different results. This section is located on the Argent-Double river at La Redorte (corresponding to zone 1 on Fig. 5.4). In this section, the CSI scores are respectively 69% for the Floodos model, 63% for the caRtino 1D model, and 35% for the HANS/MS method.

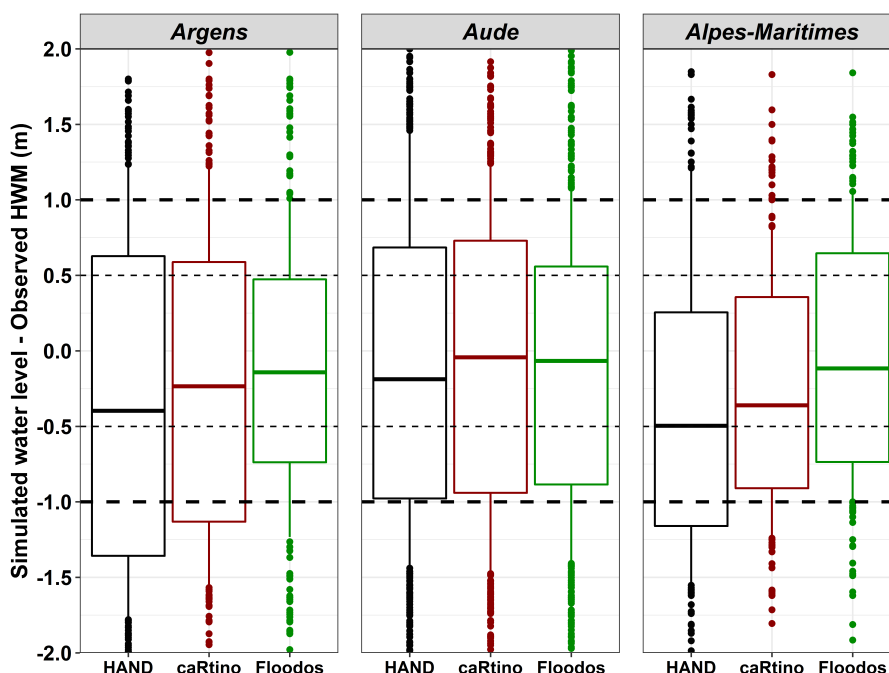


FIGURE 5.6 – Comparison of simulated water levels and observed high water marks (HWM), for the three methods and the three events. The boxplots represent respectively the 5% and 95% (whiskers), and the 15% and 85% quantiles (boxes)

This example illustrates an unexpected limitation of the HAND/MS approach, due to the configuration of the floodplain encountered here : large and flat floodplain on the left hand bank, with a longitudinal slope significantly higher than the transverse slope in the floodplain. In such a situation, a large number of HAND pixels in the floodplain are connected to a drainage point located several hundred meters downstream, with consequently a very large HAND height values. As shown on Fig. 5.7).d, this results in a large difference between the actual and HAND cross-sectional shapes. The HAND profile shows a sudden increase in HAND elevations which drastically limits the extent of the simulated floodplain (Fig. 5.7.a). Figure 5.7.d also shows that on the right bank, where the transverse slope is largely higher, the shape of the HAND profile is very similar to the actual cross-section. This cross-section retrieval error limits the wetted area and causes an increase and overestimation of the simulated water surface levels in the HAND/MS results for the affected reaches. But this is largely compensated by the under-estimation of water levels in the areas simulated as non-flooded because of the "wall" effect in the HAND profile. The flood extent underestimation effect presented here, due to the unexpected shape of the HAND profile, is frequently observed in the three case studies, which largely explains the negative bias shown on Fig. 5.6 and the lower CSIs on Fig. 5.5 with the HAND/MS method. The two other methods better retrieve the actual flood extent on Fig. 5.7, but they also show significant differences. Indeed, Fig. 5.7).b and e show that the 1D approach does not ensure a hydraulic continuity in the floodplain and between the successive river cross-sections. Due to longitudinal variations of these river cross-sections, parts of the floodplain are non-flooded according to the 1D model, because over-bank flow does locally not occur.



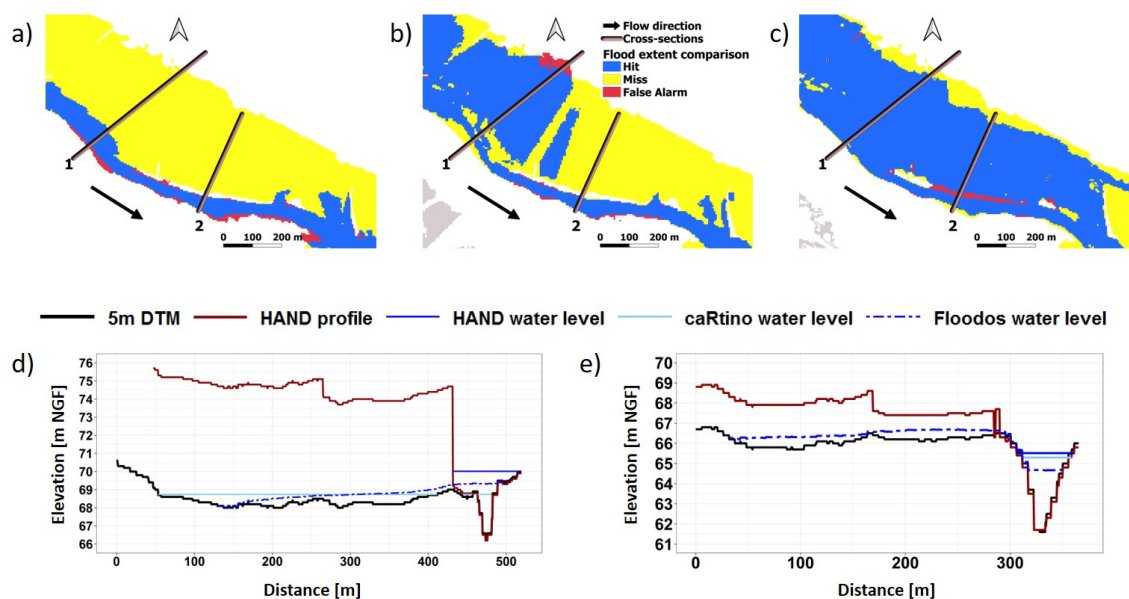


FIGURE 5.7 – Simulation results on the Argent-Double river at Le Redorte, showing large differences between the three tested approaches : a) HAND/MS, b) caRtino 1D, c) Floodos, d) cross-section 1, comparing water surface and terrain elevations, and the HAND profile (addition of the HAND height values and the elevation of the drainage point in the section), e) cross-section 2 (same information as cross-section 1)

### 5.2.5.2 Illustration of main error sources affecting all methods

Fig. 5.4 clearly showed that the larger water level underestimations or over-estimations are spatially clustered. This is observed for the three mapping methods, suggesting that the dominating error sources could be due to input simulation data in these cases (estimated peak discharges or DTM for instance). This section presents four examples of such clusters of errors, corresponding to zones 1 to 4 on Fig. 5.4. The results presented here were all obtained with the Floodos model.

#### Errors induced by the limitations of the DTM.

First, Fig. 5.8 presents two examples of large water level over-estimations mostly due to imperfections in the terrain input data. The first example (Fig. 5.8.a and b, zone 2 on Fig. 5.4) corresponds to the Aude river at Carcassonne. In this section the river bathymetry is significant, and the peak discharge of the flood was close to the limit of the riverbed capacity as no significant inundation was observed. In this case, the absence of bathymetric surveys in the DTM has a significant effect on the retrieved cross-sectional shapes and on the river bed capacity, resulting in a significant increase of the simulated water level, and simulated over-bank flows. The second example (Fig. 5.8.c and d, zone 3 on Fig. 5.4) corresponds to the Fresquel river at Pezens. In this section dikes are separating the riverbanks and the floodplain. This is a specificity of the Aude case study, where numerous flood defense structures have been built, especially along the Fresquel river and in the downstream floodplains of the Aude river. Figure 5.8.d shows that the relief of the dikes is smoothed out in the 5-m DTM if compared to a higher resolution 1-m DTM. Again in this section, the peak discharge of the

flood is close to the capacity of the river bed. The underestimation of the dike crest altitude causes in this case a large overestimation of the flood extent on the right bank of the river.

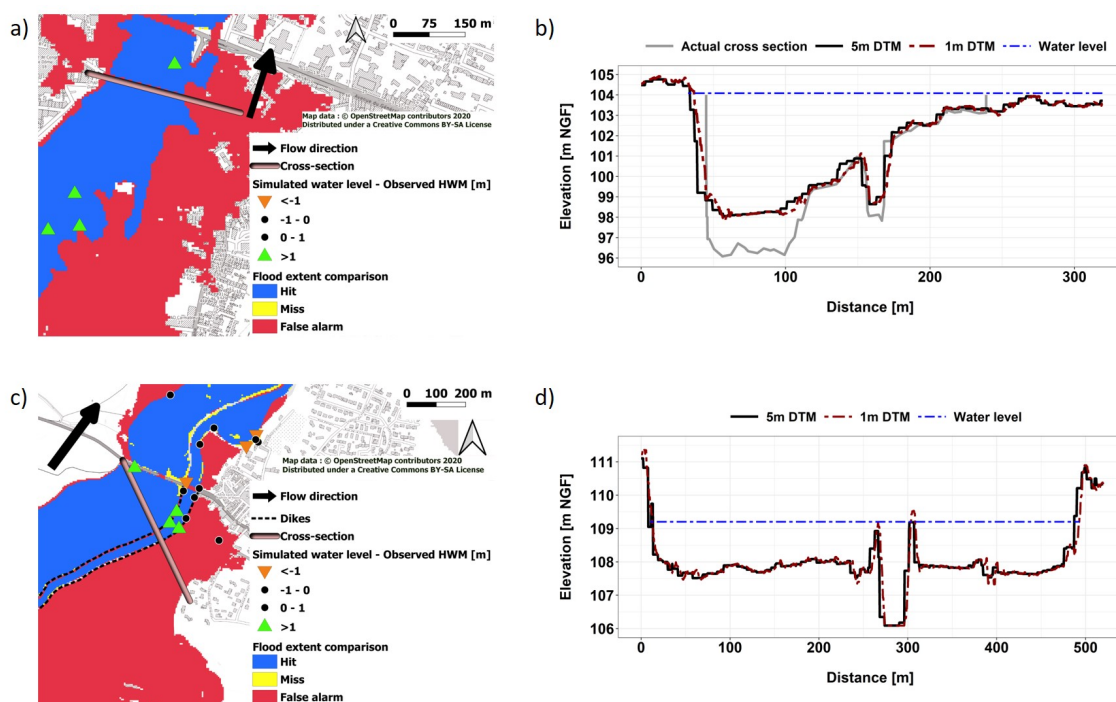


FIGURE 5.8 – Illustration of errors induced by the limitations of the DTM : a) Aude river at Carcassone, simulation results (Floodos model), b) Aude river at Carcassone, cross-sections and simulated water level, c) Fresquel river at Pezens, simulation results(Floodos model), d) Fresquel river at Pezens, cross-sections and simulated water level

### Local effects of possible bridge blockages or peak discharge errors.

On the other hand, large water level underestimations are also observed for some reaches. Two examples are provided on Fig. 5.9. The first case (Fig. 5.9.a, zone 4 on Fig. 5.4), corresponds to the inundation of Villegailhenc village by the Trapel river. In this case, a bridge located in the village has been partly obstructed and submerged during the flood, causing a large backwater effect and very high water levels ( $>2\text{m}$ ) in the vicinity of the bridge. The bridge was finally destroyed by the flood as shown by the picture on Fig. 5.9.a. Such important backwater effects, often related to bridge blockages, are erratic phenomena that cannot be easily forecasted and accounted for in the automatic simulations. They may result in large underestimations of the water levels immediately upstream and downstream the bridges. This situation is encountered at several points in the presented case studies, particularly in sections where the floods were the most intense (estimated return periods often exceeding 100 years). The second example (Fig. 5.9.c and d, zone 4 on Fig. 5.4) corresponds to the Fount Guilhen river at Cazilhac. In this case the origin of the underestimation is more difficult to explain. As no clear error appear in the terrain description, the discharge estimations and/or the choice of roughness coefficients may be at the origin of the underestimation of water levels and inundation extent. However, Fig. 5.9.c shows in this case that a reasonable variation in the peak discharge value (set from  $84.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  to  $116.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  to remain consistent

with rainfall observations) is not sufficient to compensate the underestimation effect. Since the selected roughness value ( $n=0.066$ ) is already relatively high, an underestimation of the locally estimated rainfall intensities is suspected to be at the origin of the errors in this case (Caumont et al. 2020).

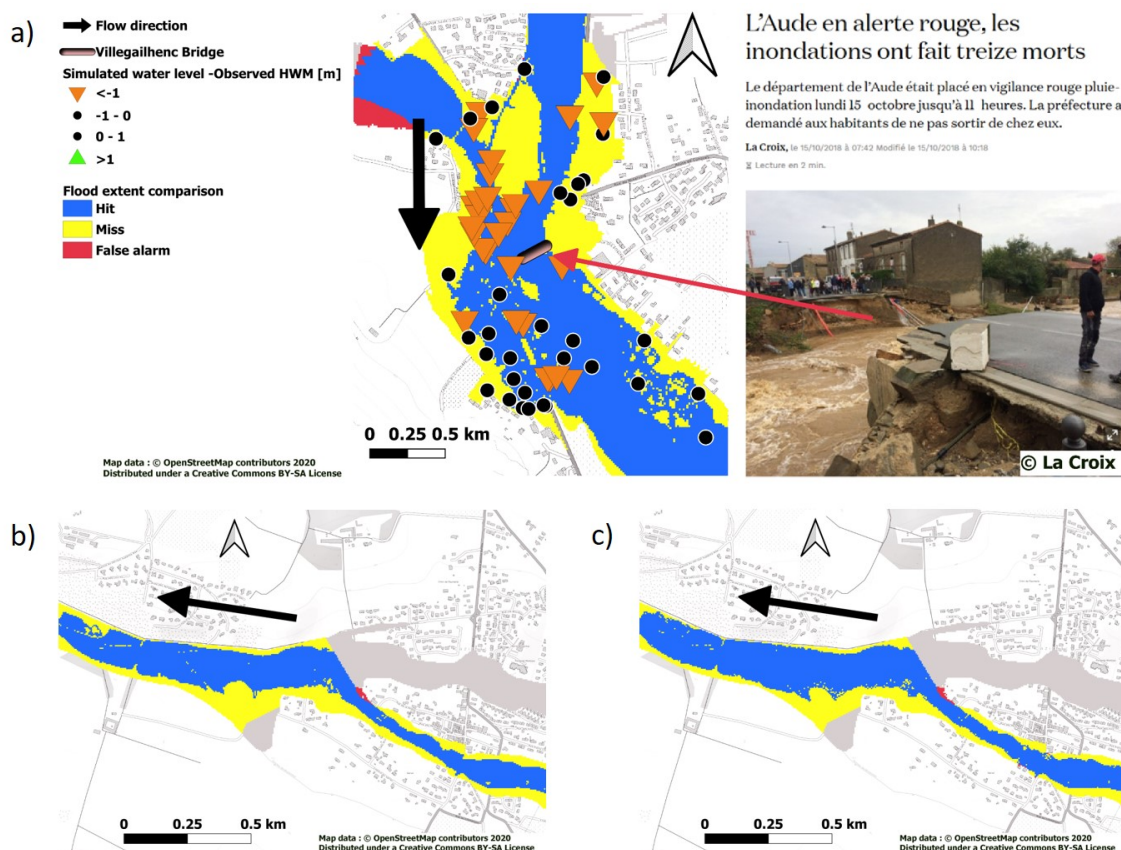


FIGURE 5.9 – Illustration of large water levels underestimations : a) Trapel river at Villegailhenc, simulation results (Floodos model) and picture of the bridge destroyed by the flood, b) Fount Guilhen river at Cazilhac, simulation results (Floodos model) with the initial discharge value ( $84.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  corresponding to a CN value of 70 in the Cinécar rainfall-runoff model), c) Fount Guilhen river at Cazilhac, simulation with a modified discharge ( $116.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , CN value of 90)

### 5.2.5.3 Computation times

The computation times required on a single CPU (Intel Core i7-7700 3.60 GHz - 32 Gb RAM) for the three mapping methods are presented in Table 5.1. They are well correlated with the length of the river network and the number of river reaches, except for the HAND/MS method which is very fast but less predictable. A factor of ten in average is observed between computation times of the HAND/MS and the caRtino 1D models, and of two in average between the caRtino 1D and the Floodos 2D models. As expected, the SWE 2D approach is computationally the most expensive. But the computation times remain reasonable for the 5 m resolution used here, and first parallel computations achieved using a 32 cores and 128 GB RAM cluster suggest that they may still easily be reduced by a factor 4 with the Floodos model. However, the resulting computation times remain large for real time applica-



tions, considering the current refreshment frequency of 1h for short-range rainfall nowcasting products.

Another important difference is the relative weight of the pre-treatment phase in the total computation time : pre-treatments are largely preponderant for the HAND/MS and caRtino 1D methods, while only the computation phase is present in the Floodos 2D model. This may be seen as an advantage of HAND/MS and caRtino 1D for real time applications, in which only the computation phase has to be repeated, and hence the required computation times are highly limited for these two methods.

Tableau 5.1 – *Comparison of computation times*

Case study	Total river length (km)	Computation times (min)								
		Nb of river sections			Total			Average per river section		
		HAND/MS	caRtino 1D	Floodos 2D	HAND/MS	caRtino 1D	Floodos 2D	HAND/MS	caRtino 1D	Floodos 2D
<b>Argens</b>	585	531	162	13	235	631	0.025	1.45	3.9	
<b>Aude</b>	569	446	110	22	247	522	0.05	2.25	4.75	
<b>Alpes Maritimes</b>	104	130	66	19	52	78	0.15	0.79	1.2	

### 5.2.6 Conclusion and perspectives

The results presented herein illustrate at first the feasibility of reasonably accurate flood mapping on small upstream rivers prone to flash flood, based on DTM-based automated approaches. The results presented here are encouraging in terms of quality, with median CSI values close to 80% for the approach based on the Floodos model.

The comparison of the three mapping approaches shows a clear grading of the methods. This result can be explained here by the fact that we do not have only V-shaped valleys with very simple hydraulic features in the presented case studies. The presence of flat floodplains clearly limits the performances of the HAND/MS approach. It induces errors in the retrieval of the river cross-sectional shapes (a "wall" effect), which limit the extent of the simulated inundations. It also limits the performances of the caRtino 1D approach if compared to the 2D Floodos approach, the difference being mainly illustrated by the reconstitution of water levels. A manual adaptation of the width and orientation of cross sections would be necessary here to improve the performance of the 1D approach. Since high progress in computation times has been made with 2D SWE approaches (including Floodos), such approaches now appear compatible with an application at large scales and at high resolutions, while offering significant gain in terms of accuracy.

A detailed sensitivity analysis to the different sources of errors has not been proposed here. However, the largest errors observed seem to be related to external sources (input data) rather than the computation methods. Using an accurate terrain description appears particularly critical. Therefore, a significant increase in quality can still be expected, for instance by using Lidar DTMs at finer resolutions (computations at 1 m resolution would be possible), and also by significant efforts put on appropriate DTM pre-treatments to better represent structures (dikes, buildings, bridges, ...). Inclusion of bathymetric data in the DTMs also appears as an important and challenging issue for the future (Lague et Feldmann 2020). However, it should be verified that the gains related to input data accuracy are not masked by other sources of uncertainty (Dottori et al. 2013). The sensitivity to roughness values has also to be further investigated for an appropriate representation of uncertainties, and variable roughness values may also be defined depending on land cover (Sampson et al. 2015, Dottori et al. 2016).

Finally, the methods presented here should be of great help to provide realistic inundation scenarios and develop information about possible flash-flood impacts as a support of flash flood risk management policies (Merz et al. 2020, Ritter et al. 2020). However, further work is still needed to integrate these methods into real-time forecasting chains and assess their performance in this context. The errors on discharge forecasts may indeed be dominating the other sources of uncertainties, and the computation times may also be another important limiting factor. Depending on the considered inundation mapping methods, real time computations may be feasible and may improve the representation of flood-wave volumes and flood dynamics at confluences, whereas off-line libraries of inundation scenarios can be generated and sampled in real time (Dottori et al. 2017), which may help representing discharge uncertainties by selecting multiple scenarios (Leedal et al. 2010). The definition of the best real-time computation strategy is even more complex in the case of flash-floods, because of their very fast evolution dynamics. The delay necessary to run and provide forecasts may indeed highly limit the capacity of emergency services to analyse forecasts and adapt their response strategies by reference to inundation scenarios they are prepared for. Finally, an optimal compromise has probably to be found in the case of flash floods between the accuracy of inundation forecasts and the rapidity of forecast delivery.

## Synthèse

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis d'illustrer la performance des trois approches de cartographie évaluées dans la thèse, à partir de leur capacité à représenter les zones inondées et les hauteurs d'eau pour trois 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 moins adaptée au contexte des crues éclair étudié ici, du fait des nombreuses simplifications sur lesquelles repose cette approche, qui s'avèrent fortement pénalisantes dans les secteurs où la forme du lit du cours d'eau varie fortement, et surtout dans les secteurs aux plaines inondables larges et très plates. Le modèle 2D Floodos est finalement celui qui permet la reconstitution la plus précise des hauteurs d'eau sur les études de cas présentées. Il permet notamment de tenir explicitement compte de la variabilité des hauteurs, des vitesses et des directions d'écoulement entre le lit mineur et les plaines inondables, ce qui explique sa meilleure performance.

Ces résultats illustrent également les principales sources d'erreur occasionnant localement des écarts importants entre modélisation et observations. Ces erreurs proviennent de la méconnaissance des débits effectifs des crues sur les tronçons de cours d'eau modélisés, et des imperfections des modèles numériques de terrain, bien plus que des simplifications ou du choix des paramètres des modèles hydrauliques testés. Trois sources majeures d'erreur associées au MNT ont notamment été identifiées : (a) l'absence de relevés bathymétriques dans le MNT qui peut conduire à sous-estimer localement fortement la section et donc la débitance du lit mineur du cours d'eau, (b) la sous-estimation de l'altitude du sommet de certaines digues par effet de lissage dans le MNT de résolution 5 m, et (c) l'absence de représentation des effets de remous importants en amont des ponts, liés aux éventuels embâcles et/ou à la possible mise en charge des ponts.

Ces conclusions ouvrent finalement des pistes de réflexion intéressantes sur les sources d'erreurs et d'amélioration possibles de la modélisation automatisée des inondations. Par la suite, dans le chapitre 6, nous allons nous intéresser à l'importance relative de ces différentes sources d'erreurs, à travers une analyse de sensibilité des résultats de modélisation obtenus avec le modèle Floodos. L'objectif est de pouvoir formuler certaines propositions d'amélioration de la démarche de modélisation appliquée. Trois sources d'incertitude seront principalement explorées : résolution et pré-traitement des MNT, débits injectés, et coefficient de rugosité appliqué.



## Chapitre 6

# Analyse de sensibilité aux principales sources d'incertitude

### *Objectifs du chapitre :*

*Ce chapitre présente une analyse de sensibilité des résultats de cartographie obtenus au chapitre 5 avec le modèle 2D Floodos, en prenant pour support le cas de la crue de l'Aude d'octobre 2018. Les sensibilités aux différentes données d'entrée (topographie et débits), et au choix du paramètre de rugosité (coefficient de Strickler), sont successivement examinées. Ce choix s'appuie sur les hypothèses émises dans le chapitre 5, concernant les principales sources d'incertitude à l'origine des erreurs constatées lors de l'évaluation initiale des trois méthodes de cartographie étudiées.*

*Les choix effectués pour la mise en œuvre de cette analyse de sensibilité sont développés et justifiés dans la première partie du chapitre. Les différents résultats obtenus sont ensuite commentés, en reprenant les critères d'évaluation utilisés aux chapitres précédents, à savoir la comparaison des résultats de simulations aux étendues d'inondation observées, et aux altitudes des plus hautes eaux relevées. Différents exemples sont également fournis dans chaque cas, de façon à mieux expliciter l'origine de l'évolution des scores. La possibilité d'utiliser ces résultats pour améliorer la performance de modélisation globale obtenue au chapitre 5 est également discutée dans chaque cas.*

## 6.1 Principe général d'une analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à étudier la manière dont les résultats d'un modèle (numérique ou autre) peuvent varier, qualitativement ou quantitativement, en fonction de différentes sources de variation (Saltelli 2004). D'une façon générale, les sources de sensibilité des modèles peuvent être divisées en quatre catégories (Willems 2012) : les données d'entrée, les paramètres des modèles, la structure du modèle, et enfin l'évaluation du modèle (données et approches utilisées). Dans le cas particulier qui nous intéresse ici, à savoir celui des modèles hydrodynamiques simulant les écoulements à surface libre, les données d'entrée correspondent aux données hydrologiques et topographiques, les paramètres se limitent généralement au coefficient de rugosité (Strickler), la structure du modèle correspond à l'approche de résolution des équations de St Venant appliquée (1D ou 2D avec simplification éventuelle de certains termes) et aux conditions aux limites retenues, et enfin l'évaluation du modèle est liée à la nature des données disponibles et à la mesure de performance associée.

On peut également remarquer ici que la notion de sensibilité est assez étroitement liée à celle d'incertitude : lorsque la sensibilité d'un modèle à une source de variation est élevée, la source correspondante risque de prendre un poids plus important dans l'incertitude de modélisation obtenue.

## 6.2 Choix effectués pour la mise en œuvre de l'analyse de sensibilité

### 6.2.1 Les différentes sources d'incertitudes examinées

Un certain nombre de travaux ont déjà examiné les effets combinés des différentes sources de sensibilité et d'incertitude associée, sur les résultats des modèles hydrodynamiques utilisés pour représenter les inondations (Pappenberger et al. 2005, Hunter et al. 2005, Warmink et al. 2011, Van Steenberghe et al. 2012). D'autres études plus spécifiques ont fourni une analyse détaillée de l'impact de certaines composantes individuelles de l'incertitude de modélisation, telles que la précision et la résolution de l'information topographique (Stephens et al. 2012, Tsubaki et Kawahara 2013, Wildemeersch et al. 2014, Morgan et al. 2016), les valeurs du paramètre de rugosité (Hall et al. 2005, Pappenberger et al. 2008, Apel et al. 2009, Dung et al. 2011), ou encore les conditions aux limites (Domeneghetti et al. 2012, Aronica et al. 2012) .

Une quantité importante d'études menées récemment ont insisté sur l'importance particulière de la donnée topographique d'entrée utilisée dans la cartographie des inondations (Fewtrell et al. 2008, Ozdemir et al. 2013, Saksena et Merwade 2015, Peña et Nardi 2018, Muthusamy et al. 2021). La plupart de ces études ont notamment examiné l'impact de la résolution utilisée sur les résultats de modélisation. Quelques-unes ont également abordé la question des méthodes de ré-échantillonnage des MNT. Les conclusions obtenues montrent qu'en hydraulique fluviale, le choix de la résolution optimale du MNT dépend fortement de la largeur des lits des cours d'eau étudiés, et des enjeux de la zone d'étude (degré d'urbanisation)

qui déterminent le niveau de précision attendu. Saksena et Merwade (2015) ont par exemple

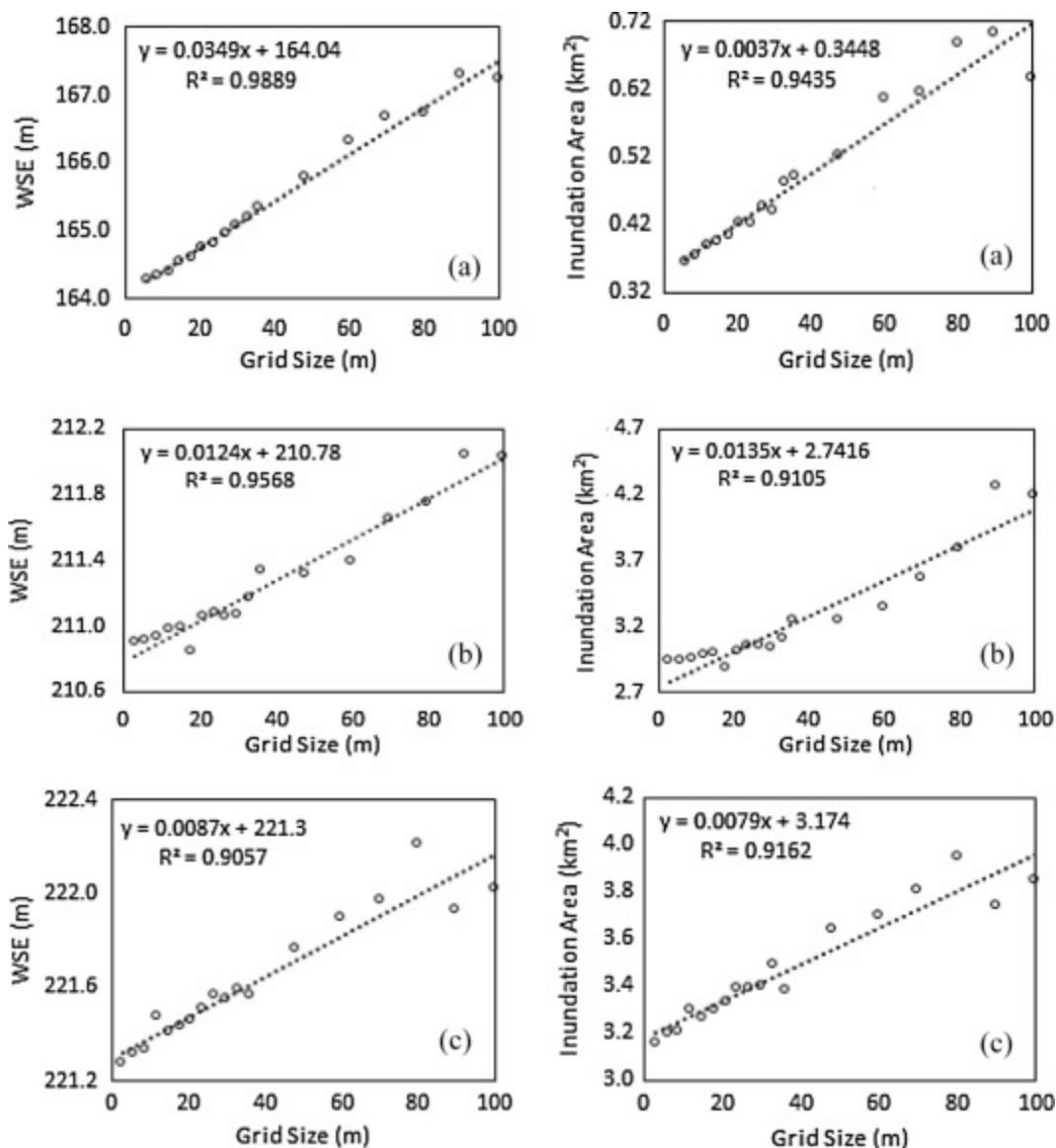


FIGURE 6.1 – Hauteurs d'eau moyennes et surfaces inondées moyennes obtenus avec le modèle HecRas 1D avec des résolutions de MNT différentes pour les cours d'eau de : (a) Strouds Creek ; (b) Tippecanoe ; et (c) Saint Joseph aux USA (Saksena et Merwade 2015)

analysé une gamme de résolutions de MNT allant de 6 m à 30 m dans la modélisation des inondations fluviales et ont cherché à mettre en évidence les différences résultant de l'utilisation de ces différentes résolutions. Ils ont ensuite utilisé ces informations pour créer des cartes d'inondation améliorées à partir de MNT de résolution plus grossière. Ils ont constaté que l'augmentation de la taille de la maille du MNT augmentait à la fois les zones d'inondation et les hauteurs d'eau simulées, du fait probablement de l'effacement progressif des lits mineurs lorsque la résolution du MNT diminue (cf. figure 6.1). Cependant, ces conclusions ne peuvent probablement pas être généralisées à tous les types de cours d'eau et de formes de vallées.

À partir des résultats obtenus au chapitre 5, plusieurs sources d'erreur potentielles ont déjà été identifiées dans les cas d'application qui nous intéressent. Ces sources d'incertitude concernent principalement les données d'entrée de la modélisation : la topographie (absence



de représentation de la bathymétrie, et manque de détail du MNT à 5 m utilisé), ainsi que les débits d'entrée qui peuvent comporter de fortes erreurs. Des incertitudes liées à la structure de la modélisation sont également apparues, dans le cas notamment de ponts mis en charge, mais il semble hélas difficile d'intégrer simplement ces effets dans les modèles mis en œuvre. Enfin, du point de vue des paramètres, le coefficient de rugosité (Strickler) utilisé est également susceptible d'avoir un impact non négligeable sur les vitesses d'écoulement, et donc sur les hauteurs d'eau modélisées.

À partir de ces constats, nous avons choisi ici de focaliser l'analyse de sensibilité sur les trois sources d'incertitudes suivantes :

- La donnée topographique, en examinant plus particulièrement l'effet de la résolution et de plusieurs méthodes de ré-échantillonnage du MNT
- Le coefficient de Strickler, en faisant varier les coefficients de façon uniforme puis en distinguant lit mineur et lit majeur.
- Les valeurs de débits estimées et/ou modélisées.

L'analyse a été conduite en reprenant l'étude de cas de la crue de l'Aude d'octobre 2018 présentée au chapitre 5, et en utilisant les mêmes critères d'évaluation : comparaison avec les emprises d'inondation observées, et avec les altitudes des PHE relevées.

### 6.2.2 Principes retenus pour l'analyse de sensibilité aux données topographiques

L'analyse de sensibilité aux données topographiques s'est focalisée sur deux aspects :

- l'influence de la résolution du MNT. Les MNT du RGE Alti de l'IGN sont en effet disponibles aux deux résolutions de 1 m et 5 m. Les évaluations conduites au chapitre 5 ont été réalisées avec une résolution de 5 m. Néanmoins, l'utilisation d'une résolution d'1 m est susceptible de mieux décrire le lit des cours d'eau (notamment le lit mineur et les digues), et est donc susceptible de donner de meilleurs résultats. La réalisation d'un calcul à 1 m permet notamment de vérifier si les débordements importants constatés à quelques endroits peuvent résulter d'une résolution insuffisante, ou ont plutôt d'autres origines, comme par exemple des défauts de la donnée topographique d'origine qui ne représente pas bien les berges des cours d'eau pour les tronçons concernés.
- la méthode de ré-échantillonnage à 5 m du MNT d'origine (RGE Alti à 1 m). Les résultats obtenus dans le chapitre 5 pour le cas de la crue de l'Aude d'octobre 2018 ont été obtenus en utilisant un MNT ré-échantillonné à 5 m en valeurs moyennes. De façon à essayer de mieux représenter les lits mineurs des cours d'eau et les digues, 6 différentes approches de ré-échantillonnage ont été utilisées et comparées, avec pour objectif de reproduire aussi fidèlement que possible le MNT d'origine utilisé (RGE Alti à 1 m) et notamment la topographie locale du lit des cours d'eau. L'objectif principal de cette comparaison, est d'essayer de trouver une méthode de ré-échantillonnage optimale qui permette d'améliorer les résultats de simulation obtenus.

Le MNT utilisé ici correspond à la dernière version du RGEAlti de l'IGN, datant de mai 2021, dont l'acquisition a été faite exclusivement avec la technologie Lidar, et qui permet d'atteindre une précision altimétrique comprise entre 20 cm et 50 cm et une précision planimétrique de 60 cm. Ce MNT est sensiblement différent de celui utilisé dans le chapitre 5, qui correspond à la version du RGE Alti disponible en 2019.

Pour ce qui concerne la sensibilité au ré-échantillonnage à 5 m du MNT d'origine (de résolution 1 m), 6 approches de ré-échantillonnage différentes ont été comparées :

- MNT 1 m ré-échantillonné à 5 m en utilisant l'altitude moyenne des pixels.
- MNT 1 m ré-échantillonné à 5 m en utilisant le minimum dans le lit mineur et la moyenne ailleurs.
- MNT 1 m ré-échantillonné à 5 m en utilisant le minimum dans le lit mineur et le maximum ailleurs.
- MNT 1 m ré-échantillonné à 5 m en utilisant le plus proche voisin. L'affectation par le voisin le plus proche détermine l'emplacement, sur le raster en entrée, de la cellule la plus proche du centre de la cellule de sortie, et attribue la valeur de cette cellule à la cellule de sortie)
- MNT 1 m ré-échantillonné à 5 m en utilisant une interpolation bilinéaire. Cette méthode utilise la valeur des quatre cellules d'entrée les plus proches du centre de la cellule de sortie, pour déterminer la valeur du raster en sortie, qui correspond à la moyenne pondérée de ces quatre valeurs.
- MNT 1 m ré-échantillonné à 5 m en utilisant le minimum dans le lit mineur, le maximum dans un intervalle de 50 mètres autour du lit mineur et là où des digues sont présentes, et le minimum ailleurs.

L'extension des lits mineurs a été délimitée à partir d'un calcul réalisé sur le MNT 1 m avec le modèle caRtino 1D, en injectant un débit qui n'engendre pas de débordement, et qui correspond au débit SHYREG de période de retour 2 ans divisé par deux. La couche obtenue a été utilisée comme masque pour l'identification des pixels du MNT correspondant au lit mineur (figure 6.2).

Concernant la dernière variante de ré-échantillonnage, la couche "LIGNE OROGRAPHIQUE" de la BDTOPO, qui contient les positions des levées et talus (représentées sous forme de polylignes mises en tampon avec un rayon de 2 m, cf. figure 6.2), a été utilisée comme couche masque pour s'assurer de garder la valeur maximale de l'altitude sur les aménagements parallèles aux cours d'eau lors du ré-échantillonnage.

### 6.2.3 Principes retenus pour l'analyse de sensibilité au coefficient de rugosité (Stickler)

Le coefficient de Strickler retenu par défaut avait une valeur de 15 (soit un coefficient de Manning de 0.066) pour la grande majorité des simulations conduites aux chapitres 4 (hors



FIGURE 6.2 – Illustration de l'identification du lit mineur et des digues qui ont servi pour le ré-échantillonnage des MNT et pour la distinction du coefficient de rugosité entre lit mineur et lit majeur

secteur Cévennes) et 5. Cette valeur est notamment celle qui a été utilisée pour la simulation de la crue de l'Aude d'octobre 2018. Des plages de variation du coefficient autour de cette valeur initiale ont été définies ici, avec deux approches différentes :

- en premier lieu, des variations conservant une valeur spatialement homogène du coefficient de rugosité sur tout le domaine de calcul. Trois nouvelles valeurs de Strickler ont été testées ici : 10, 20 et 30. Cette gamme de variation correspond aux valeurs utilisées les plus classiquement en modélisation hydraulique pour représenter les pertes d'énergie par frottement, indépendamment de la zone considérée (lit mineur ou lit majeur).
- dans un deuxième temps, une distinction de la valeur du coefficient de Strickler entre le lit mineur et le lit majeur a été réalisée, en faisant cette fois varier la valeur du coefficient entre 15 et 30 en lit mineur, et entre 10 et 15 en lit majeur. L'objectif était ici de vérifier l'effet de l'intégration de variations spatiales dans la valeur des coefficients. Une fois de plus, les gammes de variation retenues correspondent aux valeurs les plus couramment utilisées en modélisation hydraulique dans le cas des crues soudaines.

Les calculs ont été réalisés dans cette partie à partir du MNT à 5 m obtenu par ré-échantillonnage en moyenne du RGE Alti 1 m de mai 2021. La délimitation du lit mineur a été obtenue selon la même méthode que lors du ré-échantillonnage des MNT : calcul avec le modèle caRtino 1D sur le MNT 1 m, avec un débit faible n'engendrant pas de débordement.

#### 6.2.4 Principes retenus pour l'analyse de sensibilité aux débits

Comme indiqué dans le chapitre 5, les débits de pointe de la crue d'octobre 2018 dans l'Aude ont été estimés à partir de simulations pluie-débit obtenues avec le modèle hydrologique

distribué Cinecar, à partir de données de pluviométriques provenant de la lame d'eau ANTILOPE J+1 de Météo-France. Le modèle Cinecar a été calé sur l'événement d'octobre 2018 en utilisant l'ensemble des observations de débits de pointe disponibles, incluant de nombreuses estimations effectuées sur des sites non jaugés. Ceci a permis de limiter les erreurs sur les débits de pointe utilisés en entrée des simulations hydrauliques. Cependant, les observations qui ont été utilisées sont en grande partie basées sur des enquêtes de terrain post-inondation et peuvent parfois être assorties d'un niveau d'incertitude élevé, comme indiqué par les barres d'erreur figurant dans la figure 5.3. De plus, ces observations sont loin d'être disponibles sur tous les tronçons de cours d'eau considérés dans la modélisation hydraulique. Par conséquent, les débits de pointe simulés obtenus à partir du modèle pluie-débit peuvent localement différer de manière significative des débits réels.

En partant de ce constat, le choix a été fait de faire varier le débit dans la gamme suivante par rapport aux débits initialement injectés dans la modélisation hydraulique : -40 %, -20 %, +20 % et +40 %. La gamme de variation de +20 % correspond à la gamme d'erreurs la plus fréquente entre débits simulés et observés d'après la Figure 5.3. La gamme d'erreurs de +40 % est probablement moins fréquente mais peut être néanmoins atteinte ponctuellement. Une fois de plus, les calculs ont été réalisés ici à partir du MNT à 5 m obtenu par ré-échantillonnage en moyenne du RGE Alti 1 m de mai 2021.

Outre la sensibilité globale du modèle Floodos aux erreurs sur les débits, l'objectif sera ici d'examiner plus spécifiquement l'impact que des variations de débit peuvent avoir sur les zones de forte surestimation ou sous-estimation des étendues d'inondation identifiées dans le chapitre 5.

On peut néanmoins remarquer ici qu'il est assez peu probable que les erreurs sur les débits correspondent à des biais systématiques tels que ceux qui ont été introduits dans l'analyse de sensibilité. Ces erreurs sont plutôt liées à des problèmes localisés, tels que des estimations de débits observés comportant des erreurs importantes, ou bien à un paramétrage inadapté du modèle hydrologique dans les secteurs où aucune observation de débit n'est disponible, ou encore à la répercussion d'une mesure imparfaite de la pluie. Les simulations pluie-débit sont en effet fondées sur des pluies radar Antilope calibrées à partir des mesures pluviométriques disponibles, qui peuvent aussi présenter localement des incertitudes et erreurs importantes, notamment dans les secteurs à faible densité du réseau pluviométrique. Pour cette raison, un dernier cas a été ajouté à l'étude de sensibilité : il correspond à une nouvelle simulation pluie-débit Cinecar, réalisée à partir d'une réanalyse de la lame d'eau Antilope valorisant de nouvelles informations pluviométriques, en particulier des mesures amateurs, et considérée comme plus fiable que la lame d'eau Antilope J+1 initiale (Caumont et al. 2021). Ce nouveau calcul Cinecar est susceptible de corriger certaines erreurs ponctuelles sur les débits injectés dans la modélisation hydraulique, sans pour autant introduire un biais général sur les débits. La figure 6.3 présente une comparaison des débits de pointe obtenus avec les deux lames d'eau. Cette figure indique que les débits les plus forts sont corrigés à la hausse avec la nouvelle lame d'eau Antilope réanalysée, sans toutefois permettre une amélioration systématique des estimations de débits obtenues : certaines sous-estimations semblent corrigées, mais des surestimations semblent également apparaître ponctuellement.

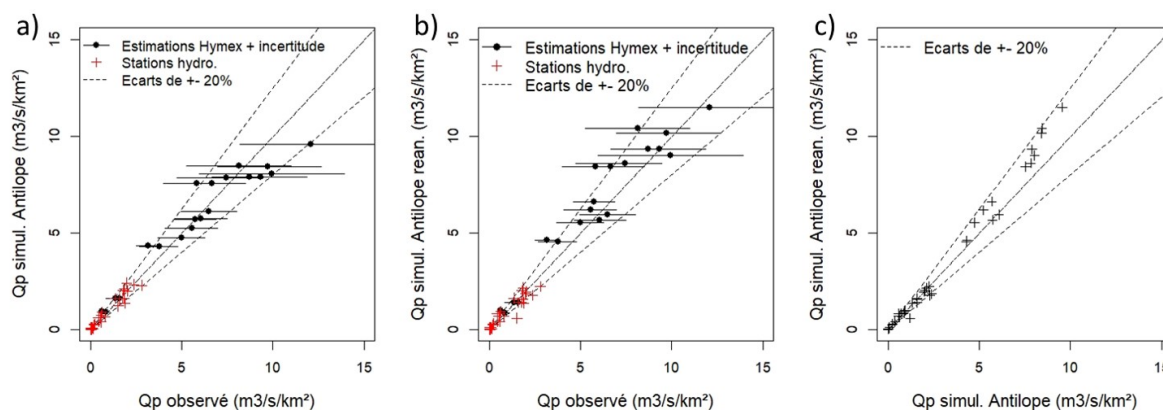


FIGURE 6.3 – *Évaluation des débits de pointe obtenus avec le modèle hydrologique Cinecar pour la crue de l'Aude d'octobre 2018 : a) avec les lames d'eau Antilope J+1, b) avec la lame d'eau Antilope réanalysée (Caumont et al. 2021), c) comparaison des débits pour les deux lames d'eau.*

## 6.3 Résultats de l'analyse de sensibilité

La suite de ce paragraphe présente les résultats de l'analyse de sensibilité conduite pour les crues de l'Aude d'octobre 2018. Les résultats obtenus avec le MNT ré-échantillonné à 5 m en moyenne, et avec un strickler homogène de 15, ont été systématiquement pris pour référence. Ces résultats s'avèrent en effet très proches de ceux obtenus au chapitre 5, bien que le MNT utilisé ici corresponde à une version plus récente du RGE Alti. Dans chaque volet de l'analyse qui suit, la sensibilité sera évaluée en premier lieu du point de vue de la reconstitution des emprises d'inondation (évolution des scores de CSI), puis du point de vue de la précision de l'altitude de la ligne d'eau simulée (comparaison aux altitudes des PHE).

### 6.3.1 Sensibilité aux données topographiques

La figure 6.4 présente une comparaison des scores CSI obtenus à partir du MNT de référence (5 m ré-échantillonné en moyenne) et des MNTs issus d'autres approches de ré-échantillonnage, puis à partir du MNT de résolution 1 m. Globalement, cette figure montre une évolution relativement limitée de scores de CSI obtenus dans tous les cas, avec des évolutions ne dépassant que rarement les 10 points de CSI. Quelques différences de résultats sont néanmoins observées entre les différentes méthodes de ré-échantillonnage considérées.

Les figures 6.4.a et 6.4.b, qui correspondent respectivement au ré-échantillonnage au minimum dans le lit mineur et au maximum ailleurs (min-max), ou au maximum sur les berges et en moyenne ailleurs (min-max-moy), montrent une tendance générale à la dégradation des scores de CSI par rapport au MNT de référence (moy, ré-échantillonné en moyenne partout). Une seule exception est constatée dans le cas du ré-échantillonnage min-max, avec un tronçon de cours d'eau pour lequel le score de CSI augmente de plus de 10 points (figure 6.4.a). Ce cas sera détaillé par la suite (figure 6.6). La figure 6.4.c présente de son côté le cas d'un ré-échantillonnage par le plus proche voisin (ppv). Dans ce cas, les scores de CSI restent très proches de la simulation de référence, ce qui signifie que la méthode de ré-échantillonnage utilisée a très peu d'effet sur l'étendue d'inondation simulée par rapport au ré-échantillonnage en moyenne. Enfin, la figure 6.4.d, présente le cas d'un calcul direct sur le MNT à résolution

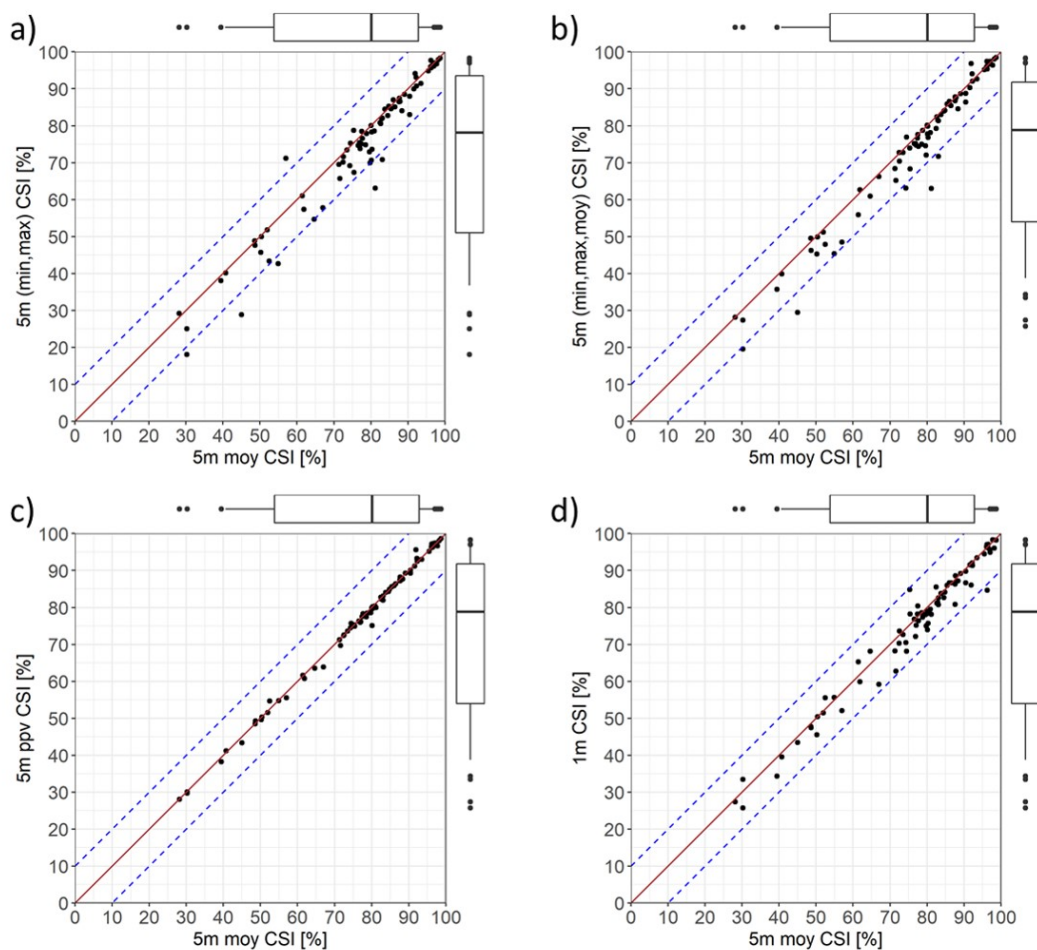


FIGURE 6.4 – *Evaluation comparée des emprises d'inondation simulées (score CSI) pour la crue de l'Aude d'octobre 2018, pour différentes données topographiques d'entrée.*

de 1 m. Dans ce cas, il n'y a pas de tendance générale à l'amélioration ou à la dégradation des résultats. Les deux effets (amélioration ou dégradation) peuvent être constatés selon les tronçons, avec toutefois une différence maximale constatée de 10 points environ sur les scores CSI.

À partir de cette figure 6.4, nous pouvons conclure que la reconstitution des zones inondées reste relativement peu affectée par les modifications introduites dans les données MNT. Aucune amélioration notable des résultats n'est constatée, même en augmentant la résolution du MNT à 1 m. Les modifications introduites dans la méthode de ré-échantillonnage du MNT ont plutôt parfois tendance à dégrader les résultats.

Les résultats de la comparaison aux altitudes des marques de plus hautes eaux (PHEs) sont présentés dans la figure 6.5. Pour le MNT 5 m ré-échantillonné en moyenne (référence), on constate que 70 % des erreurs sont comprises dans l'intervalle  $[-0,8 \text{ m}; +0,5 \text{ m}]$  (boîte), et 90 % des erreurs sont comprises dans l'intervalle  $[-1,3 \text{ m}; +1 \text{ m}]$  (moustache). Ceci représente une légère amélioration par rapport aux résultats obtenus dans le chapitre 5 (voir figure 5.6), qui est certainement due à la qualité du MNT utilisé. En prenant comme référence ce résultat du MNT 5 m ré-échantillonné en moyenne, on remarque une légère évolution à la baisse des hauteurs avec le MNT 5 m ré-échantillonné en min-moy, et une hausse des hauteurs avec

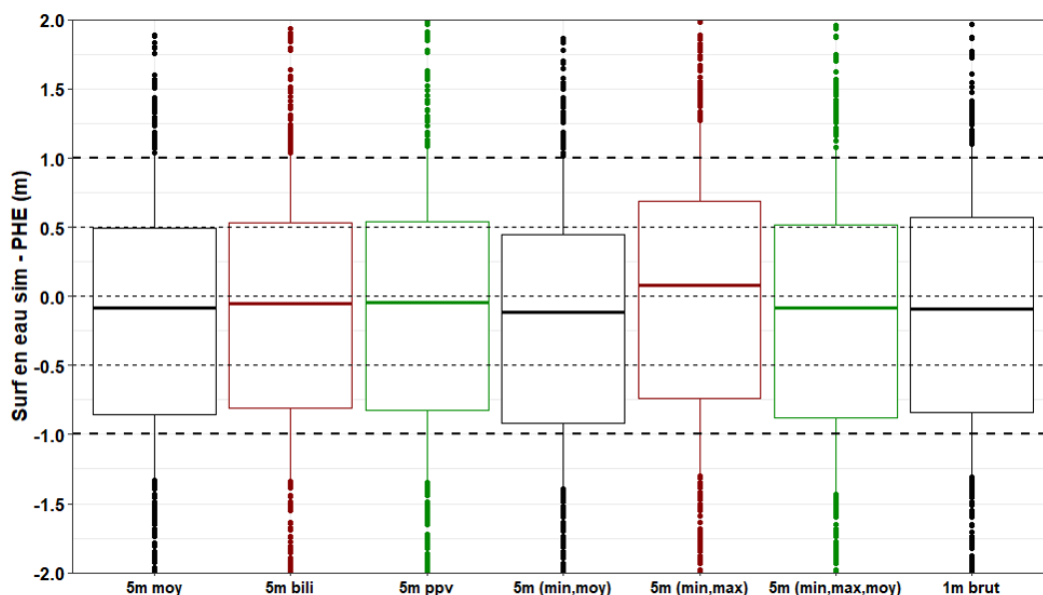


FIGURE 6.5 – Comparasion des altitudes des lignes d'eau simulées avec les relevés PHE, pour les 5 différents MNT utilisés en entrée

le MNT 5 m ré-échantillonné en min-max, ce qui est un résultat cohérent. L'évolution des hauteurs paraît en revanche plus limitée pour les autres méthodes de ré-échantillonnage (bilinéaire, ppv, et min-max- moy), ainsi que dans le cas du MNT de résolution 1 m. Comme dans le cas des étendues inondées, les résultats sont relativement peu affectés par la méthode de ré-échantillonnage utilisée, et ne s'améliorent pas sensiblement, y compris lorsque la résolution de 1 m est utilisée.

La figure 6.6 illustre le cas du tronçon pour lequel l'étendue d'inondation est mieux représentée avec le MNT 5 m ré-échantillonné en min-max, par comparaison au MNT 5 m ré-échantillonné en moyenne (cf. figure 6.4.a, scores CSI respectifs de 71.21 et 56.98). Sur ce tronçon, un large débordement en lit majeur est observé en rive gauche, que la simulation de référence a du mal à simuler sur la partie aval. Au contraire, la simulation obtenue avec le MNT ré-échantillonné en min-max simule une largeur d'inondation beaucoup plus continue et plus conforme à l'observation. Les deux profils tracés à l'amont et l'aval de la zone concernée permettent d'expliquer ce phénomène. Sur le profil amont, on constate une hausse de la ligne d'eau correspondant au MNT min-max, probablement due au fait que ce MNT surestime l'importance des obstacles ou remblais présents dans le lit majeur (voir notamment le point haut présent au milieu du lit majeur). Cette hausse favorise le passage de l'eau sur la rive gauche, ce qui active une bonne partie du lit majeur à l'aval, comme indiqué sur la figure 6.6.c et sur le profil 2 (figure 6.6.d). Dans ce cas particulier, l'amélioration des résultats semble finalement obtenue pour une "mauvaise raison", car le MNT ré-échantillonné en min-max semble plutôt dégrader la représentation de la topographie réelle du site.

On peut finalement conclure que les différentes méthodes de ré-échantillonnage utilisées, ainsi que la diminution à 1m de la résolution du MNT utilisé ici, n'ont pas influé significativement sur les résultats obtenus en termes de reconstitution des hauteurs d'eau et des étendues d'inondation. Les quelques cas où les résultats sont améliorés ne semblent pas nécessairement associés à une meilleure représentation de la géométrie du lit, mais plutôt à une représentation



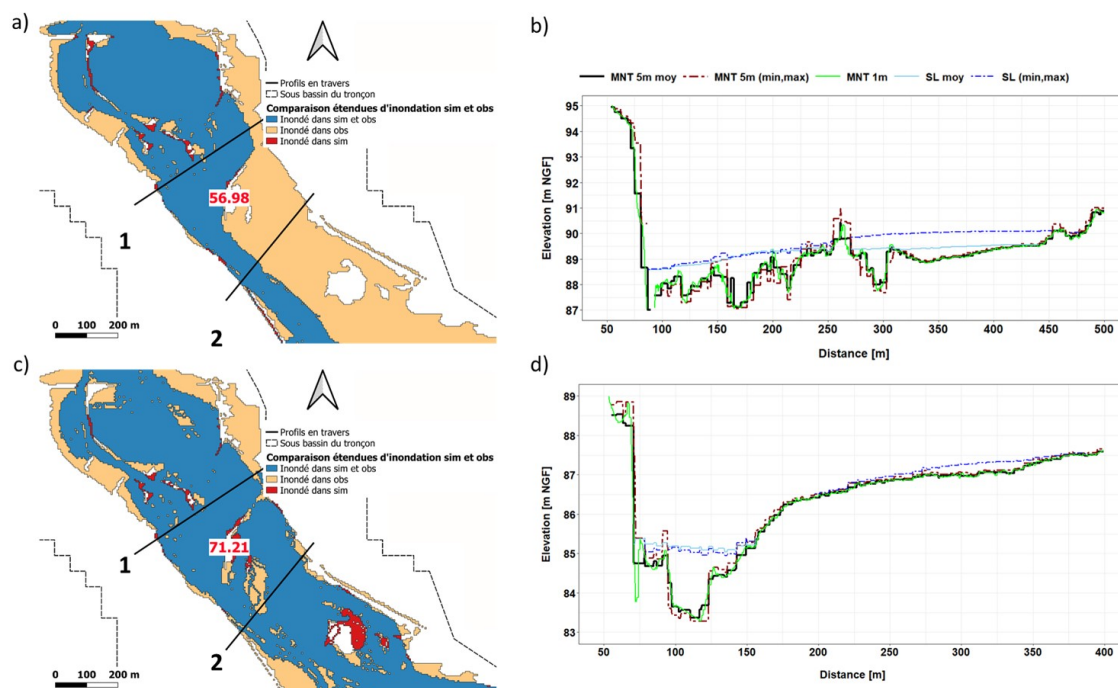


FIGURE 6.6 – Comparaison des profils en travers et des étendues d'inondation obtenus au niveau du tronçon de l'Argent Double à Terssan, avec les MNT 5m moyenne et 5m min-max : a) carte d'évaluation de l'étendue d'inondation pour le MNT 5m moyenne (score CSI en rouge), b) profil en travers 1, c) carte d'évaluation de l'étendue d'inondation pour le MNT 5m min-max (score CSI en rouge), d) profil en travers 2.

dégradée de cette géométrie qui peut aider à compenser d'autres sources d'erreur. De la même façon, le fait que le passage à une résolution de 1 m n'améliore pas de façon systématique les résultats obtenus, peut être lié au fait que dans certains cas, la résolution de 5 m permet de compenser d'autres sources d'erreur. L'effet potentiellement bénéfique d'une augmentation de la résolution du MNT reste donc difficile à confirmer ici.

### 6.3.2 Sensibilité aux variations du coefficient de Strickler

L'analyse conduite ici prend pour référence la simulation obtenue avec le MNT à 5 m ré-échantillonné en moyenne, et avec une valeur de Strickler de 15 appliquée de façon homogène en lit mineur et en lit majeur.

La figure 6.7 présente une comparaison des scores CSI obtenus pour cette simulation de référence, et pour les simulations obtenues en appliquant une variation globale du coefficient de Strickler (Figures 6.7.a et 6.7.b), puis en appliquant des valeurs distinctes entre le lit mineur et le lit majeur (figures 6.7.c et 6.7.d). Les évolutions constatées des scores CSI s'avèrent assez différentes selon les cas.

Sur les figures 6.7.a et 6.7.b, on remarque que l'éloignement de la valeur de référence du coefficient de Strickler (15) a plutôt tendance à dégrader la représentation de l'étendue d'inondation. Ceci est surtout vrai quand on augmente le coefficient de Strickler à une valeur de 20 (figure 6.7.b), ce qui a pour conséquence de diminuer les frottements, d'augmenter les vitesses d'écoulement et donc de diminuer les hauteurs d'eau et réduire l'étendue d'inondation



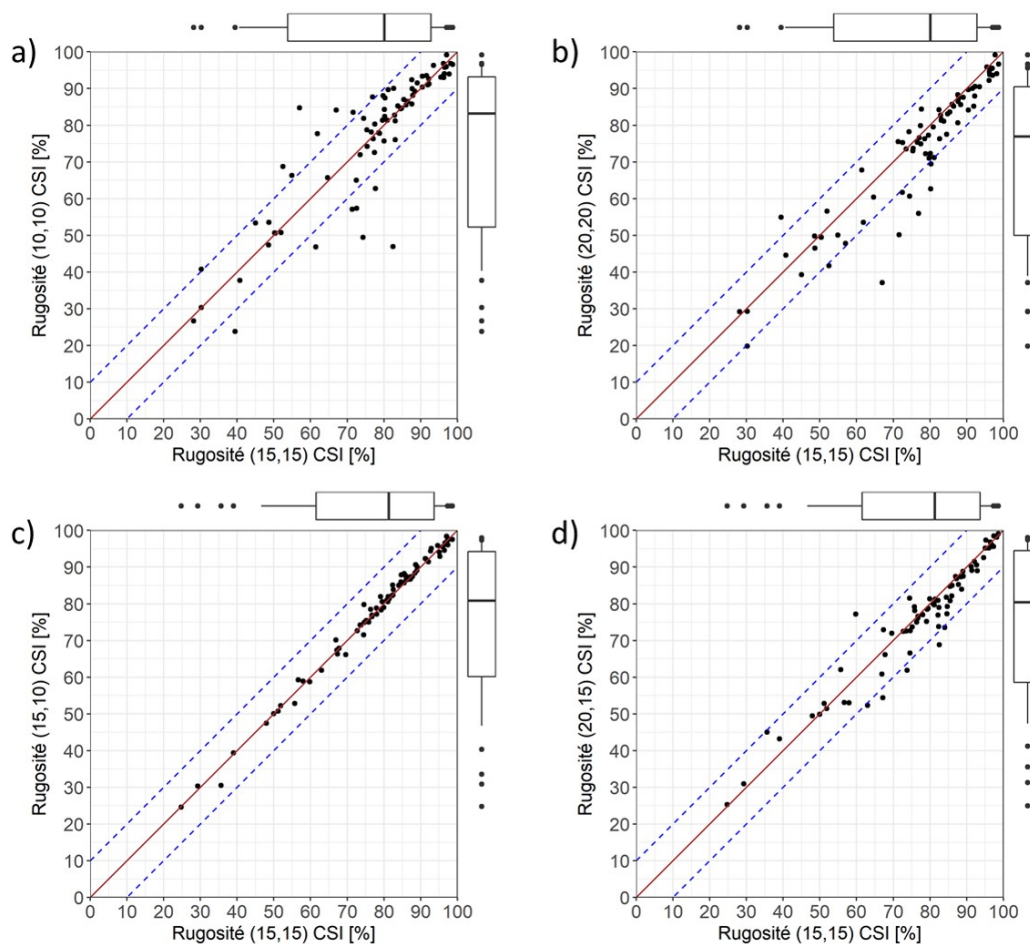


FIGURE 6.7 – Comparaison des évaluations des emprises d'inondation simulées pour la crue de l'Aude d'octobre 2018 (score CSI), pour différentes valeurs de coefficients de Strickler retenues en lit mineur et lit majeur.

simulée. En général, cela conduit à une diminution assez nette des scores de CSI, à l'exception de quelques tronçons isolés. Dans le cas où le coefficient de Strickler est diminué sur tout le domaine (figure 6.7.a), les résultats sont plus contrastés : on constate une augmentation du score CSI sur une dizaine de tronçons, et une diminution sur d'autres. Dans ce cas, la diminution du coefficient de Strickler (passage de 15 à 10) engendre une diminution de la vitesse, ce qui implique une hausse de la ligne d'eau et une augmentation de l'étendue d'inondation simulée. Deux exemples pour lesquels cette hausse se traduit par une amélioration du score de CSI sont présentés sur les figures 6.8 et 6.9. La figure 6.8 représente le cas du pont de Villegailhenc sur le Trapel, qui a été mis en charge et emporté par la crue (cf. figure 5.9.a du chapitre 5). Il a été souligné dans le chapitre 5 que la sous-estimation de l'étendue inondée est due au fait que la mise en charge du pont n'est pas représentée dans le modèle, ce qui conduit à sous-estimer l'effet de remous correspondant (figure 6.8.a). Le fait de diminuer le coefficient de Strickler (figure 6.8.b) compense cet effet en causant une augmentation générale du niveau de la ligne d'eau. Ceci aboutit à une augmentation du score CSI, mais qui est obtenue sans représenter la réalité du phénomène (mise en charge du pont). Le cas représenté dans la figure 6.9 est le même que celui déjà présenté sur la figure 6.6. On remarque ici que la diminution du coefficient de Strickler a un effet similaire à ce qui était obtenu par ré-échantillonnage du

MNT au minimum dans le lit mineur et au maximum ailleurs. Dans les deux cas, l'élévation de la ligne d'eau sur le tronçon cause une activation de la partie gauche du lit majeur. Une valeur de Strickler du lit non représentative semble dans ce cas une explication assez plausible aux erreurs constatées initialement.

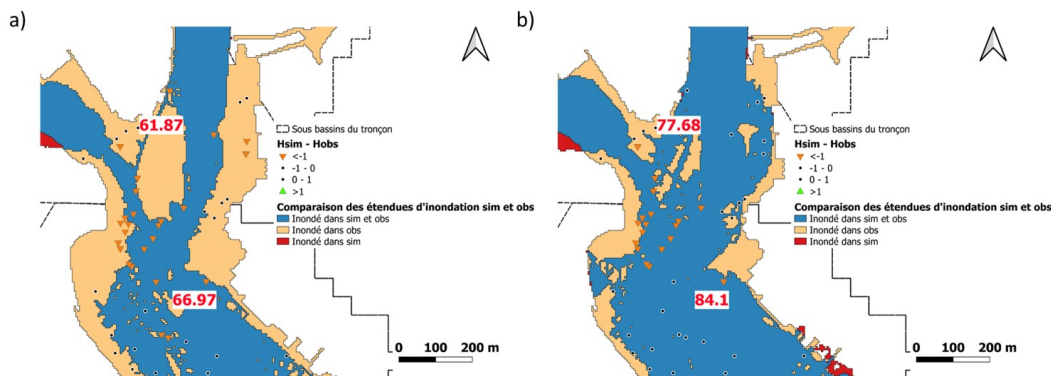


FIGURE 6.8 – Comparaison des étendues d'inondation (scores CSI en rouge) et des hauteurs d'eau au niveau du tronçon du Trapel à Villegailhenc : a) Strickler 15 , b) Strickler 10

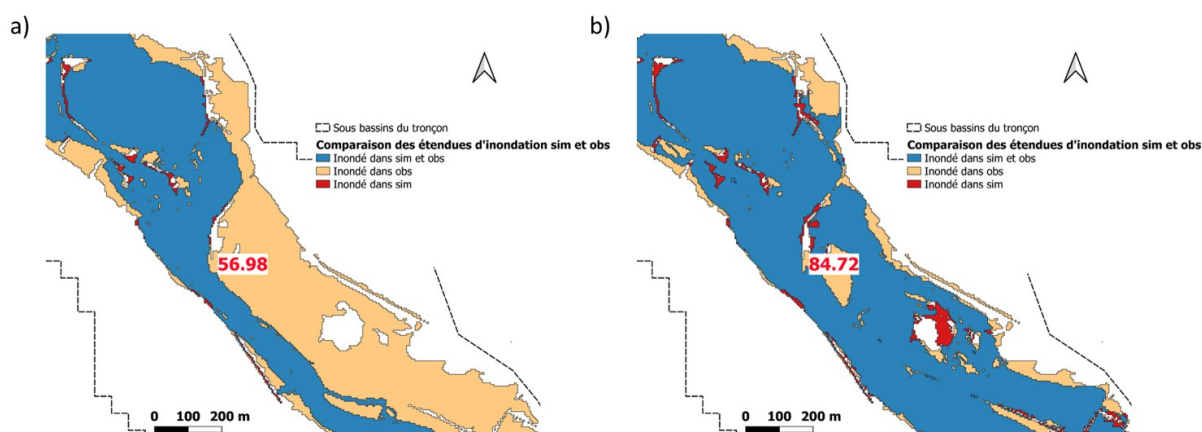


FIGURE 6.9 – Comparaison des étendues d'inondation (score CSI en rouge) au niveau du tronçon de l'Argent Double à Terressan : a) Strickler 15, b) Strickler 10

Sur la figure 6.7.c, qui représente le cas d'un strickler fixé à 15 en lit mineur et diminué à 10 en lit majeur, on constate une très faible évolution des scores de CSI par rapport à la situation de référence (Strickler homogène de 15). À titre de comparaison, la figure 6.7.a (strickler homogène de 10) montrait des évolutions bien plus marquées des scores CSI, ce qui suggère que ces évolutions étaient en grande partie dues à la valeur de 10 attribuée au lit mineur dans ce cas. De la même façon, si l'on augmente à 20 la valeur de Strickler affectée au lit mineur, sans changer la valeur de 15 pour le lit majeur (figure 6.7.d), les scores de CSI sont assez significativement modifiés, à la hausse comme à la baisse. Finalement, il semble que ce soit la valeur du Strickler affectée au lit mineur qui ait le plus d'influence sur les évolutions de la reconstitution des zones inondées. C'est le signe que la majeure partie de l'écoulement (donc du débit), se concentre dans le lit mineur selon les modélisations. En conséquence, les modifications de rugosité du lit majeur ont une moindre influence sur le débit et donc sur la relation hauteur-débit pour les biefs modélisés. Ceci est confirmé dans les figures suivantes.

On peut également retenir de la figure 6.7 que les deux cas montrant les évolutions des CSI

les plus marquées (cas des strickler homogènes de 10 ou 20 présentés sur les figures 6.7.a et b) correspondent aux cas pour lesquels les valeurs de strickler retenues sortent d'une gamme classique de 10 à 15 en lit majeur, et/ou de 15 à 20 en lit mineur. Les évolutions des CSI s'avèrent sensiblement moins marquées tant que l'on reste dans ces fourchettes de valeurs "classiques" (cas de figures 6.7.c et d).

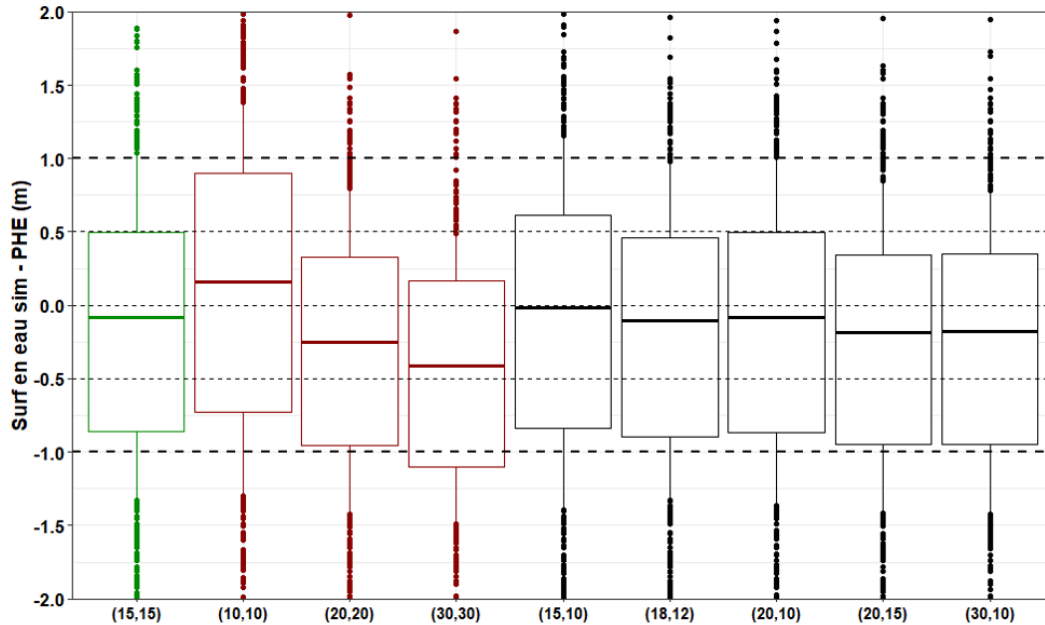


FIGURE 6.10 – Comparaison des évaluations sur les relevés de PHE avec différentes rugosités en entrée

L'évolution des erreurs sur les hauteurs d'eau simulées en fonction des valeurs retenues du coefficient de Strickler est illustrée sur la figure 6.10. Cette figure présente les résultats des comparaisons d'altitudes entre les lignes d'eau simulées et les relevés de plus hautes eaux. Les résultats de référence, obtenus pour un coefficient de Strickler homogène de 15, sont présentés sur la boîte à moustache verte (à gauche de la figure), avec des niveaux d'erreur identiques à ceux déjà présentés sur la figure 6.6. Dans le cas des variations uniformes du coefficient de Strickler (boîtes à moustaches rouges), on constate un biais positif significatif quand on diminue le coefficient de Strickler à une valeur de 10, et un biais négatif important lorsqu'on augmente le Strickler à des valeurs de 20 puis 30.

Pour ce qui concerne les cas où une distinction est introduite entre les lits mineur et majeur (boîtes à moustaches grises), les résultats restent relativement proches de ceux obtenus pour la simulation de référence. On peut noter ici que les valeurs retenues se situent presque toutes dans la gamme de valeurs classiques mentionnées précédemment, à savoir [10-15] en lit majeur, et [15-20] en lit mineur. Seul le dernier cas considéré s'écarte de ces valeurs, avec un Strickler de 30 en lit mineur et de 10 en lit majeur. Dans ce dernier cas, les erreurs sur les hauteurs simulées évoluent peu, probablement par effet de compensation entre les valeurs de Strickler retenues, plutôt forte en lit mineur et faible en lit majeur. Finalement, on peut remarquer sur cette figure 6.10 que les valeurs de Strickler de 15 en lit mineur et de 10 en lit majeur, aboutissent au résultat le plus satisfaisant, car permettant de supprimer le léger biais d'estimation négatif observé sur la simulation de référence.

Des figures 6.7 et 6.10, on peut finalement conclure que les résultats obtenus en termes d'étendue d'inondation ou de hauteurs d'eau simulées, restent relativement similaires pour des valeurs de Strickler situés dans une gamme de 10 à 15 dans le lit majeur, et de 15 à 20 en lit mineur. La diminution de la qualité des résultats s'avère plus nette si l'on s'écarte de ces valeurs. Enfin, dans le cas présenté, c'est le couple de Strickler de 15 en lit mineur et 10 en lit majeur qui semble donner les meilleurs résultats, qui s'avèrent notamment les moins biaisés pour les niveaux d'eau. Ces valeurs peuvent paraître faibles par rapport aux valeurs généralement recommandées pour la modélisation des écoulements à surface libre en rivière (25 à 35 recommandées par (Te Chow 1959)). Ce sont pourtant des valeurs pertinentes dans le cadre des crues exceptionnelles affectant des cours d'eau de taille intermédiaire (jusqu'à plusieurs milliers de  $km^2$  de surface drainée) touchés par des crues soudaines (Lumbroso et Gaume 2012).

### 6.3.3 Sensibilité aux débits

La figure 6.11 présente les évolutions des scores CSI obtenues pour différents niveaux de variation des débits d'entrée. La situation de référence correspond aux débits de la crue d'octobre 2018 reconstitués avec le modèle pluie-débit Cinecar. Ces débits correspondent à ceux déjà utilisés dans le chapitre 5, ainsi que lors de l'analyse de sensibilité aux données topographiques et aux coefficients de Strickler.

Les figures 6.11.a et 6.11.b représentent respectivement les évolutions obtenues pour des variations des débits de +20 % et -20 % par rapport aux débits de référence. Dans le cas d'une augmentation du débit +20 %, on constate une évolution assez modérée des scores CSI avec des écarts ne dépassant que rarement les 10 points, et une distribution des scores globalement proche. Cette relativement faible sensibilité peut s'expliquer par le fait que l'emprise inondée a atteint la limite du lit majeur sur de nombreux tronçons pour cette crue exceptionnelle : une augmentation du débit et des hauteurs d'eau modélisées, ne se traduit alors pas toujours par une extension de la zone inondée. Dans le cas d'une diminution du débit de -20 %, le nuage de points s'avère un peu plus dispersé, et surtout on remarque une légère diminution globale de la distribution des scores CSI, traduisant une reconstitution un peu moins bonne des étendues d'inondation.

Les cas de variations de débits plus importantes (+40 % et -40 %) sont présentés sur les figures 6.11.c et 6.11.d. Dans ces deux cas, les évolutions des scores s'avèrent logiquement plus importantes. Elles se traduisent dans les deux cas par une diminution globale des valeurs de CSI obtenues. Cette diminution est nettement plus importante dans le cas d'une réduction du débit de -40 %. Mais même dans ce cas, on constate que les scores de CSI obtenus peuvent s'avérer ponctuellement améliorés sur certains tronçons, le débit réduit pouvant éventuellement être plus proche du débit de la crue ayant effectivement affecté le tronçon, ou bien la réduction venant compenser d'autres sources d'erreurs. Une illustration de cette situation sera présentée sur la figure 6.14.

Enfin, la figure 6.11.e présente les scores obtenus en remplaçant, dans les simulations pluie-débit, la lame d'eau Antilope J+1 par la lame d'eau Antilope réanalysée par Caumont

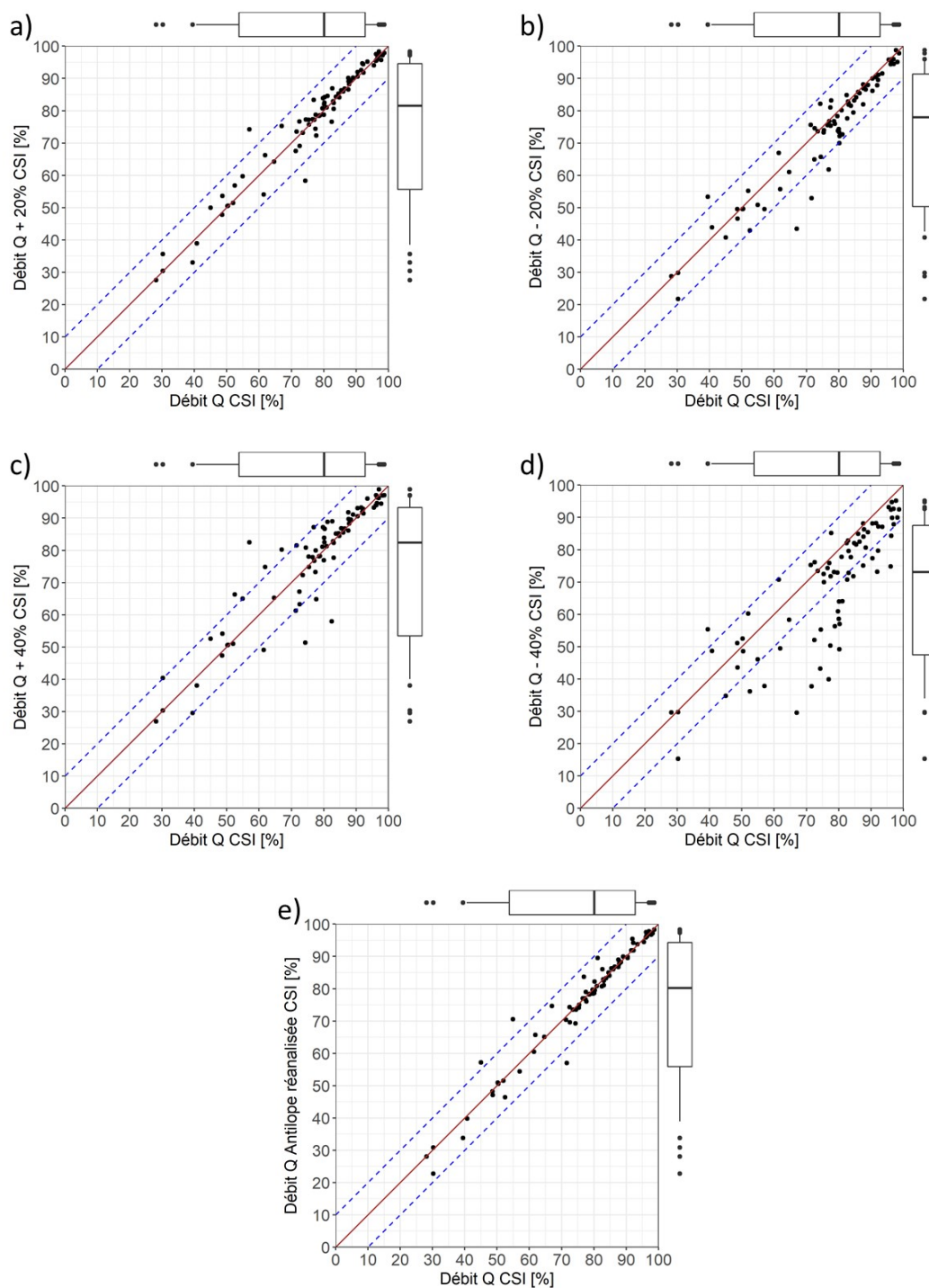


FIGURE 6.11 – Comparaison des évaluations des emprises d'inondation simulées pour la crue de l'Aude d'octobre 2018 (score CSI), pour différentes valeurs des débits d'entrée utilisées dans les modélisations Floodos : a) et b) variations de  $\pm 20\%$  du débit initial  $Q$ , c) et d) variations de  $\pm 40\%$ , et e) utilisation de la lame d'eau Antilope réanalysée.

et al. (2021) en utilisant des enregistrements pluviométriques complémentaires. Comme indiqué précédemment, ceci permet de revoir à la hausse certains débits dans le secteur où les plus fortes réactions hydrologiques ont été observées, sans introduire de biais systématique par rapport aux débits de référence. On constate que les scores de CSI obtenus varient assez peu, la différence étant rarement supérieure à 10 %, et ne sont pas systématiquement

améliorés. Les quelques dégradations constatées peuvent être dues à la surestimation ponctuelle de certains débits, l'introduction de la nouvelle lame d'eau ne garantissant pas une amélioration systématique des débits estimés (cf. figure 6.3). Ces résultats restent finalement assez similaires à ceux obtenus pour une augmentation systématique du débit de 20 %.

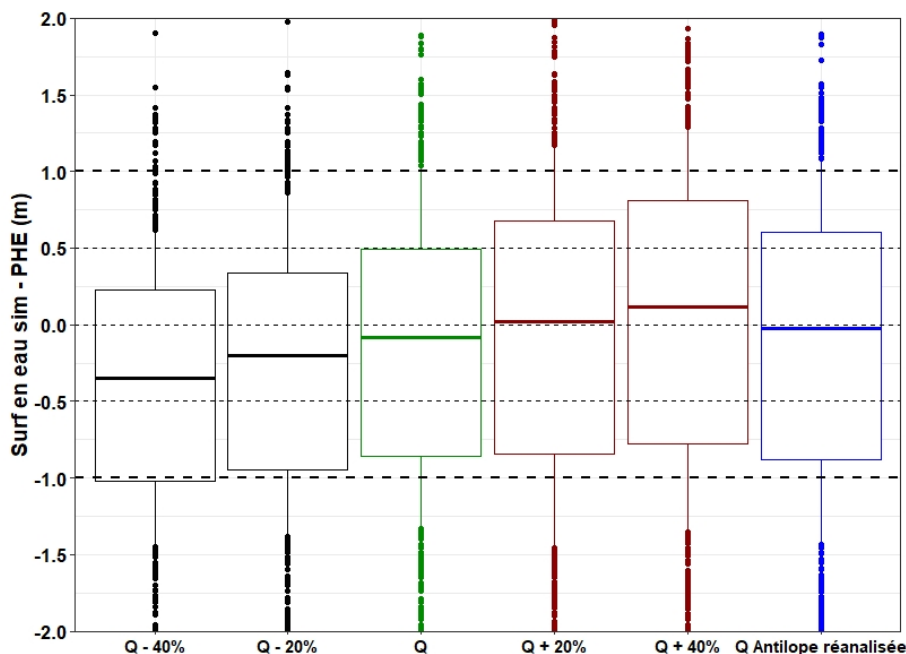


FIGURE 6.12 – Comparaison des évaluations effectuées à partir des relevés de PHE, pour la crue de l'Aude d'octobre 2018, pour différentes variations des débits injectés dans le modèle Floodos

Les variations d'altitude des lignes d'eau simulées résultant des variations de débits de pointe utilisés, sont illustrées sur la figure 6.12, qui présente les résultats des comparaisons aux altitudes des plus hautes eaux relevées sur le terrain. Les erreurs obtenues pour la simulation de référence (boîte à moustache verte) restent identiques à celles présentées aux paragraphes précédents. Les diminutions du débit injecté (boîtes à moustaches grises), se traduisent logiquement par une diminution de l'altitude de la ligne d'eau et des biais négatifs plus importants. Dans le cas d'une augmentation du débit  $Q$  (boîtes à moustaches rouges), l'effet inverse est constaté (élévation de la ligne d'eau). Toutefois, ceci conduit à corriger le léger biais négatif présent dans la simulation de référence, pour une augmentation du débit modérée (+20 %). Une correction équivalente du biais est constatée avec les débits issus de la lame d'eau Antilope réanalysée. On constate néanmoins, dans les deux cas, que bien que le biais soit corrigé, la dispersion des erreurs s'avère plus importante que pour la simulation de référence. L'amélioration des résultats n'est donc que partielle. Une fois de plus, on peut imaginer ici que la correction apparente du biais n'est pas nécessairement liée à une meilleure représentation des débits, mais peut aussi être liée à la compensation d'autres sources d'erreurs. En effet, comme nous l'avons déjà indiqué, la présence d'un biais systématique sur les débits de référence s'avère peu plausible, et l'utilisation de la lame d'eau Antilope réanalysée peut à la fois conduire à corriger certains débits et à en surestimer d'autres.

Les effets de compensation possibles de sources d'erreurs autres que les débits sont illustrés au travers des figures 6.13 et 6.14. La figure 6.13 présente tout d'abord le cas du tronçon de l'Argent-Double, déjà présenté aux paragraphes précédents, et pour lequel l'inondation dans



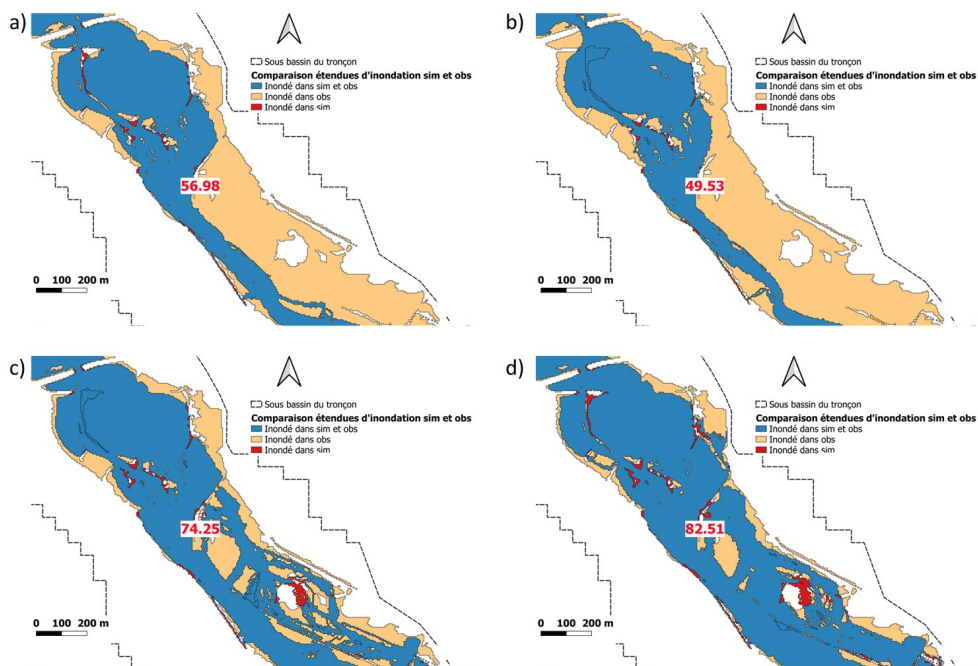


FIGURE 6.13 – Comparaison des étendues d'inondation et des scores de CSI (en rouge) obtenus au niveau du tronçon de l'Argent Double à Terssan : a) débit  $Q$  de référence, b)  $Q-20\%$ , c)  $Q+20\%$  et d)  $Q+40\%$

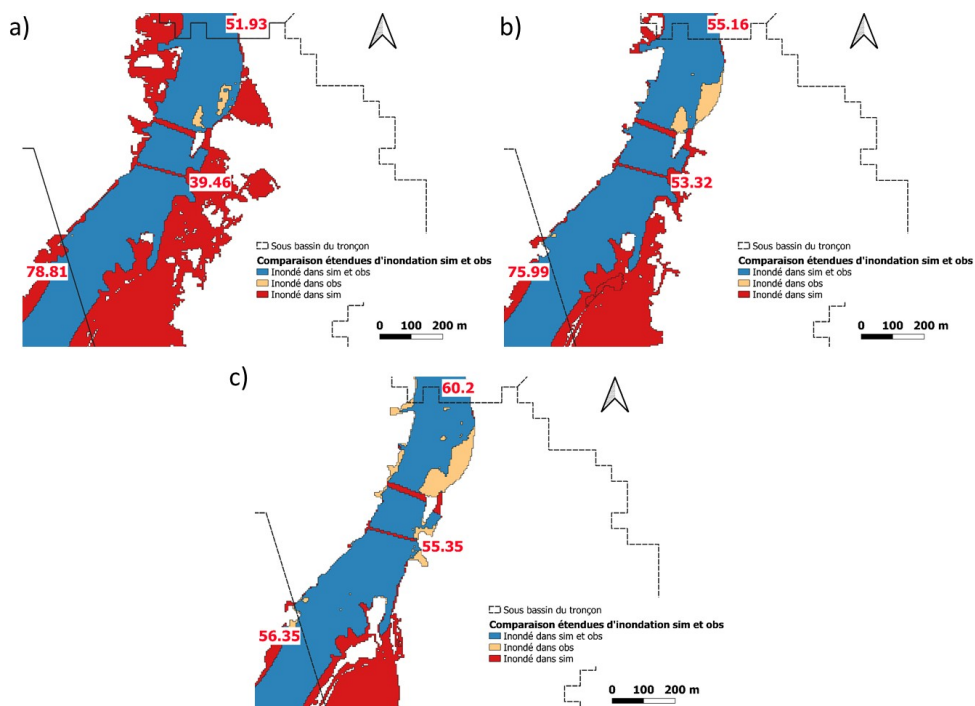


FIGURE 6.14 – Comparaison des étendues d'inondation et des scores de CSI (en rouge) obtenus sur le tronçon de l'Aude sur le vieux pont de Carcassonne : a) débit  $Q$  de référence, b)  $Q-20\%$ , c)  $Q-40\%$

le lit majeur rive gauche est largement sous-estimée dans la simulation de référence. Dans ce cas, une augmentation du débit de  $+40\%$  corrige logiquement l'effet de sous-estimation. Néanmoins, la présence d'une station hydrométrique à l'aval de ce tronçon (station de La Redorte) laisse penser que le débit n'a pas été sous-estimé dans une telle proportion dans la simulation de référence, et que l'amélioration de la reconstitution du champ d'inonda-

tion constatée ici n'est donc pas liée à une meilleure représentation du débit. La figure 6.14 représente de son côté le tronçon de l'Aude au niveau du vieux pont de Carcassonne, où on avait constaté au chapitre 5 un manque de bathymétrie non négligeable, probablement à l'origine de la surestimation de l'inondation sur ce tronçon (cf. figures 5.8.a et 5.8.b). En diminuant le débit, on remarque à nouveau un effet de compensation qui améliore la représentation de la zone inondée à l'amont du pont (figures 6.14.b et 6.14.c). Une fois de plus, cette amélioration n'est pas liée à une meilleure représentation du débit, la présence d'une station hydrométrique à proximité immédiate (station Pont-Vieux de Carcassonne sur l'Aude) permettant ici aussi de confirmer la valeur du débit utilisée dans la simulation de référence.

On peut finalement conclure des résultats présentés sur les figures 6.11 et 6.12 que les résultats des simulations peuvent être largement affectés par des variations de débits importantes ( $\pm 40\%$ ). Dans le cas de variations plus modérées, l'effet négatif est plus difficile à mettre en évidence, les variations de hauteurs d'eau s'avérant plus limitées et pouvant ponctuellement venir compenser les sources d'erreurs autres que les débits.

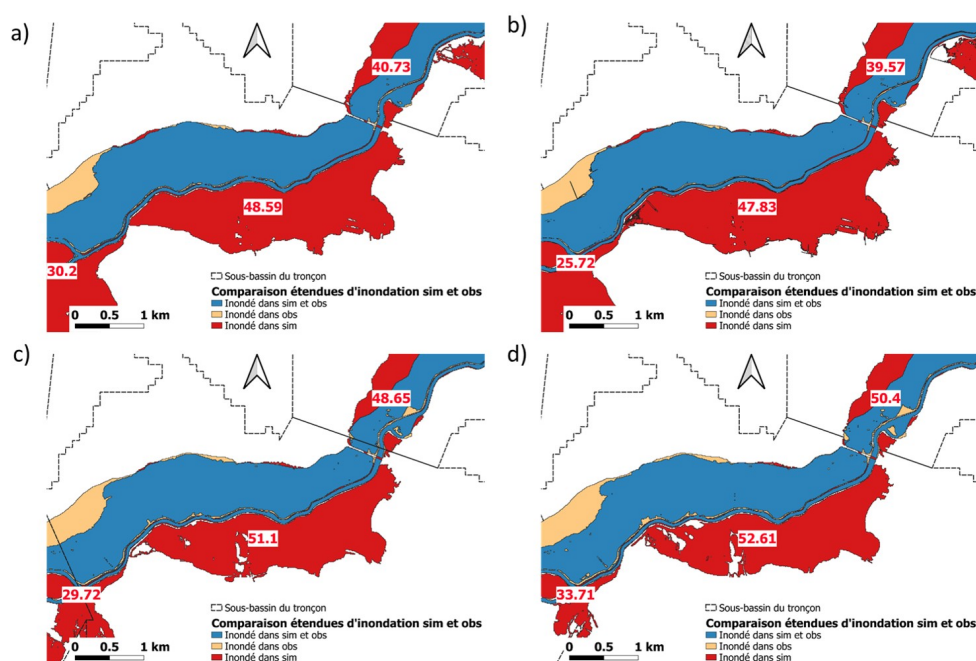


FIGURE 6.15 – Comparaison des étendues d'inondation et scores de CSI (en rouge) obtenus sur le tronçon du Fresquel à Pezens : a) calcul MNT 5m moy, Strickler = 15, b) MNT 1m, c) Q-40 %, d) Strickler = 30



## Synthèse et conclusions

Ce chapitre a permis de réaliser une analyse de sensibilité des résultats de simulation des zones inondées obtenues avec le modèle Floodos 2D. Cette analyse a été conduite en reprenant l'étude de la crue de l'Aude d'octobre 2018. La sensibilité à trois données et paramètres d'entrée du modèle été successivement examinée : la topographie, le coefficient de Strickler et le débit. Pour ce qui concerne la topographie, deux résolutions du MNT ont été comparées (1 m et 5 m), ainsi que six méthodes de ré-échantillonnage pour l'obtention d'un MNT à 5 m de résolution. Concernant le paramètre de rugosité, une variation uniforme du coefficient de Strickler a été appliquée, en conservant dans un premier temps des valeurs spatialement homogènes, puis en introduisant une distinction entre lit mineur et lit majeur. Enfin, pour ce qui concerne les débits, les valeurs des débits de pointe utilisées dans le chapitre 5 ont été modifiées uniformément en appliquant des variations de -40 % à +40 %. Les résultats de ces calculs avec modifications des données ou paramètres d'entrée ont été évalués, à la fois du point de vue de l'étendue d'inondation simulée (comparaison aux étendues d'inondation observées), et en termes d'altitude de la ligne d'eau (comparaison aux altitudes des repères de Plus Hautes Eaux observées).

D'une façon générale, la sensibilité des résultats de simulation aux données topographiques utilisées s'est avérée relativement limitée. L'utilisation d'un MNT de résolution 1 m n'a pas conduit au résultat attendu, à savoir une amélioration de la représentation de l'étendue d'inondation du fait d'une meilleure représentation de la topographie des lits des cours d'eau et des digues. La faible évolution des résultats semble indiquer que l'information topographique à résolution 1 m présente encore certains défauts, ou bien que les améliorations qu'elle apporte restent masquées par d'autres incertitudes (comme par exemple l'absence de bathymétrie). Les différentes méthodes de ré-échantillonnage utilisées pour obtenir le MNT à 5 m ont montré une légère tendance à la dégradation des résultats par rapport au MNT de référence (ré-échantillonnage en moyenne), à la fois en termes d'étendue d'inondation et de hauteurs d'eau. On peut donc conclure de cette étude de sensibilité à la topographie que les traitements simples réalisés ici ne peuvent pas compenser les principales sources d'erreur associées aux données topographiques, et notamment liées à l'absence de relevés bathymétriques. À ce titre, il serait intéressant de tester des méthodes de reconstitution de la bathymétrie, afin d'obtenir une donnée topographique la plus proche possible de la topographie réelle.

Concernant le paramètre de rugosité (coefficient de Strickler), il est constaté que les résultats des simulations évoluent relativement peu pour des valeurs de Strickler comprises entre 15 et 20 en lit mineur, et 10 et 15 en lit majeur, pour les deux aspects évalués (étendue d'inondation et hauteurs d'eau). La sensibilité à la

valeur de Strickler retenue en lit mineur semble néanmoins un peu plus marquée. D'autre part, les résultats sont sensiblement améliorés en utilisant un Strickler de 15 en lit mineur et 10 en lit majeur : ceci a pour effet de corriger le léger biais négatif sur les hauteurs d'eau constaté dans la simulation de référence (Strickler homogène de 15). Ces valeurs de Strickler peuvent paraître faibles pour des hydrauliciens habitués à la modélisation des écoulements en rivières (valeurs de Strickler de 25 à 35 recommandées dans l'Open-channel Hydraulics (Te Chow 1959)). Ce sont pourtant des valeurs pertinentes pour des crues exceptionnelles affectant des cours d'eau de bassins versants de taille intermédiaire (jusqu'à plusieurs milliers de  $km^2$ ), touchés par des crues soudaines (Lumbroso et Gaume 2012). Dès que l'on s'éloigne de la gamme des valeurs précitées (15-20 en lit mineur et 10-15 en lit majeur), les résultats obtenus se dégradent d'ailleurs de façon plus nette. On constate toujours néanmoins quelques améliorations ponctuelles des scores CSI sur certains tronçons, qui sont parfois dues à des effets de compensation d'autres sources d'erreurs (cf. figure 6.8).

La sensibilité aux valeurs de débits apparaît assez nettement, notamment pour des variations de débits dépassant les  $\pm 20\%$ . Une légère amélioration des résultats est constatée lorsque les débits sont augmentés de  $20\%$ , ce qui a pour effet de corriger le biais négatif par rapport aux hauteurs d'eau observées pour la simulation de référence, comme dans le cas des Strickler. Toutefois, des effets de compensation d'autres sources d'erreur sont également observés ici, et sont souvent à l'origine de l'amélioration des scores de CSI obtenues (figures 6.13 et 6.14).

On peut aussi remarquer qu'en raison du caractère exceptionnel de l'événement étudié (débit fort), cette étude ne reflète pas nécessairement la sensibilité globale des résultats de modélisation, qui pourrait s'avérer plus importante pour des crues de débits plus faibles, mobilisant notamment de manière moins importante les lits majeurs. Mais ce qui ressort surtout de cette analyse est le fait que l'ensemble des sources d'incertitudes n'ont probablement pas été prises en compte ici. En effet, si certaines erreurs de modélisation ont pu être corrigées lors de l'analyse de sensibilité, certaines autres (notamment des débordements excessifs) sont restées présentes quelles que soient les variations introduites dans les données et paramètres utilisés. Le cas du Fresquel à Pezens, illustré sur la figure 6.15, constitue une très bonne illustration de ces erreurs subsistantes : toutes les simulations réalisées surestiment largement l'emprise inondée en rive gauche (sud) et aucune ne permet d'expliquer l'inondation observée en rive droite à l'aval du tronçon. Ces imperfections peuvent avoir plusieurs origines : la qualité des données topographiques brutes à 1 m peut s'avérer insuffisante (mauvaise représentation des digues notamment) ; l'absence de représentation de la bathymétrie peut également jouer un rôle important ; et enfin, le fait de réaliser une modélisation en régime permanent peut également conduire à largement surestimer les volumes d'eau débordants.



## Chapitre 7

# Conclusion générale et perspectives

Les crues soudaines génèrent des impacts qui semblent de plus en plus importants en France, plus particulièrement sur les bassins versants méditerranéens, qui ont concentré l'essentiel de ces crues au cours des dernières années. Leurs conséquences dramatiques potentielles, que ce soit en termes de pertes de vies humaines ou de pertes économiques, appellent à améliorer l'anticipation des crues et de leurs impacts, afin de renforcer l'efficacité de la gestion de crise. Ces crues affectent souvent de petits cours d'eau qui ne font pas partie du réseau réglementaire couvert par le dispositif Vigicrues de prévision des crues. Afin de répondre aux besoins de prévisions et d'avertissements pour les crues soudaines, le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Aide à la Prévision des Inondations (SCHAPI) a déployé en 2017 un premier service dédié, nommé Vigicrues Flash. Ce service ne couvre cependant que partiellement le territoire national pour le moment et se limite à l'émission d'avertissements (i.e. risque de dépassement de seuils de débits) et ne propose pas encore de prévisions de débits, voire d'impacts potentiels des crues.

Le projet ANR PICS, dans lequel s'est inscrite cette thèse, s'est fixé pour objectif d'étudier certaines pistes d'amélioration du dispositif Vigicrues Flash, portant d'une part sur l'amélioration de l'anticipation, mais également sur une meilleure représentation des impacts de ces crues soudaines. L'objectif est de fournir aux acteurs impliqués dans la gestion de crise, une idée de l'impact potentiel d'une crue prévue, afin de les aider à prendre les mesures appropriées de préparation et de gestion. On peut dire, en quelque sorte, que le projet PICS prépare, pour les crues soudaines, le déploiement de solutions similaires à celles en cours de mise en œuvre sur le réseau hydrographique réglementaire, au travers de la production et de la publication des cartes de Zones d'Inondation Potentielle (ZIP).

Au sein du projet PICS, cette thèse a permis d'étudier plusieurs approches permettant de simuler les étendues et hauteurs d'inondation engendrées par les crues soudaines. Ces méthodes devaient répondre à deux objectifs principaux qui étaient de produire des résultats rapidement et automatiquement sur de grands territoires à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), tout en limitant la perte en précision par rapport à l'application de modèles calibrés localement par des experts hydrauliciens. Afin de répondre à ces objectifs, trois méthodes automatisées d'un degré de complexité croissant ont été étudiées :

- **HAND/MS** : Cette méthode permet d'estimer une géométrie hydraulique moyenne

pour chaque tronçon de calcul à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), puis de générer une courbe hauteur-débit moyenne du tronçon fondée sur l'application de la formule de Manning/Strickler. La hauteur d'eau donnée par cette courbe permet ensuite de reconstituer très rapidement la zone inondée pour un débit fixé, à partir d'un raster HAND issu du traitement du MNT (Zheng et al. 2018).

- **caRtino 1D** : Cette méthode permet le prétraitement automatisé du MNT, de façon à en extraire la géométrie de profils en travers répartis le long du réseau hydrographique et à construire les fichiers d'entrée d'un modèle hydraulique 1D. Le modèle 1D est ensuite appliqué en régime permanent, pour calculer les lignes d'eau et les champs d'inondation (Pons et al. 2014).
- **Floodos 2D** : Ce modèle résout, avec une approche numérique originale, les équations de Barré de Saint Venant bi-dimensionnelles, en prenant directement appui sur la grille du MNT (Davy et al. 2017). Le calcul est effectué en régime permanent et les termes inertiels des équations de Barré de Saint Venant sont négligés, afin de réduire les temps de calcul.

Ces approches ont été évaluées en deux temps. Tout d'abord, leurs résultats ont été comparés à des simulations expertisées de référence, produites lors de la phase cartographie de la directive européenne inondation, sur les TRI de Nice-Cannes-Mandelieu, de Toulon, d'Est Var et d'Alès. Dans un deuxième temps, les méthodes ont été utilisées pour simuler les étendues d'inondation et les hauteurs d'eau observées pour des crues réelles, à savoir les crues de l'Argens en juin 2010, des Alpes-Maritimes en octobre 2015 et de l'Aude en octobre 2018.

La dernière partie du travail a consisté à réaliser une étude de sensibilité de l'approche Floodos 2D aux différentes sources d'incertitudes identifiées lors des étapes précédentes. Cette analyse a été menée sur le cas de la crue de l'Aude d'octobre 2018.

La suite de ce chapitre reprend dans un premier temps les principaux enseignements tirés de chacune des étapes de ce travail, concernant d'une part les performances des approches hydrauliques automatisées évaluées, et d'autre part l'impact de différentes sources d'incertitude sur les résultats. L'utilité des méthodes évaluées dans un contexte de prévision des crues, ainsi que les pistes et perspectives de travaux futurs, seront évoqués dans un second temps.

## 7.1 Conclusions concernant les performances des méthodes de cartographie étudiées

### Évaluation à partir de simulations de référence expertisées

Cette première étape a permis de comparer les méthodes en ayant une maîtrise complète des données d'entrée et des paramètres des modélisations, qui étaient strictement identiques

entre les simulations de référence et les simulations évaluées. Ceci a permis de tirer de premiers enseignements concernant les sources d'erreur liées à l'automatisation et au degré de simplification des approches de cartographie testées.

La méthode HAND/MS a montré des limites importantes, liées à l'indépendance des résultats produits sur chaque tronçon de cours d'eau, et aux incohérences dans la construction des rasters HAND en présence de lits majeurs très plats, qui conduisent à une reconstitution peu réaliste des profils en travers et à de fortes discontinuités des emprises simulées. La méthode HAND/MS peut finalement conduire à une sous estimation importante de l'étendue d'inondation à l'aval des cours d'eau, dans les secteurs où les lits majeurs sont larges et à faibles pentes. Ces limitations de la méthode HAND/MS avaient encore été peu décrites et documentées jusqu'ici.

L'évaluation des méthodes caRtino et Floodos a montré de très bons résultats pour les débits importants (scénarios moyen et rare de la DI), avec une équivalence globale des résultats obtenus par les deux méthodes, en particulier sur les tronçons de cours d'eau à topographie encaissée et sur les tronçons de cours d'eau ayant des plaines d'inondation peu larges et bien délimitées. La méthode caRtino a néanmoins montré une tendance à la sous-estimation de la largeur des profils en travers, en particulier pour le scénario fréquent (débits faibles), sur les zones présentant un lit majeur large à topographie complexe ou dans les secteurs à pentes faibles. L'intérêt du passage à une approche 2D est apparu dans ces secteurs, où le modèle Floodos présente des résultats plus satisfaisants. Une limite identifiée de l'approche Floodos réside néanmoins dans sa plus grande sensibilité à certains défauts de l'information topographique : lit mineur mal défini et/ou présence d'obstacles artificiels en lit mineur partiellement éliminés dans le MNT (correspondant aux tabliers des ponts ou à des remblais busés par exemple). Un prétraitement rigoureux du MNT s'avère encore plus indispensable pour appliquer cette approche.

La conclusion de cette première étape d'évaluation est que Floodos et caRtino se démarquent nettement par rapport à l'approche HAND/MS, du point de vue de leur capacité à reconstituer les emprises d'inondation de référence.

## Évaluation sur des événements réels

Cette deuxième phase d'évaluation a permis de comparer les méthodes à partir de jeux de données plus riches (emprises et hauteurs d'eau) et en intégrant dans l'évaluation les différentes sources d'incertitudes extérieures aux 3 méthodes évaluées : topographie, débits et paramètre de rugosité des lits mineur et majeur.

Les résultats obtenus ont confirmé la performance nettement supérieure des deux approches caRtino et Floodos basées sur des modèles hydrauliques, performances dans l'ensemble très satisfaisantes compte tenu des nombreuses sources d'incertitudes<sup>1</sup>. L'approche HAND/MS semble sensiblement moins adaptée au contexte des crues éclair étudié ici, toujours pour les raisons déjà évoquées au paragraphe précédent, à savoir le comportement

---

1. Ce résultat en soi est de très bon augure dans la perspective de mise en œuvre d'une prévision des zones inondées par les crues soudaines, qui était une des motivations de la thèse.

inadapté de la méthode qui a tendance à perdre la cohérence des connexions hydrauliques entre lit mineur et lit majeur dans les secteurs à faibles pentes. L'apport du modèle 2D Floodos par rapport à l'approche 1D caRtino est apparu un peu plus nettement dans cette partie, puisque Floodos est le modèle qui a permis la reconstitution la plus précise des hauteurs d'eau sur les études de cas présentées. Ceci est également à relier avec la tendance de l'approche caRtino à sous-estimer la largeur des débordements dans les lits majeurs très larges.

Ces résultats ont également illustré le poids parfois important des sources d'erreur extérieures aux trois méthodes de calcul comparées, occasionnant localement des écarts importants entre les résultats des modélisations et les observations. Un examen détaillé des trois études de cas a permis d'identifier trois sources pour les erreurs les plus importantes : l'absence de bathymétrie dans les MNTs utilisés qui peut être localement pénalisante, la mauvaise représentation du sommet des digues pour la résolution de 5 m utilisée, et l'absence de représentation des remous importants liés à la mise en charge de certains ponts.

### **Analyse de sensibilité aux données et paramètres d'entrée**

Cette troisième étape a permis d'évaluer la sensibilité de la méthode Floodos 2D à différentes sources d'incertitude impactant les simulations dans le cas de crues réelles, à savoir : la précision et la résolution du MNT utilisé, la précision des débits estimés ou prévus, et les valeurs du paramètre de rugosité des lits.

De façon surprenante, la sensibilité des résultats de simulation aux données topographiques utilisées, dans la gamme des résolutions explorée, s'est avérée relativement limitée. L'utilisation d'un MNT de résolution plus fine (1 m), susceptible de mieux représenter la topographie des lits des cours d'eau et des digues, n'a pas conduit à une amélioration visible des résultats. Ceci laisse penser que le MNT à 1 m utilisé présente encore certains défauts, ou que les améliorations qu'il apporte sont masquées par d'autres sources d'incertitudes non corrigées ici, comme l'absence de bathymétrie et donc la définition imparfaite des profils en travers et de la capacité des lits mineurs, qui peut ponctuellement avoir des effets négatifs très visibles (cf. chapitre 5). Les différentes méthodes de ré-échantillonnage testées pour construire le MNT à 5 m à partir du MNT à 1 m, ont de leur côté montré une légère tendance à la dégradation des résultats par rapport au MNT de référence (ré-échantillonné en moyenne). On peut donc conclure de cette analyse que les principales sources d'erreurs, associées aux données topographiques, ne semblent pas uniquement liées à la résolution des MNT. La qualité des informations bathymétriques, et plus généralement la qualité de représentation des lits mineurs et de représentation des digues, restent néanmoins probablement une source d'incertitude importante.

Concernant le paramètre de rugosité (coefficient de Strickler), les performances obtenues ont assez peu varié pour des valeurs de Strickler comprises entre 15 et 20 en lit mineur, et 10 et 15 en lit majeur. En revanche, dès que l'on s'est éloigné de ces valeurs, les résultats obtenus se sont nettement dégradés. La variation de la valeur du Strickler en lit mineur est apparue comme celle influençant le plus les résultats obtenus. Finalement, les meilleurs résultats ont été obtenus pour un Strickler de 15 en lit mineur, et de 10 en lit majeur, soit des valeurs



qui s'éloignent assez fortement des valeurs conventionnelles utilisées pour la modélisation des écoulements à surface libre en rivière, mais qui rejoignent les ordres de grandeur déjà avancés pour le cas de crues exceptionnelles affectant des cours d'eau de taille intermédiaire (Lumbroso et Gaume 2012). D'une certaine manière, ce test de sensibilité contribue à confirmer le choix des valeurs de coefficients de Strickler généralement retenues aujourd'hui pour modéliser ou estimer les débits des crues soudaines exceptionnelles, et plus largement pour vérifier la cohérence d'ensemble des jeux de données disponibles pour ces crues : débits estimés aux stations du réseau hydrométrique, débits estimés à partir de campagnes de terrain post-crues, et cumuls et intensités des pluies.

En ce qui concerne la sensibilité aux valeurs de débits, celle-ci est apparue nettement, notamment pour des variations de débits dépassant les  $\pm 20\%$ . Une légère amélioration des résultats a été constatée lorsque les débits étaient augmentés de  $20\%$ , ce qui a eu pour effet de corriger le biais négatif sur les hauteurs d'eau observé dans la simulation de référence (comme dans le cas des Strickler). Toutefois, des effets assez nets de compensation d'autres sources d'erreur ont été observés ici, et sont probablement souvent à l'origine de cette amélioration des résultats.

On peut également retenir qu'en raison du caractère exceptionnel de l'événement étudié et de l'importance des débits observés et simulés pour de nombreux tronçons de cours d'eau, cette étude ne reflète pas nécessairement la sensibilité globale des résultats de modélisation hydraulique, qui pourrait s'avérer plus importante pour des crues de débits plus faibles. En effet, l'emprise inondée s'étend par exemple dans de nombreux secteurs jusqu'aux limites du lit majeur et ne peut donc plus augmenter. Par ailleurs, l'analyse réalisée n'intègre pas l'ensemble des sources d'erreurs, ce qui est apparu assez nettement dans certains cas où les erreurs de modélisation n'ont pas pu être corrigées. Ces erreurs subsistantes peuvent provenir de plusieurs facteurs comme la qualité des données topographiques et le manque d'information bathymétrique, l'impact local d'embâcles qui se sont constitués au cours de la crue, la sous-estimation ou surestimation locale des pluies et des débits correspondants, notamment dans les secteurs faiblement jaugés et peu couverts par la documentation post-événement. On peut aussi soupçonner que la modélisation en régime permanent qui fait abstraction des délais et volumes de remplissage des lits majeurs, peut, dans certains cas, conduire à largement surestimer les volumes d'eau débordants et les emprises inondées.

## 7.2 Perspectives

### 7.2.1 Comment aller plus loin sur les approches de cartographie automatisée ?

En guise de perspectives directes ouvertes par ce travail, je propose ici quelques points et études qui peuvent être abordés dans un avenir proche de façon à consolider l'expérience déjà acquise sur les méthodes de cartographies évaluées, à tenter d'améliorer leurs performances, et à mieux comprendre leurs comportements dans certains cas complexes.

Ces perspectives concernent en premier lieu les données et paramètres d'entrée des modèles appliqués :

- Tout d'abord, il a été constaté à plusieurs reprises dans ce travail, que l'absence de bathymétrie et les défauts dans la donnée topographique de base, influent fortement sur les résultats de cartographie obtenus. Pour cette raison, des études de cas permettant de disposer de données topographiques et bathymétriques de très haute qualité sont à rechercher. Des relevés Lidar topo/bathymétriques à très haute densité pourraient s'avérer intéressants dans cet objectif. Une fois confirmée l'importance de l'information bathymétrique, des méthodes d'interpolation seront à rechercher de façon à pouvoir reconstituer des profils bathymétriques à partir d'informations très limitées, comme par exemple quelques profils en travers réels des cours d'eau (un en amont et un en aval au minimum). On peut aussi penser à des hypothèses simplificatrices permettant d'inférer le profil en travers du lit mineur avant débordement : creusement éventuel du lit mineur de façon à ce qu'il puisse conduire à minima sans débordement la crue de période de retour 2 ou 5 ans.
- Une deuxième entrée sur laquelle des compléments pourraient s'avérer intéressants est le paramètre de rugosité (coefficient de Strickler). Même si ce coefficient n'est pas apparu comme étant une source d'incertitude majeure, la distinction des deux valeurs en lit mineur et lit majeur a permis d'améliorer sensiblement les résultats de modélisation obtenus. Si chercher à caler des coefficients de Strickler semble peu approprié si l'on souhaite respecter le principe de large automatisation des méthodes, une spatialisation des Strickler en lit majeur pourrait être introduite, avec au minimum une distinction par tronçons, en utilisant par exemple des bases de données de couverture de sols ou des relevés lidar pour caractériser les surfaces. L'impact de la prise en compte des bâtiments pourrait également être abordé, soit en augmentant la rugosité sur les zones urbaines, ou en représentant directement les bâtiments sur le MNT, en utilisant par exemple la couche BD Topo Bâti de l'IGN.

Une deuxième famille de perspectives concerne les simplifications et hypothèses retenues dans l'application des approches de cartographie :

- Il pourrait par exemple être intéressant de pouvoir détecter par des critères objectifs, les secteurs dans lesquels les approches les plus simplifiées de type HAND/MS, risquent de perdre fortement en précision. Cela permettrait une utilisation hiérarchisée des différentes approches de modélisation, de façon à optimiser à la fois le temps de calcul et la précision obtenue.
- Par ailleurs, les calculs effectués étant par ailleurs systématiquement découpés par tronçon de cours d'eau, la précision obtenue dans les secteurs de confluences pourrait être investiguée plus en détails, de façon à s'assurer de l'effet limité de la simplification des conditions aux limites.
- Les effets de la simulation en régime permanent pourraient également être examinés. L'hypothèse de régime permanent est potentiellement à l'origine de certaines erreurs

importantes constatées sur nos études de cas. Une comparaison d'un modèle Saint Venant complet en régime transitoire et permanent, permettrait d'évaluer dans quelle mesure le calcul en régime permanent surestime le volume débordant de la crue, et également d'évaluer dans quelle mesure l'hypothèse de concomitance des pointes sur chaque branche des confluences s'avère pénalisante (hypothèse maximisante).

- Enfin, il s'avèrerait intéressant de réfléchir à une méthode de prise en compte explicite des ouvrages de franchissement (ponts) et de modéliser les conséquences de la création potentielle d'embâcles qui peuvent localement affecter fortement les lignes d'eau et l'extension des zones inondées. Pour rester dans une approche automatisée, la position des ouvrages de franchissement pourraient être explicitement identifiée et un scénario d'embâcle pourrait être proposé, en réduisant par exemple localement le profil en travers en lit mineur.

### 7.2.2 Quel intérêt des méthodes étudiées dans un contexte de prévision des crues soudaines ?

Pour conclure, les résultats obtenus dans cette thèse, et notamment ceux du chapitre 5, illustrent globalement la possibilité de cartographier des emprises inondées potentielles (ZIP) avec une précision raisonnable sur les petits cours d'eau soumis aux crues soudaines. Les approches de cartographie simplifiées et automatisées étudiées ici, basées sur un modèle numérique de terrain, ont en effet montré une capacité intéressante à reproduire des cartes de référence ou des crues réelles. La méthode basée sur le modèle hydraulique 2D Floodos a notamment montré des performances très intéressantes, du fait de sa capacité à s'adapter aux zones à contexte hydraulique complexe, et à reproduire des résultats analogues à une cartographie expertisée dans ces configurations.

Des sources d'incertitudes importantes restent néanmoins observées ponctuellement, mais l'analyse de sensibilité conduite montre que parmi ces incertitudes, celle sur les débits est prépondérante. Dans un contexte de prévision où les erreurs sur les débits peuvent devenir très importantes, il est assez vraisemblable que les erreurs plus spécifiques à la modélisation hydraulique (Strickler, informations bathymétriques et topographiques) ne seront pas déterminantes dans l'incertitude de prévision finale. Dans certains cas, la modélisation hydraulique pourrait même conduire à atténuer les incertitudes relatives aux débits prévus. On peut penser notamment aux très forts débits pour lesquels l'emprise atteint les limites du lit majeur et sera donc assez peu sensible à la valeur exacte du débit.

Les temps de calcul des méthodes évaluées sont par ailleurs raisonnables. Ils n'excèdent pas quelques heures, sans parallélisation, pour représenter plusieurs centaines de kilomètres de linéaire de cours d'eau. Ces temps de calcul semblent donc compatibles avec la génération de scénarios d'inondation couvrant le réseau détaillé de petits cours d'eau en France, éventuellement même en temps réel. À titre d'illustration, un premier calcul de zones inondées a pu être réalisé en 2021 à partir du modèle Floodos, pour huit périodes de retour différentes et sur plus de 20.000 km de cours d'eau autour de l'arc méditerranéen Français (Nicolle et al. 2021).

Les méthodes présentées ici pourraient donc probablement être d'une grande aide pour fournir des scénarios d'inondation réalistes et développer des informations sur les impacts possibles des crues rapides, de façon à soutenir les politiques de gestion des risques de crues rapides (Merz et al. 2020, Ritter et al. 2020). Des travaux supplémentaires restent bien évidemment nécessaires pour intégrer en temps réel ces méthodes ou scénarios dans des chaînes de prévision, et évaluer leurs performances dans ce contexte. La prévision implique notamment des incertitudes sur les débits plus importantes que celles qui ont été considérées ici. Les temps de calcul peuvent aussi constituer un facteur limitant dans un contexte de décision en temps réel. La contrainte des temps de calcul, milite pour générer des catalogues de scénarios d'inondation a priori, au moins dans un premier temps, qui pourront être couplés aux débits prévus et utilisés en temps réel dans des chaînes de prévision, à l'image des ZIP sur le réseau hydrographique réglementaire (Dottori et al. 2017). Ce choix peut notamment aider à représenter les incertitudes sur les débits, en sélectionnant plusieurs scénarios d'inondation possibles (Leedal et al. 2010). Mais des calculs d'inondation effectués en temps réel et en régime transitoire, s'ils s'avèrent réalisables, pourraient également améliorer la représentation des volumes d'inondation, ainsi que la dynamique des inondations au niveau des confluences. Enfin, le délai nécessaire à l'exécution et à la fourniture des prévisions peut également limiter la capacité des services de secours à analyser les prévisions et à adapter leurs stratégies de réponse, par référence aux scénarios d'inondation auxquels ils sont préparés. Un compromis optimal doit donc probablement être trouvé dans le cas des crues rapides entre la précision des prévisions d'inondation fournies, la rapidité de délivrance de ces prévisions, et la préparation en amont des gestionnaires de crise et des services d'intervention à l'exploitation de ces prévisions cartographiques.

# Bibliographie

- Shahab Afshari, Ahmad A. Tavakoly, Mohammad Adnan Rajib, Xing Zheng, Michael L. Folum, Ehsan Omranian, et Balázs M. Fekete. Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. *Journal of Hydrology*, 556 : 539–556, Janvier 2018. ISSN 0022-1694. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417308016>. (Cité page 101.)
- Lorenzo Alfieri, Peter Salamon, Alessandra Bianchi, Jeffrey Neal, Paul Bates, et Luc Feyen. Advances in pan-European flood hazard mapping. *Hydrological Processes*, 28 (13) :4067–4077, 2014. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.9947>. (Cité pages 11, 29, 30, 67 et 101.)
- Anuar Md Ali, Giuliano Di Baldassarre, et Dimitri P. Solomatine. Testing different cross-section spacing in 1D hydraulic modelling : a case study on Johor River, Malaysia. *Hydrological Sciences Journal*, 60(2) :351–360, Décembre 2014. Publisher : Informa UK Limited. (Cité page 104.)
- H. Apel, G. T. Aronica, H. Kreibich, et A. H. Thielen. Flood risk analyses—how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1) :79–98, Avril 2009. ISSN 0921-030X, 1573-0840. URL <http://link.springer.com/10.1007/s11069-008-9277-8>. (Cité page 122.)
- L. Archer, J. C. Neal, P. D. Bates, et J. I. House. Comparing TanDEM-X Data With Frequently Used DEMs for Flood Inundation Modeling. *Water Resour. Res.*, 54(12), Décembre 2018. ISSN 0043-1397, 1944-7973. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018WR023688>. (Cité page 67.)
- P Arnaud, Y Eglin, B Janet, et O Payrastre. Bases de données SHYREG-débit : méthode, performances et limites. Notice utilisateurs. page 36, 2013. (Cité page 75.)
- G. T. Aronica, F. Franza, P. D. Bates, et J. C. Neal. Probabilistic evaluation of flood hazard in urban areas using Monte Carlo simulation : PROBABILISTIC EVALUATION OF FLOOD HAZARD IN URBAN AREAS. *Hydrological Processes*, 26(26) :3962–3972, Décembre 2012. ISSN 08856087. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.8370>. (Cité page 122.)
- Yoann Aubert, Patrick Arnaud, Pierre Ribstein, et Jean-Alain Fine. The SHYREG flow method — application to 1605 basins in metropolitan france. *Hydrological Sciences Journal*, 59 :993–1005, 2014. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667.2014.902061>. (Cité pages 35, 75 et 100.)

- Jean-Louis Ballais, Sylvain Chave, Nadia Dupont, et Éric Masson. LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DE DÉTERMINATION DES ZONES INONDABLES. page 172, 2011. (Cité pages ix et 19.)
- Paul D. Bates, Matthew S. Horritt, et Timothy J. Fewtrell. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1) :33 – 45, 2010. ISSN 0022-1694. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169410001538>. (Cité pages 25, 30 et 104.)
- P.D Bates et A.P.J De Roo. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1-2) :54–77, Septembre 2000. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002216940000278X>. (Cité page 67.)
- Michael Berger. ESA’s sentinel missions in support of Earth system science. *Remote Sensing of Environment*, page 7, 2012. (Cité page 52.)
- Gary W. Brunner. Hec - ras river analysis system hydraulic reference manual version 5.0. software CPD-69, US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC), 609 Second Street, Davis, CA 95616-4687, Février 2016. URL <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS5.0ReferenceManual.pdf>. (Cité page 103.)
- Gary W. Brunner, Alejandro Sanchez, Tom Molls, David Ford, et David A. Parr. Hec-ras verification and validation tests. resreport RD-52, U.S. Army Corps of Engineers, Insitute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 609 Second Street, Davis, CA 95616-4687, 2018. URL [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/RD-52\\_HEC-RASVerificationandValidation.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/RD-52_HEC-RASVerificationandValidation.pdf). (Cité page 103.)
- J. P. L. F. Brêda, R. C. D. Paiva, J. M. Bravo, O. A. Passaia, et D. M. Moreira. Assimilation of Satellite Altimetry Data for Effective River Bathymetry. *Water Resources Research*, 55 (9) :7441–7463, Septembre 2019. Publisher : American Geophysical Union (AGU). (Cité page 100.)
- Xueliang Cai. Living with floods - Household perception and satellite observations in the Barotse floodplain, Zambia. *Physics and Chemistry of the Earth*, page 9, 2017. (Cité page 52.)
- O. Caumont, M. Mandement, F. Bouttier, J. Eeckman, C. Lebeau-pin Brossier, A. Lovat, O. Nuissier, et O. Laurantin. The heavy precipitation event of 14–15 October 2018 in the Aude catchment : a meteorological study based on operational numerical weather prediction systems and standard and personal observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3) :1135–1157, 2021. URL <https://nhess.copernicus.org/articles/21/1135/2021/>. (Cité pages xiii, 127, 128 et 135.)
- Olivier Caumont, Marc Mandement, François Bouttier, Judith Eeckman, Cindy Lebeau-pin Brossier, Alexane Lovat, Olivier Nuissier, et Olivier Laurantin. The heavy precipitation

- event of 14–15 october 2018 in the aude catchment : A meteorological study based on operational numerical weather prediction systems and standard and personal observations. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discussions*, sep 2020. (Cité pages 106 et 116.)
- CCR. Les catastrophes naturelles en France - Bilan 1982-2016 - Catnat. Rapport technique, 2017. URL <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/les-catastrophes-naturelles-en-france-bilan-1982-2016>. (Cité pages 2 et 5.)
- CCR. Les catastrophes naturelles en France - Bilan 1982-2019. Rapport technique, 2020. URL <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/bilan-cat-nat-1982-2019>. (Cité pages viii, 2, 4 et 99.)
- L. Cea et E. Bladé. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51(7) : 5464–5486, 2015. ISSN 1944-7973. URL <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR016547>. (Cité pages 29, 32 et 101.)
- Cerema. Collecte d'informations sur le terrain suite à une inondation, 2016. (Cité pages x, 55 et 56.)
- Jean-Louis Champeaux, Pascale Dupuy, Olivier Laurantin, Isabelle Soulan, Pierre Tabary, et Jean-Michel Soubeyrou. Rainfall measurements and quantitative precipitation estimations at météo-france : inventory and prospects. *La Houille Blanche*, (5) :28–34, oct 2009. (Cité page 108.)
- Chi Chi Choi et Ricardo Mantilla. Development and analysis of gis tools for the automatic implementation of 1d hydraulic models coupled with distributed hydrological models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(12) :06015005, Décembre 2015. URL [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001202](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001202). (Cité pages 29 et 101.)
- Philippe Davy, Thomas Croissant, et Dimitri Lague. 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(8) :1491–1512, 2017. ISSN 2169-9011. URL <http://dx.doi.org/10.1002/2016JF004156>. (Cité pages x, xiv, 29, 32, 36, 46, 47, 48, 101, 104, 105, 144, 171 et 172.)
- DDTM de l'Aude. Plan de Prévention des Risques d'Inondation - Bassin versant de la Haute Vallée de l'Aude - CARTE DES ALEAS - Commune de LIMOUX 2, 2016. (Cité pages xi et 62.)
- G.A.M. de Almeida, P. Bates, et H. Ozdemir. Modelling urban floods at submetre resolution : challenges or opportunities for flood risk management ? : Modelling urban floods at submetre resolution. *Journal of Flood Risk Management*, 11 :S855–S865, Février 2018. ISSN 1753318X. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/jfr3.12276>. (Cité page 11.)
- Samuel Debionne, Isabelle Ruin, Saif Shabou, Céline Lutoff, et Jean-Dominique Creutin. Assessment of commuters' daily exposure to flash flooding over the roads of the gard region, france. *Journal of Hydrology*, 541 :636–648, oct 2016. (Cité page 57.)

- Virginie Delorme-Laurent et Jean-Louis Ballais. Les problèmes de la détermination de la limite externe de la zone inondable dans le midi méditerranéen français (Problems of the determination of the external limit of the flood zone in the mediterranean french "midi"). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 83(4) :469–476, 2006. ISSN 0004-5322. URL [https://www.persee.fr/doc/bagf\\_0004-5322\\_2006\\_num\\_83\\_4\\_2532](https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_2006_num_83_4_2532). (Cité pages ix et 19.)
- DGPR. Première évaluation nationale des risques d'inondation Principaux résultats - EPRI 2011, 2012. URL [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/EPRI-Principaux-resultats\\_120712.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/EPRI-Principaux-resultats_120712.pdf). (Cité pages 9 et 63.)
- DGPR. Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation, 2014. (Cité page 63.)
- DGPR. Prévion des Inondations- Principes de production des scénarios d'inondation. page 45, 2017. (Cité page 7.)
- M. Diakakis, G. Deligiannakis, Z. Antoniadis, M. Melaki, N.K. Katsetsiadou, E. Andreadakis, N.I. Spyrou, et M. Gogou. Proposal of a flash flood impact severity scale for the classification and mapping of flash flood impacts. *Journal of Hydrology*, 590 :125452, nov 2020. (Cité pages xi, 57 et 60.)
- A. Domeneghetti, A. Castellarin, et A. Brath. Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4) :1191–1202, Avril 2012. ISSN 1607-7938. URL <https://hess.copernicus.org/articles/16/1191/2012/>. (Cité page 122.)
- F. Dottori, G. Di Baldassarre, et E. Todini. Detailed data is welcome, but with a pinch of salt : Accuracy, precision, and uncertainty in flood inundation modeling. *Water Resources Research*, 49(9) :6079–6085, Septembre 2013. Publisher : American Geophysical Union (AGU). (Cité page 118.)
- Francesco Dottori, Milan Kalas, Peter Salamon, Alessandra Bianchi, Lorenzo Alfieri, et Luc Feyen. An operational procedure for rapid flood risk assessment in europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(7) :1111–1126, jul 2017. (Cité pages 11, 31, 100, 118 et 150.)
- Francesco Dottori, Peter Salamon, Alessandra Bianchi, Lorenzo Alfieri, Feyera Aga Hirpa, et Luc Feyen. Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources*, 94(Supplement C) :87–102, Août 2016. ISSN 0309-1708. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170816301257>. (Cité pages ix, 10, 11, 26, 29, 31, 32, 66, 67, 101 et 118.)
- DREAL Languedoc Roussillon. Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) d'ALES - Débordement de cours d'eau – la Cèze et les Gardons - Cartes de synthèse. Rapport technique, 2013. (Cité pages xi et 64.)
- DREAL PACA. Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) de NICE – CANNES - MANDELIEU - Cartes de synthèse des surfaces inondables Débordements de cours d'eau. Rapport technique, Septembre 2013. (Cité pages xi et 76.)



- Veronique Ducrocq, Brice Boudevillain, Christophe Bouvier, Isabelle Braud, Nadia Fourri, Cindy Lebeau-pin-Brossier, Pierre Javelle, Olivier Nuissier, Olivier Payraastre, Helene Roux, Isabelle Ruin, et Beatrice Vincendon. HyMeX - Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation and flash floods in the Mediterranean. *HOUILLE BLANCHE-REVUE INTERNATIONALE DE L EAU*, (3-4) :5–12, NOV 13 2019. ISSN 0018-6368. (Cité page 105.)
- N. V. Dung, B. Merz, A. Bárdossy, T. D. Thang, et H. Apel. Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4) :1339–1354, Avril 2011. ISSN 1607-7938. URL <https://hess.copernicus.org/articles/15/1339/2011/>. (Cité page 122.)
- Ismail Elkharchy. Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools : A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, page 18, 2015. (Cité page 52.)
- Ye Fan, Yan Liu, Shaowen Wang, David Tarboton, Ahmet Yildirim, et Nancy Wilkins-Diehr. Accelerating TauDEM as a Scalable Hydrological Terrain Analysis Service on XSEDE. Dans *Proceedings of the 2014 Annual Conference on Extreme Science and Engineering Discovery Environment - XSEDE '14*, pages 1–2, Atlanta, GA, USA, 2014. ACM Press. ISBN 978-1-4503-2893-7. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2616498.2616510>. (Cité page 39.)
- T. J. Fewtrell, P. D. Bates, M. Horritt, et N. M. Hunter. Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments. *Hydrological Processes*, 22(26) :5107–5118, Décembre 2008. ISSN 08856087, 10991085. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.7148>. (Cité page 122.)
- Ayan Fleischmann, Rodrigo Paiva, et Walter Collischonn. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *Journal of Hydrology X*, 3 :100027, Avril 2019. ISSN 25899155. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589915519300112>. (Cité pages 29, 67, 84 et 101.)
- Michael L. Follum, Ahmad A. Tavakoly, Jeffrey D. Niemann, et Alan D. Snow. 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 (2) :280–299, 2017. ISSN 1093474X. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/1752-1688.12476>. (Cité pages ix, 28 et 101.)
- Michael L. Follum, Ricardo Vera, Ahmad A. Tavakoly, et Joseph L. Gutenson. Improved accuracy and efficiency of flood inundation mapping of low-, medium-, and high-flow events using the AutoRoute model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2) :625–641, feb 2020. (Cité pages 28 et 101.)
- Orlando García-Feal, José González-Cao, Moncho Gómez-Gesteira, Luis Cea, M. José Domínguez, et Arno Formella. An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on Iber. *Water*, 10(10), 2018. ISSN 2073-4441. (Cité pages 32 et 101.)

- Irene Garousi-Nejad, David G. Tarboton, Mahyar Aboutalebi, et Alfonso F. Torres-Rua. Terrain analysis enhancements to the height above nearest drainage flood inundation mapping method. *Water Resources Research*, 55(10) :7983–8009, oct 2019. (Cité pages 28 et 101.)
- J. Garrote, F.M. Alvarenga, et A. Díez-Herrero. Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology*, 541 :611–625, Octobre 2016. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169416300312>. (Cité pages viii, 11 et 12.)
- Eric Gaume, Valerie Bain, Pietro Bernardara, Olivier Newinger, Mihai Barbus, Allen Bateman, Lotta Blaškovičová, Günter Blöschl, Marco Borga, Alexandru Dumitrescu, Ioannis Daliakopoulos, Joachim Garcia, Anisoara Irimescu, Silvia Kohnova, Aristeidis Koutroulis, Lorenzo Marchi, Simona Matreata, Vicente Medina, Emanuele Preciso, Daniel Sempere-Torres, Gheorghe Stancalie, Jan Szolgay, Ioannis Tsanis, David Velasco, et Alberto Viglione. A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1-2) : 70–78, Mars 2009. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409000079>. (Cité pages 3 et 4.)
- Eric Gaume, Marco Borga, Maria Carmen Llassat, Said Maouche, Michel Lang, et Michalis Diakakis. Mediterranean extreme floods and flash floods. *flash floods*, page 10, 2016. (Cité pages viii, 4 et 5.)
- Eric Gaume, Marc Livet, Michel Desbordes, et J.-P. Villeneuve. Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology*, 286 (1-4) :135–154, Janvier 2004. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169403003780>. (Cité page 34.)
- Pierre Brigode Olivier Delestre Geoffroy Kirstetter, François Bourgin. Real-time inundation mapping with a 2d hydraulic modelling tool based on adaptive grid refinement : The case of the october 2015 french riviera flood. *HAL*, 2020. (Cité page 25.)
- Konstantine P. Georgakakos. Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 317(1-2) :81–103, Février 2006. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169405002623>. (Cité page 7.)
- Colin J. Gleason et Laurence C. Smith. Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(13) :4788–4791, Mars 2014. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences. (Cité page 100.)
- Jonathan J. Gourley, Zachary L. Flamig, Humberto Vergara, Pierre-Emmanuel Kirstetter, Robert A. Clark, Elizabeth Argyle, Ami Arthur, Steven Martinaitis, Galateia Terti, Jessica M. Erlingis, Yang Hong, et Kenneth W. Howard. The FLASH Project : Improving the Tools for Flash Flood Monitoring and Prediction across the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(2) :361–372, Février 2017. ISSN 0003-0007, 1520-0477. URL <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-15-00247.1>. (Cité page 7.)

- Nicole Goutal, J-M Lacombe, F Zaoui, et K El-Kadi-Abderrezzak. MASCARET : a 1-D open-source software for flow hydrodynamic and water quality in open channel networks. *River Flow 2012 – Murillo (Ed.)*, pages 1169–1174, 2012. (Cité pages 35 et 103.)
- S. Grimaldi, Y. Li, J. P. Walker, et V. R. N. Pauwels. Effective Representation of River Geometry in Hydraulic Flood Forecast Models. *Water Resources Research*, 54(2) :1031–1057, Février 2018. Publisher : American Geophysical Union (AGU). (Cité page 100.)
- J.W. Hall, S. Tarantola, P.D. Bates, et M.S. Horritt. Distributed sensitivity analysis of flood inundation model calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2) :117–126, Février 2005. URL [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:2\(117\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(117)). (Cité page 122.)
- Matthew C Hansen. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, page 9, 2012. (Cité page 52.)
- Yukiko Hirabayashi, Roobavannan Mahendran, Sujan Koirala, Lisako Konoshima, Dai Yamazaki, Satoshi Watanabe, Hyungjun Kim, et Shinjiro Kanae. Global flood risk under climate change. *Nature Clim Change*, 3(9) :816–821, Septembre 2013. ISSN 1758-678X, 1758-6798. URL <http://www.nature.com/articles/nclimate1911>. (Cité pages 11 et 30.)
- Nabil Hocini, Olivier Payrastre, François Bourgin, Eric Gaume, Philippe Davy, Dimitri Lague, Lea Poinçon, et Frederic Pons. Performance of automated methods for flash flood inundation mapping : a comparison of a digital terrain model (DTM) filling and two hydrodynamic methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6) :2979–2995, Juin 2021. ISSN 1607-7938. URL <https://hess.copernicus.org/articles/25/2979/2021/>. (Cité pages 97, 98 et 110.)
- M.S. Horritt et P.D. Bates. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1-4) :87–99, Novembre 2002. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002216940200121X>. (Cité pages ix, 25 et 55.)
- N. M. Hunter, P. D. Bates, M. S. Horritt, A. P. J. De Roo, et M. G. F. Werner. Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(4) :412–430, Octobre 2005. ISSN 1607-7938. URL <https://hess.copernicus.org/articles/9/412/2005/>. (Cité page 122.)
- HydrologicEngineeringCenter. *HEC-RAS Hydraulic manual reference*. Manual (USArmy-CorpssofEngineers2020)US Army Corps of Engineers, Décembre 2020. (Cité page 23.)
- Keighobad Jafarzaghan, Venkatesh Merwade, et Siddharth Saksena. A geomorphic approach to 100-year floodplain mapping for the Conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 561 :43–58, Juin 2018. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169418302336>. (Cité page 27.)
- J. Michael Johnson, Dinuke Munasinghe, Damilola Eyelade, et Sagy Cohen. An integrated evaluation of the national water model (NWM)–height above nearest drainage (HAND)

- flood mapping methodology. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11) :2405–2420, nov 2019. (Cité pages 28, 42, 101 et 103.)
- C O Justice, E Vermote, J R G Townshend, R Defries, D P Roy, D K Hall, V V Salomonson, J L Privette, G Riggs, A Strahler, W Lucht, R B Myneni, Y Knyazikhin, S W Running, R R Nemani, Zhengming Wan, et A R Huete. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) : land remote sensing for global change research. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 36(4) :22, 1998. (Cité page 53.)
- Geoffroy Kirstetter, Olivier Delestre, Pierre-Yves Lagrée, Stéphane Popinet, et Christophe Jossierand. B-flood 1.0 : an open-source Saint-Venant model for flash flood simulation using adaptive refinement. *Geoscientific Model Development Discussions*, Mars 2021. Publisher : Copernicus GmbH. (Cité page 101.)
- Dimitri Lague et Baptiste Feldmann. Topo-bathymetric airborne LiDAR for fluvial-geomorphology analysis. Dans *Developments in Earth Surface Processes*, pages 25–54. Elsevier, 2020. (Cité page 118.)
- P. Laiolo, S. Gabellani, N. Reborà, R. Rudari, L. Ferraris, S. Ratto, H. Stevenin, et M. Cauduro. Validation of the flood-proofs probabilistic forecasting system. *Hydrological Processes*, 28(9) :3466–3481, 2014. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.9888>. (Cité page 8.)
- Niraj Lamichhane et Suresh Sharma. Effect of input data in hydraulic modeling for flood warning systems. *Hydrological Sciences Journal*, 63(6) :938–956, 2018. ISSN 0262-6667, 2150-3435. URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2018.1464166>. (Cité pages 29, 100 et 101.)
- Guillaume Le Bihan. *Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides : vers une estimation des impacts et des dommages potentiels*. phdthesis, Université de Nantes, 2016. (Cité pages viii, 11, 12 et 13.)
- Guillaume Le Bihan, Olivier Payraastre, Eric Gaume, David Moncoulon, et Frédéric Pons. 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(11) :5911–5928, 2017. ISSN 1607-7938. URL <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/5911/2017/>. (Cité pages x, xi, 29, 34, 35, 36, 42, 46, 55, 58, 62, 67, 101 et 104.)
- D. Leedal, J. Neal, K. Beven, P. Young, et P. Bates. Visualization approaches for communicating real-time flood forecasting level and inundation information. *Journal of Flood Risk Management*, 3(2) :140–150, Mars 2010. Publisher : Wiley. (Cité pages 118 et 150.)
- Liu Yan Y., Maidment David R., Tarboton David G., Zheng Xing, et Wang Shaowen. A CyberGIS Integration and Computation Framework for High-Resolution Continental-Scale Flood Inundation Mapping. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 0(0), Juin 2018. ISSN 1093-474X. URL <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12660>. (Cité pages 11, 28, 31, 101 et 103.)

- Darren Lumbroso et Eric Gaume. Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 414 :16–30, JAN 11 2012. ISSN 0022-1694. (Cité pages 108, 135, 141 et 147.)
- Salvatore Manfreda, Fernando Nardi, Caterina Samela, Salvatore Grimaldi, Angela Celeste Taramasso, Giorgio Roth, et Aurelia Sole. Investigation on the use of geomorphic approaches for the delineation of flood prone areas. *Journal of Hydrology*, 517 :863–876, sep 2014. (Cité page 27.)
- Salvatore Manfreda et Caterina Samela. A digital elevation model based method for a rapid estimation of flood inundation depth. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S1), apr 2019. (Cité page 27.)
- Salvatore Manfreda, Caterina Samela, Andrea Gioia, Giuseppe Gerardo Consoli, Vito Iacobellis, Luciana Giuzio, Andrea Cantisani, et Aurelia Sole. Flood-prone areas assessment using linear binary classifiers based on flood maps obtained from 1d and 2d hydraulic models. *Natural Hazards*, 79(2) :735–754, jun 2015. (Cité page 27.)
- Agostino Manzato. An Odds Ratio Parameterization for ROC Diagram and Skill Score Indices. *Weather and Forecasting*, 20(6) :918–930, Décembre 2005. ISSN 1520-0434, 0882-8156. URL <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/WAF899.1>. (Cité page 67.)
- Bruno Merz, Christian Kuhlicke, Michael Kunz, Massimiliano Pittore, Andrey Babeyko, David N. Bresch, Daniela I. V. Domeisen, Frauke Feser, Inga Koszalka, Heidi Kreibich, Florian Pantillon, Stefano Parolai, Joaquim G. Pinto, Heinz Jürgen Punge, Eleonora Rivalta, Kai Schröter, Karen Strehlow, Ralf Weisse, et Andreas Wurpts. Impact forecasting to support emergency management of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, 58(4), oct 2020. (Cité pages 118 et 150.)
- Theresa M Modrick, Rochelle Graham, Eylon Shamir, Robert Jubach, Cristopher R Spencer, Jason A Sperflage, et Konstantine P Georgakakos. Operational Flash Flood Warning Systems with Global Applicability. *International Congress on Environmental Modelling and Software*, page 10, 2014. (Cité page 7.)
- D. Moncoulon, D. Labat, J. Ardon, E. Leblois, T. Onfroy, C. Poulard, S. Aji, A. Rémy, et A. Quantin. Analysis of the french insurance market exposure to floods : a stochastic model combining river overflow and surface runoff. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(9) :2469–2485, sep 2014. (Cité pages xi, 57 et 61.)
- Abily Morgan, Delestre Olivier, Bertrand Nathalie, Duluc Claire-Marie, et Gourbesville Philippe. High-resolution Modelling With Bi-dimensional Shallow Water Equations Based Codes – High-Resolution Topographic Data Use for Flood Hazard Assessment Over Urban and Industrial Environments. *Procedia Engineering*, 154 :853–860, 2016. ISSN 18777058. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816318422>. (Cité page 122.)

- Mohamed M. Morsy, Jonathan L. Goodall, Gina L. O'Neil, Jeffrey M. Sadler, Daniel Voce, Gamal Hassan, et Chris Huxley. A cloud-based flood warning system for forecasting impacts to transportation infrastructure systems. *Environmental Modelling & Software*, 107 : 231–244, Septembre 2018. ISSN 13648152. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136481521730796X>. (Cité pages 29, 100 et 101.)
- Manoranjan Muthusamy, Mónica Rivas Casado, David Butler, et Paul Leinster. Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modeling. *Journal of Hydrology*, 596 :126088, Mai 2021. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169421001359>. (Cité page 122.)
- J. P. Naulin, O. Payraastre, et E. Gaume. Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas : Application to road network supervision in Southern France. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 486 :88–99, APR 12 2013. ISSN 0022-1694. (Cité pages x, 34, 57, 67 et 108.)
- J. Neal, G. Schumann, T. Fewtrell, M. Budimir, P. Bates, et D. Mason. Evaluating a new LISFLOOD-FP formulation with data from the summer 2007 floods in Tewkesbury, UK : Evaluating a new LISFLOOD-FP formulation. *Journal of Flood Risk Management*, 4(2) : 88–95, Juin 2011. ISSN 1753318X. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1753-318X.2011.01093.x>. (Cité page 11.)
- Jeffrey Neal, Toby Dunne, Chris Sampson, Andrew Smith, et Paul Bates. Optimisation of the two-dimensional hydraulic model LISFOOD-FP for CPU architecture. *Environmental Modelling & Software*, 107 :148–157, Septembre 2018. ISSN 1364-8152. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815217307478>. (Cité pages 29, 32 et 101.)
- Jeffrey Neal, Guy Schumann, et Paul Bates. A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas : FLOODPLAIN INUNDATION OVER LARGE AREAS. *Water Resour. Res.*, 48(11), Novembre 2012. ISSN 00431397. URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2012WR012514>. (Cité page 30.)
- Jeffrey C. Neal, Nicholas A. Odoni, Mark A. Trigg, Jim E. Freer, Javier Garcia-Pintado, David C. Mason, Melissa Wood, et Paul D. Bates. Efficient incorporation of channel cross-section geometry uncertainty into regional and global scale flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 529 :169–183, Octobre 2015. Publisher : Elsevier BV. (Cité page 100.)
- Phu Nguyen, Andrea Thorstensen, Soroosh Sorooshian, Kuolin Hsu, Amir AghaKouchak, Brett Sanders, Victor Koren, Zhengtao Cui, et Michael Smith. A high resolution coupled hydrologic–hydraulic model (HiResFlood-UCI) for flash flood modeling. *Journal of Hydrology*, 541 :401–420, Octobre 2016. ISSN 0022-1694. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415008185>. (Cité pages ix, 33 et 101.)
- Nicole GOUTAL et Fabrice ZAOUI. Mascaret Theory Guide. Décembre 2020. (Cité pages ix et 23.)

- Pierre Nicolle, Olivier Payraastre, et Nabil Hocini. Production d'un catalogue d'emprises inondées mono-fréquence sur les petits cours d'eau de l'arc méditerranéen (rapport d'étape) Action 8.1. page 15, 2021. (Cité page 149.)
- A. D. Nobre, L. A. Cuartas, M. Hodnett, C. D. Rennó, G. Rodrigues, A. Silveira, M. Waterloo, et S. Saleska. Height above the nearest drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1) :13–29, 2011. ISSN 0022-1694. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002599>. (Cité pages 28, 101 et 102.)
- Antonio Donato Nobre, Luz Adriana Cuartas, Marcos Rodrigo Momo, Dirceu Luís Severo, Adilson Pinheiro, et Carlos Afonso Nobre. HAND contour : a new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*, 30(2) :320–333, 2016. ISSN 1099-1085. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10581>. (Cité pages x, 37, 38 et 102.)
- Davide Notti, Daniele Giordan, Fabiana Caló, Antonio Pepe, Francesco Zucca, et Jorge Galve. Potential and Limitations of Open Satellite Data for Flood Mapping. *Remote Sensing*, 10(11) :1673, Octobre 2018. ISSN 2072-4292. URL <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/11/1673>. (Cité pages x et 54.)
- S. Ochoa-Rodríguez, L.-P. Wang, L. Thraves, A. Johnston, et C. Onof. Surface water flood warnings in england : overview, assessment and recommendations based on survey responses and workshops. *Journal of Flood Risk Management*, 11(S1) :S211–S221, 2018. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfr3.12195>. (Cité page 8.)
- Nurlan Ongdas, Farida Akiyanova, Yergali Karakulov, Altynay Muratbayeva, et Nurlybek Zinabdin. Application of HEC-RAS (2D) for Flood Hazard Maps Generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute - Water*, 12(10) :2672, Septembre 2020. ISSN 2073-4441. URL <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/10/2672>. (Cité page 55.)
- A Ovando. Multi-temporal flood mapping and satellite altimetry used to evaluate the flood dynamics of the Bolivian Amazon wetlands. page 14, 2018. (Cité page 52.)
- H. Ozdemir, C. C. Sampson, G. A. M. de Almeida, et P. D. Bates. Evaluating scale and roughness effects in urban flood modelling using terrestrial LIDAR data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10) :4015–4030, Octobre 2013. ISSN 1607-7938. URL <https://hess.copernicus.org/articles/17/4015/2013/>. (Cité page 122.)
- Katerina Papagiannaki, Vassiliki Kotroni, Kostas Lagouvardos, Isabelle Ruin, et Antonis Bezes. Urban area response to flash flood–triggering rainfall, featuring human behavioral factors : The case of 22 october 2015 in attica, greece. *Weather, Climate, and Society*, 9(3) :621–638, jul 2017. (Cité page 57.)
- F. Pappenberger, K. Beven, M. Horritt, et S. Blazkova. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level obser-

- vations. *Journal of Hydrology*, 302(1-4) :46–69, Février 2005. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169404003294>. (Cité page 122.)
- F. Pappenberger, E. Dutra, F. Wetterhall, et H. L. Cloke. Deriving global flood hazard maps of fluvial floods through a physical model cascade. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(11) :4143–4156, Novembre 2012. ISSN 1607-7938. URL <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/4143/2012/>. (Cité pages ix, 11, 29, 30 et 101.)
- Florian Pappenberger, Keith J. Beven, Marco Ratto, et Patrick Matgen. Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models. *Advances in Water Resources*, 31(1) :1–14, Janvier 2008. ISSN 03091708. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309170807000747>. (Cité page 122.)
- Olivier Payrastre, Eric Gaume, Pierre Javelle, Bruno Janet, Patrick Fourrnigue, Philippe Lefort, Andre Martin, Brice Boudevillain, Pascal Brunet, Guy Delrieu, Lorenzo Marchi, Yoann Aubert, Elisabeth Dautrey, Laurence Durand, Michel Lang, Laurent Boissier, Johnny Douvinet, Claude Martin, et Equipe Enquetes Post evenements Hy. Hydrological analysis of the catastrophic flash flood of 15th June 2010 in the area of Draguignan (Var, France). *HOUILLE BLANCHE-REVUE INTERNATIONALE DE L EAU*, (3-4) :140–148, NOV 13 2019. ISSN 0018-6368. (Cité page 106.)
- Adrián Pedrozo-Acuña, I Mariño-Tapia, C Enriquez, Gabriela Medellín Mayoral, et Fernando J. González Villareal. Evaluation of inundation areas resulting from the diversion of an extreme discharge towards the sea : case study in Tabasco, Mexico. *Hydrological Processes*, 26(5) :687–704, Février 2012. ISSN 08856087. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.8175>. (Cité page 11.)
- Olga Petrucci, Luigi Aceto, Cinzia Bianchi, Victoria Bigot, Rudolf Brázdil, Susana Pereira, Abdullah Kahraman, Özgenur Kılıç, Vassiliki Kotroni, Maria Carmen Llasat, Montserrat Llasat-Botija, Katerina Papagiannaki, Angela Aurora Pasqua, Jan Řehoř, Joan Rosello Geli, Paola Salvati, Freddy Vinet, et José Luis Zêzere. Flood fatalities in europe, 1980–2018 : Variability, features, and lessons to learn. *Water*, 11(8) :1682, aug 2019. (Cité page 57.)
- Francisco Peña et Fernando Nardi. Floodplain Terrain Analysis for Coarse Resolution 2D Flood Modeling. *Hydrology*, 5(4) :52, Septembre 2018. ISSN 2306-5338. URL <http://www.mdpi.com/2306-5338/5/4/52>. (Cité page 122.)
- F. Pons, C. Laroche, P. Fourmigue, et M. Alquier. Flood hazard maps for extreme event scenario : the study of Nartuby river. *HOUILLE BLANCHE-REVUE INTERNATIONALE DE L EAU*, (2) :34–41, APR 2014. ISSN 0018-6368. (Cité pages 29, 34, 42, 101, 103 et 144.)
- Prefet des Alpes Maritimes. RETOUR D’EXPERIENCE INONDATIONS DES 3 ET 4 OCTOBRE 2015 DANS LES ALPES-MARITIMES. Rapport technique, 2016. (Cité page 5.)
- Rejaur Rahman. Detecting, mapping and analysing of flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS : A case study from the Kendrapara District



- of Orissa State of India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, page 5, 2018. (Cité pages x, 52 et 53.)
- C. Rebolho, V. Andréassian, et N. Le Moine. Inundation mapping based on reach-scale effective geometry. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22(11) :5967–5985, Novembre 2018. ISSN 1607-7938. URL <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/22/5967/2018/>. (Cité pages 28, 66, 67 et 101.)
- Camilo Daleles Rennó, Antonio Donato Nobre, Luz Adriana Cuartas, João Vianei Soares, Martin G. Hodnett, Javier Tomasella, et Maarten J. Waterloo. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM : Mapping terra-firme rainforest environments in amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112(9) :3469–3481, 2008. ISSN 0034-4257. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442570800120X>. (Cité pages 37 et 102.)
- Aurélien Ribes, Soulivanh Thao, Robert Vautard, Brigitte Dubuisson, Samuel Somot, Jeanne Colin, Serge Planton, et Jean-Michel Soubeyrou. Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics*, 52(1-2) :1095–1114, Janvier 2019. ISSN 0930-7575, 1432-0894. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00382-018-4179-2>. (Cité page 5.)
- Josias Ritter, Marc Berenguer, Carles Corral, Shinju Park, et Daniel Sempere-Torres. ReAF-FIRM : Real-time assessment of flash flood impacts – a regional high-resolution method. *Environment International*, 136 :105375, mar 2020. (Cité pages 118 et 150.)
- Pierre-Alain Roche, Jacques Miquel, Éric Gaume, et Ghislain de Marsily. *Hydrologie quantitative : processus, modèles et aide à la décision*. Ingénierie et développement durable. Springer, Paris Berlin Heidelberg [etc.], 2012. ISBN 978-2-8178-0105-6. (Cité page 6.)
- Isabelle Ruin, Céline Lutoff, Brice Boudevillain, Jean-Dominique Creutin, S. Anquetin, M. Bertran Rojo, L. Boissier, L. Bonnifait, M. Borga, L. Colbeau-Justin, L. Creton-Cazanave, G. Delrieu, J. Douvinet, E. Gaume, E. Grunfest, J.-P. Naulin, O. Payrastre, et O. Vannier. Social and hydrological responses to extreme precipitations : An interdisciplinary strategy for postflood investigation. *Weather, Climate, and Society*, 6(1) :135–153, jan 2014. (Cité pages x, 57 et 58.)
- Clotilde Saint-Martin, Pierre Javelle, et Freddy Vinet. DamaGIS : a multisource geodatabase for collection of flood-related damage data. *Earth System Science Data*, 10(2) :1019–1029, jun 2018. (Cité pages xi, 5, 56, 57 et 59.)
- Siddharth Saksena et Venkatesh Merwade. Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530 :180–194, Novembre 2015. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169415007520>. (Cité pages xiii, 122 et 123.)
- Andrea Saltelli. Global Sensitivity Analysis : An Introduction. *European Commission, Joint Research Centre of Ispra*, page 17, 2004. (Cité page 122.)

- Caterina Samela, Raffaele Albano, Aurelia Sole, et Salvatore Manfreda. A GIS tool for cost-effective delineation of flood-prone areas. *Computers, Environment and Urban Systems*, 70 :43–52, jul 2018. (Cité page 27.)
- Caterina Samela, Tara J. Troy, et Salvatore Manfreda. Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments. *Advances in Water Resources*, 102 (Supplement C) :13–28, Avril 2017. ISSN 0309-1708. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170817300738>. (Cité pages ix et 27.)
- Christopher C. Sampson, Andrew M. Smith, Paul D. Bates, Jeffrey C. Neal, Lorenzo Alfieri, et Jim E. Freer. A high-resolution global flood hazard model. *Water Resour. Res.*, 51 (9) :7358–7381, Septembre 2015. ISSN 00431397. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2015WR016954>. (Cité pages 11, 29, 30, 66, 67, 101 et 118.)
- Brett F. Sanders et Jochen E. Schubert. PRIMO : Parallel raster inundation model. *Advances in Water Resources*, 126 :79–95, Avril 2019. ISSN 0309-1708. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170818308698>. (Cité pages x, 29, 32, 35, 36 et 101.)
- James Thomas Steven Savage, Paul Bates, Jim Freer, Jeffrey Neal, et Giuseppe Aronica. When does spatial resolution become spurious in probabilistic flood inundation predictions ? : When Spatial Resolution Becomes Spurious in Probabilistic Flood Maps. *Hydrol. Process.*, 30(13) :2014–2032, Juin 2016. ISSN 08856087. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.10749>. (Cité pages 29, 100 et 101.)
- G. J.-P. Schumann, J. C. Neal, N. Voisin, K. M. Andreadis, F. Pappenberger, N. Phanthuwongpakdee, A. C. Hall, et P. D. Bates. A first large-scale flood inundation forecasting model : Large-Scale Flood Inundation Forecasting. *Water Resour. Res.*, 49(10) :6248–6257, Octobre 2013. ISSN 00431397. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/wrcr.20521>. (Cité pages 30 et 55.)
- Guy J.-P. Schumann et Paul D. Bates. The Need for a High-Accuracy, Open-Access Global DEM. *Front. Earth Sci.*, 6 :225, Décembre 2018. ISSN 2296-6463. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2018.00225/full>. (Cité pages 29, 100 et 101.)
- Guy J.-P. Schumann, Dimitrios Stampoulis, Andrew M. Smith, Christopher C. Sampson, Konstantinos M. Andreadis, Jeffrey C. Neal, et Paul D. Bates. Rethinking flood hazard at the global scale. *Geophys. Res. Lett.*, 43(19) :10,249–10,256, Octobre 2016. ISSN 00948276. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2016GL070260>. (Cité pages 29 et 101.)
- Gustavo Andrei Speckhann, Pedro Luiz Borges Chaffe, Roberto Fabris Goerl, Janete Josina de Abreu, et Juan Antonio Altamirano Flores. Flood hazard mapping in Southern Brazil : a combination of flow frequency analysis and the HAND model. *Hydrological Sciences Journal*, pages 1–14, Novembre 2017. ISSN 0262-6667. URL <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1409896>. (Cité pages 28 et 101.)

- E.M. Stephens, P.D. Bates, J.E. Freer, et D.C. Mason. The impact of uncertainty in satellite data on the assessment of flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 414-415 :162–173, Janvier 2012. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169411007852>. (Cité page 122.)
- SwissRe. Catastrophes naturelles et techniques en 2017 : une année de pertes record, 2018. (Cité page 1.)
- N Tangdamrongsub, P G Ditmar, S C Steele-Dunne, B C Gunter, et E H Sutanudjaja. Assessing total water storage and identifying flood events over Tonlé Sap basin in Cambodia using GRACE and MODIS satellite observations combined with hydrological models. *Remote Sensing of Environment*, page 12, 2016. (Cité page 52.)
- David G. Tarboton. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2) :309–319, Février 1997. Publisher : American Geophysical Union (AGU). (Cité page 102.)
- David G Tarboton, Pabitra Dash, et Nazmus Sazib. *GUIDE TO USING THE TAUDEM COMMAND LINE FUNCTIONS*, 2015. (Cité page 39.)
- Ricardo Tavares da Costa, Salvatore Manfreda, Valerio Luzzi, Caterina Samela, Paolo Mazzoli, Attilio Castellarin, et Stefano Bagli. A web application for hydrogeomorphic flood hazard mapping. *Environmental Modelling & Software*, 118 :172–186, Août 2019. ISSN 1364-8152. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815218307953>. (Cité pages 11, 28 et 101.)
- Ven. Te Chow. *Open-channel Hydraulics*. Civil engineering series. McGraw-Hill, 1959. ISBN 978-0-07-085906-7. URL [https://books.google.fr/books?id=JG9\\_PwAACAAJ](https://books.google.fr/books?id=JG9_PwAACAAJ). (Cité pages 135 et 141.)
- J. Teng, A.J. Jakeman, J. Vaze, B.F.W. Croke, D. Dutta, et S. Kim. Flood inundation modelling : A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90 :201–216, Avril 2017. ISSN 1364-8152. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216310040>. (Cité pages 28, 29 et 101.)
- Galatea Terzi, Isabelle Ruin, Sandrine Anquetin, et Jonathan J. Gourley. A situation-based analysis of flash flood fatalities in the united states. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(2) :333–345, feb 2017. (Cité page 57.)
- Yves Trambly, Louise Mimeau, Luc Neppel, Freddy Vinet, et Eric Sauquet. Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11) :4419–4431, Octobre 2019. ISSN 1607-7938. URL <https://hess.copernicus.org/articles/23/4419/2019/>. (Cité page 5.)
- Ryota Tsubaki et Yoshihisa Kawahara. The uncertainty of local flow parameters during inundation flow over complex topographies with elevation errors. *Journal of Hydrology*, 486 :

- 71–87, Avril 2013. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169413000991>. (Cité page 122.)
- USGS. Identifying and Preserving High-Water Mark Data. Techniques and Methods, 2016. Series : Techniques and Methods. (Cité page 55.)
- Laurent Valette, Jeremy Piffady, André Chandesris, et Yves Souchon. SYRAH-CE : description des données et modélisation du risque d’altération de l’hydromorphologie des cours d’eau pour l’Etat des lieux DCE. Rapport technique, 2012. (Cité page 76.)
- N. Van Steenbergen, J. Ronsyn, et P. Willems. A non-parametric data-based approach for probabilistic flood forecasting in support of uncertainty communication. *Environmental Modelling & Software*, 33 :92–105, Juillet 2012. ISSN 13648152. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136481521200031X>. (Cité page 122.)
- Vigicruces. La prévision des inondations - La cartographie des zones d’inondation potentielle - Présentation Générale. Rapport technique, 2021. (Cité pages viii et 7.)
- Vinet, Bigot, Petrucci, Papagiannaki, Llasat, Kotroni, Boissier, Aceto, Grimalt, Llasat-Botija, Pasqua, Rossello, Kılıç, Kahraman, et Trambly. Mapping flood-related mortality in the mediterranean basin. results from the MEFF v2.0 DB. *Water*, 11(10) :2196, oct 2019. (Cité pages x, xi, 57, 58 et 59.)
- Jord J. Warmink, Hanneke Van der Klis, Martijn J. Booij, et Suzanne J. M. H. Hulscher. Identification and Quantification of Uncertainties in a Hydrodynamic River Model Using Expert Opinions. *Water Resources Management*, 25(2) :601–622, Janvier 2011. ISSN 0920-4741, 1573-1650. URL <http://link.springer.com/10.1007/s11269-010-9716-7>. (Cité page 122.)
- S. Wildemeersch, P. Goderniaux, Ph. Orban, S. Brouyère, et A. Dassargues. Assessing the effects of spatial discretization on large-scale flow model performance and prediction uncertainty. *Journal of Hydrology*, 510 :10–25, Mars 2014. ISSN 00221694. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169413009177>. (Cité page 122.)
- P. Willems. Model uncertainty analysis by variance decomposition. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 42-44 :21–30, Janvier 2012. ISSN 14747065. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474706511001197>. (Cité page 122.)
- Oliver E. J. Wing, Paul D. Bates, Christopher C. Sampson, Andrew M. Smith, Kris A. Johnson, et Tyler A. Erickson. Validation of a 30 m resolution flood hazard model of the conterminous United States. *Water Resour. Res.*, 53(9) :7968–7986, Septembre 2017. ISSN 00431397. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2017WR020917>. (Cité page 101.)
- Oliver E.J. Wing, Christopher C. Sampson, Paul D. Bates, Niall Quinn, Andrew M. Smith, et Jeffrey C. Neal. A flood inundation forecast of hurricane harvey using a continental-scale 2d hydrodynamic model. *Journal of Hydrology X*, 4 :100039, jul 2019. (Cité page 101.)

- H. C. Winsemius, L. P. H. Van Beek, B. Jongman, P. J. Ward, et A. Bouwman. A framework for global river flood risk assessments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(5) :1871–1892, Mai 2013. ISSN 1607-7938. URL <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/1871/2013/>. (Cité pages ix, 11, 30 et 31.)
- Eric F. Wood, Joshua K. Roundy, Tara J. Troy, L. P. H. van Beek, Marc F. P. Bierkens, Eleanor Blyth, Ad de Roo, Petra Döll, Mike Ek, James Famiglietti, David Gochis, Nick van de Giesen, Paul Houser, Peter R. Jaffé, Stefan Kollet, Bernhard Lehner, Dennis P. Lettenmaier, Christa Peters-Lidard, Murugesu Sivapalan, Justin Sheffield, Andrew Wade, et Paul Whitehead. Hyperresolution global land surface modeling : Meeting a grand challenge for monitoring Earth’s terrestrial water : OPINION. *Water Resour. Res.*, 47(5), Mai 2011. ISSN 00431397. URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2010WR010090>. (Cité pages 11 et 26.)
- Xilin Xia, Qiuhua Liang, Xiaodong Ming, et Jingming Hou. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations. *Water Resources Research*, 53(5) :3730–3759, 2017. ISSN 1944-7973. URL <http://dx.doi.org/10.1002/2016WR020055>. (Cité pages 29, 32 et 101.)
- Dai Yamazaki, Gustavo A. M. de Almeida, et Paul D. Bates. Improving computational efficiency in global river models by implementing the local inertial flow equation and a vector-based river network map : Speeding Up Global River Model Simulations. *Water Resour. Res.*, 49(11) :7221–7235, Novembre 2013. ISSN 00431397. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/wrcr.20552>. (Cité pages 11 et 29.)
- Andre Zanchetta et Paulin Coulibaly. Recent Advances in Real-Time Pluvial Flash Flood Forecasting. *Water*, 12(2) :570, Février 2020. ISSN 2073-4441. URL <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/2/570>. (Cité page 7.)
- Xing Zheng, David R. Maidment, David G. Tarboton, Yan Y. Liu, et Paola Passalacqua. GeoFlood : Large-Scale Flood Inundation Mapping Based on High-Resolution Terrain Analysis. *Water Resources Research*, 0(0), Novembre 2018. ISSN 0043-1397. URL <https://doi.org/10.1029/2018WR023457>. (Cité pages ix, x, 28, 33, 34, 36, 39, 41, 101, 102, 107 et 144.)
- Zheng Xing, Tarboton David G., Maidment David R., Liu Yan Y., et Passalacqua Paola. River Channel Geometry and Rating Curve Estimation Using Height above the Nearest Drainage. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 0(0), Juin 2018. ISSN 1093-474X. URL <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12661>. (Cité pages 28, 101 et 102.)
- Andreas Paul Zischg, Markus Mosimann, Daniel Benjamin Bernet, et Veronika Röthlisberger. Validation of 2D flood models with insurance claims. *Journal of Hydrology*, 557 :350–361, Février 2018. ISSN 0022-1694. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417308600>. (Cité pages xi, 57 et 61.)
- =====



# **Annexes**





# A

## Prise en main du modèle 2D Floodos

### A.1 Fonctionnement général du modèle Floodos

Le modèle Floodos a été développé par (Davy et al. 2017). Il est codé en C++, et est diffusé sous la forme d'un exécutable Windows que l'on peut lancer à partir de trois fichiers d'entrée qui représentent respectivement la topographie, les débits à injecter, et les paramètres de calcul à appliquer.

#### Fichier de topographie

Le modèle utilise une description de la topographie du domaine de calcul, qui prend la forme d'un modèle numérique de terrain fournissant des altitudes sur une grille de mailles carrées régulières. Cette grille est fournie au format GSBG (Golden Software Binary Grid), et avec une extension .alt (altitudes) qui est l'extension reconnue par le programme.

Cette grille va fixer le maillage utilisé par le modèle, et son extension fixe également l'extension du domaine de calcul. L'incorporation de valeurs -9999 dans cette grille permet néanmoins d'exclure certaines zones du calcul. Pour des questions de gestion de mémoire, il est recommandé de ne pas excéder des tailles de domaines de  $25 \cdot 10^6$  pixels.

#### Fichier des débits

Le fichier des débits se présente également sous la forme d'une grille au format GSBG, ayant une taille de maille et une taille de domaine qui sont identiques à celles du fichier ".alt".

Le fichier de débits est fourni au modèle avec une extension ".rain". Les valeurs qu'il contient sont soit des 0 (pas de débit injecté), soit des valeurs positives, dont les valeurs relatives vont fixer la répartition du débit total injecté sur les différents points d'injection. Le débit total à injecter sur le domaine est pour sa part fourni dans le fichier des paramètres.

## Fichier des paramètres et principaux paramétrages

Le fichier de paramètres du modèle Floodos est un fichier texte portant l'extension ".arg" dans les versions "5" et "6", et l'extension ".dat" dans les versions "7.x" du modèle.

Les paramètres se divisent en 4 catégories : les chemins de sortie et les chemins des fichiers d'entrée ; les conditions initiales et aux limites et les paramètres hydrauliques ; la gestion du calcul ; et enfin l'écriture des données de sortie. Ces paramètres sont décrits dans le tableau A.1.

Pour ce qui concerne la version 7.x du modèle Floodos, les lignes `time :end` et `time :init` contiennent en réalité plusieurs paramètres de réglages du calcul :

- `time :end=X :tu :draw=Y :time :step=Z :volume :` X donne la durée du calcul en TU après la phase d'initialisation, Y l'espacement en TU de l'écriture des résultats, et Z le volume de précipiton en  $m^3$
- `time :init :0=X :1=Y :step=2 :* :tu=Z :` X représente le premier volume de précipiton, Y le dernier volume, step le nombre d'étapes (changement de volume de précipiton) dans la phase d'initialisation, et Z la durée en TU de chaque étape.

## Conditions de convergence

La principale difficulté d'application du modèle Floodos concerne la vérification de la convergence. En effet, un choix inapproprié du volume d'eau déposé par les précipitons  $V_p$  peut conduire la méthode à converger vers une solution erronée, le niveau de la ligne d'eau étant dans ce cas surestimé (cf. figure A.1). Un critère de convergence de la méthode a été établi

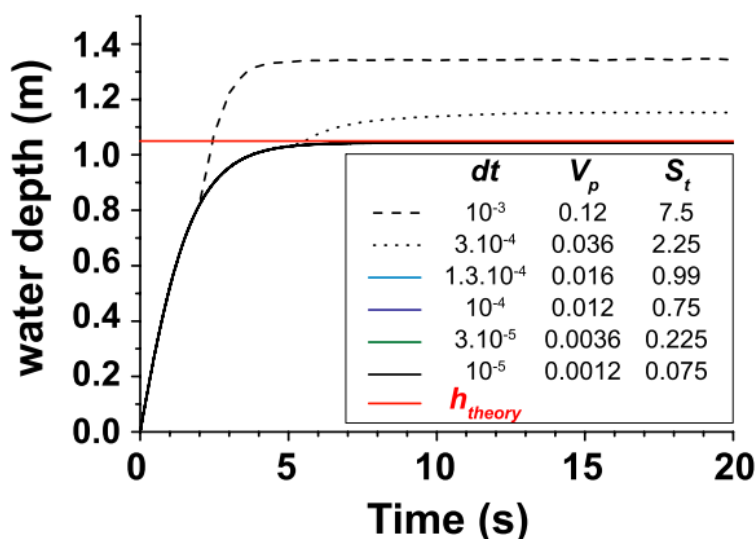


FIGURE A.1 – Convergence vers différentes solutions avec des volumes de précipitons différents (Davy et al. 2017)

lors des tests initiaux de Floodos par Davy et al. (2017) :

Tableau A.1 – Tableau (partiel) des paramètres définis dans le fichier *.arg* ou *.dat* du modèle Floodos

Paramètres	Description
<b>1.Chemins</b>	
<i>dir</i>	Chemin de sortie
<i>alt</i>	Chemin du fichier d'altitudes
<i>rain</i>	Chemin du fichier des débits injectés
<b>2.Conditions initiales et aux limites, et paramètres hydrauliques</b>	
<i>inflow</i>	Débit total : Somme des débits injectés
<i>friction_coefficient</i>	Valeur du coefficient de Manning
<i>file_manning</i>	Raster des valeurs de Manning si variable
<i>flow_boundary</i>	Condition limite aval (plusieurs conditions possibles)
<b>3.Gestion du calcul versions 5 et 6</b>	
<i>final_time_(TU)</i>	Durée totale du calcul exprimée en TU (TU= Temps Universel, correspond à l'injection d'un nombre fixé de précipitons)
<i>TU_coefficient</i>	Fixe le nombre de précipitons lancés pendant 1 TU, le nombre de précipitons est donc égal au produit entre le nombre de points d'injection et la valeur du TU_coefficient.
<i>drawing_time_(TU)</i>	Espacement en TU des pas de temps pour lesquels les résultats vont être écrits
<i>precipiton</i>	Volume de précipiton en $m^3$
<b>4.Gestion du calcul versions 7.x</b>	
<i>TU</i>	Nombre moyen de précipitons injectés pour 1 TU sur chaque point d'injection ce qui correspond au TU_coefficient
<i>time :end</i>	Durée en TU de la phase de calcul principale
<i>time :init</i>	Evolution des volumes de précipitons dans la phase d'initialisation
<i>step</i>	Nombre d'étapes dans la phase d'initialisation
<i>tu</i>	Durée en TU de la phase d'initialisation
<b>5.Écriture des fichiers de sortie</b>	
<i>write</i>	Choix des fichiers de sortie à écrire

$$S_t = \frac{V^p}{S_0 \cdot \Delta x^2 \cdot \Delta y} < 0.75 \quad (\text{A.1})$$

Où :

- $V^p$  : volume de précipiton [ $m^3$ ];
- $S_0$  : pente de la surface libre [-];
- $\Delta x$  : résolution du MNT selon l'axe X;
- $\Delta y$  : résolution MNT selon l'axe Y (généralement égale à  $\Delta x$ ).

Ceci permet d'obtenir un volume de précipiton pour lequel la convergence est assurée selon ce critère :

$$V^p = 0.75 \cdot S_0 \cdot \Delta x^3 \quad (\text{A.2})$$

Néanmoins, la pente  $S_0$  de la ligne d'eau n'est pas accessible avant le calcul, elle doit donc être estimée à partir par exemple de la pente topographique le long du lit du cours d'eau.

## A.2 Mise en œuvre du modèle dans la thèse

### Découpage du domaine de calcul en tronçons

Afin de pouvoir appliquer le modèle dans des conditions satisfaisantes, il est nécessaire de définir des domaines de calcul dont le nombre de cellules ne dépasse pas les  $25 \cdot 10^6$ . Ceci a été réalisé par un découpage du réseau hydrographique aux confluences, chaque tronçon de cours d'eau ainsi défini fixant un domaine de calcul Floodos. Chaque tronçon de cours d'eau a été allongé de 500 m après la confluence, de façon à limiter les effets de la condition limite aval sur la simulation. Les résultats de simulation obtenus sur les différents tronçons ont ensuite été fusionnés en prenant la hauteur d'eau maximale sur les zones de recouvrement.

### Construction du fichier .alt

Le fichier ".alt" (figure A.2) correspond en théorie à un simple découpage du MNT d'après les contours du tronçon de rivière à modéliser. Toutefois, quelques prétraitements ont été introduits ici de façon à éviter certaines sources d'erreurs dans les calculs :

- des "murs" ont été intégrés à l'amont des tronçons de cours d'eau modélisés, juste en amont du premier point d'injection de débit. Ceci a permis d'éviter la sortie d'une partie du débit injecté par l'amont du domaine de calcul.

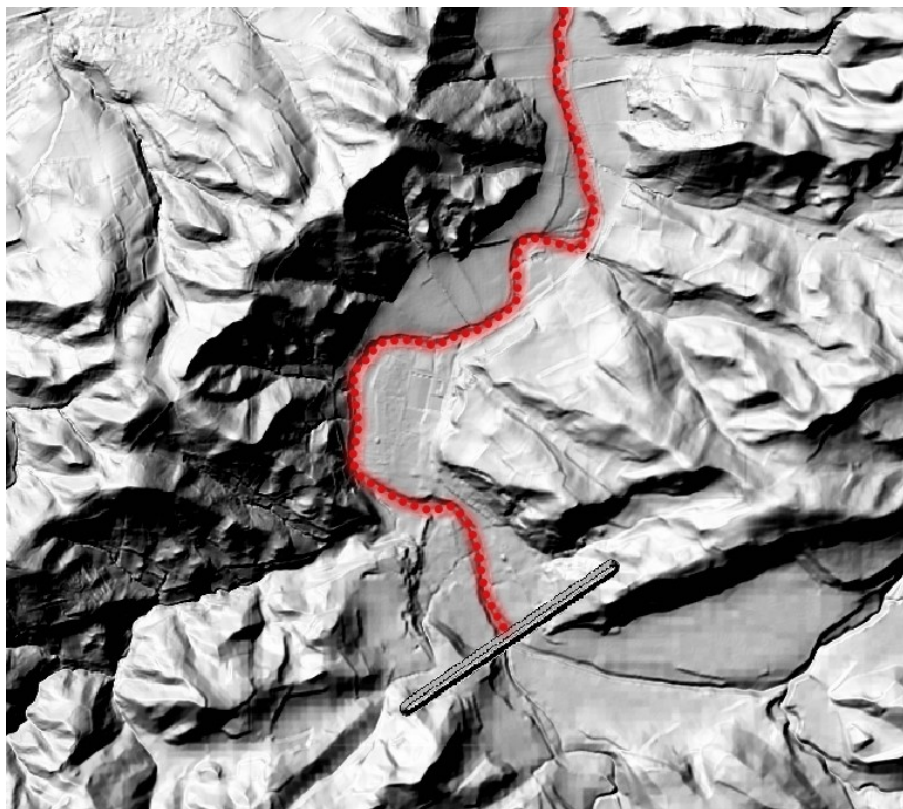


FIGURE A.2 – *Fichier .alt avec le mur à l'amont du tronçon : Les points rouges représentent les points d'injection de débit sur le tronçon de cours d'eau*

- au niveau des embouchures dans la mer, les altitudes des cellules situées en mer ont été abaissées pour éviter un effet de remous lié à la pente nulle du MNT sur ces cellules.
- le domaine de calcul ressortant du découpage a été étendu dans toutes les directions afin d'éviter une sortie du domaine par une autre direction que celle de l'aval du tronçon de cours d'eau simulé (cas de petits affluents notamment).

### Construction du fichier .rain

Pour un tronçon de cours d'eau donné, le fichier ".rain" a été créé en mettant dans un premier temps toutes les cellules à une valeur de 0, puis en écrivant sur cette grille les valeurs des débits à injecter. Une exigence très importante ici est de bien positionner les point d'injection de débit dans le fond du lit mineur, de façon à éviter des débordements intempestifs en lit majeur dus simplement à la mauvaise localisation des points d'injection.

Les débits issus du modèle hydrologique Cinecar étant fournis sur une grille raster de résolution 50m, ils étaient trop mal positionnés en plan pour pouvoir être injectés directement sur les domaines de calcul Floodos. Ils ont donc été repositionnés en plan en suivant le linéaire du réseau vecteur des cours d'eau issu de la BD Topo. Pour cela, des points espacés de 50m ont été positionnés le long du réseau vecteur, et les valeurs des débits ont été extraites au droit de ces points, avant d'être réécrites dans le fichier .rain. L'utilisation d'un réseau vecteur très bien positionné en plan (réseau BDTopo) a ainsi permis de s'assurer que les débits étaient bien injectés dans le lit mineur sur le domaine de calcul.

Lors de l'écriture du fichier `.rain`, la première injection sur le point le plus à l'amont du domaine a permis d'injecter le débit total transitant dans le cours d'eau, et ensuite seuls les apports supplémentaires de débit ont été injectés en allant vers l'aval (figure A.3).

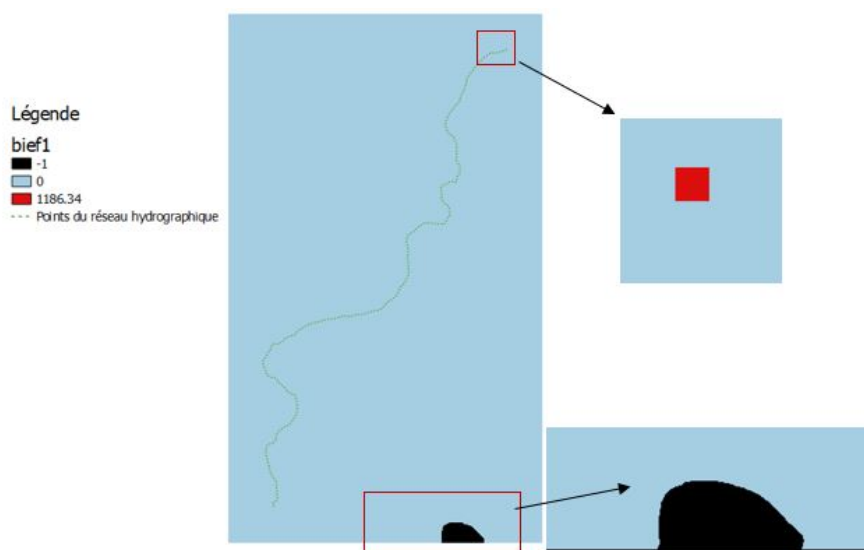


FIGURE A.3 – Création du fichier `.rain`

Finalement, la valeur de -1 a été écrite sur les cellules du contour du domaine de calcul, ces valeurs indiquant la sortie du domaine.

### Choix de la condition limites aval

La condition limite retenue à la sortie du domaine correspond au choix d'une pente hydraulique pour la cellule de sortie identique à la pente hydraulique de la cellule située immédiatement en amont.

### Définition du volume de précipiton

Pour le calcul du volume de précipiton permettant de respecter le critère de convergence du modèle (équation A.1), la pente de la ligne d'eau a dans un premier temps été estimée par la pente topographique longitudinale le long du cours d'eau. Néanmoins, celle-ci s'est avérée difficile à estimer et parfois très proche de 0, ce qui conduisait à des volumes de précipitons extrêmement faibles et qui allongeaient fortement les temps de calcul.

Finalement, il a été choisi de retenir 3 volumes de précipitons pour un MNT de résolution 5 m qui sont  $Vp1 = 0.25m^3$ ,  $Vp2 = 0.125m^3$  et  $Vp3 = 0.0625m^3$ . Ces mêmes volumes ont été appliqués pour tous les tronçons. Ils correspondent aux volumes à ne pas dépasser d'après l'équation A.1 pour des pentes  $S_0$  de respectivement  $2,7 \cdot 10^{-3}$  à  $0,7 \cdot 10^{-3}$ . Ceci correspond aux gammes de pentes minimales généralement rencontrées sur les cours d'eau modélisés. On peut également noter que le premier volume ( $Vp1$ ) correspondant à un incrément de hauteur de 1 cm sur chaque cellule de 5 m de côté traversée par un précipiton, le volume  $Vp3$  correspondant pour sa part à un incrément de 2,5 mm.

Une étude de convergence et de comparaison des résultats obtenus avec ces trois volumes de précipitation a été menée afin de vérifier que le modèle convergeait vers la même solution avec au moins les deux derniers volumes de précipitations  $Vp2$  et  $Vp3$  (le volume  $Vp1$  pouvant parfois converger vers une solution avec des hauteurs surestimées). Les résultats de cette étude sont présentés dans le paragraphe qui suit.

### Vérification de la convergence

Pour les versions 5 et 6 de Floodos, pour chaque volume de précipitation appliqué, le calcul a été effectué sur 200 TU (Temps Universel), avec un facteur TU de 20 (soit 20 précipitations injectés en moyenne sur chaque point d'injection pour 1 TU).

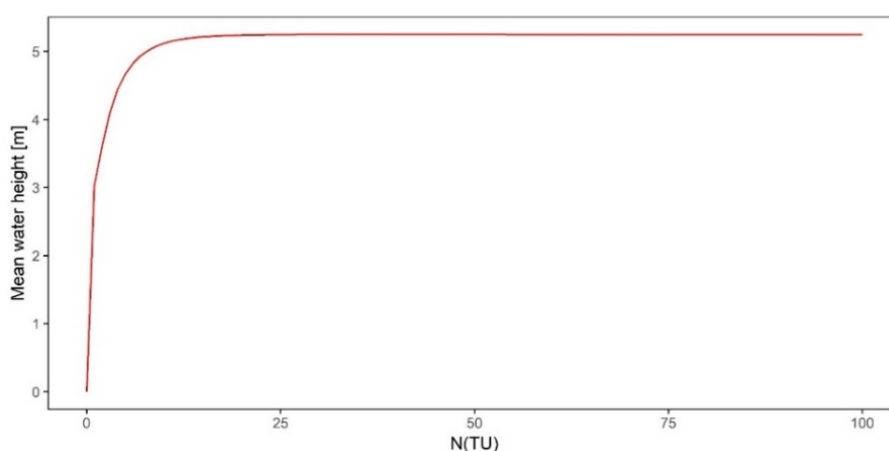


FIGURE A.4 – Vérification de la stabilisation de la hauteur d'eau pour chaque valeur de précipitation

La stabilisation de la hauteur d'eau moyenne dans le domaine a été vérifiée sur les 50 derniers TU de chaque calcul (cf. figure A.4). La ligne d'eau a été considérée comme stabilisée si la variation de hauteur était inférieure à 3 cm. Du fait de la composante aléatoire du calcul réalisé par Floodos, le niveau de la ligne d'eau moyenne est néanmoins parfois très bruité (cf. figure A.5). Pour cette raison, un lissage de la hauteur d'eau moyenne sur 10 valeurs a été effectué avant vérification de la stabilisation du niveau d'eau. Si la stabilisation de la ligne d'eau n'était pas observée au bout des premiers 200 TU, le calcul a été repris pour 200 TU supplémentaires, avec 5 reprises successives possibles (soit un calcul pouvant aller jusqu'à 1200 TU). Au bout de 5 itérations, si la stabilisation de la ligne d'eau n'était pas observée, le calcul a néanmoins été arrêté.

La convergence du modèle vers la bonne solution a été vérifiée en s'assurant de l'identité des résultats obtenus entre les volumes de précipitations  $Vp2$  et  $Vp3$ . Cette vérification a été réalisée en calculant un score Root Mean Square Error entre les rasters de hauteurs d'eau obtenus pour chaque volume de précipitation (cf. figure A.6).

On remarque sur la figure A.6 que la convergence n'est pas toujours assurée pour le premier volume de précipitation  $Vp1$ , les différences étant parfois assez importantes avec la solution obtenue pour le  $Vp2$  (cas de l'Argens notamment). En revanche, les différences entre les solutions des  $Vp2$  et  $Vp3$  sont nettement plus faibles. Ceci confirme que la procédure

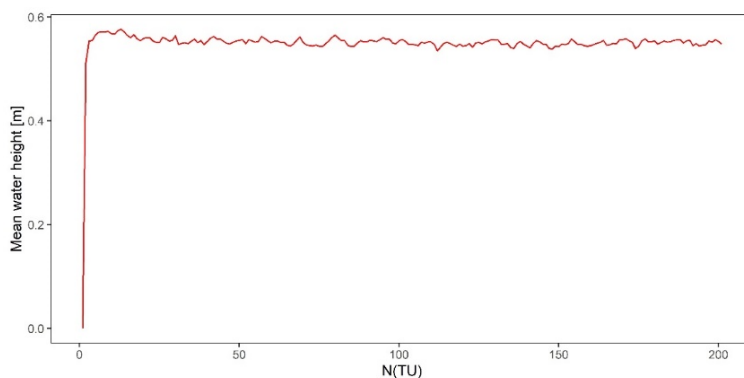
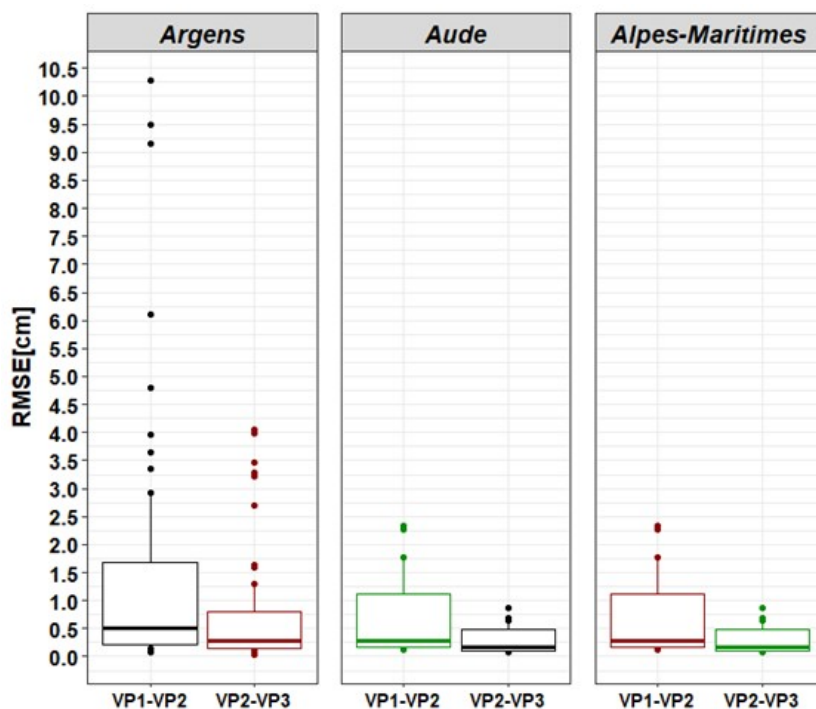


FIGURE A.5 – Exemple de niveau d'eau moyen bruité

FIGURE A.6 – Distribution des scores RMSE mesurant l'écart entre les solutions des calculs Floodos, pour les volumes de précipitation  $Vp1$  et  $Vp2$ , puis  $Vp2$  et  $Vp3$ , pour les études de cas de l'Argens, de l'Aude et des Alpes Maritimes

proposée permet de garantir la convergence du modèle vers des solutions correctes, au moins à l'issue du calcul pour le  $Vp3$ .

En revanche, la procédure proposée a conduit parfois à allonger très fortement les temps de calcul. Cet allongement n'est pas systématique, mais concentré sur certains tronçons sur lesquels la stabilisation des niveaux est difficile à obtenir. Un exemple de cette situation est donné sur la figure A.7, où l'on voit que les calculs ont dû être repris plusieurs fois. Dans ce cas, chaque reprise du calcul génère une forte élévation du niveau moyen, qui a ensuite du mal à se stabiliser. On reprend donc le calcul plusieurs fois (très long) sans arriver à stabiliser le niveau, alors qu'il faudrait plutôt relancer le calcul d'emblée sur 300 ou 400 TU pour obtenir une stabilisation. Ce genre de situations conduit à augmenter considérablement les temps de calcul sur les tronçons concernés. Comme l'illustre la figure A.8, le temps de calcul a pu parfois dépasser l'heure sur certains biefs du cas de l'Argens.



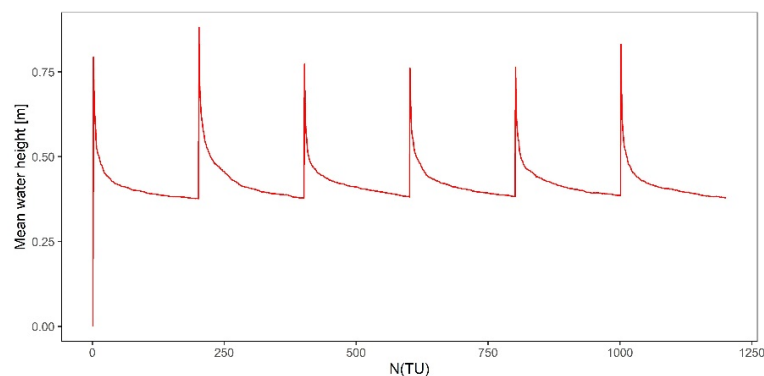


FIGURE A.7 – Pics de hauteur observés lors de la reprise des calculs

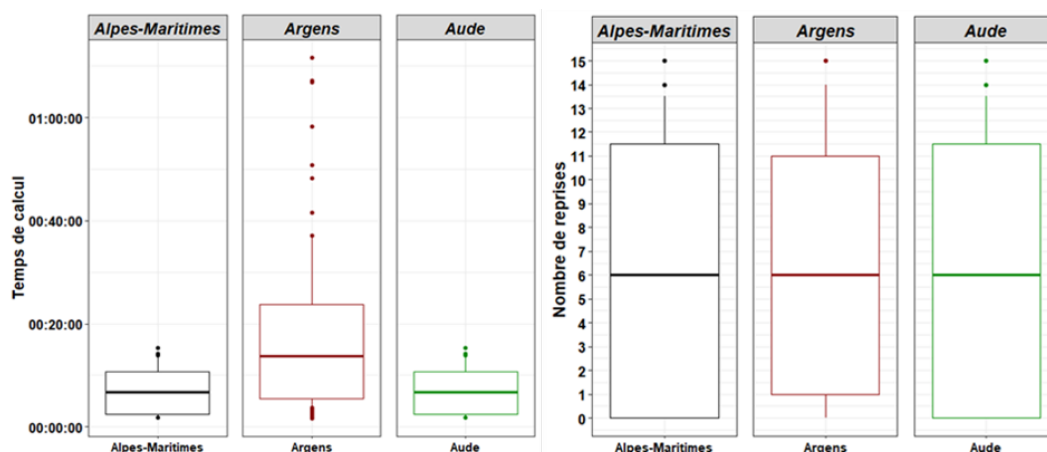


FIGURE A.8 – Distributions des temps de calcul et du nombre d'itérations (reprises du calcul) sur les tronçons des " études de cas traitées

Suite à ces constats, une nouvelle version de Floodos a été proposée par P.Davy, de façon à pouvoir ajuster le volume de précipitation en cours de calcul, et à ainsi favoriser une stabilisation plus rapide des niveaux.

## Nouvelle version de Floodos

La dernière version de Floodos utilisée (version 7.3), comporte deux modifications destinées à faciliter la vérification de la stabilisation des niveaux et la bonne convergence du modèle.

Tout d'abord, un changement dans le calcul de la hauteur d'eau moyenne sur le domaine a été introduit pour éviter le bruit présent sur cette variable (figure A.7) : la hauteur d'eau a été calculée sur l'ensemble du domaine plutôt que sur les seuls pixels mouillés, de façon à réaliser le calcul sur les mêmes pixels à chaque pas de temps.

Mais surtout, cette version intègre aussi une phase d'initialisation du calcul, permettant de faire diminuer le volume de précipitation par étapes lors de l'initialisation et favoriser ainsi une stabilisation plus rapide des niveaux. Dans notre cas, nous avons choisi une phase d'initialisation de 60 TU pour 3 volumes de précipitations ( $20\text{ TU par } V_p$ ), les volumes de précipitations appliqués correspondant aux volumes  $V_{p1}$ ,  $V_{p2}$ , et  $V_{p3}$  utilisés lors des tests initiaux de convergence. Ensuite le calcul a été poursuivi pour 100 TU avec le dernier volume de précipitation  $V_{p3}$ .

L'application de cette dernière version a permis de stabiliser beaucoup plus efficacement les niveaux et de gagner fortement en temps de calcul.

### **Essais de parallélisation des calculs**

Toujours de façon à limiter les temps de calcul, des tests de parallélisation complète (phases de prétraitement, calcul et post-traitement) du code de lancement de Floodos ont été réalisés sur le cas de l'Aude (comportant plus de 100 tronçons nécessitant chacun un calcul). Ces tests ont permis de diviser les temps de calcul par 5. Le temps de calcul obtenu sur le cas de l'Aude est d'environ 2 heures sur une machine de bureau (6 cœurs et 32 Go de RAM), contre 10 heures environ sans parallélisation. On imagine donc qu'on pourrait gagner beaucoup plus de temps sur une machine plus puissante de dernière génération.



**Titre :** Evaluation de méthodes automatisées de cartographie des zones inondables adaptées à la prévision des crues soudaines

**Mots clés :** crue rapide, cartographie automatisée, hydraulique

**Résumé :** Les crues soudaines 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, avec des conséquences souvent catastrophiques. Compte tenu du grand nombre de petits cours d'eau pouvant être touchés, l'utilisation de méthodes de cartographie automatisée des zones inondées peut être d'une grande aide pour l'identification des impacts potentiels de ce type de crues. Ce travail de thèse a permis d'automatiser et de tester trois approches de cartographie des zones inondées, adaptées aux petits cours d'eau, et d'un degré de complexité croissant : HAND/MS, caRtino 1D, et Floodos 2D. Dans un premier temps, ces méthodes ont été comparées à des modélisations expertisées de référence issues de la mise en œuvre de la directive européenne inondation, sur plusieurs cours d'eau du sud de la France, en reprenant des hypothèses et données d'entrée identiques à ces modélisations de référence. Par la suite, les trois approches ont été évaluées sur

leur aptitude à reproduire trois crues majeures récentes, toujours dans le sud de la France, et pour lesquelles de larges jeux de données d'observations des étendues et hauteurs d'inondation sont disponibles. Finalement, cette double évaluation a permis d'identifier certaines limites de l'approche HAND/MS, dont le niveau de simplification peut être à l'origine d'erreurs importantes. La plus-value de l'approche hydrodynamique 2D (Floodos) a également été mise en évidence, notamment dans les situations de plaines inondables très larges. Ces évaluations ont également confirmé la possibilité de cartographier les inondations de façon automatisée sur les petits cours d'eau, avec des niveaux d'erreurs acceptables et des vitesses de calcul adaptées à la couverture de grands domaines spatiaux. Enfin, les principales sources d'erreur subsistantes, comme la qualité des informations topographiques et/ou la connaissance des débits, ont été identifiées, et leurs poids relatif a pu être évalué.

**Title :** Evaluation of automated flood mapping methods suitable to flash flood forecasting

**Keywords :** flash flood, automated flood mapping, hydraulics

**Abstract:** Flash floods cause important material and human damage all over the world. In France, they frequently hit small rivers in the Mediterranean area, often with catastrophic consequences. Given the large number of small watercourses which may be affected, the use of automated inundation mapping methods can be of great help to identify the areas at risk. This PhD work offered the opportunity to test and compare three automated flood inundation mapping approaches, suitable for small streams and of increasing level of complexity: HAND/MS, caRtino 1D, and Floodos 2D. At first, the three methods were compared to reference expert-based simulation results elaborated for the implementation of the European Flood Directive, for several rivers in south-eastern France. In this first step, the comparison was performed using identical assumptions and input data as for the reference simulations. Then, the three approaches

were evaluated based on their ability to reproduce three recent flood events observed in South-Eastern France, and for which particularly rich observation datasets are available about flood extents and water depths. Finally, this twofold evaluation allowed identifying some limits of the HAND/MS approach, which can exhibit important errors directly related to its higher level of simplification. The added value of the 2D hydrodynamic approach (Floodos) has also been illustrated, especially for stream reaches with wide flood plains. The evaluation also confirmed the feasibility of automated flood mapping for small rivers with acceptable error levels, and computation times compatible with the coverage of large areas. Finally, the main remaining sources of error were identified, such as the quality of the input topographic data or the knowledge of the flood discharges, and their relative importance could be evaluated.