



HAL
open science

Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides : vers une estimation des impacts et des dommages potentiels

Guillaume Le Bihan

► **To cite this version:**

Guillaume Le Bihan. Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides : vers une estimation des impacts et des dommages potentiels. Hydrologie. Université Bretagne Loire, 2016. Français. NNT : . tel-01461682v2

HAL Id: tel-01461682

<https://hal.science/tel-01461682v2>

Submitted on 6 Jun 2017 (v2), last revised 15 Jun 2017 (v3)

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.

Thèse de Doctorat

Guillaume LE BIHAN

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de Docteur de l'École Centrale de Nantes
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire*

École doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architectures

Discipline : Terre, enveloppes fluides

Unité de recherche : Institut Français des Sciences et Technologie des Transports de l'Aménagement et des Réseaux

Soutenu le 26 octobre 2016

Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides : vers une estimation des impacts et des dommages potentiels

JURY

Président : **Karem CHOKMANI**, Professeur, Institut National de la Recherche Scientifique

Rapporteurs : **Jean-Dominique CREUTIN**, Directeur de recherche, Université de Grenoble Alpes
Freddy Vinet, Professeur des universités, Université Paul-Valéry Montpellier 3

Examineurs : **Hélène ROUX**, Maître de conférences, Institut National Polytechnique de Toulouse / Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications

Invité : **Emmanuel ROZIERE**, Maître de conférences, Ecole Centrale Nantes

Directeur de thèse : **Éric GAUME**, HDR/Ingénieur GREF, IFSTTAR centre de Nantes

Co-encadrant de thèse : **Olivier PAYRASTRE**, Ingénieur des TPE, IFSTTAR centre de Nantes

Résumé

AVEC le développement des mesures de pluie à hautes résolutions spatiales et temporelles, l'utilisation de modèles hydrométéorologiques distribués est désormais envisagée pour anticiper les phénomènes de crue soudaine sur les petits bassins versants non jaugés. Toutefois les approches développées jusqu'ici se sont généralement concentrées sur l'évaluation des phénomènes hydrologiques, laissant de côté la question de leurs impacts, qui dépendent fortement de la configuration du terrain et des enjeux qui y sont présents. Ce travail de thèse a permis de développer et tester une méthode d'évaluation directe de ces impacts à partir des sorties d'un modèle pluie-débit sur un territoire limité. La démarche mise en œuvre repose sur un travail préalable d'analyse du territoire permettant d'une part d'évaluer les emprises submergées dans une large gamme de débits par une approche hydraulique simplifiée, puis de construire des relations univoques débit-enjeux pour chaque bief de cours d'eau. Ces relations permettent de produire des cartes d'enjeux potentiellement touchés, pouvant être actualisées régulièrement en cours d'événement. Deux études des cas ont permis de réaliser une première évaluation des performances de cette approche, du point de vue de la qualité d'estimation des emprises inondées, et du point de vue des impacts estimés à l'échelle d'un événement grâce à la comparaison avec des données d'assurance. Finalement, ces travaux ont permis de confirmer le potentiel de la méthode, dont les performances semblent en adéquation avec l'objectif visé : obtenir rapidement une première hiérarchisation des impacts occasionnés par les crues soudaines à l'échelle d'un grand territoire.

Mots clés :

Analyse des risques d'inondation, bassins versants non jaugés, modélisation hydraulique, Région méditerranée, Système Information Géographique

Remerciements

CES travaux sont le fruit de collaborations étroites avec de nombreux acteurs. Ces premières pages me permettent de les remercier pour tout le temps et l'énergie qu'ils m'auront consacrés. Le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Aide à la Prévision des Inondations (SCHAPI), pour son soutien moral et financier.

Le Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) pour son assistance sur la prise en main de la méthode CARTINO, je remercie tout particulièrement Mathieu Alquier.

La Caisse Centrale de Réassurance (CCR) pour l'accès aux données de sinistres ayant permis l'évaluation du modèle d'impacts, dont les services de Thomas Onfroy.

À Météo France, et les équipes du projet Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment (Hymex) et de l'Observatoire Hydro-Météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV) pour l'accès et la mise à disposition des données pluviométriques nécessaires aux simulations, en particulier à Brice Boudevillain.

La direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Auvergne-Rhône-Alpes, pour la diffusion des informations sur les données des stations hydrométriques, dont Fabrice Mannessiez.

Au membre du comité de suivi de thèse, Johnny Douvinet (UMR ESPAC), Aurélie Escudier (SCHAPI), Pierre Javelle (IRSTEA), David Moncoulon (CCR) et Frédéric Pons (CEREMA), pour ces temps d'échanges qui ont été d'une aide précieuse à la structuration, l'organisation et l'approfondissement de ces travaux de thèse. Je garderai à l'esprit ces échanges interdisciplinaires et je leur suis très reconnaissant de l'ensemble de leurs conseils.

Au membre du jury de thèse, Jean-Dominique Creutin, directeur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) ; Freddy Vinet, professeur à l'Université Paul-Valéry Montpellier 3 ; Hélène Roux, maître de conférences à l'Institut national polytechnique de Toulouse (INPT) et à l'École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications (ENSEEIH) de Toulouse ; Karem Chokmani, professeur à l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) de Québec et Emmanuel Rozière, maître de conférences à l'École Centrale de Nantes (ECN). Je tenais à les remercier de leur déplacement à l'IFSTTAR de Nantes pour cette soutenance de thèse et de l'ensemble des remarques concernant l'amélioration de ces travaux de recherche.

L'accompagnement de mon directeur de thèse Eric Gaume et celui de mon encadrant Olivier Payrastra ont été déterminants à la réalisation de ces travaux. Leurs conseils et leurs inves-

tissements m'ont permis de structurer et de restituer au mieux mes travaux de recherche au cours de la rédaction de ce mémoire et des présentations effectuées pendant ces trois années de thèse. Je n'oublierai pas leur enthousiasme lors de nos échanges qui m'ont donné le courage d'avancer et de croire en l'originalité de ces travaux dans les moments de doutes.

Aux membres de l'équipe du laboratoire Eau et Environnement de l'IFSTTAR, pour les échanges scientifiques, les moments de détente et leurs aides : dont Katia Chancibault, Frédérique Larrarte, Liliane Jean-Soro, Mathieu Goriaux, Simon Lery, Marie-Laure Mosini, Fabrice Rodriguez, Pierre Augris, Anaïs Coulon, Stéphane Batany, Mélissa Delamain, Zineb Lotfi, Dominique Renou, Pierre-Emmanuel Peyneau, Mehrazin Omrani, Jean-Marc Rouaud, Bernard Flahaut... Ces temps furent essentiels à mon équilibre et à l'aboutissement de ces travaux.

À Laurent Lebouc, l'élève brillant dans l'exercice d'intégration et de pérennisation des différentes méthodes Sigistes développées dans le cadre de ces travaux.

À Xénia Lafaille, ma collègue de bureau autrichienne : un vrai rayon de "soleil" alors que mes travaux portaient sur la "pluie".

À ceux déjà partis ayant participé indirectement à ces travaux, dont Miguel Piteira Gomes et Jean-Philippe Naulin.

Aux personnels de restauration, sans qui l'énergie aurait manqué pendant ces années de travaux, dont Mickaël Gauduchon, Frédéric Pain, Nathalie Tilly, Isabelle Dardis, Catherine Gauvrit, Quentin Houssier et Matthias Rouet.

À l'ensemble des sportifs de l'IFSTTAR, en particulier les footeux, pongistes et coureurs. Je pense entre autre à Marie-Line Gallenne, Samuel Ruffle, Arnaud Can, Jean-Michel Auberlet, Patrick Lacour, Mai Lan Nguyen, Erwann Rayssac, Alexis Cothenet, Andry Razakamanantsoa,...

À celles et ceux qui m'ont aidé à un moment ou à un autre dans l'accomplissement de la thèse, en particulier Cécile Vallée, Claire Galifot, Soline Lucas, Christophe Esposito, Sylvain Charaud, Christophe Moulin, Gwenaël Jouannic, Guillaume Dramais, Clotilde Saint-Martin, Philippe Cantet.

Aux personnes proches dans mon cœur malgré la distance ou la vie qui peuvent parfois nous séparer : Jean-Charles Boutros, Charlotte Hochet, Cyril Couloigner, Patrick Muset, Marie-France Muset, Julien Sauzeau, Dorian Chandelier, Marie Lefèvre, Maryline Da Rocha, Julien Derrien, Jérémy Letort, Romain Meret, Yohan Blot, Nicolas Pornet, Sylvain Euriey, Maxence Voleau, Damien André, Morgane Doineau, Barbara Dalmont, Orane Larvaron, Marie Brechet, Déborah Ganemtoré, Jean-Louis Pagnou, Annie Talio, Guillaume Chignard, Valérie Cailly, Cindy Canivet, Anne Fournier, Berthille Saveau, Ewan Dayot, Thibault Simonet, Nina Moreau, Manon Guillaudeux, Anaïs Brossard, Guy Lafitte, Pierre Derommelaere, Ludo Gagnepain, Benjamin Lesage, Vincent Lebouedec, Aline Durand, Justine Bourguin, Elen Lepage, Laure Fournier/Guérinier, Thomas Guérinier, Théophile Guérinier, Héléne Gillet/Thouvenin, Romain Thouvenin, Morgane Druais, Jean-Batiste Oran, Carine Cédile/Oran, Laure Fonteneau, Pauline Fonteneau, Erwan Vicet, Léa Patourel, Amélie Winiger, Charleric Bailly, Nolwenn Chapel, Camille Colombain, Astrid Helt, David Joubert, Romain Redais, Aurélie Guillou, Jil Bournazel, Moctar Nouhouel, Camille Sylvain...

À mes ami(e)s du quotidien, pour leur soutien, leur patience et leur sourire : Damien Labbé, Héléne Lucas, Laura Poiron, Yann Kerdoncuff, Guillaume Lion et Bilitis Levillain.

À ma belle famille,

À ma (belle) famille, Le Bihan et Roy, tout particulièrement à mon père, ma mère, mon frère et mes grands parents.

Et à Sofiane Vallée pour de nombreuses choses qui pourraient faire l'objet de nouveaux travaux de recherche (en discussion sur des financements éventuels).

Mais également aux oubliés (il y en a toujours)...



"Un livre est la lumière du cœur, le miroir du corps, le répertoire des vertus, le destructeur des vices, la couronne des prudents, le diadème des sages, l'honneur des savants, l'illustration des justes, le camarade du voyage, le serviteur fidèle au logis, l'ami dans la conversation, le collègue de celui qui préside ; un vase plein de sagesse, la droite voie de l'éloquence, un jardin rempli de fruits, un pré couvert de fleurs, une mer dont les flots sont toujours calmes, le principe de l'intelligence, le fondement de la mémoire, l'ennemi de l'oubli, l'ami du souverain ; au premier appel il s'empresse, au premier ordre il accourt ; répondant à toutes les questions, fidèle dans son obéissance ; vainqueur de tous les accidents de la fortune, et ton véritable guide ; jardin entouré de murs, fontaine scellée, puits d'eau vive, paradis qui ne peut périr ; il te fait savant d'ignorant qu'il te trouve ; jamais il n'éprouve le moindre dégoût, de quelques exigences qu'on l'accable ; il révèle tous les secrets, et porte la clarté dans tout ce qui est obscur"

Lucas de Penna (1325 – 1390)

À la mémoire de
Stephan Gaillard
Pascal Couloigner
Marie-Louise Guezo
Amélie Le Régent

Table des matières

Liste des tableaux et des figures	xiii
1 Chapitre introductif	1
1.1 Le risque inondation en France et dans le monde	1
1.1.1 Le phénomène de crue	2
1.1.2 De la crue à l'inondation	3
1.1.3 Le risque inondation	3
1.2 Le cas particulier des crues-éclair	5
1.2.1 Définition et caractéristiques générales	5
1.2.2 Épisodes pluvieux générateurs	7
1.2.3 Quelques exemples de crues-éclair récentes en France	8
1.2.4 Les crues-éclair autour du bassin méditerranéen	10
1.3 La prévision des crues	11
1.3.1 Intérêt et difficultés	11
1.3.2 La prévision des crues à l'échelle internationale	12
1.3.3 Fonctionnement du dispositif de prévision de crues en France	13
1.3.4 Projet d'extension du dispositif aux crues soudaines (projet stratégique du SCHAPI 2013 – 2016)	15
1.3.5 Intérêt d'une anticipation des dégâts engendrés par les crues soudaines	15
1.4 Objectifs de la thèse	16
2 Prévision des impacts de crues-éclair	19
2.1 Prévisions hydrologiques sur un réseau hydrographique détaillé	22
2.1.1 Prévisions basées sur la pluviométrie	22
2.1.2 Prévisions basées sur la simulation pluie-débit	23
2.1.3 Traitement des incertitudes et recommandations pour la modélisation hydrologique	29
2.1.4 Bilan	30
2.2 Estimation des emprises inondées sur un réseau hydrographique	31
2.2.1 La modélisation hydraulique orientée vers la prévention	31
2.2.2 La modélisation hydraulique intégrée à la prévision	38
2.2.3 Recommandations pour une modélisation de qualité et adaptée aux objectifs visés dans la thèse	43
2.3 Méthode d'estimation des impacts	46
2.3.1 Modèles d'impacts existants	46
2.3.2 Synthèse sur l'estimation des impacts	55
2.3.3 Observations disponibles pour caler et évaluer les modèles d'impacts	56
2.4 Approche proposée et difficultés identifiées	59

3	Description de la zone d'étude et des simulations pluie-débit	61
3.1	Présentation du TRI d'Alès	62
3.1.1	La Directive Européenne Inondation et les TRI	62
3.1.2	Le TRI d'Alès	62
3.2	Description des bassins versants	64
3.2.1	L'hydromorphologie	65
3.2.2	L'occupation et la nature des sols	68
3.2.3	Contexte hydro-climatique	71
3.3	Données mobilisées	73
3.3.1	Données topographiques	73
3.3.2	Données hydrographiques	75
3.3.3	Données pluviométriques	77
3.3.4	Données hydrométriques	79
3.3.5	Données hydrologiques : débits SHYREG	86
3.3.6	Surfaces inondées, enjeux et dommages de référence	87
3.4	Modèle pluie-débit Cinecar	93
3.4.1	Principes	93
3.4.2	Découpage et application du modèle sur le territoire d'étude	95
3.4.3	Validation du modèle	95
3.5	Événements passés exploités	97
3.5.1	Événements CATNAT recensés au sein de la zone d'étude	97
3.5.2	Événements étudiés	99
4	Créer et évaluer un catalogue de zones inondées	105
4.1	Fonctionnement de CARTINO PC	105
4.1.1	Les données utilisées	105
4.1.2	Les étapes de traitement	106
4.1.3	Le paramétrage du modèle	109
4.1.4	Les limites et les difficultés identifiées pour l'application visée	110
4.2	Adaptation de l'outil CARTINO PC	111
4.2.1	Substitution des données sources du modèle	111
4.2.2	Adaptation des paramètres du modèle	113
4.2.3	Modification des étapes de traitement	116
4.2.4	Identification automatique des profils à reprendre	117
4.2.5	Élimination des surfaces inondées déconnectées du lit mineur	118
4.3	Constitution d'un catalogue d'emprises inondées	119
4.3.1	Paramétrage de CARTINO	119
4.3.2	Valorisation des surfaces inondées précédemment modélisées	120
4.4	Évaluation des hauteurs d'eau et des surfaces modélisées	120
4.4.1	Comparaison avec les courbes de tarage des stations hydrométriques	120
4.4.2	Comparaison avec les emprises expertisées dans le cadre de la Directive Européenne Inondations (TRI d'Alès)	136
4.4.3	Améliorations possibles	145
4.4.4	Bilan de l'évaluation des simulations	145

5	Simulation des impacts potentiels par bief et validation	149
5.1	Application au cas du TRI d'Alès pour l'événement de septembre 2002	149
5.1.1	Mise en œuvre de la chaîne de simulation	149
5.1.2	Données de validation retenues	152
5.1.3	Comparaison des résultats de simulations avec les sinistres	160
5.1.4	Comparaison des emprises simulées avec les emprises observées	166
5.1.5	Bilan de l'étude de cas menée sur le TRI d'Alès	170
5.2	Application au bassin versant de l'Argens pour la crue de juin 2010	172
5.2.1	Présentation de la zone d'étude	172
5.2.2	Mise en œuvre de la chaîne de simulation	174
5.2.3	Données de validation retenues	174
5.2.4	Comparaison des résultats de simulations avec les sinistres répertoriés	178
5.2.5	Explications des différences locales les plus significatives	183
5.2.6	Bilan de l'étude de cas menée sur le bassin de l'Argens	193
5.3	Autres pistes pour la validation du modèle d'impacts	194
5.3.1	Les Tweets au cours d'un événement d'inondation	194
5.3.2	Les interventions des SDIS au cours d'un événement d'inondation	195
5.3.3	Conclusions sur les autres sources d'information	197
5.4	Conclusion	197
6	Conclusion générale	201
6.1	Résultats de l'évaluation de la méthode proposée	202
6.2	Perspectives	204
6.2.1	Appliquer la méthode à des territoires plus vastes avec des données topographiques récentes	204
6.2.2	Évaluer la modélisation des impacts sur des événements plus récents	205
6.2.3	Rendre compte des incertitudes	206
6.2.4	Faire évoluer le modèle d'impacts	207
	Bibliographie	207
A	Les libellés des CATastrophes NATurelles	225
B	Classification des dommages	229
C	Qualité spatiale de la base de données TOPO®	231
D	FLOODRISK 2016	233
E	Simulation au pas de temps de 15 minutes des impacts pour l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard	245
F	EGU 2016	249
	Glossaire	251

Liste des tableaux

3.1	<i>Principales caractéristiques hydrogéomorphologiques des tronçons de rivières de la zone d'étude (424) - source : base de données SYRAH (Valette and Cunillera, 2010) - R. = réseau; Llm = Largeur lit mineur; LIM = Largeur lit majeur; RdE = Rapport d'Encaissement (Llm/LIM); moy = moyenne; min = minimum; max = maximum</i>	68
3.2	<i>Description des caractéristiques des données topographiques du Conseil Général et celles de l'association SIG L-R</i>	74
3.3	<i>Caractéristiques des bandes radars - +++ = élevé; ++ = moyen; + = faible; λ = longueur d'onde; SPluie = sensibilité à l'atténuation du signal radar par les fortes précipitations; SVR = sensibilité aux variations du relief - source : Delrieu et al. (2009) et Tabary et al. (2013)</i>	78
3.4	<i>Évolution du nombre de biens assurés et de sinistres dans la base de données de la CCR à l'échelle de l'ensemble du TRI d'Alès (TRI) et du lit majeur (Lm.) des cours d'eau étudiés. Les biens assurés retenus concernent uniquement les polices d'assurances de risques de particuliers propriétaires de maisons individuelles qui sont géolocalisées à la rue ou à l'adresse</i>	90
4.1	<i>Paramétrage initial de la méthode CARTINO</i>	109
4.2	<i>Paramétrage retenu pour l'élargissement des profils</i>	113
4.3	<i>Caractéristiques des profils à l'amont (n-1) et à l'aval (n+1) du profil dont la section d'écoulement est artificiellement réduite (n)</i>	115
4.4	<i>Caractéristiques des profils amont et aval suite à l'étape de reprise des calculs en absence du profil indésirable</i>	115
4.5	<i>Modification du paramétrage contrôlant la distance entre les profils</i>	115
5.1	<i>Répartition du nombre d'étages dans les habitats individuels et collectifs en Suisse</i>	154
5.2	<i>Distribution de la liste des polices d'assurances sélectionnées et du nombre de sinistres associés au cours de l'événement du 8 septembre 2002 dans le Gard</i>	158
5.3	<i>Taux sinistres/bâtiments moyens appliqués pour définir les intervalles à 90% présentés sur les figures 5.12 et 5.13 - S/P = sinistres/polices; P/B = polices/bâtiments</i>	163
5.4	<i>Caractéristiques hydrogéomorphologiques des tronçons de rivière (233) du bassin de l'Argens - source : base de données SYRAH (Valette and Cunillera, 2010) - R. = réseau; Llm = Largeur lit mineur; LIM = Largeur lit majeur; RdE = Rapport d'Encaissement (Llm/LIM); moy = moyenne; min = minimum; max = maximum</i>	173
5.5	<i>Distribution du nombre de sinistres disponibles dans la zone inondable à l'échelle des biefs, au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var</i>	177
5.6	<i>Taux sinistres/bâtiments moyens appliqués pour définir les intervalles à 90% présentés sur les figures 5.30 et 5.31 - S/P = sinistres/polices; P/B = polices/bâtiments</i>	181

5.7	<i>Caractéristiques du tronçon sur l'Argens moyen au cours de l'événement du 15 juin 2010 - débit SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Cinecar Q_{sim}, et les sinistres α suivant la formule (5.4)</i>	183
5.8	<i>CCaractéristiques du tronçon sur la rivière du Blavet au cours de l'événement du 15 juin 2010 - débit SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Cinecar Q_{sim}, et sinistres corrigés (coefficient α suivant la formule (5.4))</i>	187
5.9	<i>Caractéristiques du tronçon l'Argens aval au cours de l'événement du 15 juin 2010 - débit SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Cinecar Q_{sim}, et sinistres corrigés (coefficient α suivant la formule (5.4))</i>	189
5.10	<i>Caractéristiques du tronçon sur le Fournel au cours de l'événement du 15 juin 2010 - débit SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Cinecar Q_{sim}, et les sinistres α suivant la formule (5.4)</i>	191
A.1	<i>Description des libellés et des numéros des CATastrophes NATurelles du Journal Officiel présents dans la base de données Gaspar</i>	225

Table des figures

1.1	<i>Nombres d'arrêtés CATNAT de type "inondations et de coulées de boue" par commune, publiés au Journal Officiel entre novembre 1982 et novembre 2015 à l'échelle de la France métropolitaine - sources : base de données Gaspar et base de données GEOFLA®</i>	2
1.2	<i>Schéma explicatif du principe risque inondation = inondation × enjeux, d'après SDPRM (2004)</i>	4
1.3	<i>Évolution des temps de montée des crues en fonction de la taille des bassins versants, d'après Delrieu et al. (2016). La ligne rouge définit la courbe enveloppe des délais les plus courts et les rectangles bleus montrent les échelles spatio-temporelles typiques des événements pluvieux générateurs (MSC = systèmes convectifs méso-échelle)</i>	5
1.4	<i>Répartition des débits de pointe spécifiques ($m^3/s/km^2$) observés en Europe en fonction de la taille des bassins versants, d'après Payraastre et al. (2016)</i>	6
1.5	<i>Illustration des intensités et cumuls des pluies enregistrées à Lézignan-Corbières du 12 au 14 novembre 1999, d'après Météo France</i>	7
1.6	<i>État du pont de la Tournavelle, sur l'Argens, en aval du quartier des Badiés, sur la commune des Arcs-sur-Argens à la suite de l'inondation du 15 juin 2010. L'eau est passée près de 2 m au-dessus du pont, détruisant la chaussée et arrachant les garde-corps (photo à gauche, C. MARTIN, août 2010 et photo de droite, Cécile MARTIN, juin 2010), d'après Martin (2010)</i>	8
1.7	<i>Localisation des épisodes de crues ayant fait l'objet d'une enquête post-événement dans le cadre du projet Hymex depuis 2010, en raison de leur intensité remarquable : Var en 2010, Pyrénées en 2013, Gard et Hérault en 2014, et Alpes-Maritimes en 2015, d'après Payraastre et al. (2016)</i>	9
1.8	<i>Observations des précipitations et des cumuls de pluies à Sainte-Anastasie et à Uzès entre 0h et 12h le 10 octobre 2014, d'après Météo France</i>	10
1.9	<i>Nombre de décès enregistrés au cours des événements d'inondation entre 1940 et 2015, d'après Gaume et al. (2016)</i>	11
1.10	<i>Carte des prévisions de type "Flash Flood Guidances" pour un horizon d'une heure (quantité de pluie donnant lieu à un risque de crue, 1 pouce = 2,54 cm), publiée aux États-Unis le 18 avril 2016 à 10h.</i>	13
1.11	<i>Exemple de carte de vigilance publiée sur Vigicrues, à 8h30 le 23 août 2016, au niveau du Service de Prévision des Crues (SPC) du Grand Delta</i>	14
2.1	<i>Exemple de catalogue d'emprises inondées pour un bief de cours d'eau</i>	20
2.2	<i>Exemple de construction d'un modèle débit/impacts à l'échelle d'un bief de cours d'eau</i>	21
2.3	<i>Estimation du nombre de bâtiments inondés à l'échelle de chaque bief de cours d'eau au cours de l'événement de crue du 22 octobre 2008 à 3h00 (Secteur du Territoire à Risque Important d'inondation d'Alès)</i>	21

2.4	Principe de fonctionnement de la méthode AIGA , d'après <i>Lavabre and Gregoris (2005)</i>	24
2.5	Cartographie des risques d'inondation identifiés par la méthode AIGA au cours de l'événement du 15 juin 2010 sur le bassin versant de l'Argens (Var) : vert inférieurs à 2 ans, jaune entre 2 et 10 ans, orange entre 10 et 50 ans et rouge supérieurs à 50 ans, d'après <i>Javelle et al. (2014)</i>	25
2.6	Fonctionnement du modèle LISFLOOD d'après <i>Burek et al. (2013)</i>	26
2.7	Fonctionnement du modèle pluie-débit distribué G2G d'après <i>Cole and Moore (2009)</i>	27
2.8	Représentation schématique d'un bassin versant dans le modèle hydrologique Cinecar. Chaque sous-bassin est constitué d'un talweg de section rectangulaire et de un ou deux versants rectangulaires qui lui sont raccordés, d'après <i>Gaume (2002)</i>	28
2.9	Données d'entrée, structure et paramètres du modèle MARINE, d'après <i>Roux et al. (2011)</i>	29
2.10	Schéma de différentes approches disponibles à la mise en place d'une prévision des crues-éclair, d'après <i>Hapuarachchi et al. (2011)</i>	30
2.11	Représentation conceptuelle des zones d'accumulation et des points de communication entre zones d'accumulation, d'après <i>Gouldby et al. (2008)</i>	32
2.12	Schéma des principes de l'algorithme de propagation de l'inondation, d'après <i>Gouldby et al. (2008)</i>	33
2.13	Détail du calcul de la "Normal Depth Method" d'après <i>Bradbrook et al. (2005)</i>	34
2.14	Résultats des calculs de surfaces inondées à partir de JFLOW 2D au cours d'une simulation à l'échelle d'un tronçon d'un kilomètre, d'après <i>Bradbrook et al. (2005)</i>	34
2.15	Illustration des réservoirs de la rivière et de la plaine inondable définis dans chaque maille par CaMa-Flood. Les paramètres et variables sont définis dans <i>Yamazaki et al. (2011)</i>	35
2.16	(a) Hauteur d'eau pour un débit de 255 m ³ /s simulée avec WOLF2D; (b) Photographie de crue prise au cours de l'inondation de 1998, d'après <i>Detrembleur et al. (2009)</i>	36
2.17	Comparaison entre la cartographie des surfaces inondées par modélisation automatisée (CARTINO) par rapport à celle détaillée sur l'étude de la crue de juin 2010 dans le Var (surface inondée relevée), d'après <i>Pons et al. (2014)</i>	37
2.18	Cascade de modélisation HiResFlood-UCI couplant le modèle pluie-débit HL-RDHM au modèle hydraulique BreZo, d'après <i>Sanders (2007)</i>	38
2.19	Méthode de détermination de la relation hauteur-débit pour chaque cellule de la zone étudiée, d'après <i>Poulin et al. (2012)</i>	40
2.20	Modélisation hydraulique locale de l'étendue et de la profondeur de submersion pour un débit de 83 m ³ /s sur un tronçon de la rivière Saint-Charles (46 ° 53'36.9"N 71 ° 21'26.2"W), Québec, d'après <i>Poulin et al. (2012)</i>	41
2.21	Modélisation de la plaine inondable de manière dynamique par LISFLOOD-FP	41
2.22	Résultats d'une simulation globale fixée pour une période de retour 100 ans sur, (a) toute l'Afrique, (b) le delta du Niger, et (c) la plaine inondable du fleuve Zambèze, d'après <i>Sampson et al. (2015)</i>	42
2.23	Prévisions de zones inondées à partir de LISFLOOD-FP, d'après <i>Merkuryeva et al. (2015)</i>	43
2.24	a) Modélisation des surfaces inondées et b) incertitude associée à la modélisation à partir de LISFLOOD-FP et de la dégradation des données topographiques (10, 20, 50, 100, 150, 200 m), d'après <i>Savage et al. (2016)</i>	44
2.25	Répartition des échelles de longueur du quartier de Greenfields à Glasgow; (a) le côté le plus court des bâtiments et (b) la distance la plus courte entre deux bâtiments, d'après <i>Fewtrell et al. (2008)</i>	45

2.26	<i>La carte des risques associés au débordement de cours d'eau pour le Territoire à Risque Important d'inondation d'Alès, centrée sur la commune d'Alès d'après la DREAL (2013c)</i>	47
2.27	<i>Hierarchisation par sévérité des impacts de la base de données SHAVE aux États-Unis vis-à-vis du risque d'inondation (Severe Hazard Analysis and Verification Experiment), d'après Calianno et al. (2013)</i>	48
2.28	<i>Prévision à 1 heure des impacts à partir des Flash Flood Guidance lors de la tempête tropicale Erin, d'après Calianno et al. (2013)</i>	48
2.29	<i>Carte de la capacité des personnes : (a) à entendre et évacuer la zone à fort risque (b) à se protéger ou évacuer rapidement la zone (c) à comprendre et à réagir suite aux avertissements diffusés, et (d) synthèse de la capacité moyenne des habitants à faire face à l'aléa par blocs de recensements, d'après Wilhelmi and Morss (2013)</i> .	50
2.30	<i>Cartes associées à la crue de 1997 sur le site de Fort Collins : (a) capacité des personnes à faire face aux inondations et (b) localisation des appels de secours émis et des bâtiments impactés au cours de l'événement, d'après Wilhelmi and Morss (2013)</i>	50
2.31	<i>Méthode d'évaluation de la vulnérabilité de la population face aux risques d'inondation, d'après Tanguy (2012)</i>	51
2.32	<i>Cartographie de la vulnérabilité humaine en fonction de la prévision d'une inondation, d'après Tanguy (2012)</i>	52
2.33	<i>Distribution spatiale des coûts annuels prévus liés aux inondations à l'échelle des quartiers se situant dans l'estuaire de la Tamise, d'après Gouldby et al. (2008)</i> . .	52
2.34	<i>(a) Distribution spatiale des coûts annuels prévus face aux inondations, et (b-e) observation des dommages et des périodes de retour atteintes pour différents versants au cours de deux événements passés. Les figures b et c représentent le premier événement avec des dommages estimés à 28 millions d'euros, et les figures d et e le second événement avec des dommages estimés à 68 millions d'euros, d'après Falter et al. (2015)</i>	53
2.35	<i>Carte de l'étendue des aléas de ruissellement et d'inondation en fonction des sinistres recensés, d'après Moncoulon et al. (2014)</i>	54
2.36	<i>Estimation (a) du coût des dommages des maisons autour de la ville de Sayo au Japon (vue d'environ 1 km²) et (b) des pertes liées à la destruction des cultures sur le bassin versant de Sayogawa (191km²), d'après Kobayashi and Takara (2013)</i> . .	55
2.37	<i>Représentation des débits maximums atteints (noir) et des impacts recensés (rectangle vert) au cours de différents événements a) à l'échelle d'un bassin et b) à l'échelle de ce même bassin en définissant un seuil des premiers dégâts, d'après Defrance (2014)</i>	57
2.38	<i>Schéma de "courdsourcing" en temps de crise et ses six dimensions, d'après Liu (2014)</i>	58
3.1	<i>Le Territoire à Risque Important d'inondation d'Alès en région Languedoc-Roussillon, d'après la DREAL (2015)</i>	63
3.2	<i>Observation des évolutions de l'urbanisation sur la commune d'Alès entre 1957 (à gauche) et 2016 (à droite) - L'encadré rouge correspond à l'aval du ruisseau du Grabieux et de la rivière du Bruèges - source IGN</i>	63
3.3	<i>Localisation du TRI d'Alès au sein des bassins versants des Gardons et de la Cèze</i>	64
3.4	<i>Zone retenue pour l'étude de cas du TRI d'Alès au sein des bassins versants des Gardons et de la Cèze</i>	65
3.5	<i>Échelle temporelle de l'ajustement des différents paramètres géomorphologiques du chenal, d'après Sear et al. (2003)</i>	66

3.6	<i>Emplacement des rivières de la Cèze, du Gardon d'Alès et du Gardon de Saint-Croix/Mialet/Anduze au niveau du TRI d'Alès - source : base de données SYRAH, d'après Valette and Cunillera (2010)</i>	67
3.7	<i>Profil en long de la Cèze, du Gardon d'Alès et du Gardon de Saint-Croix/Mialet/Anduze à partir de leur source vers leur exutoire. La partie en pointillé du profil en long correspond à la traversée du TRI d'Alès - source : base de données SYRAH, d'après Valette and Cunillera (2010)</i>	67
3.8	<i>Organisation spatiale des rapports d'encaissements des tronçons de la base de données SYRAH-CE - source : base de données SYRAH (Valette and Cunillera, 2010)</i>	68
3.9	<i>Organisation spatiale de l'occupation du sol - source : Base de données Corine Land Cover 2012 (Kosztra and Arnold, 2014) et Base de données SYRAH (Valette and Cunillera, 2010)</i>	69
3.10	<i>Contexte géologique de la zone d'étude - source : BRGM France - WMS de la carte géologique à l'échelle du millionième (6ème édition)</i>	70
3.11	<i>Synthèse des perméabilités des sols en fonction de la nature de la roche mère et de l'occupation des sols du bassin versant du Gardon d'Anduze, d'après Desprats et al. (2010)</i>	70
3.12	<i>Pluies journalières de période de retour centennale (mm), d'après Ceresetti et al. (2012)</i>	72
3.13	<i>Évolution (en %) du cumul journalier maximum annuel de pluie sur la période 1985-2014 par rapport la moyenne inter-annuelle des enregistrements pluviométriques (cercles de couleur) et aux moyennes spatialisées (carrés de couleur 8x8 km²), d'après Blanchet et al. (2016)</i>	72
3.14	<i>Comparaison entre (a) une image obtenue par un drone et (b) une photogrammétrie, d'après Smith et al. (2014)</i>	73
3.15	<i>Image des dalles de l'Orthophoto 2012 du SIG-LR couvrant le département du Gard</i>	74
3.16	<i>Données sur les réseaux hydrographiques retenues pour les modélisations hydrologique et hydraulique</i>	75
3.17	<i>Différences de l'identification du lit mineur de deux jeux de données hydrographiques</i>	76
3.18	<i>Découpage de la zone d'étude en bassins versants et son réseau hydrographique - source : Base Nationale des Bassins Versants du SCHAPI</i>	77
3.19	<i>Localisation des dispositifs de mesures pluviométriques dans la zone d'étude, d'après l'OHMCV</i>	78
3.20	<i>Courbe de tarage de la station hydrologique d'Alès, centrée sur les jaugeages</i>	79
3.21	<i>Stations hydrométriques retenues de la zone d'étude</i>	80
3.22	<i>Profil en travers à la station hydrométrique d'Alès, vue de l'amont vers l'aval</i>	81
3.23	<i>Courbe de tarage de la station hydrologique d'Alès</i>	81
3.24	<i>Profil en travers à la station hydrométrique de Corbès, vue de l'amont vers l'aval</i>	82
3.25	<i>Courbe de tarage de la station hydrométrique de Corbès</i>	82
3.26	<i>Profil en travers à la station hydrométrique de Banne, vue de l'amont vers l'aval</i>	83
3.27	<i>Courbe de tarage de la station hydrométrique de Banne</i>	83
3.28	<i>Profil en travers à la station hydrométrique de Mialet, vue de l'amont vers l'aval</i>	84
3.29	<i>Courbe de tarage de la station hydrométrique de Mialet</i>	84
3.30	<i>Profil en travers à la station hydrométrique de Bessèges, vue de l'amont vers l'aval</i>	85
3.31	<i>Courbe de tarage de la station hydrométrique de Bessèges</i>	85
3.32	<i>Modèle opératoire de la création de la base de données SHYREG débits - source : Arnaud et al. (2013) - Q_0 = débit mensuel moyen (m³/s/km²); A = capacité du réservoir (mm); S_0/A = variable d'ajustement du modèle hydrologique GR (entre 0 et 1) correspondant un niveau de remplissage du réservoir</i>	87

3.33	<i>Carte des surfaces inondables pour les trois scénarios retenus dans le TRI d'Alès sur la commune d'Alès, d'après la DREAL (2013b)</i>	88
3.34	<i>Carte des surfaces inondables au droit de la commune d'Alès pour le scénario de forte fréquence du TRI d'Alès, d'après la DREAL (2013a)</i>	89
3.35	<i>Distribution des hauteurs des bâtiments de la base de données TOPO® concernés dans la zone d'étude, d'après IGN (2011)</i>	91
3.36	<i>Croquis du calcul de la hauteur des bâtiments de la base de données TOPO®, d'après IGN (2011)</i>	92
3.37	<i>Distribution de la distance minimum entre deux bâtiments</i>	92
3.38	<i>Distribution de la largeur des bâtiments</i>	93
3.39	<i>Attribution des valeurs de Curve Number moyen sur les différents bassins versants de la Base Nationale des Bassins Versants du SCHAPI</i>	94
3.40	<i>Comparaison des valeurs de Nash calculées pour 10 événements par le modèle Cinecar et GR4J au niveau de la commune d'Anduze. La partie supérieure de la figure décrit les débits de pointe observés de ces événements, d'après Naulin (2012)</i>	96
3.41	<i>Répartition des différentes surfaces géographiques soumises à un événement d'inondation, d'après Bourguignon (2014)</i>	97
3.42	<i>Nombre de communes du TRI d'Alès déclarées CATNAT entre juillet 1982 et juin 2016, d'après la base de données Gaspar</i>	98
3.43	<i>Nombre de CATNAT de type "inondations et de coulées de boue", référencées dans le Journal Officiel, entre novembre 1982 et novembre 2015 à l'échelle des communes du TRI d'Alès - source : base de données Gaspar et base de données GEOFLA®</i>	98
3.44	<i>Cumul des pluies (mm) à partir des lames d'eau radar réanalysées (TRADHY) de 2002 et du modèle pluie-débit Cinecar Delrieu et al. (2009)</i>	99
3.45	<i>Comparaison des débits pseudo spécifiques relevés suite à l'événement de 2002 ($m^3/s/km^{(0,8)^2}$) avec les débits simulés avec le modèle pluie-débit Cinecar</i>	100
3.46	<i>Répartition des écarts des débits pseudo spécifiques de ceux relevés par rapport à ceux simulés</i>	100
3.47	<i>Cumul des pluies (mm) à partir des lames d'eau radar réanalysées de 2008 (méthode KED) et du modèle pluie-débit Cinecar (Delrieu et al., 2013)</i>	101
3.48	<i>Comparaison des débits pseudo spécifiques relevés suite à l'inondation de 2008 ($m^3/s/km^{(0,8)^2}$) avec les débits simulés avec le modèle pluie-débit Cinecar</i>	102
3.49	<i>Répartition des écarts des débits pseudo spécifiques de ceux relevés par rapport à ceux simulés</i>	102
4.1	<i>Résultats de la méthode CARTINO : étendue des surfaces inondées et hauteurs d'eau associées</i>	106
4.2	<i>Modélisation d'un réseau hydrographique à partir de l'outil CARTINO</i>	107
4.3	<i>Construction automatique des profils en travers avec l'outil CARTINO</i>	107
4.4	<i>Profil en travers avec sa charge hydraulique, a) en cours de construction et b) terminé</i>	108
4.5	<i>Illustration des différences spatiales entre le lit mineur hydrogéomorphologique de la DREAL Languedoc-Roussillon et le réseau hydrographique a) modélisé par CARTINO à partir d'une emprise EXZECO, b) provenant de la base de données CARTHAGE®</i>	111
4.6	<i>Construction d'un profil en travers avec sa charge hydraulique simulée, a) sans contrainte spatiale et b) centré sur le lit mineur</i>	112

4.7	<i>Les effets d'un profil positionné au droit d'un pont dont le tablier apparaît dans le MNT, (a) au cours de l'étape des calculs hydrauliques, (b) au cours de l'étape de reprise des calculs en l'absence du profil "n"</i>	114
4.8	<i>Impact d'une réduction artificielle de la section d'écoulement dans un profil sur la hauteur d'eau simulée et la largeur du profil en amont</i>	114
4.9	<i>Optimisation du nombre de profils nécessaire à la couverture du réseau hydrographique : cas d'un méandre en tête de bassin versant</i>	116
4.10	<i>Série de profils modélisés à proximité d'une confluence. Les sections mouillées sont indiquées en m²</i>	118
4.11	<i>Surfaces inondées modélisées sous CARTINO (a) avec une surface en eau déconnectée, (b) sans surface en eau déconnectée</i>	118
4.12	<i>Méthode de suppression des surfaces inondées déconnectées du lit mineur, d'après Poulin et al. (2012)</i>	119
4.13	<i>Distinction des lits hydrogéomorphologiques, d'après Ballais et al. (2005)</i>	120
4.14	<i>Localisation des profils utilisés pour les calculs hydrauliques et du profil de référence de la station de Mialet</i>	121
4.15	<i>Courbe de tarage de la station hydrologique de Mialet et les HQsim</i>	122
4.16	<i>Comparaison du profil de référence vis-à-vis de profils simulés par CARTINO à partir de trois jeux de données topographiques différents au droit de la station de Mialet</i>	122
4.17	<i>Courbe de tarage de la station hydrologique de Corbès et les valeurs des hauteur/débit simulées</i>	123
4.18	<i>Comparaison du profil de référence aux profils simulés avec CARTINO au droit de la station de Corbès</i>	124
4.19	<i>cotes de fond (B) et Hsim (H) le long de la station hydrologique de Corbès</i>	124
4.20	<i>Courbe de tarage de la station hydrologique de Banne et les valeurs de hauteur/débit simulées avec CARTINO</i>	125
4.21	<i>Comparaison du profil de référence aux profils simulés au droit de la station de Banne</i>	125
4.22	<i>Observation de la variation de la section mouillée lors du débordement en lit majeur à Banne</i>	126
4.23	<i>Effet d'une correction de deux mètres appliquée à l'ensemble des hauteurs/débits simulées à Banne</i>	127
4.24	<i>Courbe de tarage de la station hydrométrique de Bessèges et hauteurs/débits simulés avec CARTINO</i>	127
4.25	<i>Profil en long présentant les altitudes de fond du lit (B) simulées et de référence à l'aval de la station hydrométrique de Bessèges</i>	128
4.26	<i>cotes de fond (B) simulées et celle de référence le long de la station hydrométrique de Bessèges</i>	128
4.27	<i>Courbe de tarage de la station hydrométrique d'Alès et hauteurs/débits simulés avec CARTINO</i>	130
4.28	<i>Courbe de tarage de la station hydrométrique d'Alès et couples hauteurs/débits simulés pour deux jeux de données topographiques</i>	130
4.29	<i>Comparaison du profil de référence aux profils simulés au droit de la station d'Alès</i>	131
4.30	<i>Comparaison des profils simulés à 300 m en aval de la station d'Alès avec un profil de référence issu d'un levé de terrain</i>	131
4.31	<i>Profil en long présentant les cotes du fond du lit (B) et les hauteurs d'eau simulées (H) à proximité de la station hydrométrique d'Alès</i>	132

4.32	<i>Visualisation des différences entre les simulations à l'aval de la station d'Alès :(a) Profils Q10 (m²), (b) Profils Q20 (m²); (c) Ssim Q10 brute; (d) Ssim Q20 brute; (e) Ssim Q10 finale; (f) Ssim Q20 finale</i>	133
4.33	<i>Vue du profil en travers avec les résultats des hauteurs simulées pour les débits de PDR 10, 20, 30 et 50 ans</i>	134
4.34	<i>Courbe de tarage de la station hydrométrique d'Alès et influence du coefficient de rugosité sur les hauteurs simulées</i>	134
4.35	<i>Profil en travers à la station hydrométrique d'Alès et influence du coefficient de rugosité sur les hauteurs simulées</i>	135
4.36	<i>Cartes à l'échelle du TRI d'Alès (a) de la surface inondée de référence (Sref) pour la période de retour 30 ans, (b) de la surface modélisée sous CARTINO (Ssim) pour la période de retour de 30 ans, (c) de l'échelle d'évaluation retenue pour la comparaison des Ssim et Sref pour la période de retour 30 ans, (d) de la surface de référence pour la période de retour 300 ans, (e) de la surface modélisée pour la période de retour 300 ans, (f) de l'échelle d'évaluation retenue pour la comparaison des Ssim et Sref pour la période de retour 300 ans</i>	137
4.37	<i>Comparaison des emprises simulées Ssim et de référence Sref (DREAL, 2013b) à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau</i>	138
4.38	<i>distributions de valeurs des TSI pour les débits de périodes de retour 30 et 300 ans</i>	139
4.39	<i>distributions des valeurs des TSI en fonction de l'étendue de la Sref pour les périodes de retour 30 et 300 ans - médiane (trait épais), boîte correspondant aux quartiles 0,25 et 0,75, et moustaches d'une longueur d'au maximum 1,5 fois la distance interquartile. Q0,25-1,5IQR et Q0,75+1,5IQR - valeurs extrêmes non représentées</i>	139
4.40	<i>répartition des valeurs des TSI en fonction de la surfaces drainée par les tronçons</i>	140
4.41	<i>Distributions des TSI obtenues à partir des données topographiques du SIGLR</i>	141
4.42	<i>répartition des TSI obtenus à partir des données topographiques du SIGLR, en fonction de l'étendue de la Sref - médiane (trait épais), boîte correspondant aux quartiles 0,25 et 0,75, et moustaches d'une longueur maximum de 1,5 fois la distance interquartile. Q0,25-1,5IQR et Q0,75+1,5IQR - valeurs extrêmes non représentées</i>	142
4.43	<i>Cartographie, sur les tronçons retenus pour l'évaluation : du nombre de bâtiments identifiés dans les surfaces de référence (a) et modélisée (b) pour la période de retour 30 ans, dans les surfaces de référence (d) et modélisée (e) pour la période de retour 300 ans; des différences relatives β du nombre de bâtiments identifiés entre les surfaces simulées et de référence pour les périodes de retour 30 ans (c) et 300 ans (f)</i>	144
5.1	<i>Exemple d'une courbe d'impacts obtenue à partir du nombre de bâtiments inventoriés dans la base de données TOPO® à l'échelle d'un tronçon de la BNBV du SCHAPI</i>	150
5.2	<i>Exemple de restitution du nombre d'impacts maximums estimés par la chaîne de simulation pour le TRI d'Alès, le 9 septembre 2002 à 7h00</i>	151
5.3	<i>Évolution du nombre de cédantes fournissant des données des risques à l'adresse et de leur représentativité de 1995 à 2011, d'après Bidan and Quantin (2013)</i>	153
5.4	<i>Répartition des bâtiments de la base de données TOPO® en fonction de leur hauteur, centrée sur le centre-ville d'Alès - fond de carte : Imagery (ArcMap)</i>	154
5.5	<i>Ratio moyen entre le nombre de polices d'assurances dans la base CCR et le nombre de bâtiments de la base de données TOPO obtenu à l'échelle des biefs de la BNBV, et des surfaces simulées de PDR 1000, 50 et 10 ans</i>	155
5.6	<i>Carte des ratios nombre de polices d'assurances / nombre de bâtiments à l'échelle de la zone inondable (période de retour 1000 ans)</i>	156

5.7	<i>Présentation des taux de sinistralité moyens au sein des différentes surfaces inondées simulées ($T=10, 50$ et 1000ans) et en dehors de la zone inondable simulée</i>	157
5.8	<i>Distribution du nombre de sinistres disponibles dans la zone inondable à l'échelle des biefs, au cours de l'événement du 8 septembre 2002 dans le Gard</i>	158
5.9	<i>Distribution des débits de pointe simulés atteints par le modèle hydrologique Cinecar au cours de l'événement du 8 septembre 2002 par comparaison aux quantiles de débits SHYREG sur les différents tronçons du modèle</i>	159
5.10	<i>Comparaison du nombre de bâtiments et du nombre de sinistres dans la zone inondable (période de retour 1000 ans)</i>	160
5.11	<i>Distribution des sinistres interpolés en fonction des bâtiments inondables au cours de l'événement</i>	161
5.12	<i>Sinistres répertoriés corrigés (coefficient α) en fonction du nombre N de bâtiments calculé au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale de N tirages et probabilité de succès de 6% . .</i>	162
5.13	<i>Sinistres répertoriés corrigés (coefficient δ) en fonction du nombre N de bâtiments calculé au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale de N tirages et probabilité de succès de 6% . .</i>	163
5.14	<i>Cartes des dégâts au cours de l'événement à l'échelle de 41 tronçons, a) nombre de bâtiments inondés estimés, b) nombre de sinistres recensés (après ajustement δ) .</i>	164
5.15	<i>Cartes des différences relatives entre les sinistres recensés (après ajustement δ) et le nombre de bâtiments estimés au cours de l'événement à l'échelle de 41 tronçons</i>	165
5.16	<i>Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur le Galeizon au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon</i>	166
5.17	<i>Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur le Grabieux au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon</i>	167
5.18	<i>Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur l'Avène au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon</i>	167
5.19	<i>Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur l'Alzon aval au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon</i>	168
5.20	<i>Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur l'Amous au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon</i>	168
5.21	<i>Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur le Gardon d'Alès à Alès, au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon</i>	170
5.22	<i>Caractéristiques du bassin versant de l'Argens</i>	172
5.23	<i>Zone d'étude retenue pour l'étude de cas du Var au sein du bassin versant de l'Argens</i>	173

5.24	<i>Ratio moyen entre le nombre de polices d'assurances de la base CCR et le nombre de bâtiments de la base de données TOPO® à l'échelle des biefs de la BNBV, et des surfaces simulées de périodes de retour 1000, 50 et 10 ans</i>	175
5.25	<i>Carte des ratios entre le nombre de polices d'assurances et le nombre de bâtiments à l'échelle de la zone inondable (emprises de période de retour 1000 ans)</i>	176
5.26	<i>Présentation des taux de sinistralité moyens au sein des différentes surfaces inondées simulées (T=10, 50 et 1000ans) et en dehors de la zone inondable simulée</i>	177
5.27	<i>Distribution du nombre de sinistres disponibles dans la zone inondable à l'échelle des biefs, au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var</i>	178
5.28	<i>Comparaison du nombre de bâtiments et du nombre de sinistres dans la zone inondable (période de retour 1000 ans)</i>	179
5.29	<i>Distribution des sinistres interpolés en fonction des bâtiments inondables au cours de l'événement</i>	179
5.30	<i>Sinistres corrigés (coefficient α) en fonction des bâtiments inondables simulés au cours de l'événement du 15 juin 2010 et quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale</i>	180
5.31	<i>Sinistres corrigés (coefficient δ) en fonction des bâtiments inondables simulés au cours de l'événement du 15 juin 2010 - bornée par les probabilités 5%, 50% et 95% de la loi binomiale</i>	180
5.32	<i>Sinistres interpolés et corrigés (coefficient α) en fonction des bâtiments inondables simulés au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var, et quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale - points magentas = points éloignés de l'intervalle</i>	181
5.33	<i>Cartes des dégâts au cours de l'événement à l'échelle de 36 tronçons, a) nombre d'impacts maximums estimés, b) nombre de sinistres ajustés</i>	182
5.34	<i>Cartes des différences relatives entre les sinistres ajustés et les impacts estimés au cours de l'événement à l'échelle de 36 tronçons</i>	182
5.35	<i>Carte des emprises inondées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim}, et des bâtiments potentiellement impactés sur la rivière de l'Argens moyen, à Vidauban, au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var</i>	183
5.36	<i>Comparaison du profil extrait du MNT et du profil relevé post-catastrophe - Hauteur d'eau calculée pour un débit retenu de 1200 m³/s</i>	184
5.37	<i>Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et emprise de la zone inondée relevée dans le secteur de Vidauban au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var</i>	185
5.38	<i>Profils extraits du MNT à l'origine des différences constatées entre la surface inondée de référence et les emprises calculées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim}, (a) position des profils extraits pour les calculs hydrauliques, (b) observation d'un profil au niveau d'un lit perché</i>	185
5.39	<i>Carte des étendues inondées estimées par les débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim}, de l'étendue réelle inondée et des bâtiments potentiellement impactés sur la rivière du Blavet, à Roquebrune-sur-Argens, au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var</i>	187
5.40	<i>Carte des emprises inondées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et emprise inondée relevée sur l'Argens au droit de la confluence avec le Canavère au cours de l'événement du 15 juin 2010</i>	189

5.41	<i>Carte des emprises inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et emprise inondée relevée sur la rivière du Fournel, à la confluence avec l'Argens, au cours de l'événement du 15 juin 2010</i>	191
5.42	<i>Carte des emprises inondées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Q_{sim}, et emprise relevée sur la rivière de la Florièye au niveau de la commune de Taradeau et de la confluence avec l'Argens au cours de l'événement du 15 juin 2010</i>	193
5.43	<i>Carte centrée sur la ville de Nîmes des Tweets recensés par le LTHE au cours des inondations d'octobre et de novembre 2014. Ils sont classés en fonction de leur géolocalisation par rapport au lit majeur hydrogéomorphologique - source : LTHE et DREAL Languedoc-Roussillon</i>	195
5.44	<i>Carte des interventions du SDIS au cours des inondations mineures du 2009, 2010 et 2011 dans le Gard, centrée sur la ville d'Alès - source : SDIS30 et DREAL Languedoc-Roussillon</i>	196
6.1	<i>Couverture de l'information LiDAR en 2014 (carte à gauche) et projection des informations disponibles courant 2016 (carte à droite) - source Pauthonnier (2014)</i>	205
B.1	<i>Exemple de la répartition des dommages suivant leur caractère tangibles/intangibles et direct/indirect - source : André (2013)</i>	229
C.1	<i>Précision géométrique planimétrique des données de la base de données TOPO de l'IGN</i>	231
C.2	<i>Précision géométrique altimétrique des données de la base de données TOPO de l'IGN</i>	232
E.1	<i>Évolution des impacts du 8 septembre 2002 entre à 20h30 et 22h30</i>	245
E.2	<i>Évolution des impacts entre le 8 septembre 2002 à 22h45 et le 9 septembre 2002 à 3h00</i>	246
E.3	<i>Évolution des impacts du 9 septembre 2002 entre 3h15 et 9h00</i>	247
E.4	<i>Évolution des impacts du 9 septembre 2002 entre 9h15 et 12h45</i>	248

Chapitre 1

Chapitre introductif

1.1 Le risque inondation en France et dans le monde

PARMI les 189 catastrophes naturelles majeures recensées à l'échelle planétaire en 2014, 32% étaient des inondations d'après [SwissRe \(2015\)](#). Depuis 1970, 2014 fut l'année où les inondations ont été les plus meurtrières. Elles ont également causé de très importants dégâts, et les pays affectés se localisaient aux quatre coins du monde¹, illustrant la forte exposition de nos sociétés face à ce risque naturel.

D'une façon plus générale, les inondations constituent le risque naturel le plus destructeur à l'échelle mondiale, en raison d'une part de la fréquence d'occurrence élevée de cet aléa, et d'autre part de la forte exposition des enjeux humains et de leur vulnérabilité.

La France fait partie des pays fortement exposés aux inondations. Avec les séismes, les inondations y constituent le phénomène naturel le plus dommageable ([DGPR, 2012](#)) : le montant annuel des dégâts liés aux inondations oscille entre 1 et 1,4 milliards d'euros. Entre 1982 et 2015, 4 395 communes ont été touchées au moins cinq fois par des "inondations et coulées de boue" d'après la base de données Gaspar (Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques), qui recense l'ensemble des arrêtés CATNAT de CATastrophes NATurelles (Cf. figure 1.1 et annexe A). Ce chiffre traduit à la fois la fréquence élevée des phénomènes d'inondation et une forte exposition à cet aléa. Les communes concernées se répartissent sur l'ensemble de la France métropolitaine mais de manière hétérogène. Les dix communes² ayant fait l'objet du plus grand nombre d'arrêtés CATNAT depuis 1982 se situent dans les départements des Alpes-Maritimes, du Var et de l'Aude. L'agrégation par départements du nombre d'arrêtés CATNAT montre également que les départements du pourtour de la Méditerranée mais également certains départements du nord et de l'est de la France sont particulièrement exposés.

1. Royaume-Unis, Pérou, Italie, Bolivie, Brésil, Indonésie, France, Tanzanie, Argentine, Sri Lanka, Burundi, Zimbabwe, Paraguay, Colombie, îles Salomon, Afghanistan, Tadjikistan, Chine, Serbie-et-Monténégro, Bosnie-Herzégovine, Croatie, Roumanie, Slovaquie, Pologne, Russie, Iran, Côte d'Ivoire, Bulgarie, Inde, Uruguay, Allemagne, Cambodge, Niger, États-Unis, Népal, Bangladesh, Japon, Pakistan, Nicaragua, Honduras, Guatemala, Suisse, Slovénie, Maroc, Espagne, Malaisie et Thaïlande

2. Antibes, Nice, Roquebrune-sur-Argens, Cagne-sur-Mer, Saint-Laurent-du-Var, Canne, Narbonne, Grasse, la Colle-sur-Loup, la Gaude

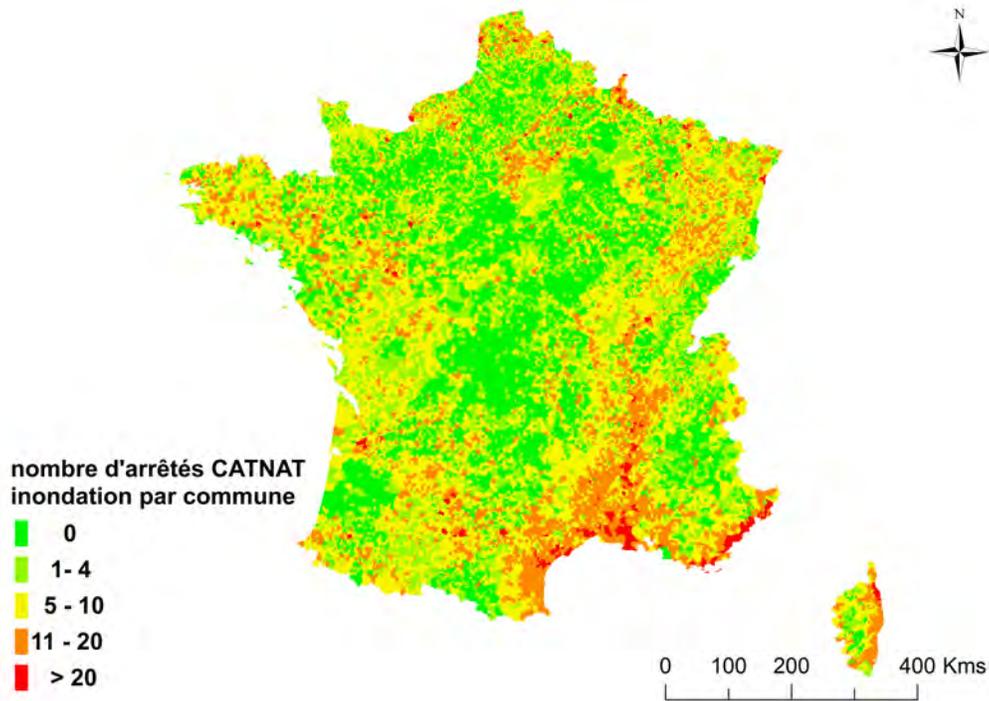


FIGURE 1.1 – Nombres d'arrêtés CATNAT de type "inondations et de coulées de boue" par commune, publiés au Journal Officiel entre novembre 1982 et novembre 2015 à l'échelle de la France métropolitaine - sources : base de données Gaspar et base de données GEOFLA®

Une grande partie des inondations observées en France est associée aux phénomènes de crues. [Vinet \(2010\)](#) rappelle qu'il est important de distinguer ces deux termes. En effet les inondations peuvent être générées par des phénomènes naturels autres que les crues de cours d'eau, comme par exemple les submersions marines, ou le ruissellement localisé notamment en milieu urbain.

1.1.1 Le phénomène de crue

[Vinet \(2010\)](#) définit une crue comme la montée du niveau des eaux contrôlée par une variation du débit d'un cours d'eau. La formation d'une crue dépend d'une multitude de facteurs dont l'intensité de la pluie génératrice et sa durée, le relief, la température pouvant induire un apport de fonte nivale, la nature du sous-sol et son état d'humidité, l'occupation des sols et l'imperméabilisation des surfaces, les obstacles naturels ou anthropiques, les conditions d'écoulement et les concomitances des pointes de crue aux confluences,... C'est souvent la multiplication de facteurs défavorables qui est à l'origine des crues les plus catastrophiques. L'intensité des pluies et leur répartition dans le temps constituent néanmoins les principaux facteurs de contrôle d'un hydrogramme de crue (évolution temporelle du débit). La forme de cet hydrogramme (en particulier la montée du débit) permet de distinguer les crues rapides des crues lentes. Le caractère rapide d'une crue se définit souvent à partir du temps de réponse qui sépare le pic de pluviométrie de la pointe de crue. Ce temps de réponse sera d'autant plus réduit que le bassin versant est de petite taille et que sa pente moyenne est forte. La forme de l'hydrogramme dépend néanmoins aussi de nombreux autres facteurs, comme les formations superficielles des sols et leur état de saturation en eau juste avant l'épisode pluvieux, ou encore la localisation des plus forts cumuls de pluie dans le bassin versant.

La description synthétique d'une crue est généralement réalisée au travers des informations suivantes :

- la magnitude ou l'intensité de la crue, qui se mesure par son débit de pointe (m^3/s) ou par défaut la hauteur d'eau atteinte, ou encore par son volume (débit moyen sur une durée définie). La comparaison des débits dans différents bassins versants ou différentes régions du monde se fait souvent en ramenant le débit de pointe à une surface drainée élémentaire de 1km^2 , ce qui correspond au débit de pointe spécifique ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) ;
- la fréquence ou période de retour à laquelle des crues d'intensité similaires sont observées ;
- la forme de l'hydrogramme notamment en phase de montée, et notamment le temps de réponse ;
- la saison d'occurrence, régie par le climat régional.

1.1.2 De la crue à l'inondation

Vinet (2010) présente une classification complète des inondations suivant leur origine, pluviale ou non climatique (tsunami, rupture de barrage). Les inondations d'origine pluviale regroupent les phénomènes de crues, de ruissellements localisés, et de coulées de boues. L'inondation associée aux crues peut être définie comme le débordement du cours d'eau hors de son lit, inondant des espaces exondés habituellement.

L'inondation est souvent caractérisée par une hauteur d'eau et une vitesse. Le seuil de 50 cm de hauteur d'eau, toutes vitesses confondues, est considéré comme dangereux puisque les déplacements pédestres ou véhiculés deviennent difficiles voire impossibles. À cette hauteur, la turbidité de l'eau masque les dépressions naturelles (fossés) et artificielles (bouches d'égout) demandant l'intervention des secours par voies nautique ou aérienne.

1.1.3 Le risque inondation

Le risque inondation est lié à la présence d'enjeux humains vulnérables au sein de la zone inondée (aléa), comme par exemple des bâtiments (figure 1.2).

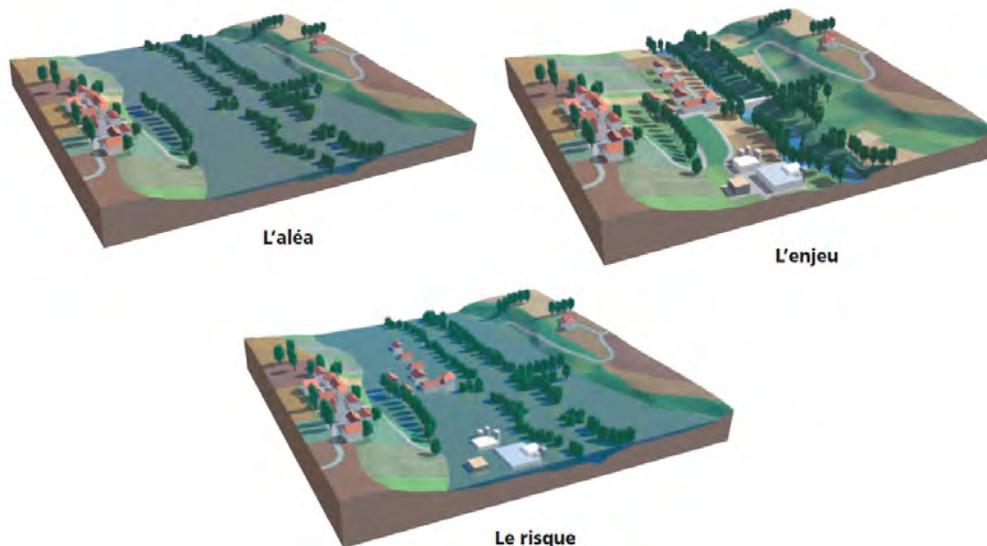


FIGURE 1.2 – Schéma explicatif du principe $\text{risque inondation} = \text{inondation} \times \text{enjeux}$, d'après SDPRM (2004)

La phase EPRI (évaluation préliminaire du risque inondation) de la Directive Européenne Inondations a récemment permis de mieux évaluer l'ampleur des enjeux exposés aux débordements de cours d'eau en France métropolitaine (DGPR, 2012). D'après cette évaluation, le risque inondation concerne :

- 16,8 millions de résidents permanents ;
- au moins 9 millions d'emplois ;
- 5% du territoire.

Ces enjeux exposés au risque d'inondation ont notablement augmenté lors de l'urbanisation massive des années 1950-60. Ceci constitue une tendance générale dans l'histoire de l'urbanisation des pays occidentaux : densification urbaine, extension pavillonnaire, recherche de la proximité des cours d'eau (tourisme).

L'île de Noirmoutier constitue un exemple d'augmentation importante des enjeux exposés depuis les années 1970 (inondations par submersion marine dans ce cas particulier). Dans les quatre communes de l'île (Barbâtre, L'Épine, La Guérinière et Noirmoutier-en l'île) l'urbanisation s'est accélérée suite à la construction du pont, alors que les $\frac{2}{3}$ ³ de ce territoire sont sous le niveau des plus hautes eaux. Lors de la catastrophe Xynthia en 2010, l'île fut coupée en deux au niveau des communes de la Guérinière et de l'Épine, inondation engendrant de nombreux dégâts.

On constate toujours aujourd'hui une augmentation quasi générale du risque par augmentation des enjeux situés dans les zones exposées. De façon logique, les dommages dus aux inondations suivent également une tendance croissante ce qui préoccupe assureurs et gestionnaires du risque.

3. Plan de prévention des risques naturels de l'île de Noirmoutier, 2012

1.2 Le cas particulier des crues-éclair

1.2.1 Définition et caractéristiques générales

Defrance (2014) évoque la difficulté de définir le terme "crues-éclair". Il recommande de définir ce terme en prenant en compte l'échelle spatiale à laquelle le phénomène est étudié mais également la région du monde.

Roche et al. (2012) précisent que les crues dites "éclair" sont provoquées par des précipitations particulièrement intenses, orageuses, et par des conditions favorisant le ruissellement et la concentration des volumes d'eau précipités. Les "crues-éclair torrentielles" se distinguent pour leur part par une capacité accrue de transport solide, de creusement de berges, d'arrachement de végétation et de charriages divers.

Mais les crues-éclair se caractérisent avant tout par la rapidité de leur formation et leur forte intensité (Gaume et al., 2009). Ces caractéristiques sont directement reliées à l'intensité des pluies génératrices et à la petite taille des bassins versants sur lesquelles se forment ces crues. Les bassins de surface inférieure à 100 km² peuvent en effet avoir des temps de réponse très courts (figure 1.3), ce qui limite fortement les capacités d'anticipation des phénomènes, et la possibilité pour les gestionnaires de crise de protéger ou évacuer les populations. De plus, les débits de pointe spécifiques ($m^3/s/km^2$) enregistrés sur ces petits bassins s'avèrent nettement plus élevés, ce qui engendre des impacts conséquents (figure 1.4).

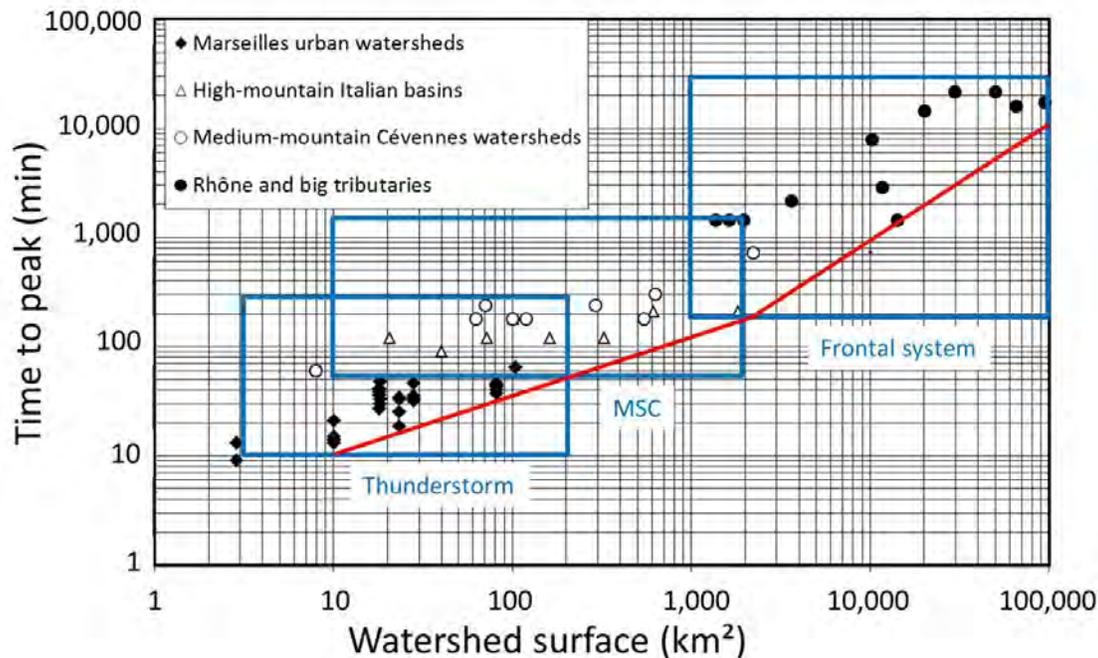


FIGURE 1.3 – Évolution des temps de montée des crues en fonction de la taille des bassins versants, d'après Delrieu et al. (2016). La ligne rouge définit la courbe enveloppe des délais les plus courts et les rectangles bleus montrent les échelles spatio-temporelles typiques des événements pluvieux générateurs (MSC = systèmes convectifs méso-échelle)

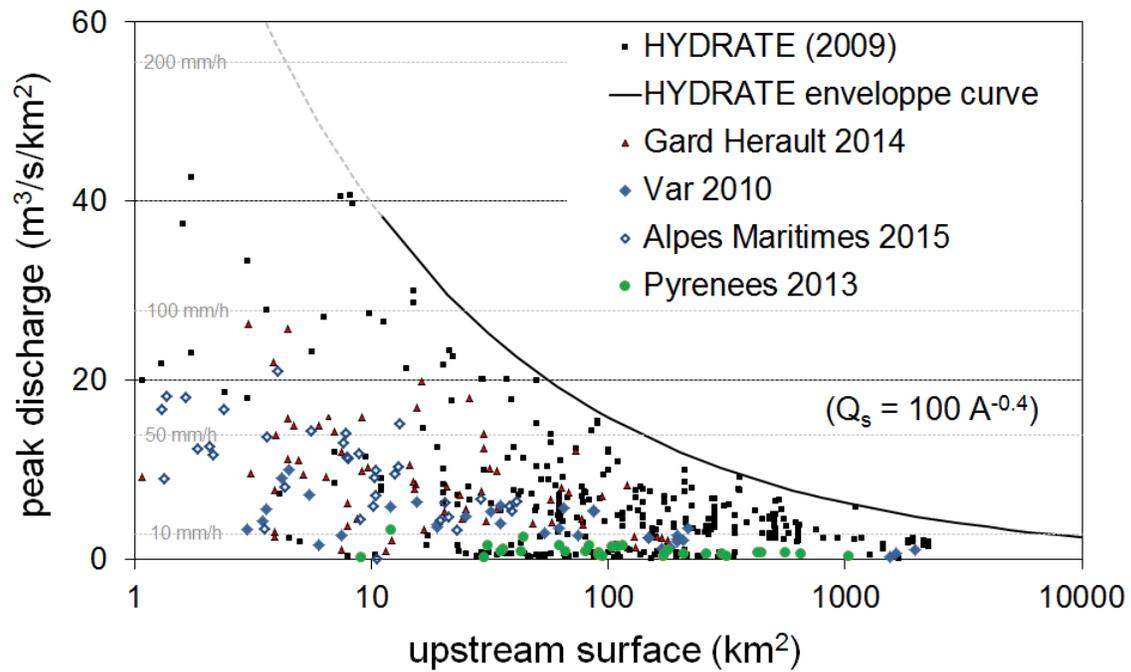


FIGURE 1.4 – Répartition des débits de pointe spécifiques (m³/s/km²) observés en Europe en fonction de la taille des bassins versants, d'après *Payraastre et al. (2016)*

1.2.2 Épisodes pluvieux générateurs

Gaume et al. (2009) indiquent que les crues-éclair observées en Europe sont généralement associées à des cumuls pluviométriques d'au moins 100 mm en quelques heures. Le recensement des événements pluviométriques remarquables en France métropolitaine, consultable sur le site de météo France, montre que de tels cumuls (supérieurs à 100 mm en 24 heures) ont déjà été mesurés dans 80 départements. En revanche, seules les régions méditerranéennes et les zones de montagnes sont exposées à des cumuls supérieurs à 200 mm en 24h.

Les régions méditerranéennes sont en effet connues pour leurs fortes intensités pluviométriques. En Méditerranée occidentale, les records officiels de cumuls journaliers frôlent les 1000 mm :

- en Corse, le col de Bavella a reçu 906 mm entre le 31 octobre et 1er novembre 1993 ;
- le mont Aigoual et ses piémonts dans les Cévennes sont coutumiers des forts cumuls pluviométriques. Le record pluviométrique enregistré est de 950 mm en 24 heures à Valleraugue le 28 septembre 1900 ;
- dans les Pyrénées orientales, 840 mm ont été mesurées en 24h à Saint-Laurent-de-Cerdans lors de l'Aiguat du 17 octobre 1940 ;

En excluant les zones tropicales, les régions méditerranéennes détiennent également des records d'intensités pluviométriques horaire : 163 mm/h ont par exemple été enregistrés dans la commune d'Anduze dans le Gard le 8 septembre 2002, et 112 mm/h⁴ dans la commune de Lézignan-Corbières dans l'Aude le 13 novembre 1999 (figure 1.5).

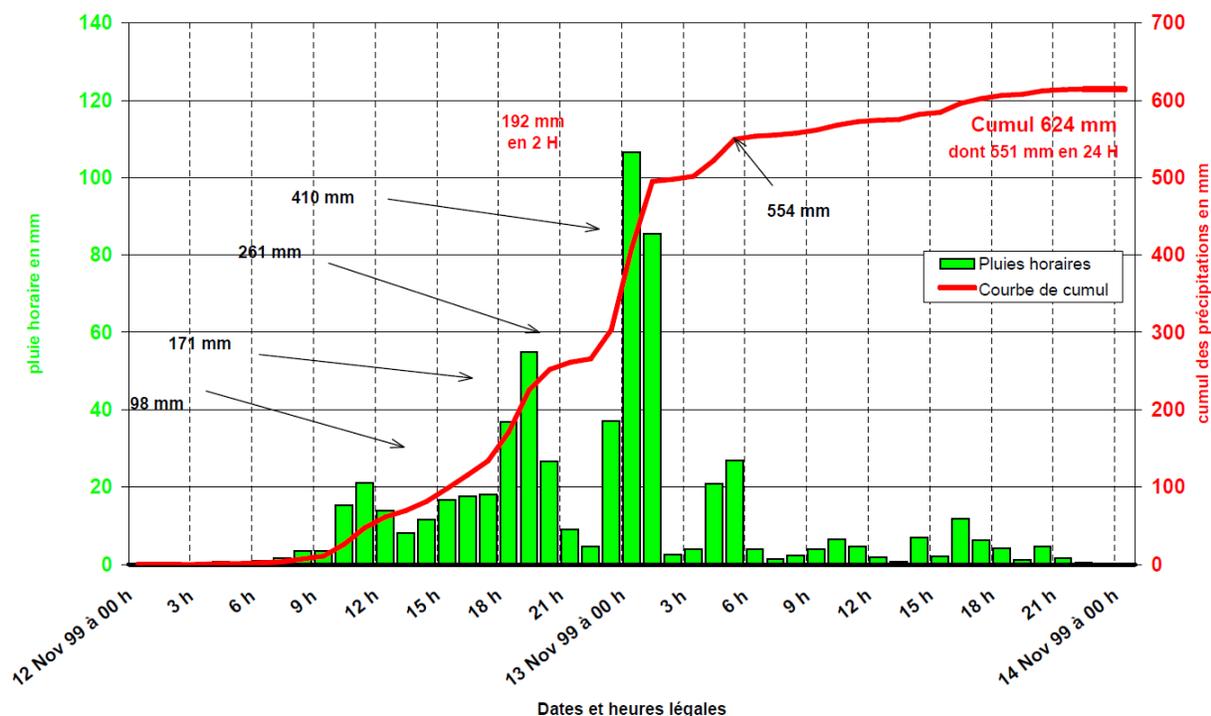


FIGURE 1.5 – Illustration des intensités et cumuls des pluies enregistrées à Lézignan-Corbières du 12 au 14 novembre 1999, d'après Météo France

4. <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Catastrophe-sur-les-Corbiere.html>

En général, les épisodes pluvieux intenses méditerranéens s'étalent sur quelques jours, et ils affectent plusieurs milliers voire dizaine de milliers de km². Des précipitations d'intensité supérieures à 30 mm/h se concentrent au sein de ces épisodes sous forme de pics de quelques heures, qui touchent des secteurs spatialement très circonscrits. Ceci explique que les crues-éclair affectent principalement les bassins versants de taille limitée.

1.2.3 Quelques exemples de crues-éclair récentes en France

Les inondations du 15 juin 2010 dans le Var constituent l'un des épisodes majeurs de crues-éclair observés sur le territoire national au cours des dix dernières années. Cet événement, causé par des cumuls pluviométriques atteignant localement les 400 mm en 24h, a fait 26 morts. Selon le rapport de la mission d'enquête nationale, "les moyens engagés ont permis de sauver 2 450 personnes dont 1 100 sauvetages au sol et 1 350 sauvetages aériens, 300 personnes ayant évité une mort certaine". Un rapport de l'Association Française de l'Assurance⁵ dresse un bilan détaillé des dégâts répertoriés lors de l'événement. L'économie locale a été durement touchée (tourisme, activités industrielles et commerciales), les pertes agricoles sont évaluées à plus de 50 millions d'euros, de nombreuses maisons sont devenues inhabitables, et les dégâts matériels sont très importants (figure 1.6). Au total, les dégâts occasionnés sont estimés à plus d'un milliard d'euros. Ces crues ont été les plus dévastatrices jamais enregistrées dans le département depuis 1827.



FIGURE 1.6 – État du pont de la Tournavelle, sur l'Argens, en aval du quartier des Badiés, sur la commune des Arcs-sur-Argens à la suite de l'inondation du 15 juin 2010. L'eau est passée près de 2 m au-dessus du pont, détruisant la chaussée et arrachant les garde-corps (photo à gauche, C. MARTIN, août 2010 et photo de droite, Cécile MARTIN, juin 2010), d'après *Martin (2010)*

De plus, en novembre 2011, octobre 2012, janvier 2014, septembre 2014 et novembre 2014 le département du Var a de nouveau été touché par des crues importantes, avec à chaque fois un lourd bilan matériel et humain.

Mais le phénomène ne se cantonne pas au département du Var. D'autres épisodes importants de crues-éclair se sont produits récemment sur le territoire français (figure 1.7), comme par exemple ceux enregistrés dans le Gard, l'Hérault et l'Ardèche en 2014, ou dans les Alpes Maritimes en novembre 2015, qui sont brièvement décrits ci-après.

5. http://www.onrn.fr/site/rapportannuel/ffsa_var2010_bilan2011.html

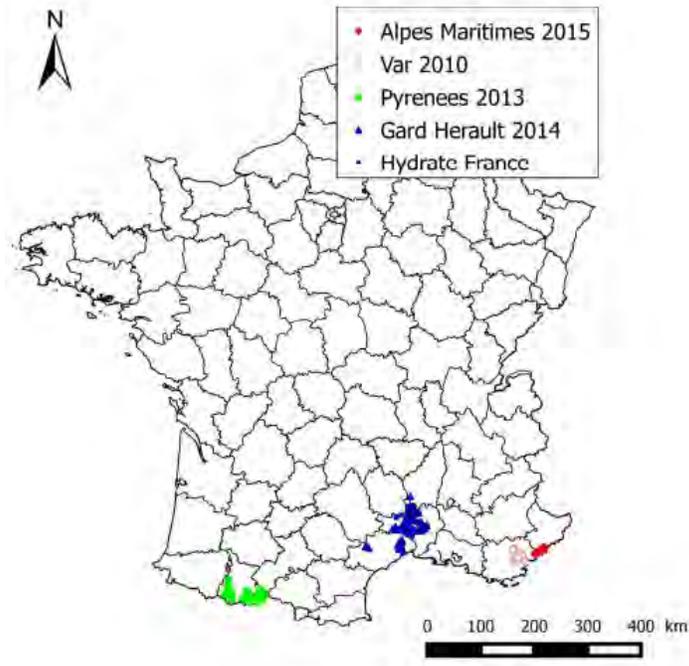


FIGURE 1.7 – Localisation des épisodes de crues ayant fait l’objet d’une enquête post-événement dans le cadre du projet Hymex depuis 2010, en raison de leur intensité remarquable : Var en 2010, Pyrénées en 2013, Gard et Hérault en 2014, et Alpes-Maritimes en 2015, d’après *Payraastre et al. (2016)*

En 2014, les départements du Gard, de l’Hérault, et de l’Ardèche ont été touchés par 7 épisodes de pluies intenses successifs qui ont tous occasionné des crues importantes⁶. Cette succession d’épisodes en l’espace de deux mois présente un véritable caractère exceptionnel. Au total, ces épisodes auront fait 17 victimes et des dégâts dépassant les 600 millions d’euros d’après l’Association Française de l’Assurance. Pendant la nuit du 9 au 10 octobre 2014 par exemple, un orage stationnaire sur le Gard a donné des cumuls pluviométriques de 272 mm à Sainte-Anastasie (figure 1.8), 264 mm à Nîmes et 211 mm à Uzès. En l’espace de deux jours, certaines communes ont enregistré des cumuls de pluie localement supérieurs à 400 mm, comme par exemple à Nîmes-mas de Ponge alors qu’à 10 km de là, seulement 34 mm ont été enregistrés. La rivière du Vidourle a atteint la cote des 4 mètres au pont romain de la commune de Sommières, soit à 80 centimètres de la hauteur record de la crue de 2002. Ce déluge sur le Gard a engendré des dégâts marquants nécessitant 147 interventions de sauvetage dont 47 par hélitreuillage.

6. 16-19 septembre, 29 septembre, 6 octobre, 9-10 octobre, 3-4 novembre, 14-15 novembre et 27-30 novembre

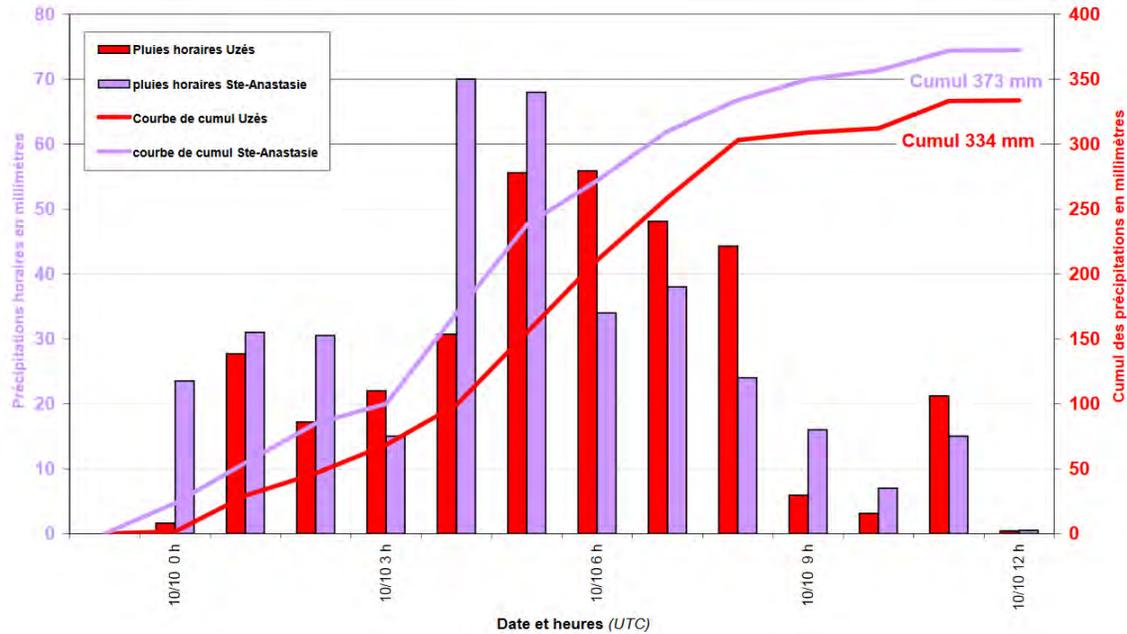


FIGURE 1.8 – Observations des précipitations et des cumuls de pluies à Sainte-Anastasie et à Uzès entre 0h et 12h le 10 octobre 2014, d’après Météo France

En 2015, dans la soirée du 3 octobre, des pluies très intenses ont été enregistrées sur une durée de deux heures sur le littoral des Alpes-Maritimes. Le poste pluviométrique de Mandelieu a enregistré une intensité remarquable de 115 mm en 1 h et celui de Cannes 109 mm en 1h. Ces pluies s’abattant sur des sols déjà humidifiés par les pluies des jours précédents ont occasionné des crues dévastatrices dans les communes de Biot, Antibes, Cannes, et Mandelieu. Ce dernier événement a fait 20 victimes, a privé 70 000 personnes d’électricité, et a finalement causé des dégâts d’un montant estimé compris entre 500 et 600 millions d’euros.

1.2.4 Les crues-éclair autour du bassin méditerranéen

La France n’est pas la seule à être confrontée à ces phénomènes de crues-éclair. En effet, chaque année des victimes et des dégâts considérables liés à ce type de phénomènes sont observés à l’échelle du bassin méditerranéen.

Ces dernières années en particulier, des événements marquants ont été enregistrés. En novembre 2013 par exemple, la ville d’Orgosolo en Sardaigne a reçu 469 mm de pluie en 12 heures, et des crues-éclair qui ont touché toute la partie nord de l’île, générant des dommages estimés à 1 milliards d’euros, et faisant plusieurs victimes⁷.

Certains territoires fortement exposés sont également touchés de façon récurrente par les crues-éclair. La ville d’Athènes (17 000 hab/ km²) et sa banlieue ont par exemple été confrontées à 48 épisodes de crues entre 2005 et 2014 (Papagiannaki et al., 2015), nécessitant plus de 3 500 interventions des secours.

Gaume et al. (2016) rappellent enfin que si l’ensemble des pays du pourtour du bassin méditerranéen sont soumis au phénomène des crues-éclair, des contrastes significatifs existent entre l’ouest et l’est (figure 1.9) : le nombre moyen de décès par an sur la période 1940-2015

7. <http://www.geoclimat.org/2014/01/stations-les-plus-arrosees-dans-le.html>

est sensiblement plus élevé à l'ouest qu'à l'est. Une tendance similaire est observée pour les débits, qui sont sensiblement plus élevés sur les côtes nord-ouest de la Méditerranée (France, Italie, Espagne).

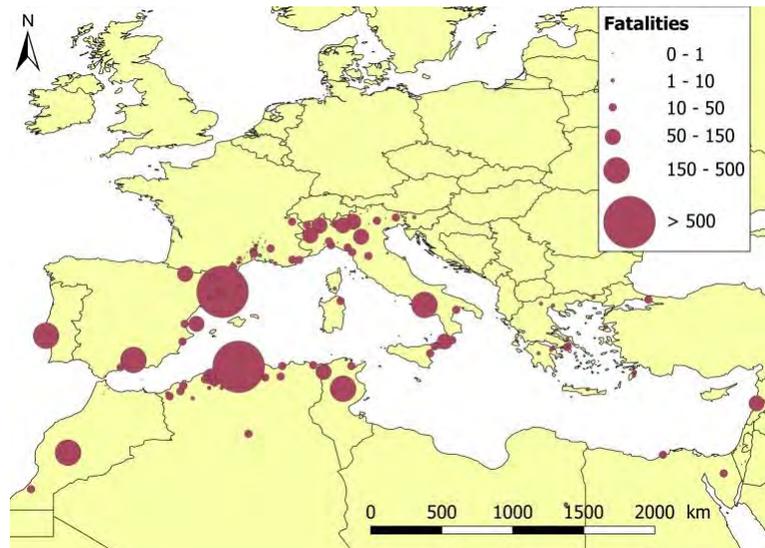


FIGURE 1.9 – Nombre de décès enregistrés au cours des événements d'inondation entre 1940 et 2015, d'après *Gaume et al. (2016)*

1.3 La prévision des crues

1.3.1 Intérêt et difficultés

De nombreux dispositifs sont mis en place dans le monde pour prévoir les crues et les inondations associées, afin d'en réduire les risques. En parallèle à ces dispositifs, des structures dites de gestion de crise sont préparées à agir pour la protection des citoyens et des biens matériels en cas d'inondation (*Akıncı and Erdoğan, 2014*). Ces structures planifient et adaptent leurs actions en se basant sur les prévisions disponibles. Il est donc important que les prévisions anticipent au maximum l'arrivée d'un événement de crue, puis qu'elles soient réactualisées régulièrement en cours d'événement de façon à tenir compte de l'évolution de la crue.

La prévision des crues est un processus qui se déroule en temps réel. Cette particularité distingue fortement la prévision de la simulation hydrologique, et la rend bien plus complexe, même si ce sont souvent les mêmes modèles pluie-débit qui sont utilisés. Le fait d'effectuer une prévision hydrologique demande notamment :

- une anticipation des forçages pluviométriques dans le mesure du possible, sans attendre les observations, et donc le recours à des modèles météorologiques ;
- une réactualisation régulière des prévisions en fonction des dernières observations/prévisions disponibles ;
- une pratique en temps contraint et de façon irréversible.

Une difficulté supplémentaire réside dans le fait que tout retard ou échec d'un des maillons de la chaîne de prévision (données d'observation, calcul, ..) rend rapidement le système in-opérationnel.

Il est impossible de prévoir précisément les phénomènes d'inondation qui se produiront dans un futur lointain (Carpenter and Georgakakos, 2006, Coustau, 2011, Shamir et al., 2013). Toutefois, une localisation et une estimation de l'intensité des phénomènes attendus est généralement envisageable quelques jours ou quelques heures en avance, et peut servir à une meilleure organisation des secours en évacuant les secteurs vulnérables ou en déployant de manière judicieuse les hommes et le matériel disponibles pour les interventions de secours à venir.

1.3.2 La prévision des crues à l'échelle internationale

Des prévisions à grande échelle

En Europe, un système de référence pour la prévision des inondations fluviales, European Flood Alert System (EFAS), a été développé par la Commission Européenne dans le but de prévoir 3 à 10 jours en avance les inondations potentielles sur les grands bassins versants européens, en particulier les transnationaux, et d'informer les différentes autorités en charge de la sécurité des populations (Thielen et al., 2009). Cette initiative a été mise en place en 2002 pour harmoniser l'organisation des secours entre les acteurs en charge de la gestion des crises d'inondation dans les différents pays. Depuis l'automne 2012, EFAS⁸ fonctionne de manière opérationnelle. Les différents hydrogrammes produits sont analysés, combinés et transmis au service de Sécurité Civile national en cas d'identification d'un événement d'inondation éventuel. La résolution spatiale à laquelle sont transmis les résultats oscille entre 7 et 30 km.

EFAS intègre les prévisions passées dans une base de données, apportant aux prévisionnistes la possibilité d'évaluer les performances passées du système et de lui indiquer comment adapter ses prévisions. Après deux années d'application, les prévisions semblent être plus efficaces, par diminution du nombre de fausses alertes, en intégrant les informations sur les prévisions passées (Bartholmes et al., 2009).

L'Afrique a également fait l'objet de travaux sur le développement d'un système de prévision des inondations, l'African Flood Forecasting System (AFFS), avec une capacité d'anticipation élevée, s'élevant à 15 jours (Thiemig et al., 2015). Le système détecte correctement les événements d'inondation (à hauteur de 70%), en particulier sur les bassins drainant des surfaces supérieures à 10000 km² et pour des inondations lentes (montée durant plus d'une semaine). L'AFFS s'est avéré assez précis sur la prévision d'inondations en zones non jaugées.

Aux États-Unis, le National Weather Service (NWS) du National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) met à jour des cartes de prévision du risque d'inondation⁹ à un horizon temporel de 1h, 3h et 6h pour l'ensemble des comtés, voire de 12h et 24h pour ceux situés à l'est du pays (figure 1.10). Les prévisions du risque d'inondation sont restituées à l'échelle de bassins prédéfinis de taille oscillant entre 25 et 200 km². Ce système de prévision s'appuie sur la méthode des Flash Flood Guidances qui sera présentée au chapitre 2.

L'apparition de prévisions régionales à haute résolution

En Europe le système EFAS n'est pas calibré pour couvrir les bassins versants de petite taille et/ou non jaugés soumis à des crues soudaines. Par ailleurs il ne fournit pas

8. <https://www.efas.eu/>

9. <http://www.srh.noaa.gov/rfcshare/ffg.php>

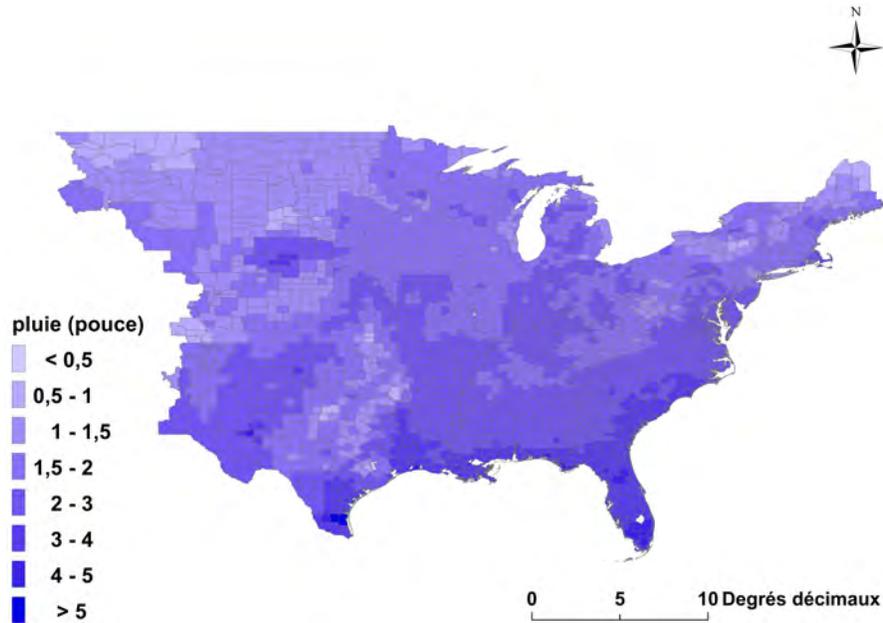


FIGURE 1.10 – Carte des prévisions de type "Flash Flood Guidances" pour un horizon d'une heure (quantité de pluie donnant lieu à un risque de crue, 1 pouce = 2,54 cm), publiée aux États-Unis le 18 avril 2016 à 10h.

d'indications concernant les zones inondées ou les dégâts possibles. Pour cette raison, il est parfois nécessaire de compléter ce dispositif par des systèmes régionaux présentant une résolution plus fine, ou fournissant une information plus détaillée sur les phénomènes à venir.

En Espagne par exemple (Versini et al., 2014), un modèle, le Guadalhorce Flood Warning System (GFWS), a été adapté régionalement au bassin versant du Guadalhorce (sud-est de l'Espagne, 3 200 km², peu jaugé). Il s'est avéré performant sur la prévision des secteurs encourant un risque d'inondation pour deux événements passés.

Au nord de l'Angleterre, des travaux ont également permis de mettre en place un système de prévision régional identifiant les secteurs potentiellement inondés sur l'ensemble des bassins, dont les non jaugés (Cole and Moore, 2009). Les prévisions s'effectuent à partir de la combinaison d'informations pluviométriques (radars et pluviomètres), permettant le renouvellement des prévisions toutes les 15 minutes (délais des pluviomètres) à une résolution de 50 m.

Enfin, en France, un dispositif de prévision des inondations couvre les principaux cours d'eau à l'échelle nationale, et est sur le point d'être complété par un système d'avertissement spécifique aux crues soudaines se produisant sur les petits bassins versants de taille supérieure à 5km². Ces dispositifs sont décrits en détail dans les paragraphes qui suivent.

1.3.3 Fonctionnement du dispositif de prévision de crues en France

En France, depuis 2006, le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Aide à la Prévision des Inondations (SCHAPI) assure la production et la diffusion sur le site Vigicrues¹⁰ d'une

10. <http://www.vigicrues.gouv.fr/>

carte de vigilance crues actualisée deux fois par jour (SCHAPI, 2012). Cette carte de vigilance fournit une information sur les risques d'inondations dommageables dans les 24 heures suivant sa publication, à destination du grand public et des gestionnaires de crise. Elle est complétée lorsque nécessaire par des prévisions chiffrées de débits et de hauteurs d'eau. Au début de l'année 2015, la vigilance crues couvre un linéaire de 21 720 km de cours d'eau dits "réglementaires" (figure 1.11), sur lesquels se concentre 75% de la surface habitée en zone inondable (SCHAPI, 2014).

Cette mission de prévision des inondations est assurée en s'appuyant sur le réseau national de Prévision des Crues et de l'Hydrométrie (PCH) qui regroupe les Unités d'Hydrométrie (UH), les Services de Prévision des Crues (SPC) et les Cellules de Veille Hydrologique (CVH). Ce réseau collecte en temps réel des informations provenant de 1 500 stations hydrométriques, gérées et maintenues par les UH. L'anticipation des crues s'appuie également sur les observations et prévisions météorologiques fournies par Météo-France (pluies, températures).

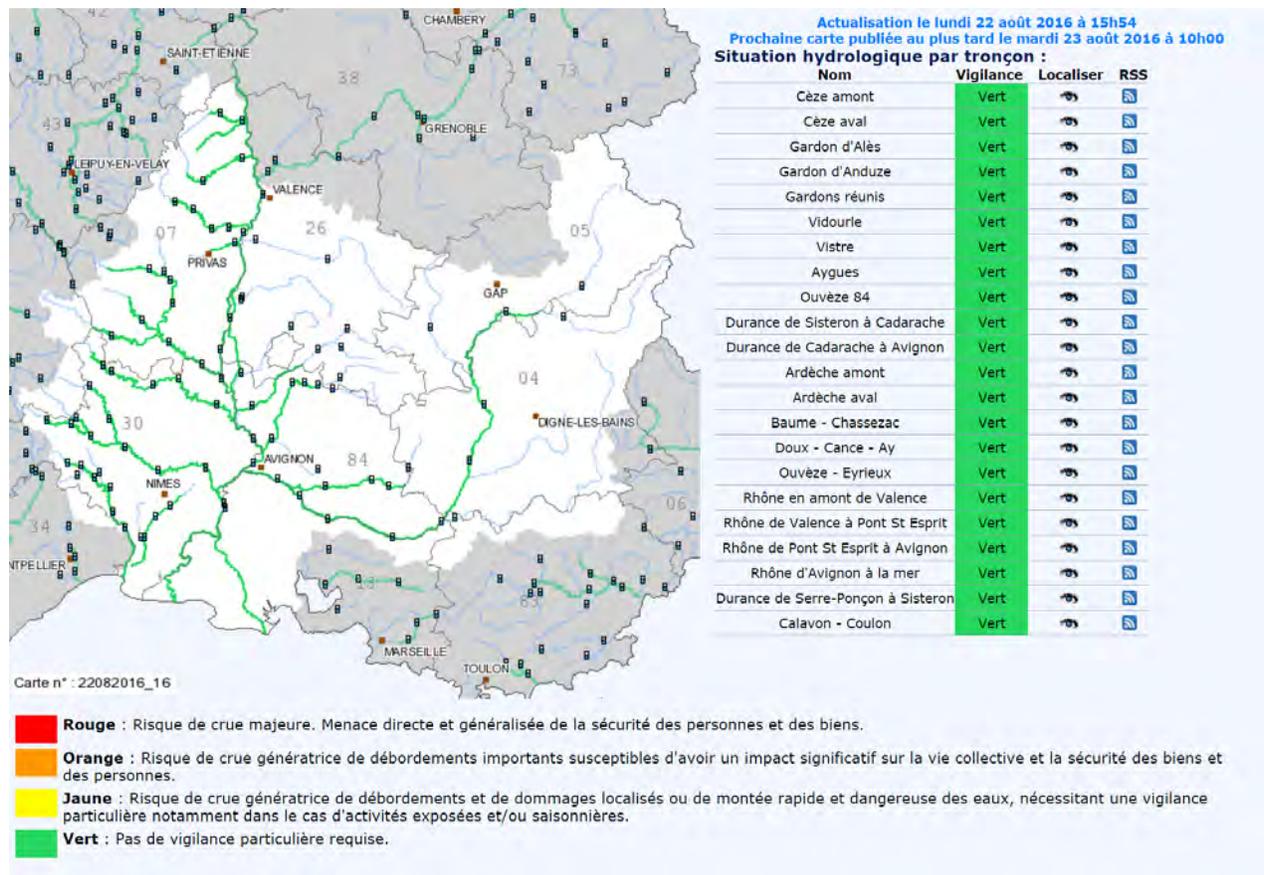


FIGURE 1.11 – Exemple de carte de vigilance publiée sur Vigicrues, à 8h30 le 23 août 2016, au niveau du Service de Prévision des Crues (SPC) du Grand Delta

Borrell (2004) rappelle que les performances de prévisions publiées sur Vigicrues dépendent de plusieurs critères, dont la vitesse d'évolution de la crue, la taille du bassin versant, ainsi que les systèmes de mesure, de télésurveillance et de prévision disponibles sur ce bassin. Mais dans tous les cas, la prévision en temps réel des inondations ne permet pas d'espérer un haut niveau de précision (Wolfs et al., 2015).

Malgré ces difficultés, le SCHAPI cherche en permanence à améliorer et faire évoluer les

informations publiées sur Vigicrues. De nouvelles informations doivent notamment apparaître dans le prochains mois pour compléter les prévisions et en faciliter l'utilisation : incertitudes associées aux prévisions de débits et hauteurs, mais également cartes de zones inondées potentielles associées aux prévisions.

1.3.4 Projet d'extension du dispositif aux crues soudaines (projet stratégique du SCHAPI 2013 – 2016)

Au travers du Plan Submersions Rapides adopté 2011, l'État s'est engagé à améliorer la prévision des crues soudaines dans les zones soumises à ce risque , en proposant des évolutions du système Vigicrues mis en œuvre par le SCHAPI ([Ministère de l'Écologie, 2011](#)).

Dès 2013, le SCHAPI a annoncé la mise en place d'un dispositif d'avertissement dédié aux crues soudaines, ayant pour objectif d'anticiper de 2 à 6 heures le dépassement de seuils de débits de référence dans les petits bassins versants ([SCHAPI, 2013](#)). Ce service d'avertissement crues soudaines (ACS) aura des caractéristiques sensiblement différentes du dispositif actuel de la vigilance crues, pour les raisons suivantes :

- les petits bassins versants sujets à des crues soudaines ne font généralement pas partie de la couverture actuelle du dispositif de vigilance crues (cours d'eau réglementaires), et ne sont pas équipés de stations hydrométriques. Leur couverture nécessitera donc d'étendre et d'adapter fortement les capacités actuelles de modélisation pluie-débit. Pour cela, le SCHAPI collabore actuellement avec IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) pour développer une modélisation pluie-débit de résolution adaptée, permettant de couvrir l'ensemble des bassins cibles ([SCHAPI, 2014](#)).

- le niveau d'anticipation sera beaucoup plus limité, les bassins concernés étant de petite taille avec des temps de réaction courts, et les prévisions n'étant produites qu'à partir des observations pluviométriques (pas de prévisions météorologiques suffisamment fiables à l'échelle des petits bassins concernés). Ceci impliquera un rafraîchissement très régulier des prévisions (vraisemblablement toutes les 15 min), et donc un fonctionnement automatique du dispositif (pas de prévisions expertisées par des prévisionnistes) ;

- compte tenu de l'automatisation du dispositif et de la rapidité des phénomènes, la chaîne de transmission de l'information sera plus directe, avec notamment un avertissement direct des maires. Ces avertissements sur le risque de crues imminentes et leur intensité seront transmis par le même canal que le service d'Avertissement des Pluies Intenses à l'échelle de la Commune (APIC), mis en place depuis 2013 par Météo France ([Carrière et al., 2011](#)) ;

- les avertissements générés porteront sur l'intensité des crues, qui sera qualifiée par niveaux (phénomène courant, rare, exceptionnel), mais n'intégreront pas de prévisions chiffrées, ni d'informations sur les conséquences possibles des phénomènes.

La mise en service de ce nouveau dispositif d'avertissement crues soudaines est programmée pour la fin de l'année 2016.

1.3.5 Intérêt d'une anticipation des dégâts engendrés par les crues soudaines

Dans un premier temps le dispositif d'avertissement crues soudaines (ACS) permettra de qualifier l'intensité des phénomènes de crues en cours de formation. Cette information sera probablement d'une grande utilité pour les gestionnaires de crise, néanmoins elle sera de nature différente de celle fournie sur les cours d'eau réglementaires : en effet, sur ces cours

d'eau la couleur de vigilance représente le niveau des dommages prévisibles plus utile que l'intensité de la crue prévue seule. Par ailleurs, la carte de vigilance est complétée par des prévisions chiffrées de hauteurs d'eau, ainsi que, dans un futur proche par des cartes de zones inondées potentielles.

Pour optimiser l'efficacité du futur système d'ACS, il semble d'ores et déjà préférable de pouvoir le faire évoluer vers quelque chose de plus proche du dispositif de vigilance crues mis en œuvre sur les cours d'eau réglementaires, en y intégrant une estimation des impacts occasionnés par les crues. Les raisons militent en faveur de cette évolution sont les suivantes :

- l'analogie avec le dispositif de vigilance crues favorisera une bonne compréhension et donc une utilisation appropriée des ACS.
- les cours d'eau non jaugés soumis aux crues-éclair ne sont que rarement couverts par des cartographies des zones inondables. De ce fait, les enjeux exposés sont très difficiles à identifier sur ces cours d'eau sauf pour les acteurs qui connaissent très bien le contexte local, d'où l'intérêt d'intégrer directement cette information sur les enjeux dans les dispositifs de prévision et de transmission d'information.
- plus que la hiérarchisation de l'intensité des phénomènes, c'est la hiérarchisation des impacts possibles qui permet aux gestionnaires de crise de bien préparer leurs interventions et d'être véritablement efficaces. L'information sur les impacts possibles est donc essentielle notamment pour les gestionnaires devant mobiliser et répartir les moyens à l'échelle d'un département par exemple (SDIS, préfet dans le cadre d'une Cellule Opérationnelle de Défense et un plan ORganisation des SECours).

1.4 Objectifs de la thèse

Au regard du constat qui précède, les objectifs de la thèse ont été définis, en accord avec le SCHAPI, de façon à rendre possible une évolution ultérieure du système d'avertissement crues soudaines (ACS) vers une prévision des impacts. Il s'agissait donc principalement de proposer une base méthodologique, reposant sur un modèle hydrologique pluie-débit distribué couvrant les petits bassins versants, pour pouvoir réaliser en temps réel une prévision des impacts des crues soudaines.

Pour répondre correctement à cet objectif, les principales contraintes fixées concernaient la compatibilité de l'approche proposée avec le système ACS en cours de déploiement. Ceci impliquait notamment les exigences suivantes :

- approche susceptible d'être déployée à une résolution équivalente à celle du dispositif ACS, soit pour une surface drainée minimale de 5 km² et sur des tronçons de cours d'eau définis par la Base Nationale de Bassins Versants du SCHAPI ;
- approche suffisamment simple d'application pour pouvoir être déployée sur l'ensemble du territoire national. Ceci implique notamment de pouvoir traiter des grands linéaires de cours d'eau (120 000 km de cours d'eau permanents à l'échelle du territoire métropolitain) ;
- approche peu coûteuse en temps de calcul de façon à pouvoir fournir une estimation réactualisée en temps réel toutes les 15 minutes, voire même 5 minutes qui correspond à la résolution temporelle minimale actuelle des données pluviométriques radars et des modèles hydrologiques ;
- approche permettant au minimum de qualifier et hiérarchiser les impacts attendus sur les zones habitées, suivant des catégories prédéfinies, par analogie avec les 4 niveaux de vigilance crues.

La suite de ce mémoire présente l'ensemble des travaux menés au cours de la thèse pour répondre à ces objectifs. Cette présentation a été structurée de la façon suivante : le deuxième chapitre est consacré à la description de la méthodologie proposée, en s'appuyant sur une revue bibliographique ; le troisième chapitre décrit l'étude de cas retenue pour tester cette méthodologie : le TRI d'Alès ; le quatrième chapitre définit le travail d'élaboration et d'évaluation d'un catalogue d'emprises inondées, permettant la construction d'un modèle d'impacts approprié ; enfin le cinquième chapitre propose une évaluation de l'ensemble de la chaîne de prévision pluie-débit-impacts obtenue, à l'échelle de l'événement, pour l'étude de cas initiale puis en transposant l'approche à un autre secteur.

Chapitre 2

Évaluation des impacts des crues-éclair : proposition d'une méthodologie et identification des verrous

Objectifs du chapitre :

- *Décrire les modèles hydrologiques existant adaptés à un réseau hydrographique détaillé.*
- *Présenter des modèles hydrauliques capables de fournir des surfaces inondées sur un réseau hydrographique étendu.*
- *Faire le point sur les approches existantes pour l'estimation des impacts.*
- *Définir l'approche adoptée pour répondre aux objectifs de thèse.*

CONTRAIREMENT à la prévision des crues mise en œuvre par le SCHAPI sur les cours d'eau principaux (Cf. §1.3.2) qui vise désormais la prévision des inondations, les outils développés jusqu'ici pour la prévision des crues rapides ne tiennent pas compte des enjeux touchés par ces crues. En France, le projet PreDiFlood a permis de commencer à dépasser la prévision hydrologique simple en s'intéressant aux impacts des crues rapides sur les réseaux routiers. Mais la question de l'estimation des impacts des crues-éclair reste jusqu'ici assez peu traitée dans la littérature : les outils de prévision développés se limitent en général à la qualification du phénomène hydrologique. Pour être plus efficace, les outils de prévision des crues rapides doivent désormais évoluer pour proposer des indications sur les enjeux pouvant être touchés au cours d'un événement.

De plus en plus de travaux s'orientent sur le couplage d'un modèle hydrologique à un modèle hydraulique pour prévoir les surfaces inondées et les cotes d'inondations (Laganier et al., 2014). Le couplage suscite des questions sur les modalités de connexions entre les modèles hydrologiques et hydrauliques pour l'obtention de résultats performants (Lerat et al., 2012), mais également les incertitudes associées à la modélisation couplée hydrologique-hydraulique (Rodríguez-Rincón et al., 2015). La cartographie en temps réel de la prévision des emprises inondées constituerait un outil de grande utilité auprès des services en charge de l'alerter et des opérations de secours (Lerat, 2009), tout particulièrement la prévision de l'extension maximale de cette emprise (Pan et al., 2014). Il semble désormais possible de dépasser les

phases de test des outils de simulation sur des événements de crues passés et de proposer des outils opérationnels amenés à appuyer les décisions de mise en alerte et de gestion de l'eau au cours des inondations à venir (Pinho et al., 2015).

Même si des travaux internationaux proposent quelques éléments de réponse à cette question de la prévision des impacts (Lin et al., 2013), dans le cas des crues-éclair il est important de pouvoir définir une méthode générique, simple et applicable à l'échelle d'un vaste territoire, sur des bassins versants non jaugés (Creutin and Borga, 2003), et non tributaire de jeux de données observés sur des événements passés et nécessitant une phase de calage importante sur des événements et des sites bien documentés.

L'objectif visé dans cette thèse est donc de mettre en place une chaîne de modélisation pour prévoir régionalement les débits à l'échelle de bassins versants de petite surface et évaluer simultanément les emprises inondées correspondantes et les enjeux pouvant être touchés.

Pour répondre à cet objectif innovant, la chaîne de modélisation envisagée doit intégrer :

- l'utilisation d'un modèle de simulation hydrologique existant afin d'estimer des valeurs de débits sur un territoire étendu, particulièrement sur les cours d'eau non jaugés ;

- l'application de méthodes de calcul de surfaces inondées, pour pouvoir calculer des emprises en temps réel ou générer a priori un catalogue d'étendues submergées pour différentes intensités de crues (figure 2.1). Compte tenu de l'étendue possible des territoires couverts, de la précision spatiale souhaitée et des contraintes de temps de calcul, c'est la seconde solution qui a été retenue dans cette thèse.

- la réalisation d'un modèle d'impacts, permettant d'établir une relation continue entre le débit et les impacts associés à partir des étendues de surfaces inondées produites pour chaque bief de cours d'eau (figure 2.2) ;

En s'appuyant sur ces trois composantes, la chaîne de modélisation obtenue permettra de calculer, sur une séquence complète de débits simulés par le modèle pluie-débit, la séquence des impacts estimés correspondante (figure 2.3).

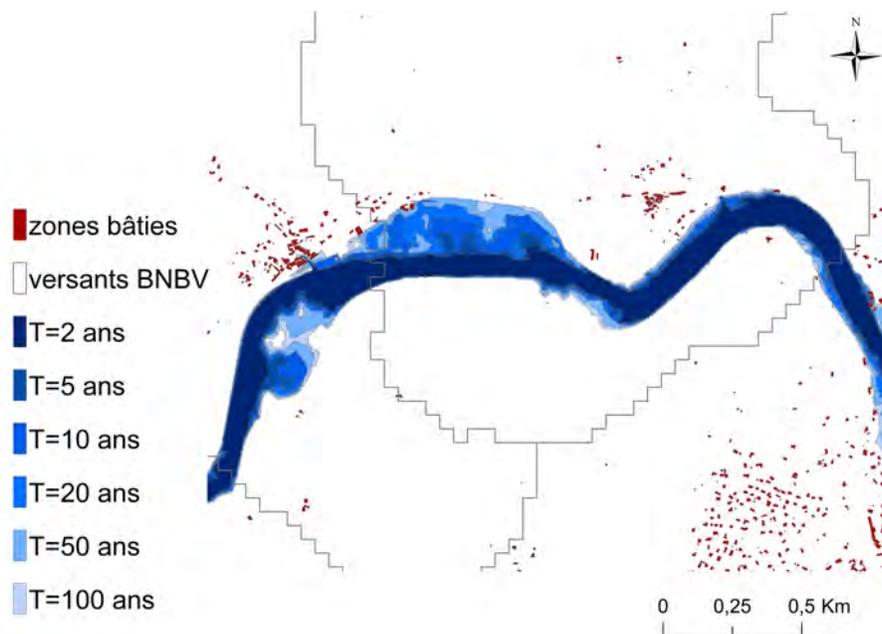


FIGURE 2.1 – Exemple de catalogue d'emprises inondées pour un bief de cours d'eau

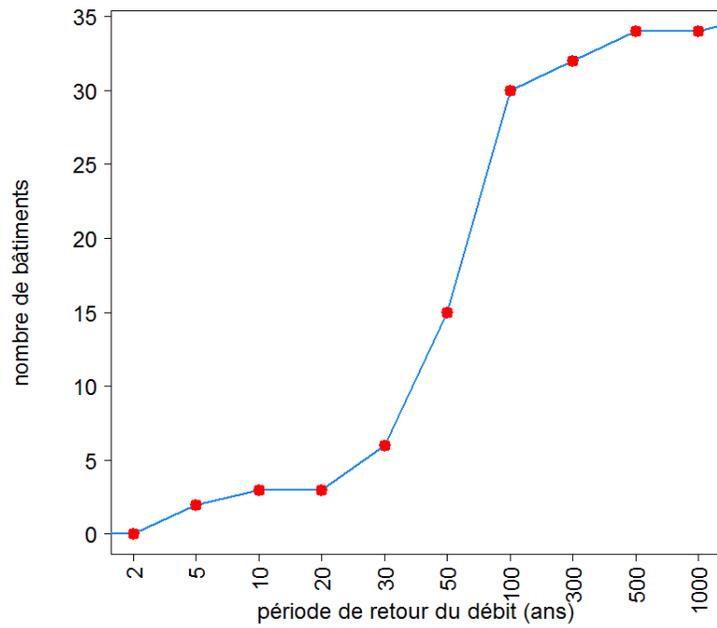


FIGURE 2.2 – Exemple de construction d'un modèle débit/impacts à l'échelle d'un bief de cours d'eau

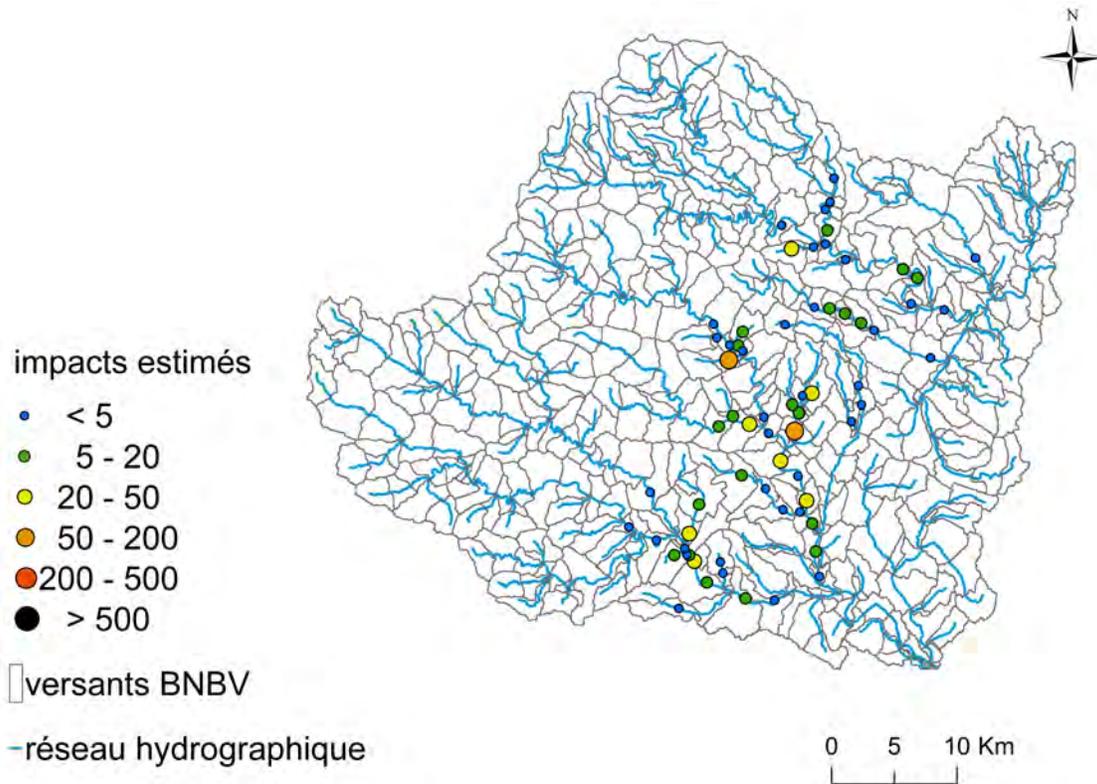


FIGURE 2.3 – Estimation du nombre de bâtiments inondés à l'échelle de chaque bief de cours d'eau au cours de l'événement de crue du 22 octobre 2008 à 3h00 (Secteur du Territoire à Risque Important d'inondation d'Alès)

Le travail de thèse consiste à appliquer et tester cette méthodologie à l'échelle du Territoire à Risque important d'Inondation d'Alès (Gard). La méthodologie proposée sera testée dans un second temps sur la crue de la rivière Argens de 2010. L'objectif est d'une part de mettre en place la chaîne de modélisation pour le calcul des impacts estimés, et d'autre part de produire les cartes associées pour différents événements de crue de façon à pouvoir visualiser l'évolution spatio-temporelle des impacts estimés.

Les sections suivantes seront dédiées à l'état de l'art concernant les trois principaux composants nécessaires à la mise en place de la chaîne de modélisation pluie-débit-impacts : la prévision hydrologique sur un réseau hydrographique détaillé, la modélisation automatisée des emprises inondées, et les méthodes d'identification de la vulnérabilité et des impacts au sein de ces emprises.

2.1 Préviation hydrologiques sur un réseau hydrographique détaillé

Avant d'envisager une modélisation en temps réel de l'étendue des surfaces inondées sur un réseau hydrographique intégrant les secteurs jaugés et non jaugés, il est nécessaire de disposer de mesures et de prévisions quantitatives et spatialisées des pluies et d'employer un modèle pluie-débit distribué sur l'ensemble de la région pour anticiper les débits atteints (Cole and Moore, 2009).

La modélisation pluie-débit visée, dans le cadre de la thèse, doit être adaptée aux objectifs ci-dessous :

- fonctionner sur un nombre de bassins de petites tailles (surface minimale de 5 km²), et non jaugés ;
- être déployée de manière opérationnelle, en temps réel, sous entendant l'emploi d'un modèle avec peu de paramètres et des temps de calculs courts pour être applicable à l'échelle de la France métropolitaine (Laganier et al., 2014) ;
- être adaptée aux caractéristiques spécifiques de la zone d'étude (régionalisation du modèle), dans notre cas, une zone soumise aux risques de crues soudaines et aux caractéristiques d'écoulement variables ;
- prévoir correctement les débits de pointe, dans le but de mieux identifier quelle étendue inondée retenir pour le calcul des impacts.

La suite de ce paragraphe détaille les méthodes proposées dans la littérature pour atteindre les objectifs, à partir des prévisions basées sur la pluviométrie et celles sur la simulation pluie-débit. Une partie est dédiée aux incertitudes et aux recommandations quant à l'usage de la prévision hydrologique dans le cadre de nos travaux.

2.1.1 Préviation basées sur la pluviométrie

L'une des méthodes les plus directes pour l'anticipation des crues-éclair est de déterminer des seuils de précipitations pour lesquels des désordres significatifs apparaissent. En France métropolitaine, la méthode d'Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte crues (Lavabre and Gregoris, 2005) produit des cartes du risque pluviométrique à pas de temps horaire. Sur chaque pixel de 1 km², le risque pluvial est évalué en estimant la fréquence d'apparition des cumuls pluviométriques observés : un code de trois couleurs (jaune, orange et rouge) traduit l'intensité de l'événement. Les seuils pluviométriques peuvent être

par exemple fixés en fonction des observations passées par exemple (déclarations CATNAT). L'information est rafraîchie toutes les quinze minutes. Cette méthode est à la base du service APIC (Avertissement Pluies Intenses à destination des Communes) mis en place en 2011 par Météo France (Carrière et al., 2011).

Pour aller plus loin dans la prévision des inondations par le biais des seuils de précipitations, il peut cependant être nécessaire de prendre en compte les conditions d'humidité du sol au moment des précipitations (Martin, 2011). La réponse hydrologique dépend en effet de l'antériorité pluviométrique.

La méthode des Flash Flood Guidance (FFG) est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus utilisées pour l'alerte crues soudaines dans le monde. Elle anticipe un niveau de risque d'inondations à partir des cumuls pluviométriques et de l'estimation de l'état hydrique du sol à l'échelle d'une multitude de bassins (Carpenter and Georgakakos, 2004). Dans cette méthode, à l'échelle de chaque bassin versant considéré, des seuils de précipitations définis à partir de modélisations pluie-débit en fonction de l'antériorité pluviométrique. Ces seuils correspondent à un niveau de risque choisi : en général le risque de dépassement du débit de période de retour 2 ans considéré comme le débit d'apparition des premiers débordements. Le service en charge de la prévision des inondations aux États-Unis (Cf. §1.3.4) s'appuie sur ce type de méthodologie en exploitant des lames d'eau radar et le modèle hydrologique Sacramento restituant le taux d'infiltration, d'évapotranspiration, et les flux d'écoulement des eaux de surface (Burnash et al., 1973).

La précision et les incertitudes associées à l'application des FFG ont fait l'objet de multiples travaux de recherche. Une étude s'est particulièrement intéressée à l'incertitude provenant de la détermination des seuils de précipitations (Georgakakos, 2006). L'efficacité de la méthode a été contrôlée lorsque les paramètres de simulation ne peuvent pas être étalonnés, mais doivent être transposés d'un bassin versant jaugé à un bassin non jaugé, et la sensibilité des résultats de la méthode utilisée pour estimer l'état initial de l'humidité du sol a été évaluée (Norbiato et al., 2008). La méthode a également fait l'objet d'une évaluation en temps réel au cours de l'ouragan Tomas à Haïti du 4 au 6 novembre 2010 (Shamir et al., 2013).

D'autres travaux ont mis en avant l'impact de la précision des précipitations sur l'application de la méthode des FFG à partir d'un modèle empirique d'erreur radar-précipitation (Villarini et al., 2010).

La méthode des FFG a été employée et adaptée à l'échelle des bassins versants méditerranéens sujets à des crues-éclair, sans donner des résultats satisfaisants (Douinot et al., 2015) : les seuils prévus à l'échelle de trois bassins français sont surestimés.

Par ailleurs, des expériences menées sur des bassins drainant plus de 1 000 km² démontrent que les prévisions des risques d'inondation basées uniquement sur l'information pluviométrique ne sont pas fiables par rapport à celles effectuées en se fondant sur la prévision hydrologique (Stephens et al. (2015)). L'hétérogénéité spatiale des pluies, que ne peut pas prendre en compte la méthode FFG, ne peut visiblement pas être ignorée pour de telles échelles de bassins versants .

2.1.2 Prévisions basées sur la simulation pluie-débit

Certaines méthodes, moins directes, vont au-delà des seuils de précipitations pour anticiper le risque d'inondation en s'appuyant sur des seuils de débits (Hirpa et al., 2016). L'utilisation directe d'un modèle hydrologique distribué s'avère plus performante en effet que la méthode des FFG fondée sur des seuils pluviométriques ajustés a priori pour le déclenche-

ment d'alertes crues soudaines sur des bassins versant non jaugés (Reed et al., 2007).

À l'échelle d'un bassin versant, la réponse hydrologique est néanmoins très dépendante de l'état hydrique initial rendant la modélisation hydrologique complexe, sans compter les difficultés associées à la soudaineté des crues-éclair, au calage et à la validation des modèles sur les bassins non jaugés souvent touchés par ces crues (Harader, 2015).

Les modèles hydrologiques existants sont de divers types (Edijatno et al., 1999) et ils peuvent parfois être combinés (Nicolle et al., 2014) dans un but commun : restituer une information hydrologique détaillée sur l'ensemble des bassins versants jaugés ou non.

Certaines expériences de mise en œuvre à grande échelle de modèles hydrologiques adaptés à la surveillance des crues-éclair sur des bassins versants non jaugés existent déjà. Nous distinguerons par la suite les modèles opérationnels des modèles de recherche.

A) Modèles opérationnels

AIGA

Dans le cadre de la méthode AIGA d'alertes aux crues en cours d'implémentation sur l'ensemble de la France métropolitaine (Cf. §1.3.3), l'information pluviométrique à l'échelle du pixel de 1 km² est convertie en débit à l'aide d'un modèle hydrologique (figure 2.4).

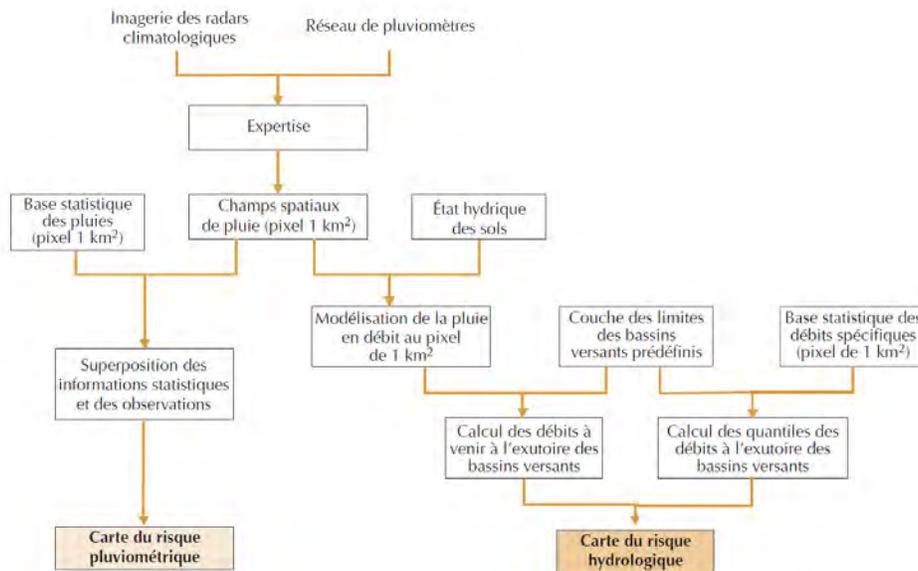


FIGURE 2.4 – Principe de fonctionnement de la méthode AIGA, d'après Lavabre and Gregoris (2005)

Ensuite, ces valeurs de débits sont comparées aux différents quantiles de débits de référence calculés par la méthode SHYREG (Cf. §3.2.3). Lorsque les débits prévus par AIGA (de 1h à 72h) dépassent des quantiles de débits de référence, des alarmes sont émises et cartographiées en précisant la période de retour du débit prévu (figure 2.5) :

- inférieurs à 2 ans ;
- entre 2 et 10 ans ;
- entre 10 et 50 ans ;
- supérieurs à 50 ans.

La modélisation pluie-débit sous AIGA s'effectue à partir du modèle Génie Rural Distribué (GRD), modèle régionalisé et adapté à la prédétermination et la prévision des crues à courte échéance à partir de l'information pluviométrique (Perrin, 2002, Javelle et al., 2014).

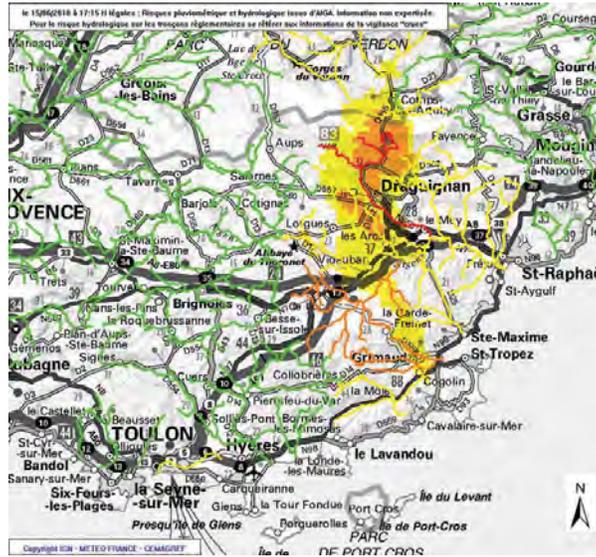


FIGURE 2.5 – Cartographie des risques d'inondation identifiés par la méthode AIGA au cours de l'événement du 15 juin 2010 sur le bassin versant de l'Argens (Var) : vert inférieurs à 2 ans, jaune entre 2 et 10 ans, orange entre 10 et 50 ans et rouge supérieurs à 50 ans, d'après Javelle et al. (2014)

En effectuant des calculs hydrologiques toutes les quinze minutes, le système AIGA est particulièrement adapté aux têtes de bassins et aux crues soudaines.

De plus, la méthode AIGA fournit une information "synthétique" de la situation, qui est produite de manière continue contrairement aux informations provenant du terrain, parfois indisponibles, en raison des ruptures des réseaux de communication (Javelle et al., 2014).

Le principal intérêt de la méthode est l'obtention d'une prévision du risque hydrologique sur l'ensemble des bassins versants non jaugés, à partir de la conversion des pluies en débits. Les développements de la méthode AIGA se poursuivent à travers de nombreux travaux d'amélioration de la chaîne de modélisation pluie-débit afin d'optimiser les performances de la méthode (Fouchier, 2010, Javelle et al., 2010).

LISFLOOD

Dans un autre registre, le modèle hydrologique LISFLOOD a été développé initialement pour simuler les réactions hydrologiques des grands bassins fluviaux à l'échelle mondiale (Alfieri et al., 2013). Le système GloFAS tente de prévoir les phénomènes d'inondation en fonction de la prévision des seuils de débits pour lesquels un risque d'inondation est possible à l'échelle de ces grands bassins versants, à partir du modèle LISFLOOD. Au mieux, le modèle est en capacité de prévoir jusqu'à 1 mois les risques d'inondation sur des bassins versants de 1 000 000 km² si les conditions initiales du modèle ont été correctement renseignées. Le modèle LISFLOOD, utilisé dans la méthode EFAS (European Flood Alert System) en Europe est en capacité de proposer des prévisions 10 jours en avance en se fondant sur les prévisions météorologiques du centre européen de prévisions météorologiques de moyennes échéances (ECMWF). La méthode EFAS compare sur chaque tronçon de rivière les débits prévus pour un épisode particulier, aux débits simulés à l'aide de longues séries d'archives pluviométriques

pour le même tronçon, afin d'évaluer la période de retour des débits prévus. Les valeurs absolues des débits simulés par le modèle LISFLOOD peuvent être éloignées des valeurs observées car le modèle n'a été que sommairement calé. Le pari des concepteurs est que l'intensité relative et donc la période de retour de l'événement seront correctement prévus. La méthode EFAS permet aux gestionnaires du risque de se mettre en pré-alerte et aux services de sécurité civile de programmer d'éventuels soutiens transfrontaliers notamment. Le modèle LISFLOOD et l'approche EFAS sont également en cours de test sur le continent Africain (Cf. §1.3.4).

Par la suite, le champ d'application du modèle LISFLOOD s'est étendu à des domaines variés tels que ceux de :

- l'évaluation de l'impact du changement climatique (Rojas et al., 2012) ;
- la prédiction des crues-éclair sur des bassins versants jaugés et pour des événements d'intensité modérée (Alfieri et al., 2012, Raynaud et al., 2015) ;
- la disponibilité des ressources en eau (Mubareka et al., 2013).

Le modèle LISFLOOD a donc été conçu pour simuler les réponses hydrologiques sur des échelles de bassins de moyenne à grande taille à partir des données spatiales de pluviométrie, de nature et de couverture des sols, et de la topographie (figure 2.6 et §EFAS). Récemment, il a été étendu à la prédiction des crues-éclair. Les premiers tests indiquent un bon taux de détections des crues-éclair à une échéance de 1 à 3 jours en fondant toujours les prévisions hydrologiques sur les prévisions météorologiques de l'ECMRWF (Raynaud et al., 2015).

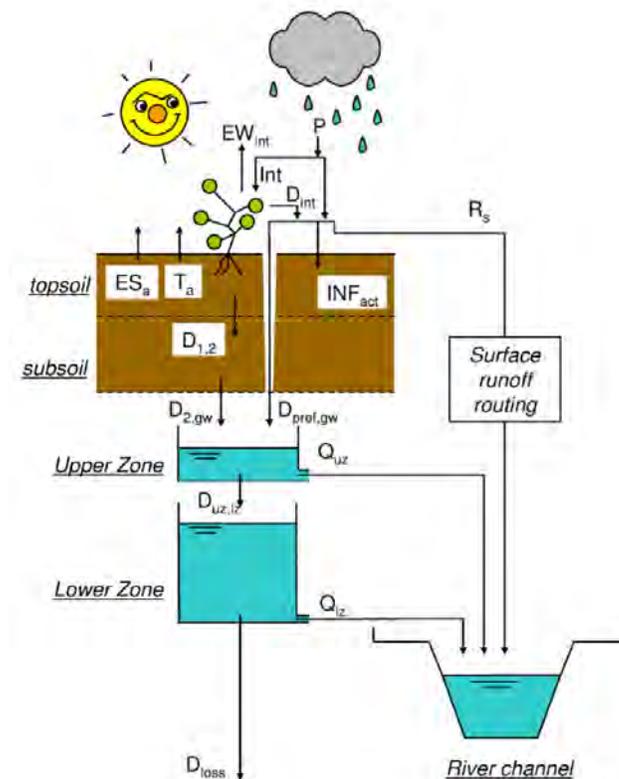


FIGURE 2.6 – Fonctionnement du modèle LISFLOOD d'après Burek et al. (2013)

GWFS

Une autre méthode, GFWS (Cf. §1.3.4) a été développée et mise en œuvre pour la prévision des crues soudaines dans le bassin versant de la rivière Guadalhorce (3200 km²) située en Andalousie. La méthode proposée produit des avertissements d'inondation, à l'échelle d'un pixel de 1 km², basés sur l'accumulation des précipitations et sur une modélisation pluie-débit distribuée spécifique (Versini et al., 2014). Les avertissements sont renouvelés au pas de temps horaire et ils reflètent l'intensité de l'événement par rapport à des seuils de périodes de retour 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 et 500 ans.

Pour deux événements de crues étudiés, les performances du modèle se sont révélées de bonne qualité avec une précision spatio-temporelle fine de l'inondation. Néanmoins, GFWS n'est pas adapté aux prévisions à très court terme (<1h) et sur des petits bassins versants (<100km²) : ceci est principalement dû à la fréquence à laquelle sont produites les informations pluviométrique (toutes les 20 minutes).

G2G

À l'échelle de l'Angleterre (Cf. §1.3.4), le modèle hydrologique distribué G2G (Grid to Grid), développé par le Centre d'écologie et d'hydrologie de Wallingford, est utilisé pour la prévision des crues rapides sur les bassins non jaugeés (Cole and Moore, 2009, Cole et al., 2014). L'avantage de ce modèle est qu'il emploie uniquement des données numériques de terrain pour délimiter les zones de production des eaux de ruissellement, par le croisement de la pente et de la capacité d'absorption du sol (figure 2.7). Le modèle a été étudié sur deux bassins versants tests avec un calage sur les stations hydrométriques aval. Il s'avère que les débits simulés coïncident avec les valeurs de débits mesurés par les stations hydrométriques en amont sur ces bassins, signe encourageant pour les prévisions sur les parties non jaugeées de ces mêmes bassins versants.

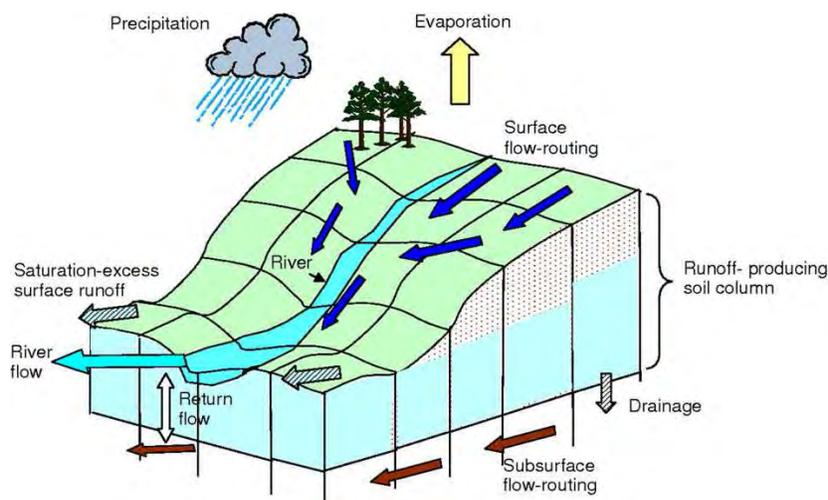


FIGURE 2.7 – Fonctionnement du modèle pluie-débit distribué G2G d'après Cole and Moore (2009)

Le modèle a depuis été appliqué à l'échelle de l'ensemble de l'Angleterre pour couvrir les bassins non jaugeés.

B) Modèles de recherche

Cinecar

Le modèle pluie-débit distribué Cinecar fonctionne à partir d'un ensemble de bassins versants découpés en un réseau ramifié de biefs de cours d'eau supposés uniformes et de section rectangulaire (figure 2.8). La pluie efficace est calculée à l'échelle de chaque versant par la formule du Soil Conservation Service - Curve Number (SNS-CN). Le transfert vers l'aval des bassins est assuré par le modèle de l'onde cinématique, avec des paramètres adaptés aux crues étudiées. Le modèle d'onde de crue diffusant remplace le modèle de l'onde cinématique pour les biefs de cours d'eau de pente inférieure à 0.6 % afin de rendre compte des phénomènes de laminage des ondes de crues. Par rapport aux différents modèles hydrologiques existants (Edijatno et al., 1999), le modèle Cinecar se classe dans la gamme des modèles hydrologiques physico-conceptuels puisqu'il fonctionne avec des équations physiques et repose sur la notion de capacité d'absorption des sols (Naulin, 2012).

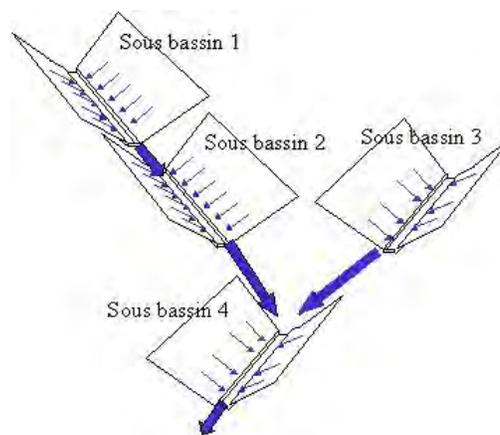


FIGURE 2.8 – Représentation schématique d'un bassin versant dans le modèle hydrologique Cinecar. Chaque sous-bassin est constitué d'un talweg de section rectangulaire et de un ou deux versants rectangulaires qui lui sont raccordés, d'après Gaume (2002)

Le modèle a été appliqué au cours de deux thèses antérieures sur le département du Gard. Versini (2007) a appliqué le modèle sur une partie du département : les pics de crues passées étaient bien identifiés, la qualité des résultats étant fortement tributaire des données pluviométriques en entrée. Naulin (2012) a ensuite étendu et adapté le modèle à l'ensemble du département du Gard en ajoutant des modules de calcul spécifiques afin de modéliser des secteurs particuliers tel que ceux influencés par les barrages du département.

Ces travaux ont confirmé les bonnes performances du modèle par la reproduction des pics de crue sur des bassins non jaugés à l'échelle du département (Naulin et al., 2013).

MARINE

La Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations de versant des événements Extrêmes (MARINE) est un modèle distribué développé pour la simulation des crues-éclair (Douinot et al., 2015). Ce modèle à base physique s'appuie sur différentes données d'entrée : topographie, occupation et propriété des sols (figure 2.9). Les travaux menés à partir de ce modèle soulignent ses capacités de prévisions des crues-éclair, en particulier sur les bassins versants non jaugés (Roux et al., 2011).

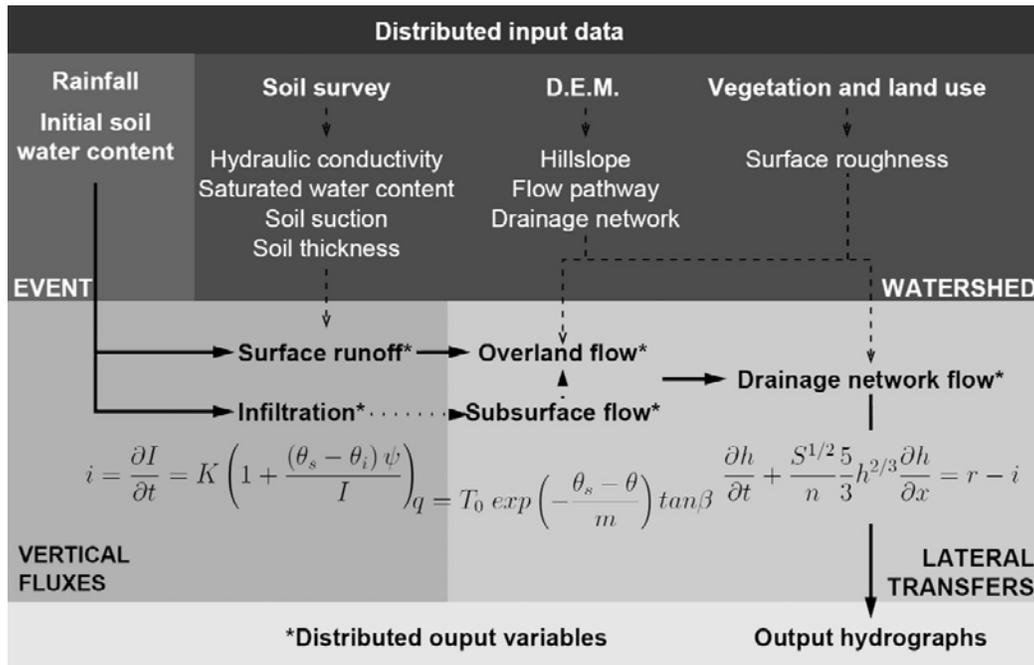


FIGURE 2.9 – Données d'entrée, structure et paramètres du modèle MARINE, d'après Roux et al. (2011)

Les premiers travaux effectués avec le modèle pluie-débit MARINE ont mis en évidence l'importance des données d'entrée (pluviométrie, type de sol, topographie) et des paramètres de modélisation (rugosité du lit de la rivière) pour la modélisation hydrologique des crues-éclair (Braud et al., 2010, Roux et al., 2011, Garambois et al., 2013).

L'effet de la régionalisation du modèle pluie-débit MARINE a été étudié dans le cas de 118 crues-éclair dans la région méditerranéenne française (Garambois et al., 2015). La régionalisation de ce modèle est plus complexe lorsque les bassins versants étudiés n'ont pas un comportement "stable" lors des différentes crues. La nature du substratum rocheux semble être le facteur déterminant pour la régionalisation des paramètres du modèle.

2.1.3 Traitement des incertitudes et recommandations pour la modélisation hydrologique

Chaque composante intervenant dans la modélisation (données, modèle, ...) introduit une part d'incertitude sur les résultats obtenus (Gourley et al., 2014), d'où le besoin de connaître ce niveau d'incertitude pour prétendre à des prévisions de qualité. Les incertitudes liées à la mesure et à la prévision des pluies sont par exemple très importantes et constituent probablement la principale source d'erreur dans la prévision des inondations (Hapuarachchi et al., 2011). Cet effet est accentué par le fait que les crues-éclair se produisent généralement sur des petits bassins versants (<300 km²) : une prévision hydrologique précise n'est envisageable que si les observations pluviométriques sont disponibles échelles spatiales et temporelles de ces petits bassins versants (données radars essentielles). Par ailleurs, des décalages de quelques kilomètres des mesures ou des prévisions pluviométriques peuvent conduire à des erreurs importantes de simulation pluie-débit : affectation des pluies intenses au bassin versant voisin (figure 2.10).

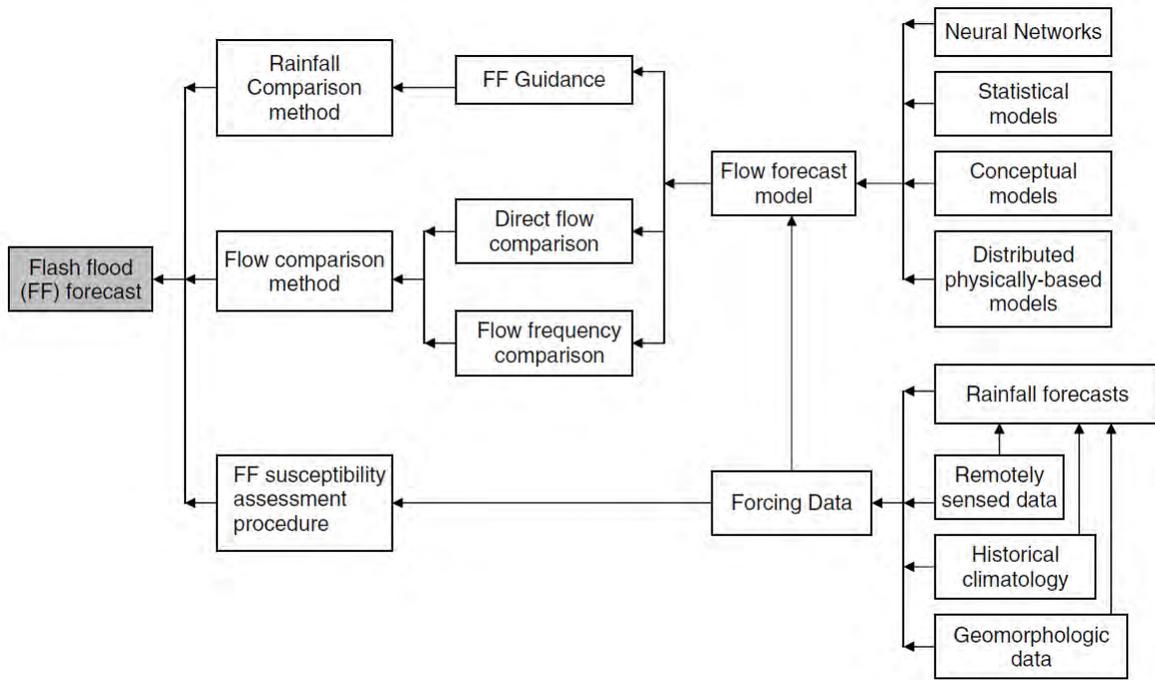


FIGURE 2.10 – Schéma de différentes approches disponibles à la mise en place d'une prédiction des crues-éclair, d'après *Hapuarachchi et al. (2011)*

L'incertitude des prévisions hydrologiques doit finalement être communiquée et visualisable pour les personnes en charge de la gestion des crises (*Pappenberger et al., 2013*). Ces incertitudes attachées aux prévisions hydrologiques ne doivent pas entraver les décisions des gestionnaires. Pour cela, une liste des informations essentielles attachées à la prévision probabilistes des inondations a été proposée par des experts du domaine tels que :

- le débit ;
- la date et l'heure ;
- les dangers, le niveau d'alerte ou les périodes de retour ;
- les observations et la performance du modèle par le passé, par le biais de statistiques ou d'un graphique ;
- la représentation de l'incertitude par quantiles ;
- le meilleur et le pire des scénarios (max/min) ;
- les métadonnées sur l'institut et la personne à contacter en cas de questions ;
- les mesures des risques potentiels associés aux scénarios (coût, population impactée, ...).

Les incertitudes des simulations hydrologiques et celles des prévisions hydrologiques sont complexes (*Bourgin, 2014*). Elles peuvent cependant être modélisées, en se fondant par exemple sur les événements passés, et associées aux prévisions déterministes (*Roux, 2004*).

2.1.4 Bilan

À travers les différents travaux présentés, plusieurs renseignements peuvent être tirés sur la modélisation hydrologique.

Tout d'abord, les méthodes pluie-débit applicables au contexte non jaugé ne semblent pas

manquées et elles possèdent des niveaux de performances estimées correctes dans les environnements où elle ont été déployées.

De plus, les modèles hydrologiques disponibles semblent en capacité de fonctionner avec des résolutions temporelles et spatiales en accord avec les crues-éclair. C'est notamment le cas pour le modèle Cinocar, développé à l'IFSTTAR et qui sera utilisé dans le cadre de cette thèse.

Les difficultés majeures semblent liées à la prévision des pluies qui limitent les niveaux d'anticipation des crues-éclair.

2.2 Estimation des emprises inondées sur un réseau hydrographique

L'identification des enjeux impactés au cours d'une inondation demande la mise en œuvre d'une modélisation hydraulique identifiant les secteurs inondés. L'étendue des zones inondées dépend inévitablement des débits prévus par les modélisations hydrologiques. L'objectif de la thèse est de prévoir en temps réel l'étendue des surfaces inondées et les impacts potentiels correspondants en fonction des débits prévus sur des bassins versants jaugés et non jaugés. La modélisation hydraulique souhaitée, dans le cadre de la thèse, doit être adaptée aux contraintes ci-dessous :

- produire des emprises inondées pour une large gamme de débits ;
- prévoir précisément l'étendue des surfaces inondées, dans le but de bien identifier quels sont les impacts associés à ces zones inondées ;
- être déployé sur des bassins versants jaugés et non jaugés soumis aux crues-éclair.

La suite de ce paragraphe détaille les méthodes proposées dans la littérature pour atteindre ces objectifs. Une partie est consacrée aux recommandations d'une modélisation hydraulique adaptée aux objectifs fixés.

2.2.1 La modélisation hydraulique orientée vers la prévention

RFSM

En Angleterre, une méthode "Rapid Flood Spreading Model" (RFSM) a été élaborée dans le but de modéliser la dynamique d'inondation des lits majeurs de cours d'eau en prenant en compte les éléments de topographie tels que les ouvrages de protection à une échelle régionale (Gouldby et al., 2008). La méthode combine une étape de prétraitement suivi d'une étape de calculs hydrauliques.

L'étape de prétraitement identifie les sommets et les dépressions sur un modèle numérique de terrain et détermine également le volume pouvant être contenu dans chacune de ces dépressions (figure 2.11).

L'étape de calculs hydrauliques évalue le volume d'eau contenu dans les différentes dépressions de manière itérative. Lorsque la dépression atteint son volume d'eau maximum, il y a un transfert des eaux restantes par déversement dans la dépression voisine (figure 2.12). Les calculs sont réitérés de manière à savoir si ce volume supplémentaire complète les capacités de stockage de cette dépression voisine.

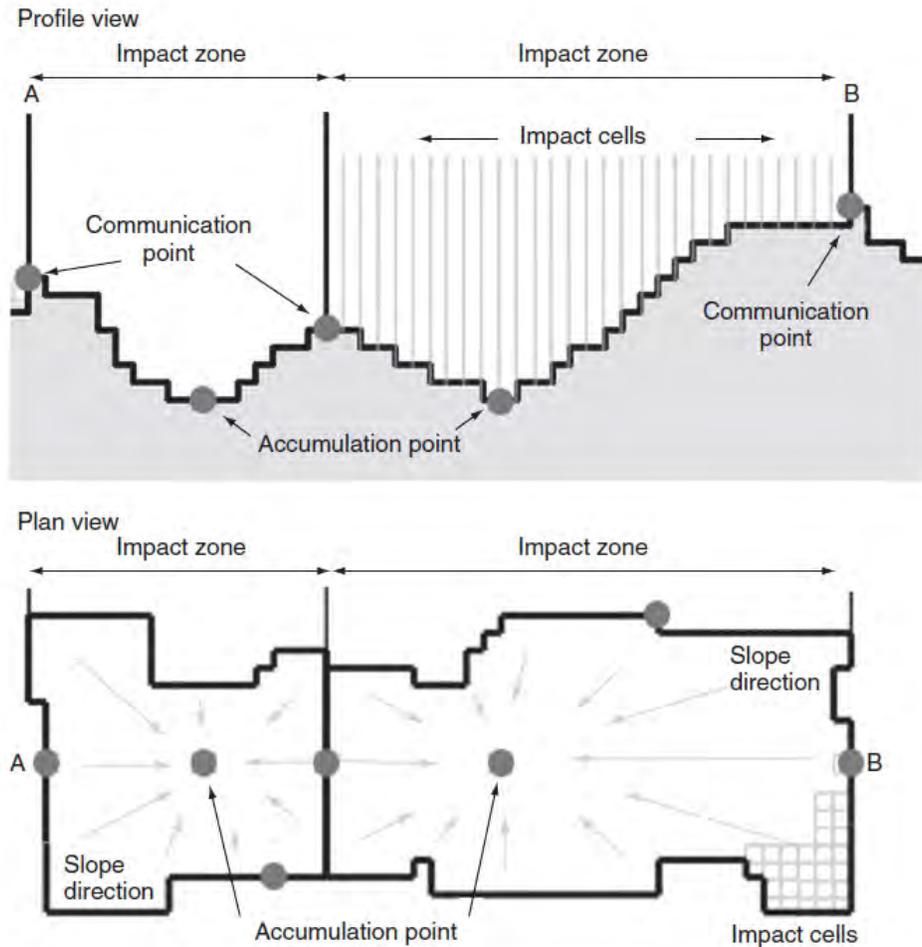


FIGURE 2.11 – Représentation conceptuelle des zones d'accumulation et des points de communication entre zones d'accumulation, d'après *Gouldby et al. (2008)*

Les résultats de ce type de modélisation à l'échelle régionale se sont av er es de meilleure qualité que ceux provenant de l'application à l'échelle nationale.

Une transposition de ces travaux a été effectu e sur une zone de 2 025 km², travers e par l'Elbe en Allemagne (*Falter et al., 2013*). Les résultats des simulations de l'événement du 18 août 2002, obtenus à partir d'un MNT de 25 m de précision sont proches de l'étendue et des profondeurs lev es après l'événement.

Les auteurs précisent que la qualité des résultats de simulations hydrauliques et les temps de modélisations sont principalement contr ol es par la précision des données topographiques. Le déploiement d'un tel modèle à l'échelle nationale de l'Allemagne demanderait des temps de calculs importants : confirmant les capacités de la méthode pour un objectif cartographique de prévention mais pas de prévision en temps réel (*Falter et al., 2016*). La méthode étant basée sur des volumes d'eau, elle ne peut en effet s'appliquer qu'à partir d'un hydrogramme complet, mais pas constituer des cartes à partir de valeurs fixées de débit (régime permanent).

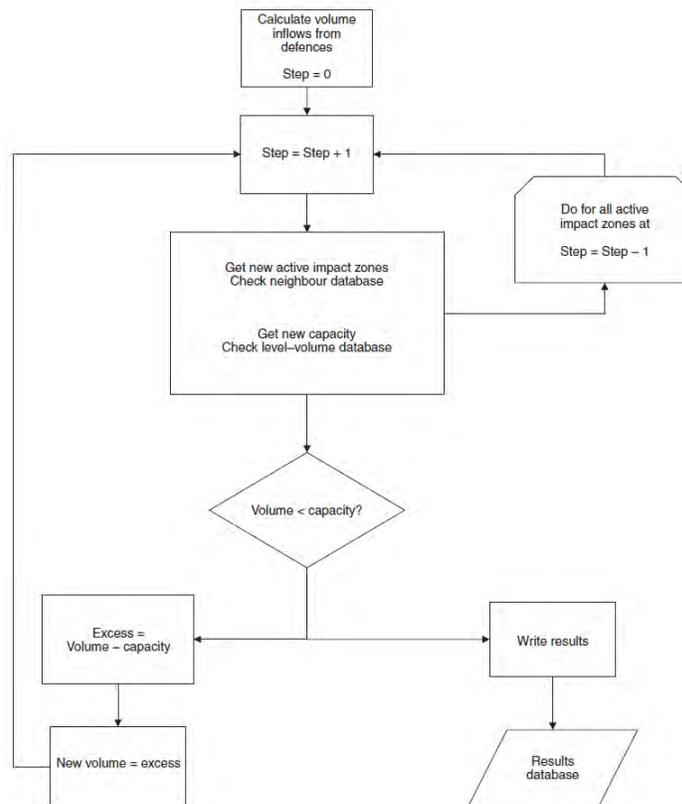


FIGURE 2.12 – Schéma des principes de l'algorithme de propagation de l'inondation, d'après *Gouldby et al. (2008)*

Les auteurs mettent en garde sur une application de l'approche en zone amont, où les lits des cours d'eau sont plus étroits et l'extension de l'inondation est alors davantage liée au débit de pointe qu'au volume d'eau de la crue.

Combinaison de "Normal Depth Calculation" et de JFLOW2D

D'autres travaux de cartographie des zones inondables ont été effectués en Angleterre et au Pays de Galles sur 80 000 km de linéaire de cours d'eau à l'aide de deux modèles hydrauliques de complexités différentes : Normal Depth Calculation et JFLOW2D (*Bradbrook et al., 2005*). Les données topographiques employées ont une résolution planimétrique de 5 m et une précision altimétrique comprise entre 0,5 et 1 m. Le calcul des surfaces inondées s'est appuyé sur des quantiles de débits disponibles et une segmentation à intervalles réguliers du réseau hydrographique.

La méthode Normal Depth Calculation se base sur l'application de l'équation de Manning-Strickler en faisant donc l'hypothèse d'un régime d'écoulement normal au droit de chaque profil en travers traité (2.1) :

$$Q = \frac{AS^{\frac{1}{2}}R^{\frac{2}{3}}}{n} \quad (2.1)$$

avec "Q" le débit (m³/s), "A" la section mouillée (m²), "S" la pente (m/m), "R" le rayon hydraulique (m) et "n" le coefficient de Manning déterminé en fonction de l'occupation du lit.

Le calcul est appliqué à une section transversale, qui est divisée en segments d'une largeur équivalente à la taille des cellules du MNT. Le résultat de ce calcul fournit une cote moyenne de la ligne d'eau par profil en travers et par débit (figure 2.13). Le calcul est exécuté en fonction du nombre de débits disponibles dans le but de créer une courbe de tarage au droit de la section transversale.

Dans un second temps, à partir d'outils SIG, les hauteurs d'eau calculées au droit de chaque profil sont interpolées entre les profils et intersectées avec le relief pour déterminer les surfaces inondées.

Une vérification manuelle des profils en travers est préconisée par les auteurs, nécessitant des temps conséquents (2 semaines de vérification pour 15 000 km de cours d'eau).

Le modèle hydraulique 2D, JFLOW, combine l'équation de Manning-Strickler et l'équation de continuité appliquée à chaque cellule du MNT. Ainsi, des surfaces inondées sont simulées sur des tronçons de rivière un kilomètre de longueur. Par la suite, les résultats de chaque tronçon sont agrégés pour former une surface unique de submersion (figure 2.14). L'avantage de la méthode est l'intervention minimale de l'utilisateur. Cependant, pour être fonctionnelle, elle nécessite de grandes capacités de calcul.

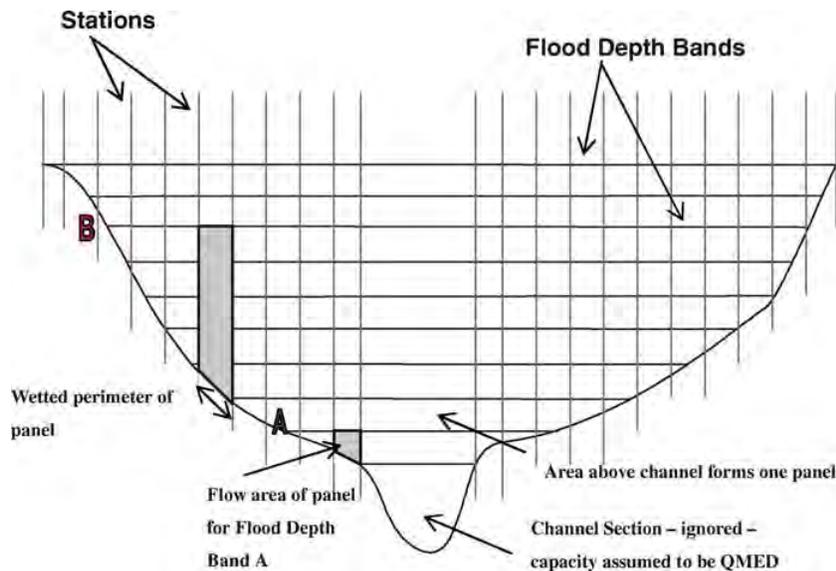


FIGURE 2.13 – Détail du calcul de la "Normal Depth Method" d'après Bradbrook et al. (2005)

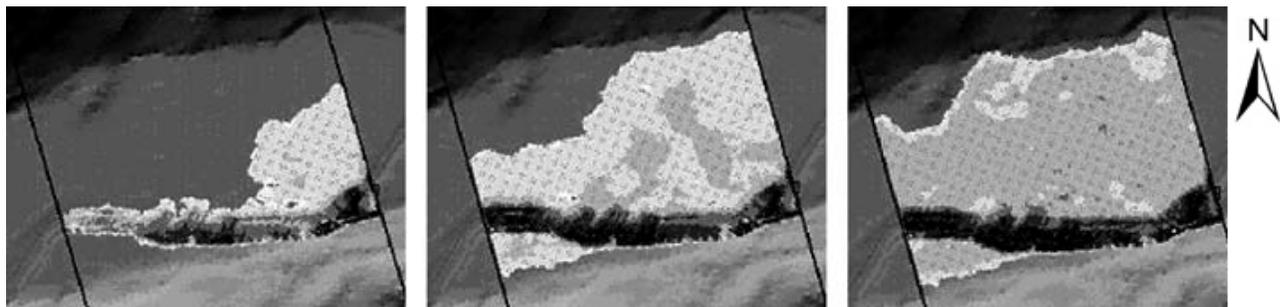


FIGURE 2.14 – Résultats des calculs de surfaces inondées à partir de JFLOW 2D au cours d'une simulation à l'échelle d'un tronçon d'un kilomètre, d'après Bradbrook et al. (2005)

Les deux méthodes ont été comparées lorsqu'elles sont appliquées à grande échelle. Elles offrent des résultats de surfaces inondées similaires dans les vallées simples mais elles montrent des différences lorsque les calculs sont réalisés en lits complexes. Dans les deux cas, les temps de calculs et l'expertise attendue de l'utilisateur sont importants : ils ne permettent pas d'envisager un calcul en temps réel.

CaMa- Flood

Le modèle Catchment-Based Macro-scale Floodplain (CaMa-Flood) est capable de calculer la dynamique d'inondable d'un lit majeur à partir d'un réseau hydrographique maillé sur les grands cours d'eau mondiaux (Yamazaki et al., 2011). À partir des mailles d'un km^2 d'un MNT, le transfert de l'eau est représenté par la simplification de l'équation de Saint Venant permettant de connaître la hauteur d'eau et la surface inondée à l'échelle de chaque maille (figure 2.15).

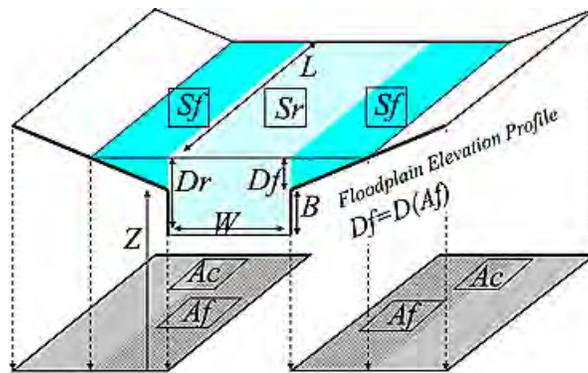


FIGURE 2.15 – Illustration des réservoirs de la rivière et de la plaine inondable définis dans chaque maille par CaMa-Flood. Les paramètres et variables sont définis dans Yamazaki et al. (2011)

Les résultats des plaines inondables modélisées sur les grands cours d'eau mondiaux correspondent aux observations satellites disponibles. Cependant, les auteurs rapportent de nombreuses incertitudes sur la relation surface inondée et hauteur d'eau en lien avec la précision et la résolution limitées des données topographiques utilisées.

Le modèle CaMa-Flood a été employé dans la réalisation de cartes du risque d'inondation pour différentes périodes de retour à l'échelle mondiale (Pappenberger et al., 2012). Les résultats de cette étude indiquent que l'approche adoptée permet de produire des cartes des risques d'inondation mondiale réalistes pour différentes périodes de retour.

Cependant, les travaux de recherche avec le modèle CaMa-Flood se sont globalement limités à un déploiement sur les grands cours d'eau mondiaux avec des résolutions de mailles d'un km^2 au mieux, paraissant beaucoup trop grossières pour une application sur de petits bassins versants.

WOLF2D

L'administration belge a produit des cartes de l'aléa inondation, pour les quantiles de débit 25, 50 et 100 ans sur l'ensemble du territoire. Les calculs hydrauliques ont été réalisés à partir du modèle d'écoulement à surface libre WOLF2D (Dewals, 2006).

Une étude de cas régionale, s'étendant sur 800 km de cours d'eau, décrit les résultats simulés par le modèle (Detrembleur et al., 2009). Les données topographiques employées permettent de produire des résultats de surfaces inondées basés sur des cellules carrées de 2 m de côté. Les résultats des surfaces en eaux ont été comparés avec les observations d'événements passés, révélant une incertitude globale du modèle inférieure à 10 cm en terme de surface libre (figure 2.16) : des résultats très satisfaisants, liés en partie à la résolution du MNT retenu, mais qui laisse espérer des performances satisfaisantes de l'application de modèles hydrauliques à grande échelle moyennant le choix de modèles adaptés et un choix judicieux de paramètres.

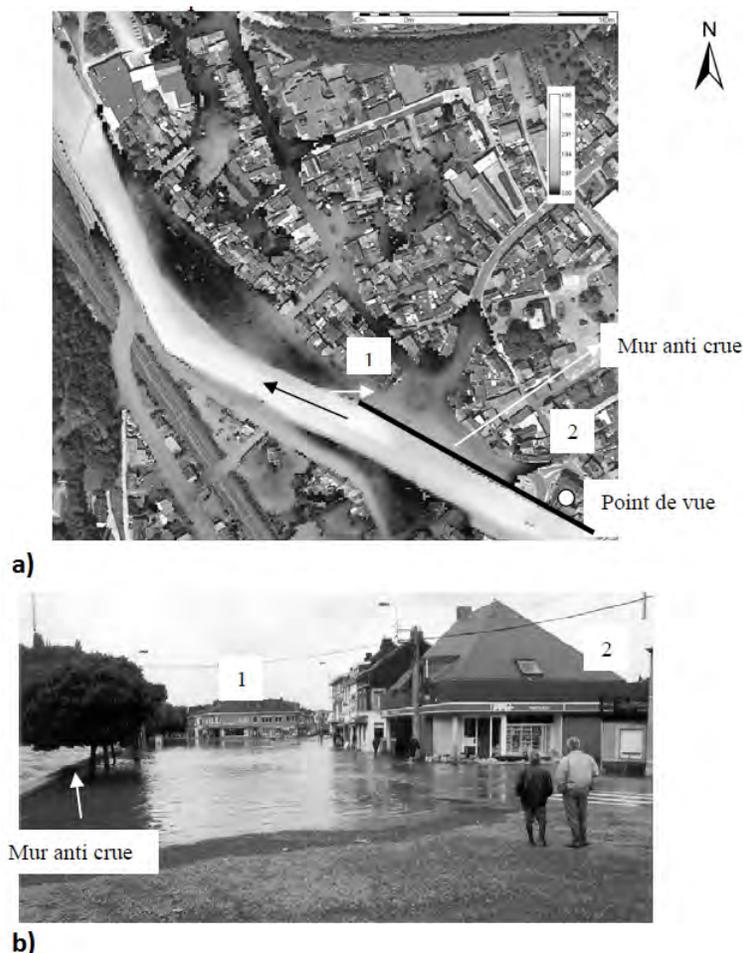


FIGURE 2.16 – (a) Hauteur d'eau pour un débit de $255 \text{ m}^3/\text{s}$ simulée avec WOLF2D; (b) Photographie de crue prise au cours de l'inondation de 1998, d'après Detrembleur et al. (2009)

Les temps de calculs nécessaires à la modélisation des étendues inondées ne sont pas précisés dans le cadre de ces travaux. WOLF2D ne semble pas avoir été développé dans le but de prévoir le risque d'inondation mais plutôt dans un contexte de prévention et de cartographie des risques (Detrembleur et al., 2009).

Le niveau de précision des résultats des surfaces inondées obtenus à partir du modèle WOLF2D dépassent la précision recherchée dans le cadre des travaux de thèse.

CARTINO

La méthode CARTINO (CARTographie des INondations) permet la construction et l'application d'un modèle hydraulique 1D, comme Fudaa-Mascaret [Descatoire et al. \(2008\)](#), en régime permanent et le calcul de zones inondables associées, ceci de façon semi-automatisée à partir de l'exploitation directe d'un modèle numérique de terrain à haute résolution et d'une base de données de quantiles de débits ([Pons et al., 2014](#)). Le résultat est une emprise inondée mono-fréquence de période de retour fixée sur l'ensemble du linéaire du réseau hydrographique traité.

Une étude de cas a permis de comparer les surfaces inondées provenant de la méthode CARTINO avec celles obtenues à partir d'une modélisation hydraulique expertisée sur un événement extrême de la Directive Européenne Inondation (Cf. figure 2.17).

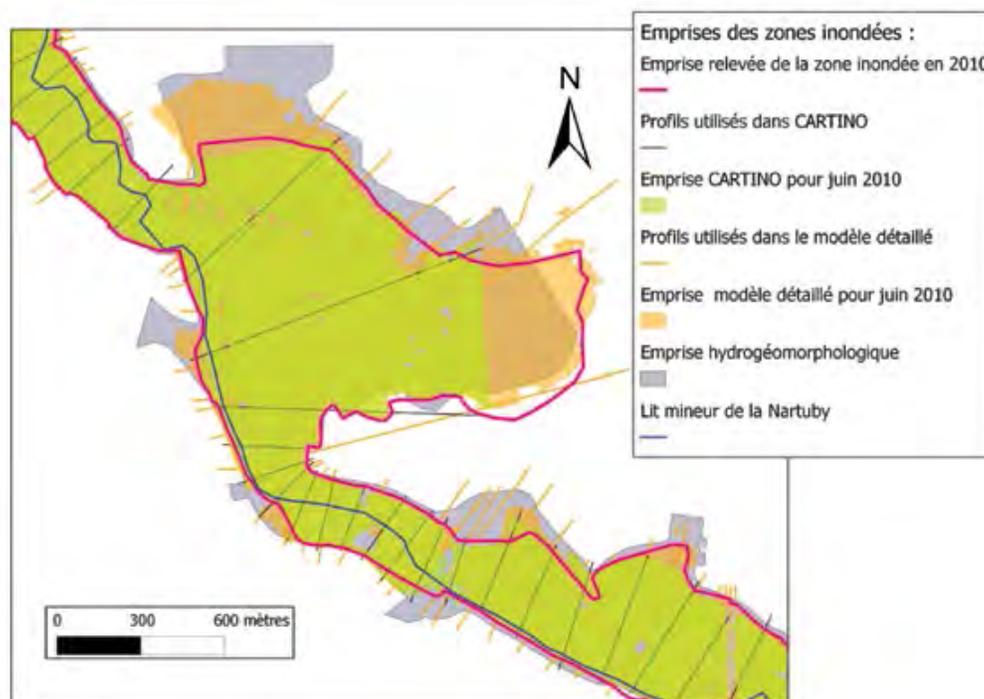


FIGURE 2.17 – Comparaison entre la cartographie des surfaces inondées par modélisation automatisée (CARTINO) par rapport à celle détaillée sur l'étude de la crue de juin 2010 dans le Var (surface inondée relevée), d'après [Pons et al. \(2014\)](#)

Il s'avère que les résultats obtenus de manière automatisée sont très proches de la surface relevée post-catastrophe, et d'une précision similaire aux résultats générés par la modélisation détaillée sur les secteurs de test.

2.2.2 La modélisation hydraulique intégrée à la prévision

Quelques travaux de recherche, dont ceux de [Schumann et al. \(2013\)](#), ont été conduits afin de développer des modèles de prévisions des surfaces inondées à grande échelle et à haute résolution spatiales. Cependant, les données nécessaires à la validation de ce type de modélisation sont rarement disponibles sur de grandes échelles spatiales. Les applications et tests de ces approches se limitent souvent à des secteurs géographiques peu étendus.

BreZo

BreZo est un modèle hydraulique 2D, appliqué sur un maillage non structuré de cellules triangulaires. Ce type de modèle est idéal pour la modélisation hydraulique des cours d'eau aux géométries complexes ([Begnudelli and Sanders, 2006](#)). L'algorithme du modèle est robuste et efficace pour suivre constamment le volume de fluide et l'élévation de la surface libre dans les cellules partiellement submergées du modèle. Ce modèle a fait l'objet de travaux concluants sur la modélisation des étendues inondées ([Sanders, 2007](#)). Ces travaux proposent une évaluation des résultats obtenus à partir de différentes sources de données topographiques et de différents niveaux de résolution.

Dans le cadre de travaux d'anticipation des crues ([Nguyen et al., 2015b](#)), le modèle hydrologique HL-RDHM a été couplé au modèle hydraulique BreZo aux États-Unis (figure 2.18). L'application de ce couplage a été effectuée sur le bassin versant du Cedar, dans l'Iowa aux États-Unis, drainant une surface de 20 000 km². Les caractéristiques de ce bassin sont décrites dans un rapport technique Américain précisant, en particulier, l'occupation des sols majoritairement de type agricole ([Linhart and Eash, 2010](#)).

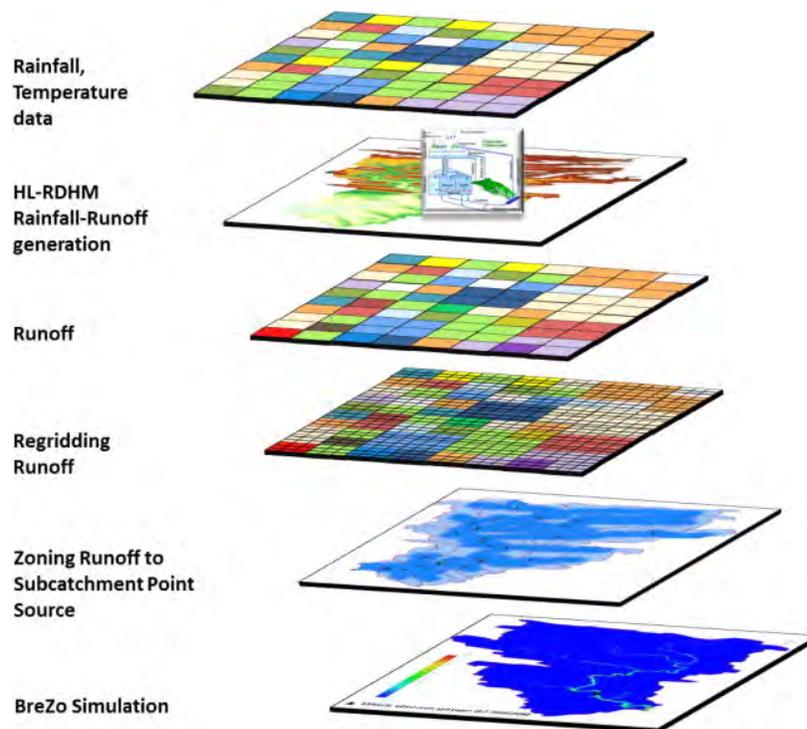


FIGURE 2.18 – Cascade de modélisation HiResFlood-UCI couplant le modèle pluie-débit HL-RDHM au modèle hydraulique BreZo, d'après [Sanders \(2007\)](#)

Le modèle a été testé sur sa sensibilité aux données d'entrée et aux valeurs de ses paramètres. La résolution des données topographiques est importante pour l'optimisation des simulations obtenues par le modèle (les mailles doivent avoir une taille inférieure à 30 mètres). En parallèle, il s'avère que ce modèle hydraulique est sensible à la rugosité en lit mineur et majeur, impliquant une vigilance importante de l'utilisateur sur les choix de ces coefficients.

Les hauteurs d'eau simulées à partir de six inondations passées ont été comparées à celles disponibles aux stations de mesures, révélant une erreur de hauteur d'eau maximale de 0,82 m, présageant une bonne modélisation de l'étendue des surfaces simulées.

Les résultats des étendues simulées ont pu être comparés à des photographies aériennes post-catastrophe de l'inondation de 2008 dans l'Iowa aux États-Unis (Nguyen et al., 2015a). Les résultats dévoilent une forte similitude des étendues simulées par rapport à celles photographiées. Ces résultats prometteurs sont en attente de nouvelles validations avant de déployer la chaîne de modélisation HiResFlood-UCI à une zone géographique plus étendue.

Les résultats de ces travaux laissent entrevoir des perspectives intéressantes de développement de la méthode à une échelle plus grande. Toutefois, la forte sensibilité du modèle aux paramètres, dont le coefficient de rugosité, peut freiner son déploiement à ces échelles et nécessiter une longue phase de calage et d'ajustements.

De plus, le territoire de l'Iowa possède une topographie à pentes très faibles, d'approximativement 0,2% entre les têtes de bassins versants (Cf. carte Nguyen et al. (2015a)). L'efficacité de la méthode sur un secteur à forte pente, comme le territoire des Rocheuses ou les Cévennes-Vivarais dans le sud de la France reste à démontrer.

Travaux de l'Institut National de la Recherche Scientifique du Québec

Dans le cadre de la prédiction des crues au Canada, des travaux ont établi une relation débit-hauteur au droit de l'ensemble des cellules d'un modèle numérique de terrain dans le but d'estimer et de prévoir la profondeur de submersion pour un débit donné (Poulin et al., 2012). Tout d'abord, une étape de construction de la relation débit-hauteur est réalisée en tous points du domaine à partir des cotes de récurrences officielles disponibles ($T=0, 2, 20$ et 100 ans). Cette relation hauteur-débit construite correspond à un catalogue de relations hauteur-débit sur chacun de ces points (figure 2.19).

La seconde étape consiste à déterminer, pour ces niveaux de débits obtenus, le niveau de la surface d'eau associée et subséquemment de dériver l'étendue de la plaine inondable et la profondeur de submersion en tous points de la zone inondée en utilisant un modèle numérique de terrain (figure 2.20).

Le résultat de la seconde étape est une approximation de la réalité, contrôlé en grande partie par la relation hauteur-débit effectuée au cours de la première étape.

À notre connaissance, ces travaux n'ont pas encore fait l'objet d'une phase d'évaluation des modélisations réalisées par rapport à des événements passés.

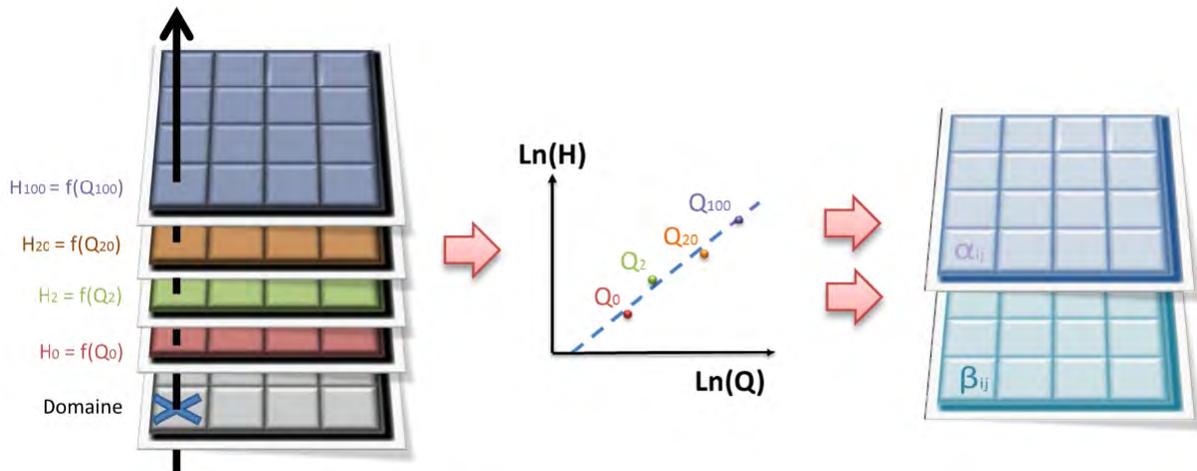


FIGURE 2.19 – Méthode de détermination de la relation hauteur-débit pour chaque cellule de la zone étudiée, d'après Poulin et al. (2012)

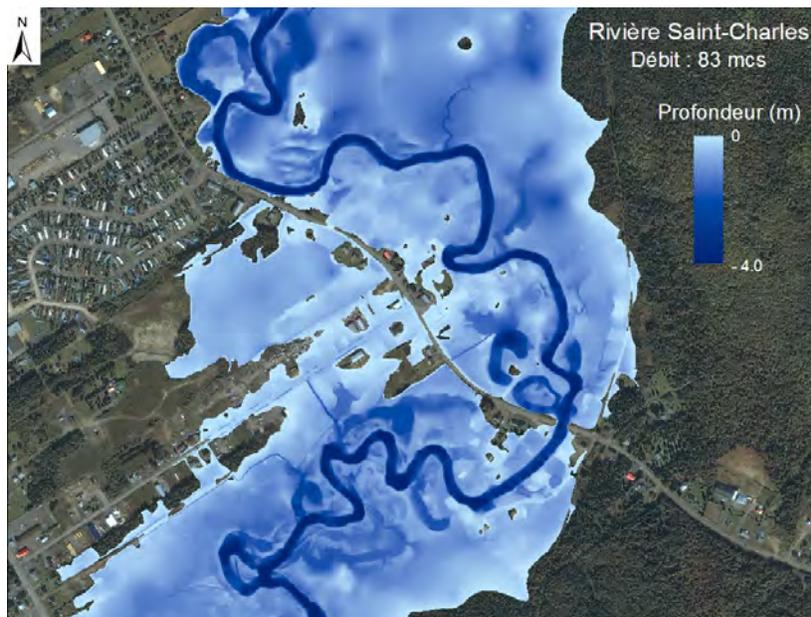


FIGURE 2.20 – Modélisation hydraulique locale de l'étendue et de la profondeur de submersion pour un débit de $83 \text{ m}^3/\text{s}$ sur un tronçon de la rivière Saint-Charles ($46^\circ 53'36.9''\text{N}$ $71^\circ 21'26.2''\text{W}$), Québec, d'après *Poulin et al. (2012)*

LISFLOOD-FP

Le modèle à base physique LISFLOOD-FP¹ a été développé dans le but de simuler une inondation dynamique de manière simple (*Bates and Roo, 2000*), pour être déployé à grande échelle. Le modèle calcule des hauteurs d'eau dans chaque cellule régulière d'une grille et à chaque pas de temps, et peut donc simuler la propagation dynamique des ondes de crue sur les plaines inondables à topographie complexe (figure 2.21). Ce modèle provient de travaux de recherche, dont le but était d'améliorer la prévision des inondations et l'évaluation des risques d'inondation.

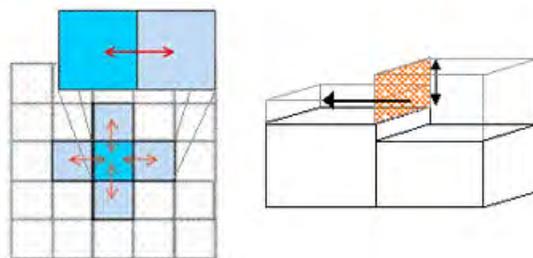


FIGURE 2.21 – Modélisation de la plaine inondable de manière dynamique par LISFLOOD-FP

À partir de ce modèle des travaux ont été effectués à différentes échelles, depuis l'échelle planétaire décrite dans *Schumann et al. (2013)* ou *Sampson et al. (2015)* à celle de la ville présentée dans *Merkuryeva et al. (2015)* ou *Apel et al. (2009)*.

1. <http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/structure/>

Les premiers travaux sont ambitieux et de nombreuses améliorations sont nécessaires avant que ce projet soit opérationnel, notamment l'acquisition de données plus précises concernant la topographie et la bathymétrie (Schumann et al., 2013). Les calculs dédiés à la réalisation de cartes des surfaces inondées par périodes de retour s'avèrent très longs (figure 2.22). En optimisant les temps de calculs sur plusieurs machines, il faut 24 heures pour produire ce type de carte à l'échelle de l'Afrique (Sampson et al., 2015).

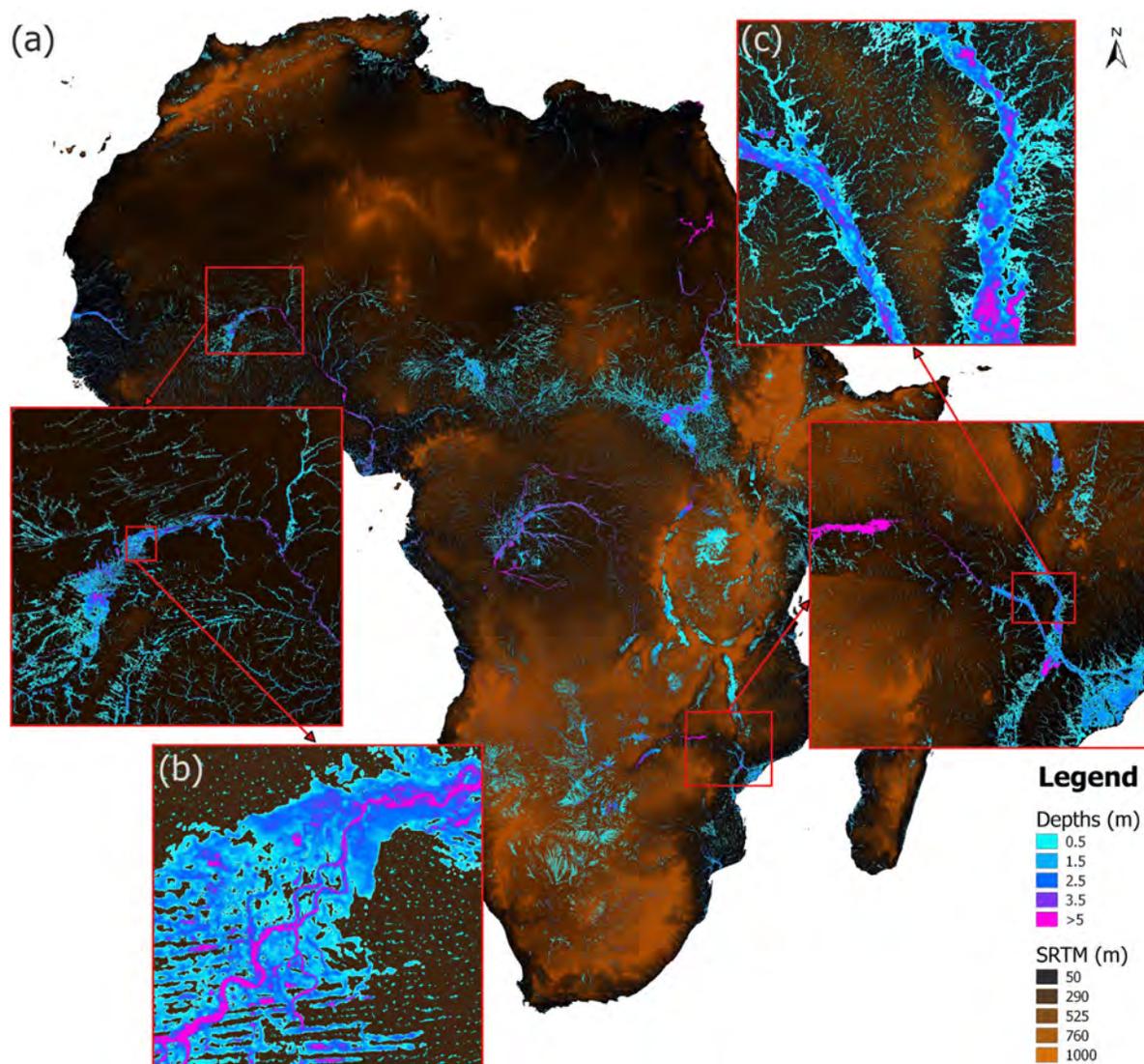


FIGURE 2.22 – Résultats d'une simulation globale fixée pour une période de retour 100 ans sur, (a) toute l'Afrique, (b) le delta du Niger, et (c) la plaine inondable du fleuve Zambèze, d'après Sampson et al. (2015)

D'autres travaux emploient LISFLOOD-FP dans le but de réaliser des prévisions de surface inondée à une échelle plus limitée. Ces travaux ont permis de prévoir des surfaces inondées à 12 heures d'anticipation, rafraîchies toutes les heures à l'échelle de la commune de Daugavpils² en Lettonie (figure 2.23).

2. <https://www.ecosia.org/maps?q=daugavpils+universitahe>



FIGURE 2.23 – Prévisions de zones inondées à partir de LISFLOOD-FP, d'après *Merkuryeva et al. (2015)*

Des simulations sur des événements passés ont été effectuées pour connaître la qualité des résultats proposés par la méthode par rapport aux surfaces inondées réelles. Il s'avère que les résultats sont proches, avec une étendue inondée similaire supérieure à 90%.

Toutefois, le calcul du modèle est effectué de maille en maille, principe plus adapté aux cours d'eau en zone de larges plaines inondables, ce qui semble plus complexe à adapter à une partie des cours d'eau encaissés sujets aux crues-éclair.

2.2.3 Recommandations pour une modélisation de qualité et adaptée aux objectifs visés dans la thèse

Choix du modèle hydraulique

Combien de dimensions faut-il pour le modèle hydraulique : 1D ou 2D ? Quel est le niveau de simplification des équations hydrauliques à adopter ?

Les réponses à ces questions dépendent des objectifs visés tels que l'échelle à laquelle est utilisé le modèle, le niveau de précision attendu, voire les temps de calculs nécessaires à ces modélisations (*Laganier et al., 2014*).

Les modélisations hydrauliques 2D permettent de mieux traiter les géométries complexes. Leur mise en œuvre plus lourde. Les données nécessaires (topographie fine, rugosité locale, ...) et les temps de calculs plus longs qu'une modélisation 1D limitent leur mise en œuvre à grande échelle ou sur un réseau hydrographique détaillé. La modélisation hydraulique 2D est généralement réservée à des secteurs de petite taille (bassins versants de plusieurs dizaines de km^2), en raison de la complexité de l'approche (*Lerat, 2009*), même si des exemples récents cités plus haut font état de l'application de ce type de modèles à grande échelle.

Les objectifs visés dans le cadre de la thèse demandent une mise en œuvre simple du modèle hydraulique retenu pour pouvoir traiter un linéaire de cours d'eau important. Ceci a orienté

notre choix de travailler avec un modèle hydraulique à une dimension pour produire les différentes emprises inondées.

Ajuster les valeurs des paramètres des modèles à la zone d'étude

La rugosité du lit apparaît comme l'un des facteurs clé influant sur les résultats de la modélisation hydraulique. La modification de ce paramètre modifie les calculs de niveau d'eau par le modèle hydraulique : pour un même débit, l'augmentation du coefficient de rugosité de Strickler K (réduction de rugosité) diminue la section mouillée S et la cote du tirant d'eau (Cf. §4.4.1). À partir de deux expériences, menées sur le Pô et sur la Garonne, [Bozzi et al. \(2014\)](#) montrent par exemple que les probabilités de sous-estimer le niveau d'eau de un mètre sont significatifs si l'incertitude sur la rugosité est forte. Les valeurs de coefficients de rugosité devront donc être soigneusement choisies.

La précision des données topographiques

[Yu and Lane \(2006\)](#) démontrent que des variations, même faibles, de la résolution spatiale des modèles numériques de terrain ont un fort impact sur les résultats des modélisations de surfaces inondées, qui se dégradent fortement en deçà d'une certaine résolution (figure 2.24).

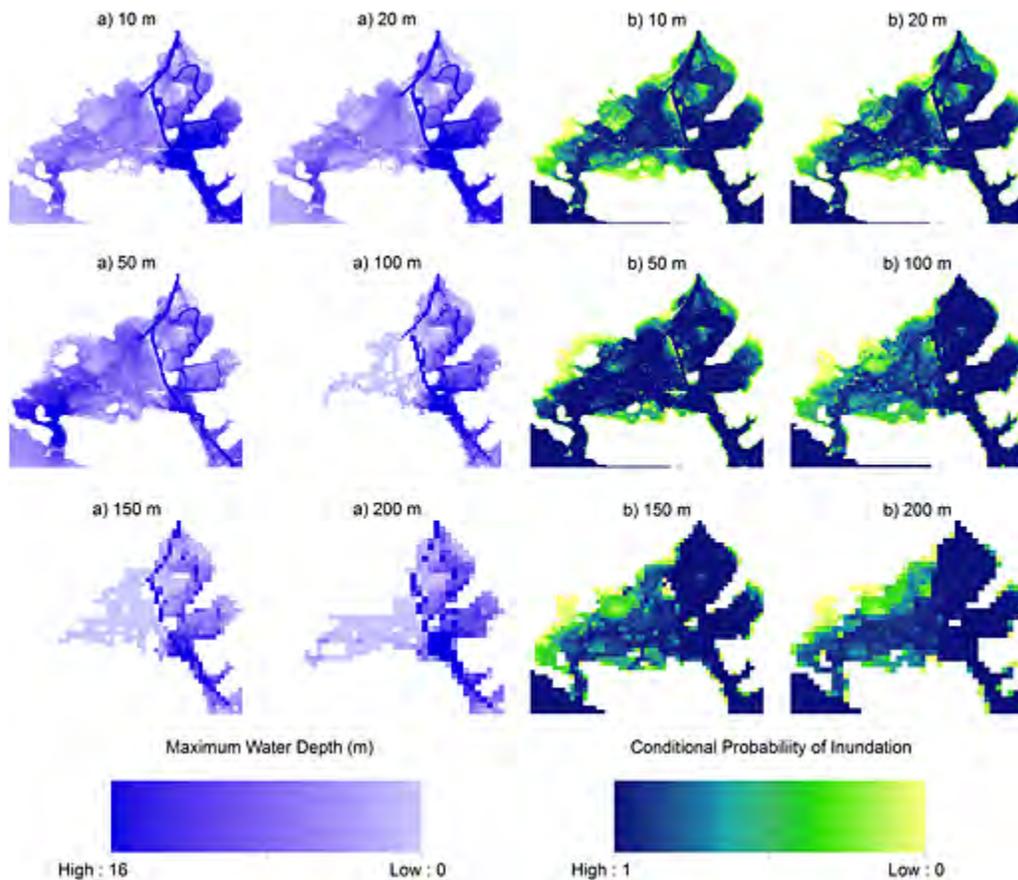


FIGURE 2.24 – a) Modélisation des surfaces inondées et b) incertitude associée à la modélisation à partir de LISFLOOD-FP et de la dégradation des données topographiques (10, 20, 50, 100, 150, 200 m), d'après [Savage et al. \(2016\)](#)

La résolution topographique influe nettement plus sur l'extension de la zone inondée que sur les niveaux d'eau calculés selon certains travaux (Mark et al., 2004). La dégradation de données LiDAR, d'une résolution de 2 mètres à 16 mètres peut par exemple engendrer une augmentation de 20% des surfaces inondées et de 0,1 mètres du niveau d'eau simulé (Fewtrell et al., 2008). À partir de calculs hydrauliques effectués en dégradant progressivement des données LiDAR, Fewtrell et al. (2008) révèlent qu'un MNT avec des mailles plus fines ne garantit pas toujours les meilleurs résultats : la qualité des résultats de surfaces inondées obtenus avec des mailles de 4 mètres est inférieure à celle réalisée avec des mailles de 8 mètres par exemple.

De plus, la résolution des données topographiques doit être en relation avec la taille des enjeux à identifier. Concernant la taille moyenne des bâtiments, une longueur critique et générique à l'échelle mondiale a été fixée à 8 m (figure 2.25). Les travaux de Mark et al. (2004) proposent d'utiliser une résolution topographique similaire, typiquement 5 mètres, estimée suffisante pour distinguer des bâtiments, mais également des routes.

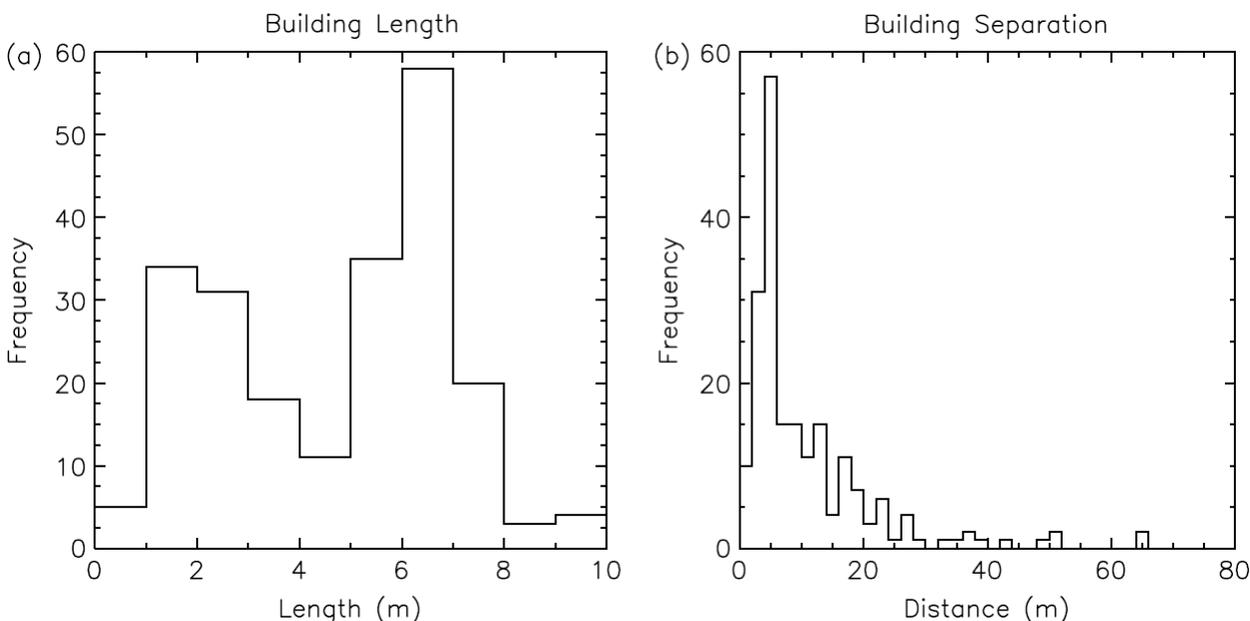


FIGURE 2.25 – Répartition des échelles de longueur du quartier de Greenfields à Glasgow ; (a) le côté le plus court des bâtiments et (b) la distance la plus courte entre deux bâtiments, d'après Fewtrell et al. (2008)

2.3 Méthode d'estimation des impacts

Pigeon (2002) définit l'impact comme étant l'effet produit par un événement, comme par exemple les dommages matériels occasionnés par une catastrophe naturelle. Dans le contexte du risque d'inondation, le dommage observé est la résultante de l'intensité de l'inondation (aléa), de l'exposition et de la vulnérabilité des enjeux (Calianno et al., 2013). Par nature, les zones urbaines sont vulnérables aux inondations, d'autant plus dans un contexte où les villes se densifient et subissent les effets du changement climatique (Hapuarachchi et al., 2011). La prédiction des inondations en zone urbaine demande une attention particulière afin d'identifier et de diminuer les dommages éventuels. André (2013), au cours de ses travaux sur l'exposition des enjeux face à la submersion marine, a proposé une classification des enjeux exposés à l'aléa (Cf. annexe B). Dans le cadre des objectifs fixés dans la thèse, ce type de classification peut permettre de distinguer les différentes natures de dommages pour lesquelles une prédiction faciliterait l'intervention des secours et la gestion de crise (Wilhelmi and Morss, 2013). Le paragraphe qui suit donne un état des lieux des différents travaux sur l'identification des enjeux exposés et les impacts directs associés au risque d'inondation.

2.3.1 Modèles d'impacts existants

Estimation générique des enjeux et des impacts

Dans le cadre de l'application de la Directive Européenne Inondations, les enjeux exposés pour différents niveaux d'aléa ont été estimés sur l'ensemble des Territoire à Risque Important d'inondation (DREAL, 2013d,e). Les enjeux recensés correspondent aux catégories suivantes, illustrées sur la figure 2.26 :

- le nombre indicatif d'habitants, permanents et saisonniers, potentiellement touchés (Moulin and Charaud, 2013, Charaud, 2014) ;
 - les bâtiments présents et leur nature (habitation, industrie, bâtiments utiles à la gestion de crise, ...) ;
 - les natures d'activités économiques et le chiffre d'affaire dans la zone potentiellement inondée (Moulin and Charaud, 2013) ;
 - les installations ou activités visées par la directive 2010/75/ UE du Parlement européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles qui sont susceptibles de provoquer une pollution accidentelle en cas d'inondation ;
 - les zones protégées potentiellement impactées par les activités polluantes tels que les eaux de captage, les eaux de plaisance, et les zones de protection des habitats et des espèces.
- Ces travaux donnent une vision synthétique des enjeux potentiellement impactés au cours d'une inondation (figure 2.26).

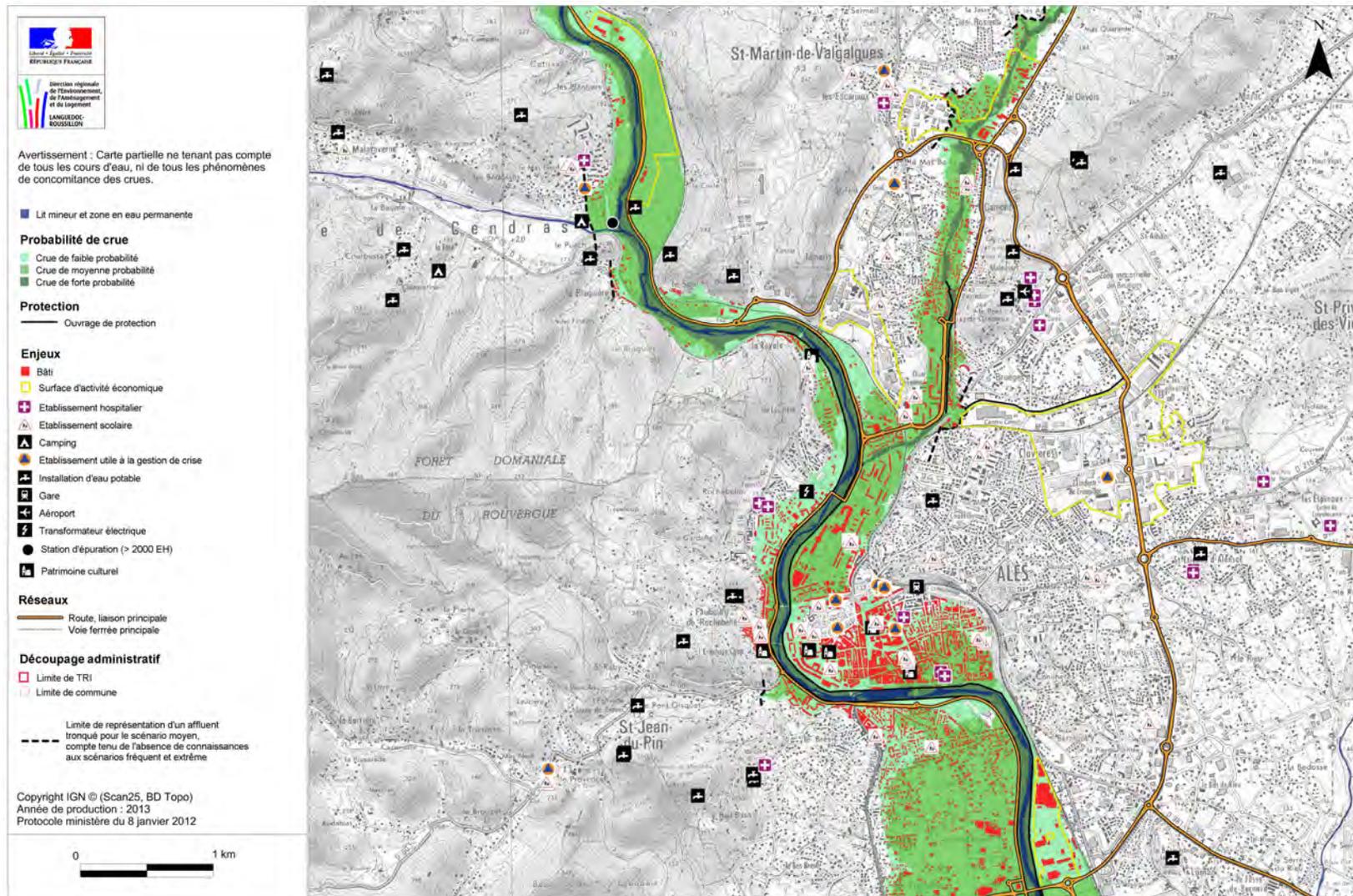


FIGURE 2.26 – La carte des risques associés au débordement de cours d'eau pour le Territoire à Risque Important d'inondation d'Alès, centrée sur la commune d'Alès d'après la *DREAL* (2013c)

Dans un autre registre, plus directement lié à la prédiction des crues-éclair, une étude a proposé de classer les enjeux vulnérables aux inondations en fonction de la sévérité des impacts associés (Calianno et al., 2013), comme illustré par la figure 2.27.

Le croisement de ces différentes informations sur les enjeux avec l'emplacement des cours d'eau et leurs propriétés physiques aboutit au développement d'indices de vulnérabilité du territoire. Ces indices sont employés en lien avec des modélisations hydrologiques dans le but d'améliorer la précision des prévisions d'impacts.

Pour deux événements d'inondations extrêmes passés dans l'Oklahoma en 2007 et 2010, la méthode développée a été en mesure de distinguer correctement la sévérité des impacts par rapport aux observations disponibles au cours des deux événements (figure 2.28).



FIGURE 2.27 – Hiérarchisation par sévérité des impacts de la base de données SHAVE aux États-Unis vis-à-vis du risque d'inondation (Severe Hazard Analysis and Verification Experiment), d'après Calianno et al. (2013)

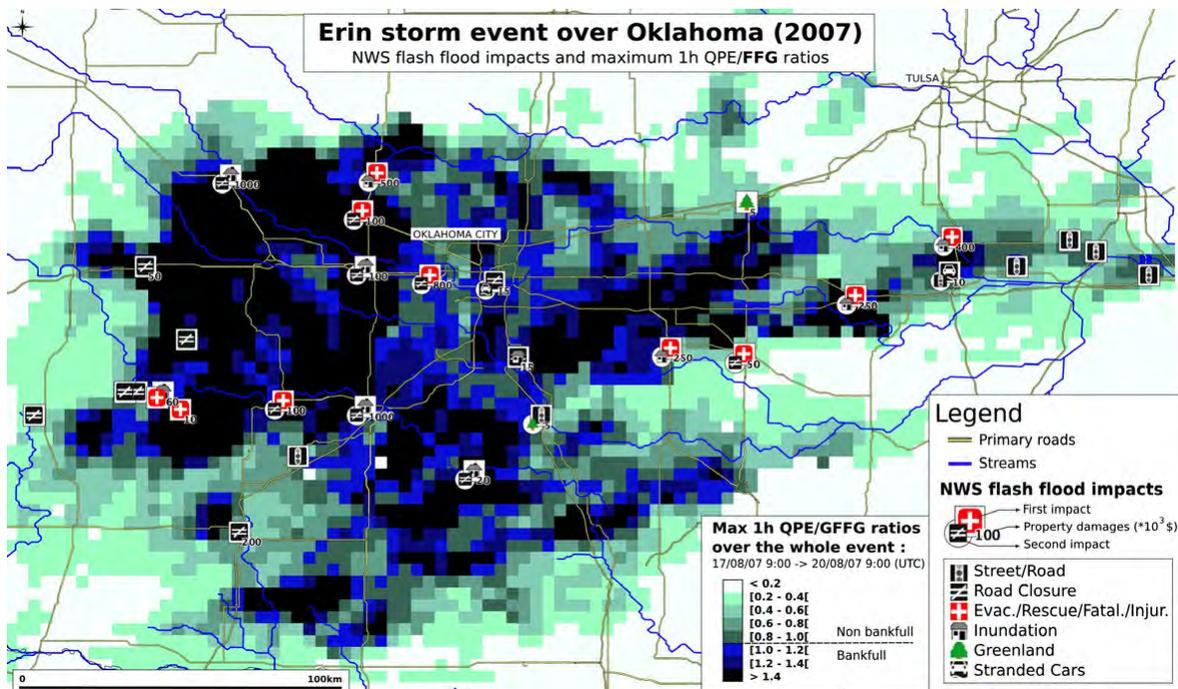


FIGURE 2.28 – Prédiction à 1 heure des impacts à partir des Flash Flood Guidance lors de la tempête tropicale Erin, d'après Calianno et al. (2013)

Estimation spécifique des dommages

Comme le rappellent [Alfieri et al. \(2013\)](#), les territoires ne disposent pas de la même vulnérabilité face aux risques d'inondation. La protection des sociétés est envisageable par réduction de leur exposition face à ces risques ([Dewals, 2006](#)).

Impacts fonctionnels

Le projet Prediflood a contribué au développement d'une prévision hydrométéorologique des coupures de routes par inondation, en s'appuyant sur un modèle pluie-débit distribué. Un prototype a été conçu sur une partie du département du Gard ([Versini, 2007](#)), puis étendu à l'ensemble du département avec la prise en compte de certains ouvrages hydrauliques et de plus de 2000 points de surveillance ([Naulin, 2012](#)).

Au cours de 9 événements étudiés, les résultats du modèle permettent d'identifier une large majorité des coupures de route, avec néanmoins un taux élevé de fausses alarmes sur les événements extrêmes ([Naulin et al., 2013](#)). Ces résultats de simulations sont encourageants car l'approche identifie correctement les événements et les secteurs à risque de coupure de routes. Elle offre également la possibilité de mieux organiser l'intervention des secours en cas d'inondation.

Impacts humains

[Wilhelmi and Morss \(2013\)](#) s'est penché sur la vulnérabilité humaine en tenant compte de l'exposition des personnes et à leurs capacités à faire face à l'aléa, en étudiant le cas de Fort Collins dans l'état du Colorado aux États-Unis.

La capacité des personnes à faire face à l'aléa est estimée à partir de trois caractéristiques : la capacité physique (entendre l'avertissement et réagir en fonction), les ressources disponibles (moyens de locomotion et de mise en sécurité) et la capacité linguistique des résidents (comprendre les alertes). Pour chacune de ces caractéristiques, l'information a été normalisée (z-scores, formule (2.2)) à l'échelle des blocs de recensement (figure 2.29(a)-(c)), puis une moyenne de ces indices a été effectuée (figure 2.29(d)).

$$zscore = \frac{(valeur - moyenne)}{écart-type} \quad (2.2)$$

L'évaluation de ce critère de vulnérabilité a été effectuée sur l'événement extrême de 1997 dans la région. La carte du risque de crues-éclair est comparée aux dégradations de bâtiments recensées, aux appels de secours géoréférencés émis et à la capacité des personnes à faire face aux inondations (figure 2.30). Les limites du risque englobent les z-scores les plus élevés (supérieur à 0,5), 99% des bâtiments impactés et 85% des appels de secours géolocalisés au cours de l'événement (figure 2.30(b)).

En valorisant la carte des z-scores, les secteurs les plus vulnérables sont plus facilement identifiables et les gestionnaires du risque d'inondation peuvent adapter leurs interventions en fonction des secteurs qui risquent d'être le plus fortement impactés.

Ces travaux permettent donc de hiérarchiser la vulnérabilité humaine sur le territoire et ils mettent en avant l'importance de l'échelle à laquelle les informations sont synthétisées. Dans le cadre de ces travaux les blocs de recensements ont été retenus pour la prise de décisions des services en charge de la sûreté des personnes.

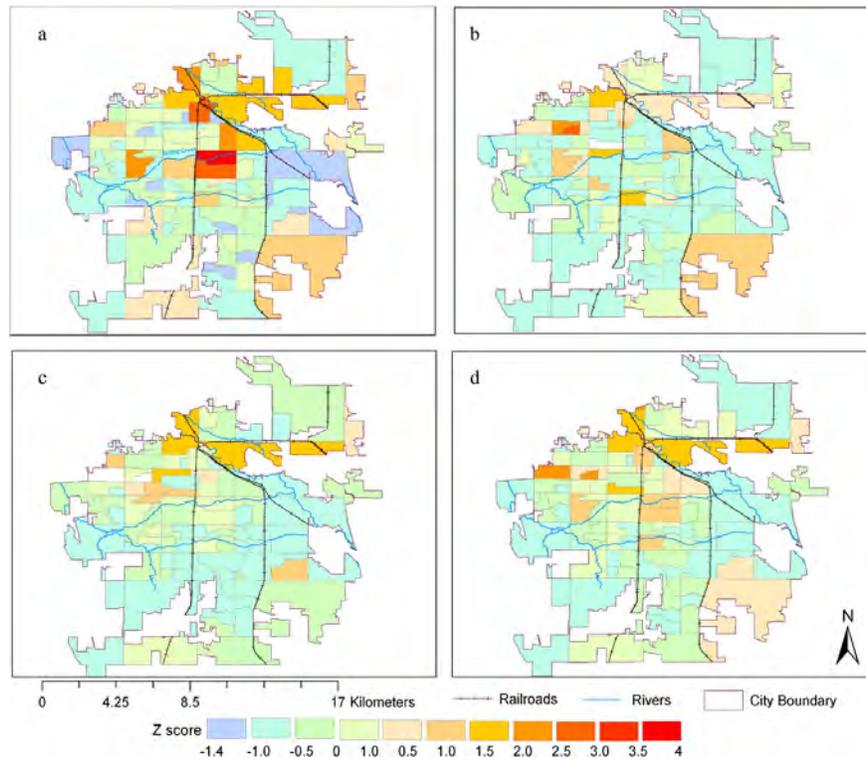


FIGURE 2.29 – Carte de la capacité des personnes : (a) à entendre et évacuer la zone à fort risque (b) à se protéger ou évacuer rapidement la zone (c) à comprendre et à réagir suite aux avertissements diffusés, et (d) synthèse de la capacité moyenne des habitants à faire face à l'aléa par blocs de recensements, d'après *Wilhelmi and Morss (2013)*

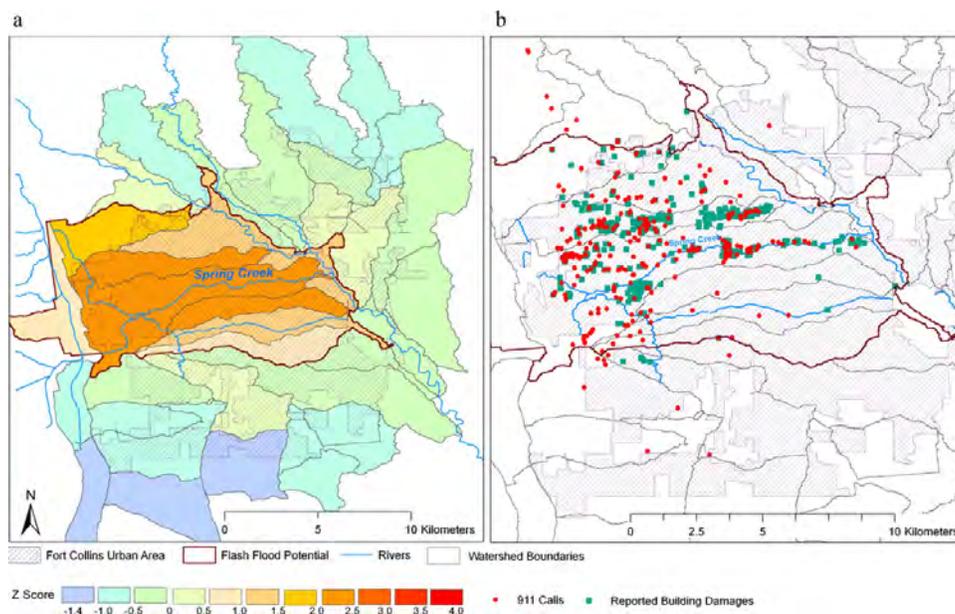


FIGURE 2.30 – Cartes associées à la crue de 1997 sur le site de Fort Collins : (a) capacité des personnes à faire face aux inondations et (b) localisation des appels de secours émis et des bâtiments impactés au cours de l'événement, d'après *Wilhelmi and Morss (2013)*

Des travaux similaires se sont intéressés à la prévision des impacts humains pour une inondation de la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu au Québec, d'une surface de 234 km² (Tanguy, 2012). Tout d'abord, des indices de vulnérabilité ont été définis avec l'appui des responsables de la sécurité civile locale à l'échelle de chaque bâtiment, en incluant un premier critère en lien avec la hauteur du bâtiment, un deuxième sur l'aspect socio-économique et un troisième sur la fonction du bâtiment et les implications pour la gestion de crise (figure 2.31). À partir des

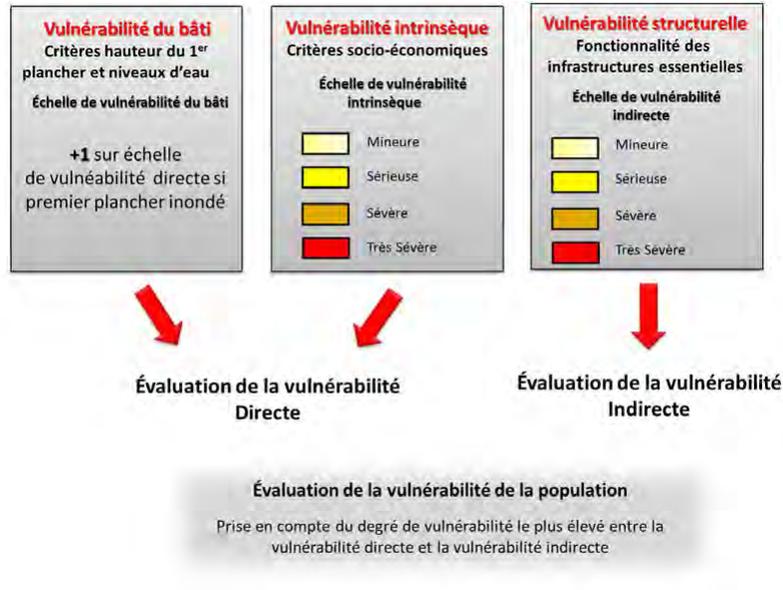


FIGURE 2.31 – Méthode d'évaluation de la vulnérabilité de la population face aux risques d'inondation, d'après Tanguy (2012)

prévisions de submersions effectuées, il devient ensuite possible de hiérarchiser les bâtiments à fortes vulnérabilité et de mieux anticiper les interventions des services de secours notamment les évacuations des personnes lésées (figure 2.32). Le niveau de résolution de ces travaux restitués, à l'échelle du bâtiment, s'éloigne néanmoins de l'objectif visé dans la thèse qui est de hiérarchiser à grandes échelles les secteurs les plus impactés par l'inondation. De plus, ces travaux de recherche ne sont pas encore opérationnels et ils n'ont pas été évalués au cours d'une réelle inondation.

L'ensemble des travaux ci-dessus rend finalement compte de la complexité du choix des critères pour l'élaboration d'indice de vulnérabilité des populations face au risque d'inondation (Tanguy, 2012, Wilhelmi and Morss, 2013).

De plus, les expériences présentées comportent des limites assez évidentes puisqu'elles ne tiennent pas compte de l'aspect temporel de l'exposition et de la vulnérabilité des enjeux (jour/nuit, semaine/week-end, saison, ...), qui complexifient les décisions éventuelles des gestionnaires du risque en temps de crise (Shabou, 2017).

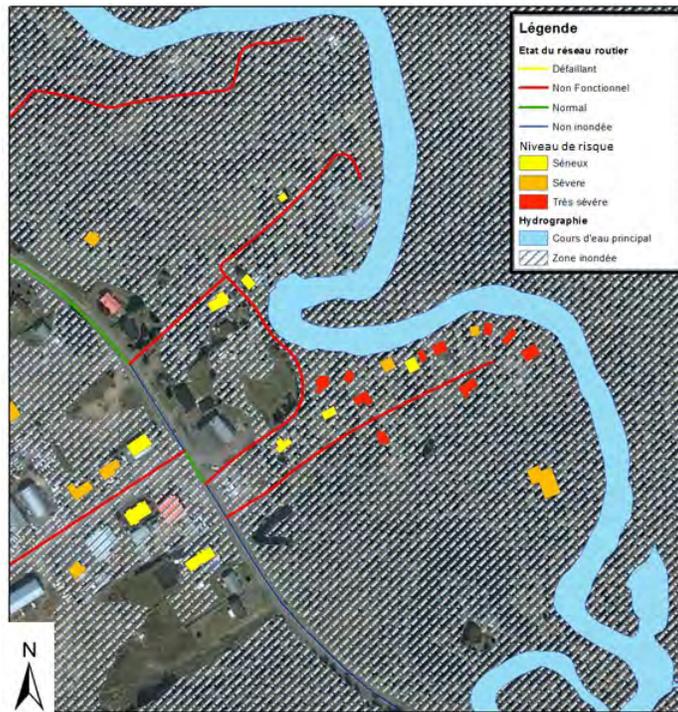


FIGURE 2.32 – Cartographie de la vulnérabilité humaine en fonction de la prévision d’une inondation, d’après *Tanguy (2012)*

Impacts matériels et économiques

Face aux inondations, les gestionnaires du risque développent de plus en plus d’études préventives pour cerner la vulnérabilité de leur territoire et mieux gérer leur politique de gestion voire de réduction des risques.

Au niveau de l’estuaire de la Tamise en Angleterre, un modèle de dommages économiques a été élaboré en fonction de différentes périodes de retour des inondations (*Gouldby et al., 2008*). Ce modèle intègre l’ensemble des ouvrages de protection face à l’inondation et leur efficacité face à l’ampleur de l’inondation (figure 2.33).

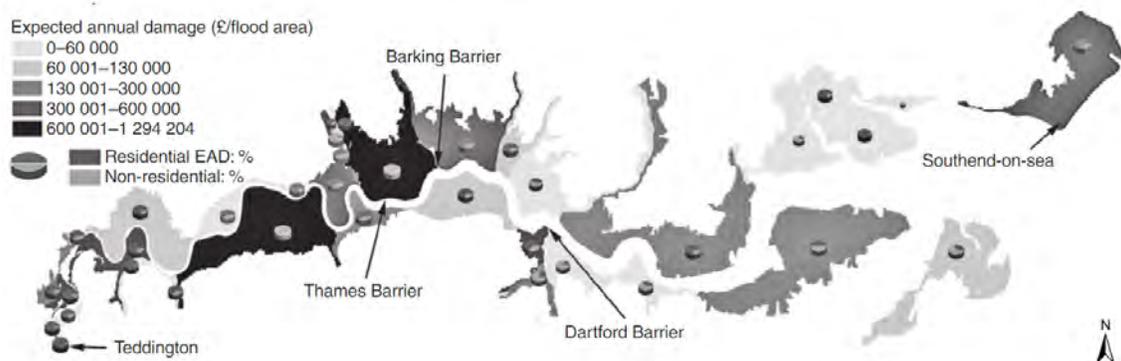


FIGURE 2.33 – Distribution spatiale des coûts annuels prévus liés aux inondations à l’échelle des quartiers se situant dans l’estuaire de la Tamise, d’après *Gouldby et al. (2008)*

Malgré les incertitudes associées à la méthode, les gestionnaires du risque sont en capacité de connaître l'impact du maintien ou de l'amélioration des ouvrages de mitigation sur le niveau de dommages attendu en fonction de l'intensité de l'inondation.

Cette approche est très intéressante puisqu'elle offre aux gestionnaires la capacité d'estimer la rentabilité des investissements liés aux ouvrages de protection face aux risques d'inondation dans les différents quartiers.

Des travaux ont été effectués sur l'estimation des dommages résidentiels annuels à l'échelle de tronçons de rivière (Falter et al., 2015), sur une partie du bassin versant de l'Elbe en Allemagne.

Ces travaux estiment les dommages annuels prévus à l'échelle de chaque tronçon, illustrant l'hétérogénéité spatiale liée à l'exposition et à la vulnérabilité des enjeux face au risque d'inondation (figure 2.34(a)).

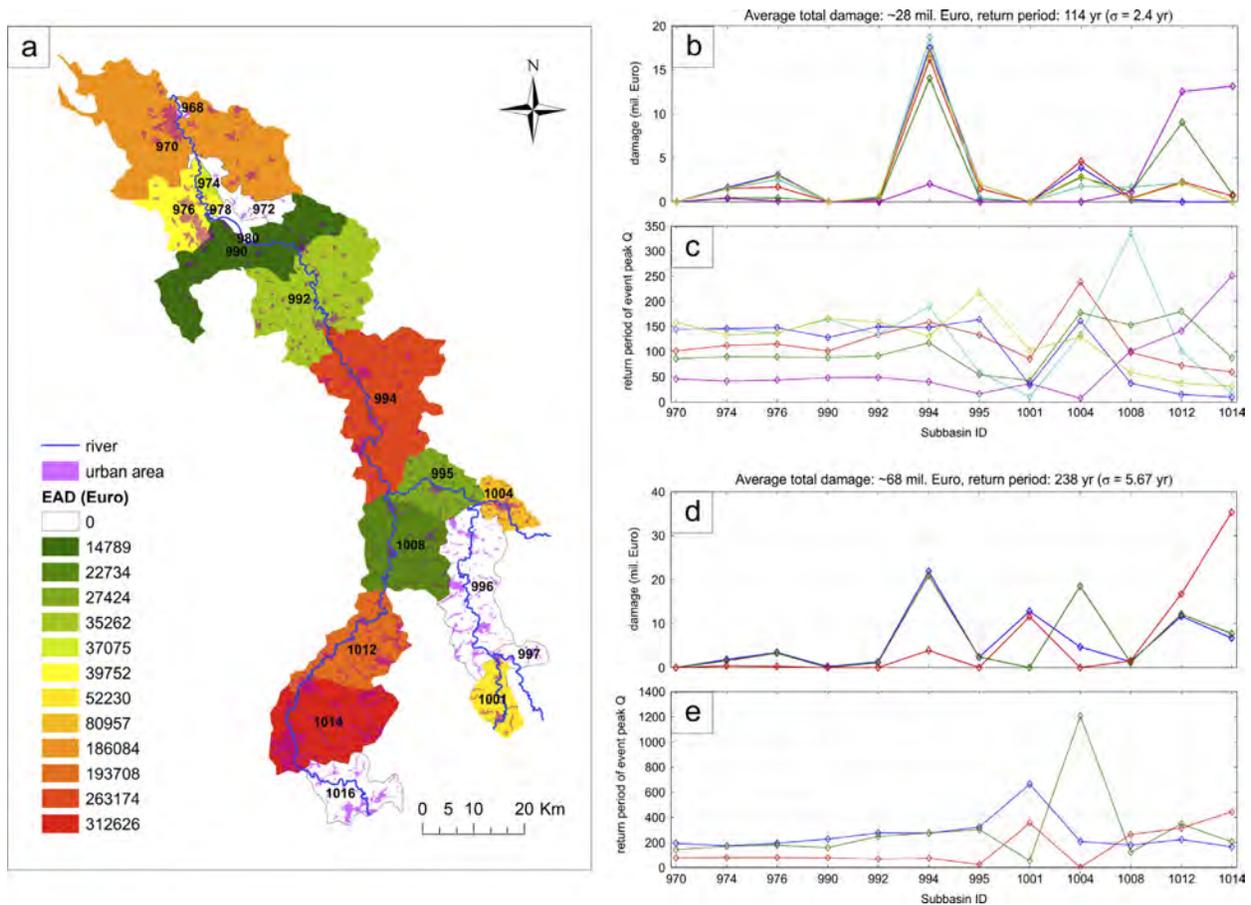


FIGURE 2.34 – (a) Distribution spatiale des coûts annuels prévus face aux inondations, et (b-e) observation des dommages et des périodes de retour atteintes pour différents versants au cours de deux événements passés. Les figures b et c représentent le premier événement avec des dommages estimés à 28 millions d'euros, et les figures d et e le second événement avec des dommages estimés à 68 millions d'euros, d'après Falter et al. (2015)

L'auteur compare les dommages causés par l'étendue de l'inondation aux périodes de retour atteintes par les événements simulés (figure 2.34(b-e)). Chaque tronçon est plus ou moins vulnérable en fonction de l'intensité de l'événement, révélant des seuils d'endommagement spécifiques à chaque tronçon.

Ce travail met en évidence l'importance d'identifier la variabilité spatiale des risques d'inondation à l'échelle de tronçons, par comparaison à une échelle plus large telle que celle d'un grand bassin versant unique.

Des expériences ont été menées pour prévoir l'exposition financière face au risque d'inondation de sociétés d'assurance à l'échelle de la France (Moncoulon et al., 2014). La méthode s'appuie sur deux étapes : une phase de modélisation déterministe calée à partir des dommages des inondations antérieures, et une phase de couplage de ce modèle déterministe à un ensemble d'événements de forçage, simulés de façon probabiliste. Ce travail met en évidence l'intérêt de la valorisation des données assurantielles pour le calage et la validation des modèles d'impacts. L'étude de l'événement de juin 2010 sur la partie aval de l'Argens à partir des données d'assurances révèle par exemple que 13% des sinistres enregistrés à l'intérieur de la zone inondée de référence représentant 54% des coûts enregistrés. Cependant, de manière surprenante, 68% des sinistres et 42% du montant total des dommages au cours de l'événement ont été observés en dehors des secteurs inondés par débordement (figure 2.35).

Claims due to flooding || CCR Probabilistic Hazard

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

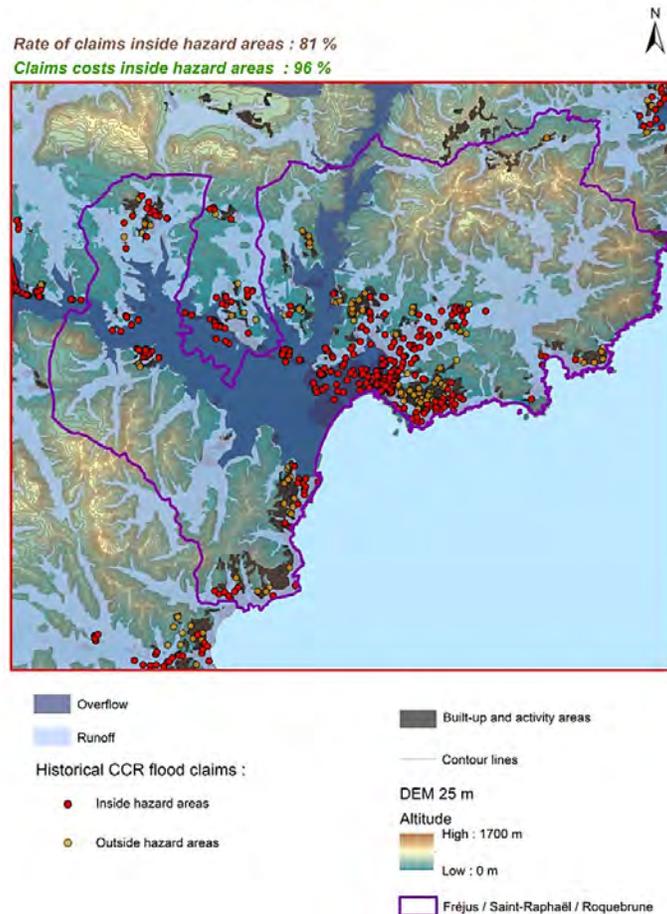


FIGURE 2.35 – Carte de l'étendue des aléas de ruissellement et d'inondation en fonction des sinistres recensés, d'après Moncoulon et al. (2014)

Ceci met en évidence l'influence possible du ruissellement localisé sur les impacts observés

au cours des crues-éclair.

L'estimation des impacts économiques suite à une inondation offrirait la possibilité aux gouvernements ou aux organismes d'assurances de connaître rapidement l'ampleur des dégâts et des fonds de dédommagement à débloquer. Des travaux japonais ont développé un modèle d'estimation des impacts économiques liés aux inondations sur les habitations et les terres cultivées (Kobayashi and Takara, 2013).

Pour atteindre ces objectifs, un modèle pluie-débit distribué estime les pics de débit à partir de lame d'eau radar (AMEDAS) afin d'alimenter un modèle hydraulique d'estimation des zones inondées. Les secteurs inondés sont croisés avec des bases de données SIG pour estimer l'ampleur des dégâts associés aux habitations et aux terrains cultivés en fonction des données disponibles sur l'intensité les inondations passées (figure 2.36).

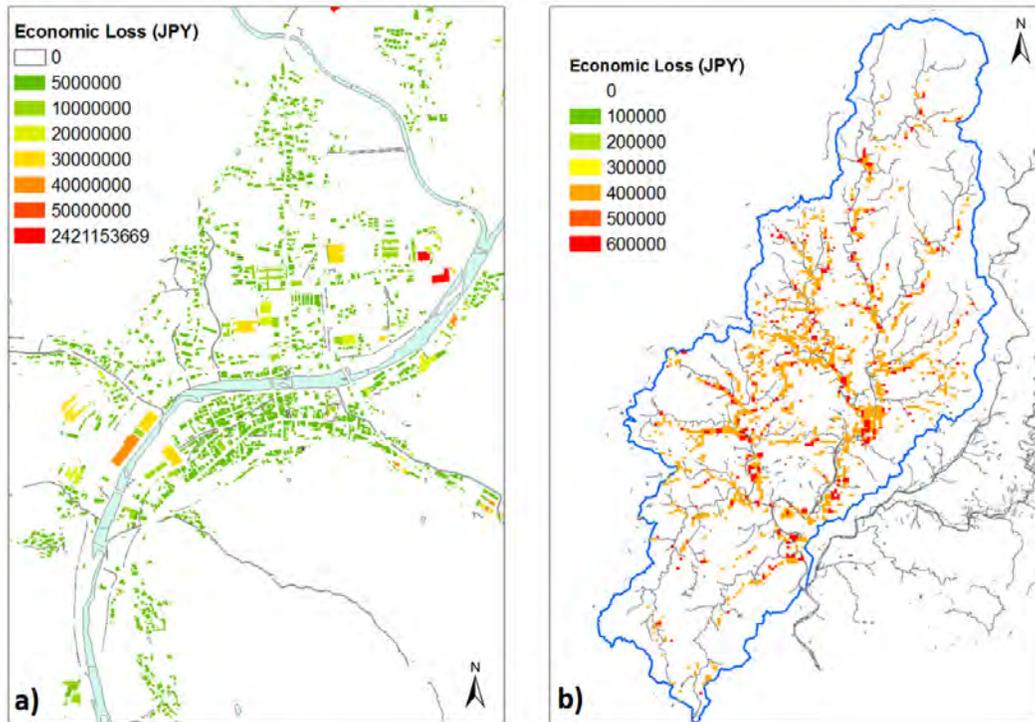


FIGURE 2.36 – Estimation (a) du coût des dommages des maisons autour de la ville de Sayo au Japon (vue d'environ 1 km²) et (b) des pertes liées à la destruction des cultures sur le bassin versant de Sayogawa (191km²), d'après Kobayashi and Takara (2013)

Cependant, l'échelle à laquelle ces travaux sont menés (bassin de 191 km²), est bien inférieure à celle visée dans le cadre des travaux de thèse.

2.3.2 Synthèse sur l'estimation des impacts

Suite à la présentation de ces diverses méthodes d'estimation des impacts, le panel existant est large et il propose des estimations d'impacts plus ou moins ciblées, en fonction des besoins, et à une échelle plus ou moins grande. Le point commun est que les méthodes présentées sont généralement fondées que le croisement d'emprises inondées estimées et de bases de données SIG.

Des éléments très intéressants apparaissent dans ces différents travaux dont l'intérêt de l'agrégation des résultats d'impacts à l'échelle du quartier (Gouldby et al., 2008) ou à celle de tronçons de rivière (Falter et al., 2015), ainsi que l'existence d'une base de données des polices d'assurances et des sinistres en France métropolitaine pouvant servir de base pour la validation des résultats de simulations (Moncoulon et al., 2014).

2.3.3 Observations disponibles pour caler et évaluer les modèles d'impacts

Interventions des Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS)

Les interventions géolocalisées des services de secours ont déjà été exploitées au cours de travaux antérieurs (Papagiannaki et al., 2015), dans le but de mesurer l'intensité de l'événement.

En France, il existe des outils de main courante informatisés sous la forme d'une application web accessible aux différents acteurs de la gestion des risques : SDIS, SAMU, COG, Police, Conseil Général, ...). Dans le cadre du risque inondation, il serait tout à fait possible de retrouver les interventions des secours au cours d'une inondation passée. Le détail spatial des interventions se décompose en trois niveaux (site, bâtiment, lieu) localisant précisément les zones d'intervention des secours. Ce type d'outil apparaît comme étant une source de validation potentielle dans le cadre de ces travaux de thèse. Au cours d'un événement passé simulé, il serait possible de :

- comparer la localisation des impacts passés avec les surfaces inondées simulées ;
- corrélérer le nombre d'interventions effectuées au nombre d'alertes simulées par le modèle d'impacts développé.

Ces mains courantes informatisées sont en activité depuis 2004. Des catastrophes majeures sont survenues depuis. Cependant, il semblerait que la qualité des informations contenues dans cette application n'est pas homogène : elle est alimentée de façon irrégulière par ces utilisateurs. Cela s'explique par le fait que les services de secours, en période d'intervention ponctuelle, ont peu de temps à consacrer à l'enregistrement des interventions dans l'application, contrairement en temps de crise où les priorités changent et le temps pour documenter les interventions manque.

Des travaux antérieurs ont exploité les coupures de routes enregistrés par le Conseil Général du Gard au cours de crues-éclair, rappelant la difficulté de mettre en œuvre ce type d'information dans la validation des modèles d'impacts : non exhaustivité des recensements de coupures de routes, forte sensibilité des coupures à des configurations et vulnérabilités locales qui sont difficiles à prévoir, caractère aléatoire des coupures liées aux embâcles par exemple (Naulin, 2012).

Relevés des dommages en zone de montagnes

L'exploitation des relevés de dégâts et des conséquences morphologiques des crues, issus de la base de données des services de Restauration des Terrains en Montagne³, a été envisagée pour la validation de modèle hydrologique (Defrance, 2014).

Les dégâts disponibles associés au risque d'inondation, 179 signalements, ont été rattachés à un seuil de débit spécifique au niveau de 123 tronçons de rivière sélectionnés, en évitant au

3. <http://rtm-onf.ifn.fr/>

maximum l'attribution de seuil théorique régionalisé, afin de définir correctement un seuil d'alerte par tronçon. L'auteur indique une période de retour pour laquelle les premiers dégâts sont recensés à 6,5 ans en moyenne pour l'ensemble des tronçons (min=1,5 ans et max=10 ans).

Ces travaux mettent en avant les difficultés d'identifier un seuil générique (toutes inondations confondues) par bassin pour lequel les premiers dégâts sont susceptibles d'être générés, sans émettre de fausses alertes ou d'alertes manquées (figure 2.37).

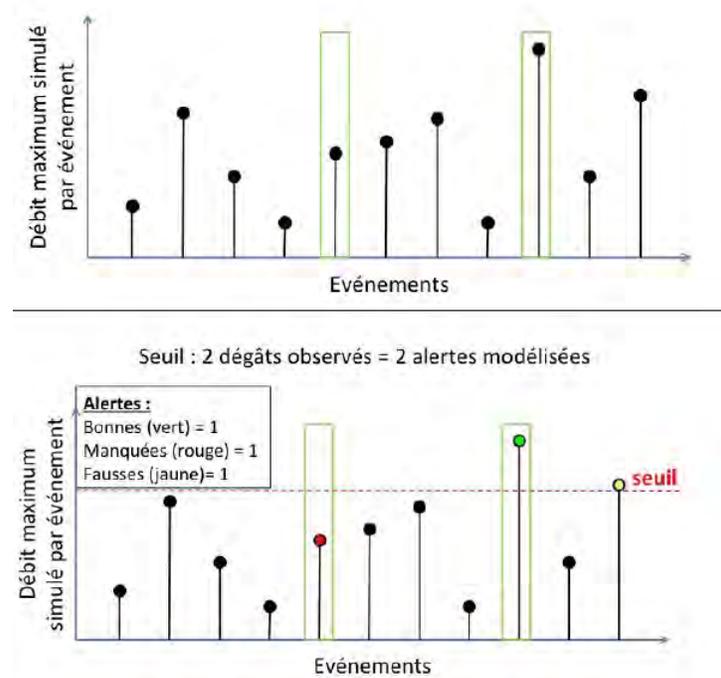


FIGURE 2.37 – Représentation des débits maximums atteints (noir) et des impacts recensés (rectangle vert) au cours de différents événements a) à l'échelle d'un bassin et b) à l'échelle de ce même bassin en définissant un seuil des premiers dégâts, d'après *Defrance (2014)*

De manière à compenser ces problèmes de seuils uniques sur chaque tronçon, l'auteur propose une méthode multi-seuils qui permet de ne pas manquer d'alertes tout en augmentant le nombre de fausses alertes.

Les Tweets au cours d'une inondation

En complément des outils de communication actuels, les réseaux sociaux peuvent accroître la connaissance de la situation en temps de crise et simplifier les décisions prises par les gestionnaires du risques. L'analyse des messages circulant sur ces réseaux pourrait permettre de mesurer en temps réel l'intensité des crues et des inondations qui se produisent (densité spatiale des messages produits et contenu des messages).

Cependant, le volume d'informations provenant des réseaux sociaux est important et il doit faire l'objet d'un filtrage dans le but d'extraire les informations pertinentes à la gestion de crise en cours (*Jongman et al., 2015*).

Des techniques de "crowdsourcing" sont disponibles pour analyser et hiérarchiser les informations provenant des réseaux sociaux (figure 2.38), au cours d'une catastrophes (*Liu, 2014*).

Crisis Crowdsourcing Framework

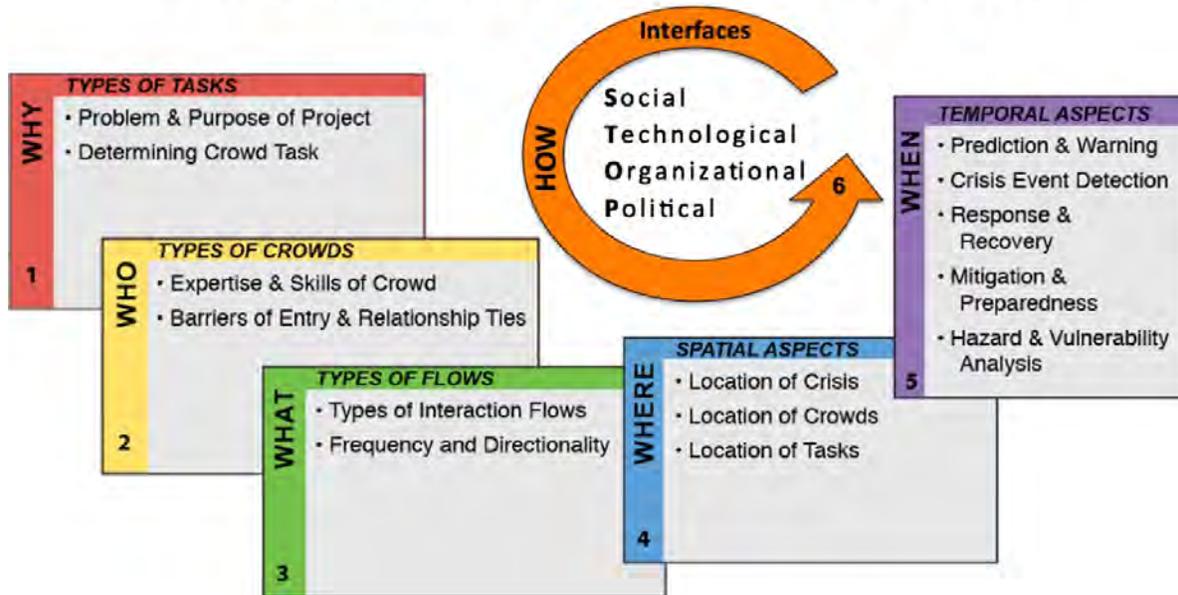


FIGURE 2.38 – Schéma de "crowdsourcing" en temps de crise et ses six dimensions, d'après Liu (2014)

C'est à partir de 2010 que les réseaux sociaux numériques et les smartphones ont commencé à être utilisés dans la gestion des catastrophes (Douvinet et al., 2016). En France, ce type de pratique s'est manifesté au cours des inondations d'octobre et de novembre 2014 dans la région Languedoc-Roussillon.

Les services de l'état et les gestionnaires de crise semblent partisans au développement de ces pratiques dans le but d'améliorer la gestion des crises.

Cependant, la couverture du territoire en équipements de télécommunications 4G n'est pas homogène, ne permettant pas d'assurer l'usage de ces techniques sur l'ensemble du territoire. De plus, ces équipements de télécommunications sont vulnérables aux phénomènes d'inondations : les communications peuvent justement être interrompues dans les secteurs les plus touchés (Javelle et al., 2014).

Les réseaux sociaux modernes, tel que Twitter, sont un moyen d'enregistrer les traces des catastrophes passées. L'ensemble de ces informations pourrait alimenter une base de données sur les dommages causés par les inondations. L'avantage de ce type d'information est la connaissance de l'heure, la date et la géolocalisation de l'envoi de ces messages : des informations importantes lors de l'évaluation des modèles d'impacts et des étendues de surfaces inondées au cours d'une inondation passée. Il s'agit cependant d'informations imparfaites et éventuellement biaisées. Si l'usage des messages envoyés sur les réseaux sociaux pour qualifier l'ampleur des inondations semble être prometteurs dans le cas des crues lentes, il n'est pas certain que l'approche soit aussi intéressante dans le cas des crues éclair. En effet, la cinétique des événements laisse peu de temps aux particuliers pour produire des messages notamment dans les zones les plus touchées.

2.4 Approche proposée et difficultés identifiées

Pour répondre aux attentes fixées dans le cadre de cette thèse, l'approche proposée consiste à combiner une étape de prévision pluie-débit, avec une étape de modélisations hydrauliques et d'estimation des impacts.

Le modèle Cinecar a été retenu pour la modélisation pluie-débit (Versini et al., 2010, Naulin et al., 2013). Ce modèle a le réel avantage d'avoir déjà été implémenté et testé avec succès sur la zone d'étude. De plus, ce modèle est facilement transposable à d'autres secteurs puisqu'il dispose d'un nombre réduit de paramètres. Ses résolutions spatiale et temporelle sont compatibles avec les objectifs visés. Les lames d'eau radar observées sont retenues pour alimenter le modèle. Compte tenu des difficultés liées à la valorisation des prévisions météorologiques sur la zone d'étude : l'anticipation restera limitée au temps de concentration des bassins versants concernés (Blanchet et al., 2016).

Les emprises inondées seront calculées a priori pour chaque tronçon et un certain nombre de débits ou périodes de retour de référence (catalogue de cartes) à l'aide d'un modèle hydraulique, pour éviter les difficultés liées à l'application en temps réel. Un modèle hydraulique simple (1D) sera testé dans un premier temps afin de simplifier sa mise en œuvre sur un domaine spatial étendu et de faciliter son extrapolation. Les travaux précédents cités plus haut semblent indiquer une plus-value modeste des modèles hydrauliques 2D en dehors des secteurs à lit majeur complexe que l'on ne trouve que très peu dans les zones affectées par les crues éclair. La méthode CARTINO répond à ces attentes (Pons et al., 2014). Elle a déjà fait l'objet d'application sur la zone d'étude retenue pour la réalisation des cartes de références établies dans le cadre de la Directive Européenne Inondation (DREAL, 2013b). Le choix d'un MNT de 5 mètres de résolution a été adopté pour permettre une représentation de terrain suffisamment précise et notamment une bonne description de la géométrie du profil en travers du lit mineur des cours d'eau.

Quant à l'estimation des impacts, l'information agrégée à l'échelle du tronçon semble être adaptée aux objectifs poursuivis : hiérarchisation des impacts à l'échelle régionale afin d'orienter les choix d'intervention des services de secours (Falter et al., 2015). Une résolution plus fine (échelle du pixel) est probablement incompatible avec les sources d'erreur liées aux simulations pluie-débit et hydrauliques et ne pourrait pas faire l'objet d'une validation par manque de données observées. L'estimation des impacts sera réalisée à partir d'un décompte de bâtiments recensés dans la base de donnée TOPO et situés dans les emprises inondées calculées (IGN, 2011). Cet indicateur d'impacts est facilement accessible sur l'ensemble du territoire et permet une validation à partir de données de sinistres des assurances (Moncoulon et al., 2014).

Synthèse

Il existe des modèles hydrologiques adaptés aux bassins versants non jaugés avec des niveaux de performances correctes dans les secteurs où ils ont été déployés.

Ces modèles sont en capacité de répondre aux problématiques des crues-éclair avec des résolutions spatiales et temporelles adaptées.

La prédiction hydrologique est tributaire de la qualité des prévisions de pluie avec un niveau d'anticipation limitée dans le contexte des crues-éclair.

Au cours de la présentation des modèles hydrauliques, deux catégories de modélisation sont comparées : les modèles hydrauliques utilisés pour l'établissement de cartes d'emprises dans une perspective de connaissance de l'aléa et de prévention des risques pouvant être utilisés pour la construction de catalogues d'emprises et d'autres modèles utilisés directement au sein d'une chaîne intégrée de prédiction des inondations.

Le choix de la catégorie du modèle dépend surtout du linéaire de cours d'eau à traiter et du niveau de précision souhaité des étendues inondées. La production a priori de catalogues d'emprises est l'approche la plus simple et la plus adaptée à une application à grande échelle.

Les modèles d'estimation des impacts sont nombreux et variés en fonction de la précision, de l'échelle et de la nature des impacts étudiés.

Les différents modèles d'impacts présentés croisent unanimement l'aléa, l'étendue des surfaces inondées, aux enjeux provenant de différentes bases de données sous SIG.

De plus, certaines bases de données se sont révélées intéressantes pour caler et évaluer le modèle d'impacts.

L'approche proposée dans le cadre de ces travaux intègre un modèle pluie-débit, un modèle hydraulique et un modèle d'impacts, dans le but de construire une chaîne de simulation pluie-débit-impacts.

Trois modèles ont été retenus pour répondre aux objectifs de thèse de prédiction des impacts sur une vaste échelle d'étude.



Chapitre 3

Caractérisation de la zone d'étude et préparation des modélisations pluie-débit

Objectifs du chapitre :

- *Présenter la zone d'étude et les bassins versants sur lesquels la méthode d'estimation des impacts sera appliquée.*
- *Décrire l'ensemble des jeux de données nécessaires à la mise en œuvre de la chaîne de calcul pluie-débit-impacts et à sa validation.*
- *Déployer le modèle pluie-débit Cinécar à l'échelle de la zone d'étude.*
- *Choisir les événements passés sur lesquels les simulations et la validation de la méthode développée durant la thèse seront effectués.*

L'ÉTENDUE de la zone d'étude retenue dans l'application de la méthode de prévision des impacts de débordements de cours d'eau, doit être limitée pour faciliter la mise en œuvre et les premiers tests du modèle d'impacts, et représentative de la diversité des environnements confrontés aux crues-éclair.

Cette zone d'étude doit idéalement comprendre une grande diversité, de la géomorphologie fluviale, de cours d'eau disposant d'enjeux associés, à définir, sur les cours d'eau principaux et les affluents. Elle sera dotée d'une topographie variée alliant des reliefs marqués et des secteurs de plaines. Des événements d'inondation passés documentés sont nécessaires au travail de validation du modèle d'impacts.

Le TRI d'Alès semble être le bon candidat. Sa diversité géomorphologique et ses enjeux disponibles répondent aux différents critères de la zone d'étude idéale sur laquelle la méthode développée est appliquée dans le cadre de ces travaux de thèse. Ce chapitre contient une description du TRI d'Alès, suivie de celle des bassins versants. Puis, les différentes données sont présentées pour la mise en œuvre de la méthode et de sa validation. Le modèle hydrologique sélectionné est aussi décrit et ses performances de simulations de crues passées, observées dans le secteur, sont commentées.

3.1 Présentation du TRI d'Alès

3.1.1 La Directive Européenne Inondation et les TRI

La Directive Européenne Inondation impose le recensement des différents Territoires à Risque Important d'inondation (TRI) en Europe (DGPR, 2012). En France, ces TRI ont été identifiés en dressant un état des lieux national des risques d'inondation, en s'appuyant sur deux critères

- la synthèse des informations locales ;
- l'identification des enjeux potentiellement exposés par tronçons de cours d'eau, en se basant sur les emprises maximales des inondations estimées.

La définition des TRI sur le territoire français permet à l'État de hiérarchiser ses priorités d'actions et de moyens dans sa politique de gestion des inondations (DREAL, 2015). Les différents TRI doivent disposer :

- depuis fin 2013, d'une cartographie des surfaces inondables et des risques d'inondation (DREAL, 2013b,c) ;
- depuis fin 2014, d'une stratégie locale de gestion des inondations (DREAL, 2014).

3.1.2 Le TRI d'Alès

Dans le département du Gard, le TRI d'Alès se compose de 37 communes confrontées au risque de débordement de cours d'eau¹. En cas d'événements extrêmes, 8,3% de la population permanente, 36,8% des emplois et 27,4% du réseau routier seraient potentiellement impactés au cours du débordement des cours d'eau. Ces communes présentent une population permanente de 115 744 habitants et saisonnière de 30 195 personnes (DREAL, 2013e).

La commune d'Alès est la plus peuplée. Elle connaît une décroissance démographique depuis quarante ans, passant de 44 245 habitants en 1975 à 40 711 habitants en 2013. Cependant, au cours de cette même période, elle rencontre un accroissement de 38% de l'urbanisation en zone inondable² en raison de la construction de zones industrielles et commerciales, et une densification d'habitat périurbain : 49% des emplois et 22 000 logements à l'échelle de la commune se situent en zone inondable (figure 3.2). À titre d'exemple, au nord de la ville se situent deux cours d'eau, le Grabieux et le ruisseau du Bruèges, à proximité desquels les habitations se sont multipliées entre 1957 et 2016. Ces quartiers ont été particulièrement affectés par les crues de septembre 2002 et 2014.

Cette situation risque de se maintenir : le concept BiMBY³, "Build in My Back Yard", séduit de plus en plus, les habitants, les élus, les urbanistes et les filières de construction. Ce concept propose de limiter l'étalement urbain en densifiant les zones déjà urbanisées : des zones, dans le cas du TRI d'Alès, déjà soumises à de forts risques d'inondation. Au niveau de la région Languedoc-Roussillon, 9 TRI bénéficient de cette politique de gestion du risque d'inondation dont celui d'Alès (figure 3.1).

1. Alès, Anduze, Bagard, Bessèges, Boisset-et-Gaujac, Bordezac, Branoux-les-Taillades, Cardet, Cendras, Corbès, Gagnières, Générargues, La Grand-Combe, Les Mages, Les Salles-du-Gardon, Lézan, Massillargues-Attuech, Méjannes-lès-Alès, Meyrannes, Molières-sur-Cèze, Mons, Rousson, Saint-Ambroix, Saint-Brès, Saint-Christol-lès-Alès, Sainte-Cécile-d'Andorge, Saint-Hilaire-de-Brethmas, Saint-Jean-de-Valériscle, Saint-Jean-du-Gard, Saint-Jean-du-Pin, Saint-Julien-de-Cassagnas, Saint-Julien-les-Rosiers, Saint-Martin-de-Valgalmes, Saint-Privat-des-Vieux, Saint-Victor-de-Malclap, Salindres et Thoiras

2. <https://remonterletemps.ign.fr/>

3. <http://bimby.fr/>

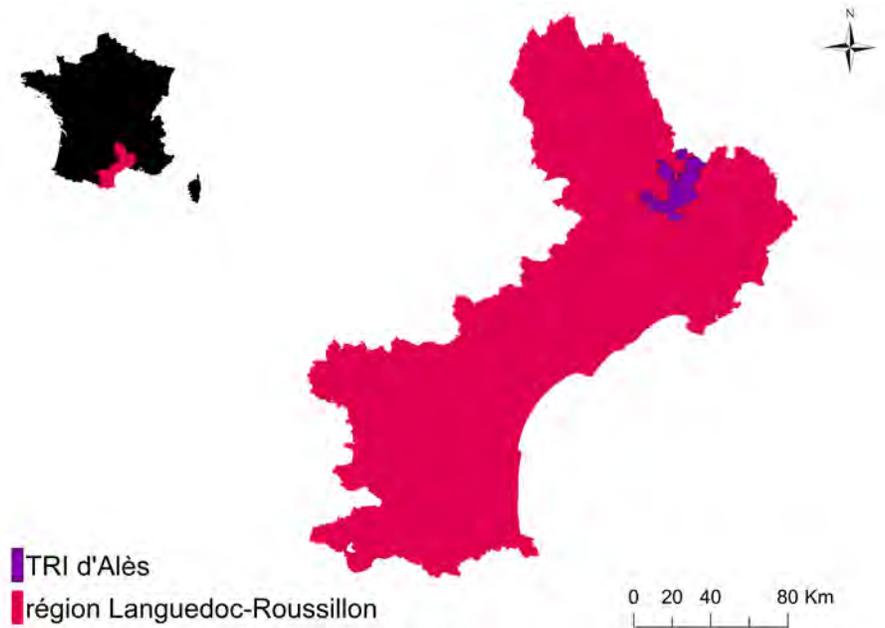


FIGURE 3.1 – *Le Territoire à Risque Important d'inondation d'Alès en région Languedoc-Roussillon, d'après la DREAL (2015)*

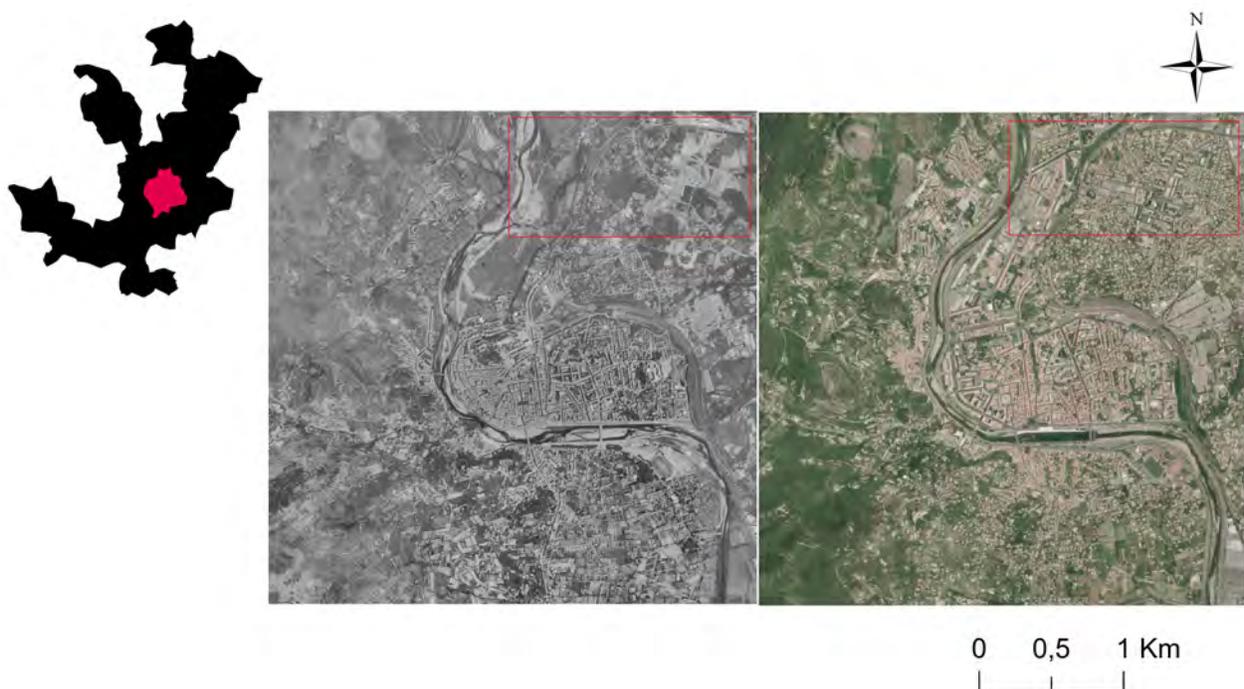


FIGURE 3.2 – *Observation des évolutions de l'urbanisation sur la commune d'Alès entre 1957 (à gauche) et 2016 (à droite) - L'encadré rouge correspond à l'aval du ruisseau du Grabie et de la rivière du Bruèges - source IGN*

3.2 Description des bassins versants

Au cours de cette partie, les bassins versants feront l'objet d'une description détaillée : topographie, hydrogéomorphologie, pédologie et occupation des sols. Ces informations sont nécessaires pour les modélisations hydrologiques et hydrauliques envisagées (Cf. §3.4 et §4.4). À titre d'exemple, les facteurs contrôlant théoriquement les flux d'écoulements à l'échelle d'un bassin versant sont nombreux : la nature du substratum, la profondeur des sols et leurs propriétés hydrodynamiques (Smith et al., 2002).

Le TRI d'Alès se situe dans la partie amont des bassins versants de la Cèze (1 350 km²) et des Gardons (2 025 km²). Ces deux bassins sont bordés par une partie montagneuse, les Cévennes, au nord-ouest, et traversent une région de plateaux marno-calcaires entaillés par de larges vallées dans leurs parties aval au sud-est (figure 3.3). Le TRI d'Alès se situe dans la zone de transition entre deux zones géographiques : les Cévennes et la Méditerranée.

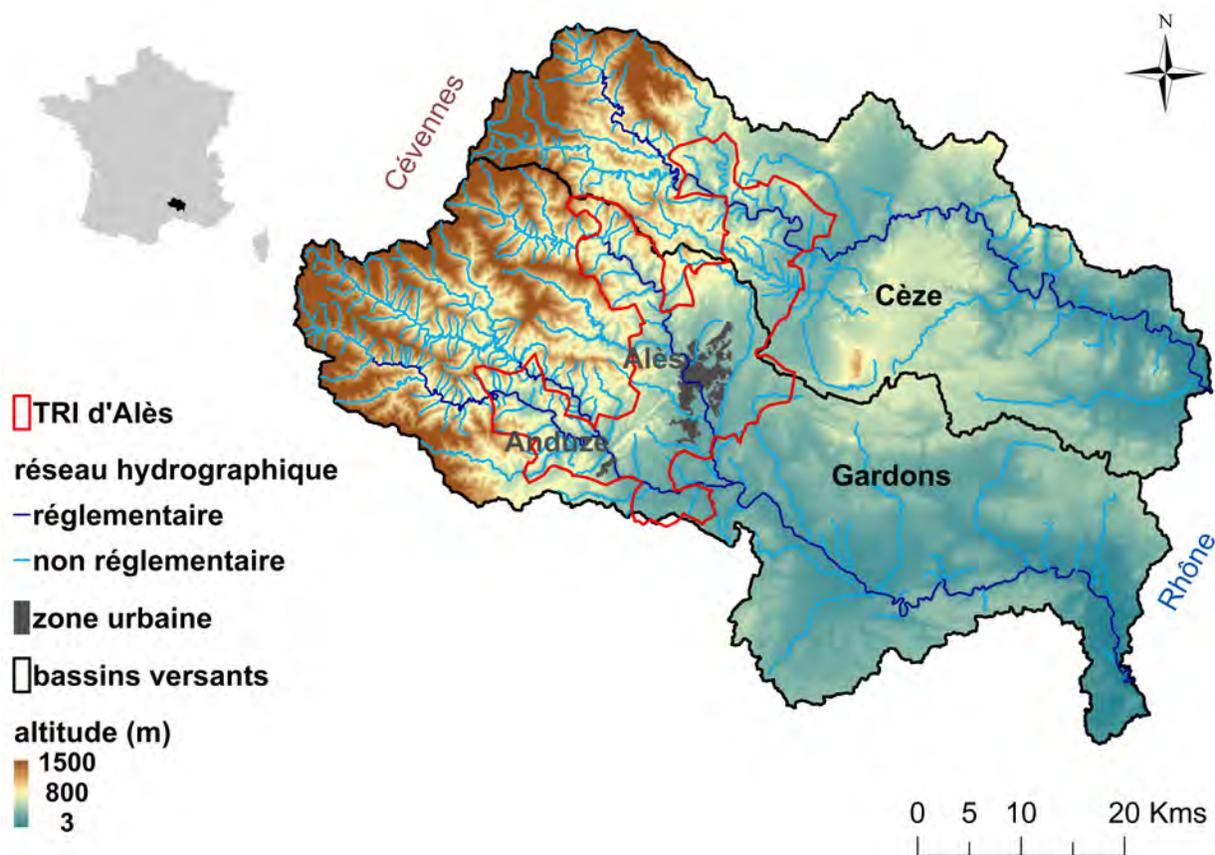


FIGURE 3.3 – Localisation du TRI d'Alès au sein des bassins versants des Gardons et de la Cèze

Par la suite, la description de ces bassins versants se limitera aux zones couvertes par le TRI et situées à l'amont du TRI, soit une surface de 1 990 km² (figure 3.4). Une distinction du réseau hydrographique est faite entre les tronçons du réseau réglementaire de surveillance Vigicrues du SCHAPI (Cf. §1.3.2) et les autres tronçons sur lesquels une attention particulière est portée dans le cadre de ces travaux.

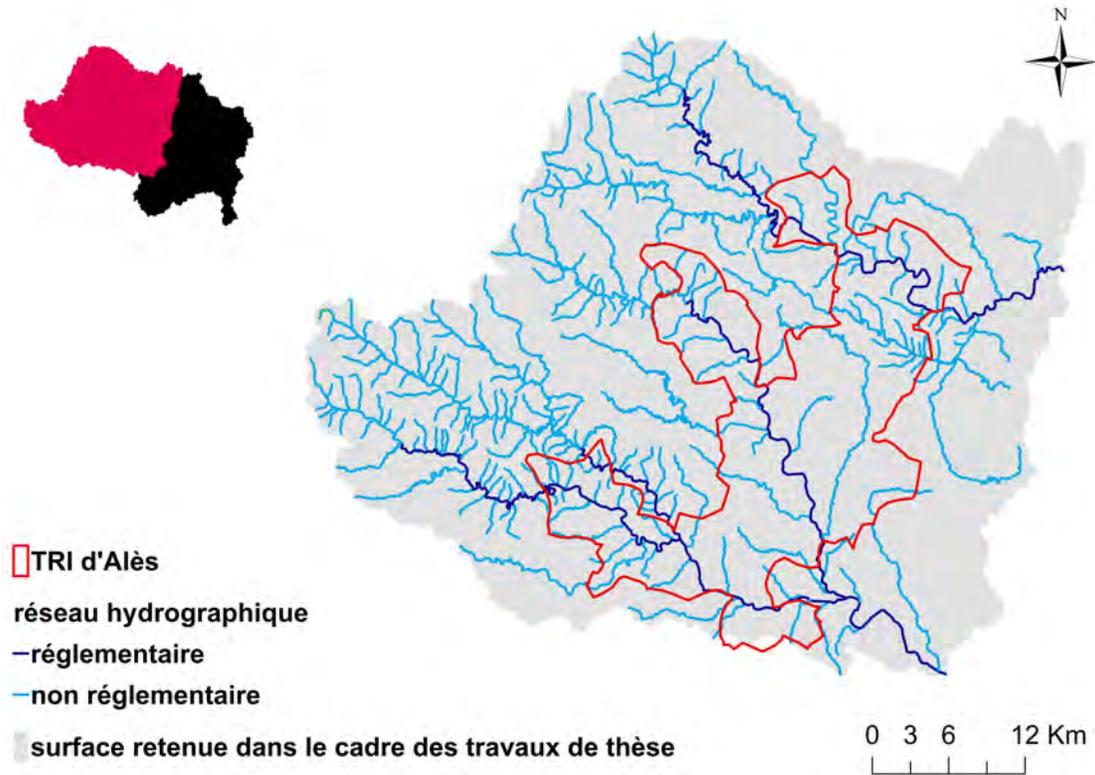


FIGURE 3.4 – Zone retenue pour l'étude de cas du TRI d'Alès au sein des bassins versants des Gardons et de la Cèze

3.2.1 L'hydromorphologie

L'hydromorphologie s'intéresse d'une part à la dynamique fluviale (fonctionnement) et d'autre part à la morphologie fluviale (la forme) du réseau hydrographique d'un bassin versant (Malavoi and Bravard, 2010).

Un cours d'eau est soumis à des variations de fonctionnement et de forme au cours du temps (Schumm, 1977, Sear, 1994), comme le montre par exemple une étude de cas à l'échelle de la Vallée de la Deûle, avec une liste non exhaustive d'évolutions spatio-temporelles recensées (Deschodt and Salvador, 2003).

Une évolution morphologique durable peut se produire sous l'effet des activités anthropiques ou d'un changement climatique majeur (figure 3.5).

Suite aux objectifs fixés dans la Directive Cadre sur l'Eau, les caractéristiques morphologiques des cours d'eau doivent être connues à l'échelle du territoire français. 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. Les résultats sont disponibles dans la base de données SYRAH-CE (Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau).

La méthode développée par l'ONEMA permet de disposer des caractéristiques moyennées de la morphologie des cours d'eau à l'échelle de tronçons dont la pente, la largeur du lit mineur et celle du lit majeur. Ces moyennes réduisent l'influence des aménagements locaux, tels que des piliers de pont ou des barrages, sur la détermination de ces caractéristiques (Delestrac, 2011).

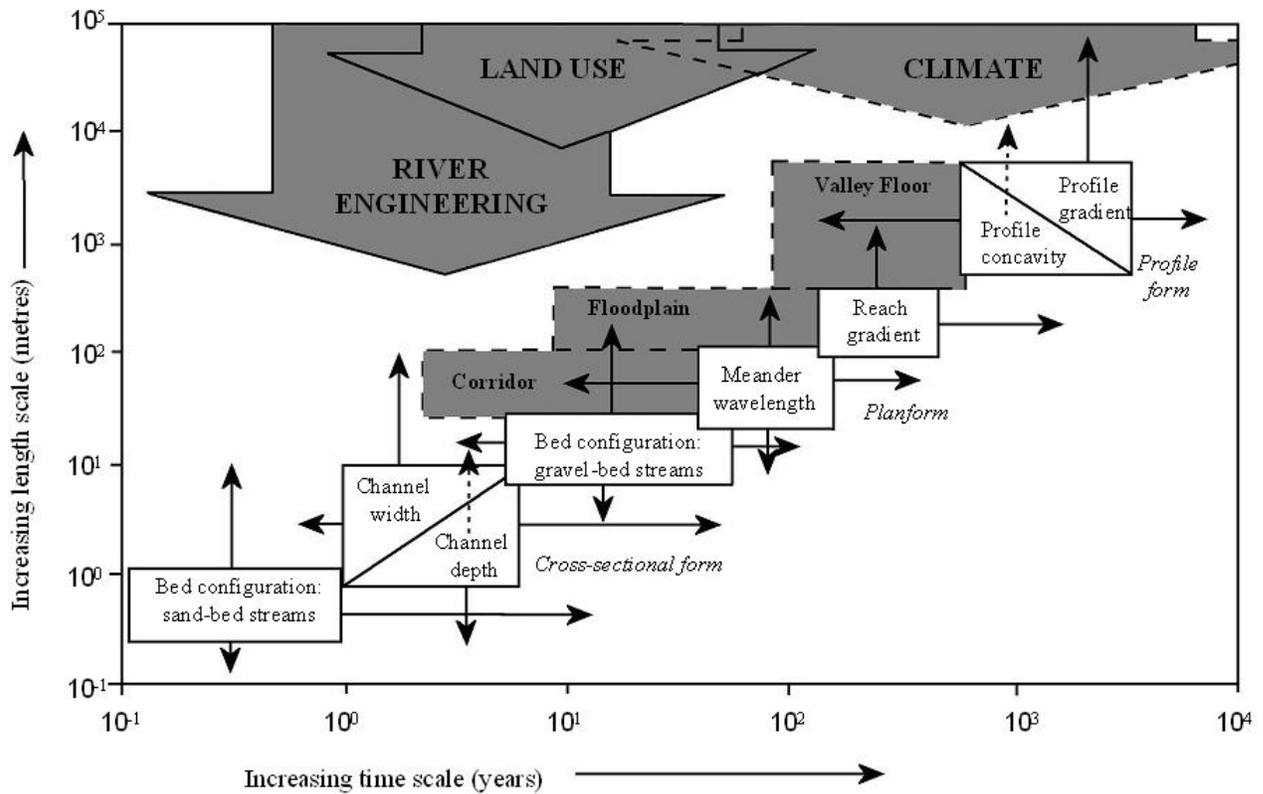


FIGURE 3.5 – Échelle temporelle de l'ajustement des différents paramètres géomorphologiques du chenal, d'après *Sear et al. (2003)*

La largeur du lit mineur et celle du lit majeur en tout point de la rivière sont fondamentales dans le cadre de ces travaux de modélisation hydraulique et des débordements. Elles représentent la zone en eau permanente et la zone potentiellement inondable. Le ratio de ces deux largeurs détermine le niveau d'encaissement de la section, représentant la capacité de déplacement latéral du lit et de la recharge sédimentaire potentielle (*Malavoi and Bravard, 2010*). Les variations de pente influent pour leur part sur les vitesses d'écoulement, la vitesse de l'onde de crue et la profondeur du tirant d'eau. De manière générale, la pente diminue très fortement de l'amont vers l'aval à mesure que le débit croît, d'où une forme concave des profils en long. Trois cours d'eau de la zone d'étude illustrent parfaitement la diminution brutale de la pente en l'espace de quelques kilomètres (figure 3.6 et 3.7) : les écoulements provenant des reliefs sont concentrés rapidement vers la zone du TRI d'Alès.

La zone d'étude du TRI d'Alès comprend une grande variété de configurations de lit de rivière, allant de vallées en forme de "V" raides et étroites, à de larges plaines inondables. Quelques statistiques sur les caractéristiques des lits de rivières sont fournies dans le tableau 3.1, en distinguant les tronçons du réseau réglementaire (209 km) des tronçons hors réseau réglementaire (1 027 km).

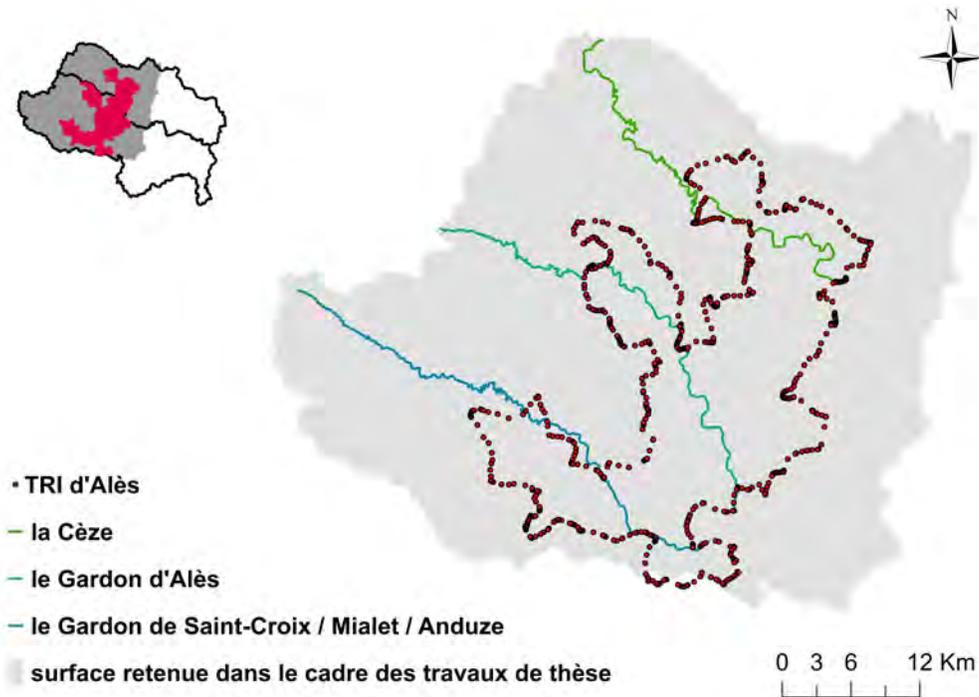


FIGURE 3.6 – Emplacement des rivières de la Cèze, du Gardon d'Alès et du Gardon de Saint-Croix/Mialet/Anduze au niveau du TRI d'Alès - source : base de données SYRAH, d'après Valette and Cunillera (2010)

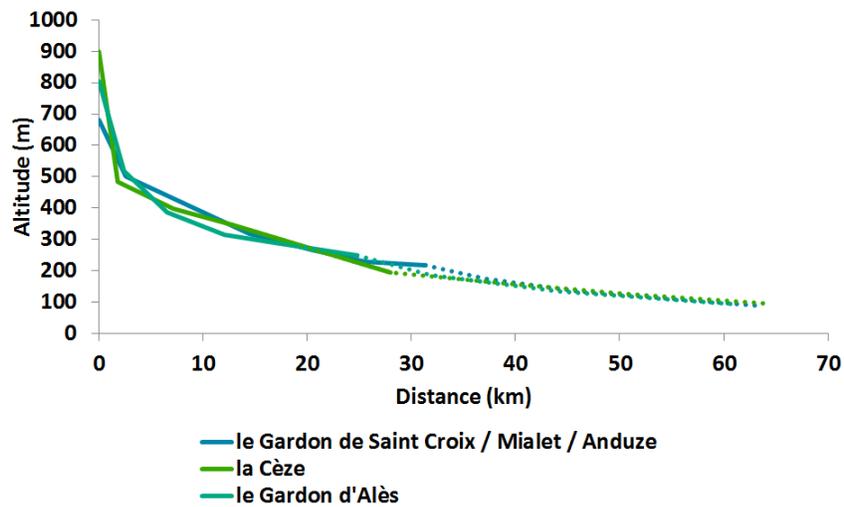


FIGURE 3.7 – Profil en long de la Cèze, du Gardon d'Alès et du Gardon de Saint-Croix/Mialet/Anduze à partir de leur source vers leur exutoire. La partie en pointillé du profil en long correspond à la traversée du TRI d'Alès - source : base de données SYRAH, d'après Valette and Cunillera (2010)

Tableau 3.1 – Principales caractéristiques hydrogéomorphologiques des tronçons de rivières de la zone d'étude (424) - source : base de données SYRAH (Valette and Cunillera, 2010) - R. = réseau; Llm = Largeur lit mineur; LLM = Largeur lit majeur; RdE = Rapport d'Encaissement (Llm/LLM); moy = moyenne; min = minimum; max = maximum

caractéristiques des tronçons	R. réglementaire (21)	hors R. réglementaire (403)
pente (%) [min ;max]	[0,1 ;1,2]	[0,1 ;40,3]
Llm (m) moy/ [min ;max]	42,1 / [16,5 ;110,5]	5,5 / [2 ;34,5]
LLM (m) moy/ [min ;max]	375,7 / [122,5 ;5116,8]	225,2 / [50 ;3719,9]
RdE moy/ [min ;max]	13,5 / [4,05 ;46,13]	59,04 / [4 ;1239,95]

Les forts rapports d'encaissement se localisent sur les tronçons hors réseau réglementaire à proximité des confluences avec les cours d'eau principaux (figure 3.8). Ces zones de confluence correspondent à des largeurs de lit majeur importantes, liées à la présence des cours d'eau principaux, impactant la largeur du lit majeur de l'affluent. La largeur du lit mineur reste celle de l'affluent. Le tronçon de "valat de malamas", affluent de la Cèze, a le rapport d'encaissement le plus élevé. Sa largeur de lit mineur est évaluée à 3 m pour une largeur de lit majeur estimée à 3 719,9 m, d'où un rapport d'encaissement de 1 239,95.

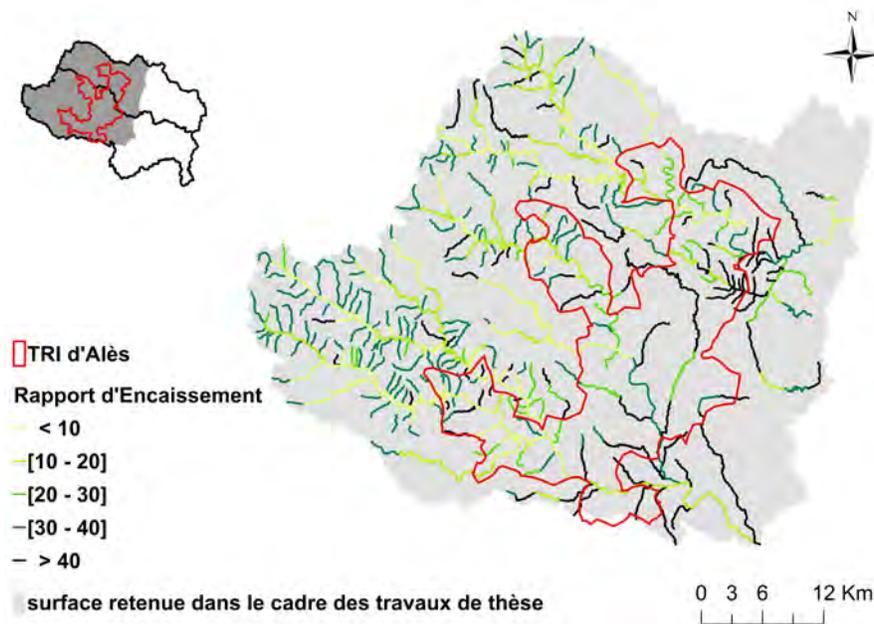


FIGURE 3.8 – Organisation spatiale des rapports d'encaissements des tronçons de la base de données SYRAH-CE - source : base de données SYRAH (Valette and Cunillera, 2010)

3.2.2 L'occupation et la nature des sols

Les données sur l'occupation et la nature des sols peuvent s'avérer intéressantes dans le cadre de ces travaux de thèse pour :

- améliorer les modélisations du modèle pluie-débit distribué, en aidant à déterminer les valeurs des paramètres (Cf. §3.4) ;

- caractériser la couverture des différents bassins versants. Les bassins fortement boisés ou urbanisés doivent être identifiés car les secteurs boisés disposent de données topographiques de moins bonnes précisions (Cf. §3.3.1) ce qui est source d'éventuelles erreurs au cours des modélisations hydrauliques, et les secteurs urbanisés sont souvent très imperméabilisés ce qui augmente les rendements d'écoulement et diminue les temps de concentration.

La base de données Corine Land Cover 2012 caractérise l'occupation des sols à l'échelle de 39 pays dont la France. Cette caractérisation distingue l'occupation du sol en cinq classes (Kosztra and Arnold, 2014) :

- territoires artificialisés ;
- territoires agricoles ;
- forêts et milieux semi-naturels ;
- zones humides ;
- surfaces en eau.

Pour le cas de la zone étudiée, la classe dominante est celle des forêts et milieux semi-naturels (72,61%), suivie de la classe des territoires agricoles (23,21%) et de la classe territoires artificialisés (4,14%) (figure 3.9). Les deux dernières classes se concentrent majoritairement sur les parties est et sud-est de la zone d'étude, de manière discontinue (entités isolées). Ces proportions d'occupation des sols sont inchangées lorsque l'on se limite aux communes du TRI d'Alès.

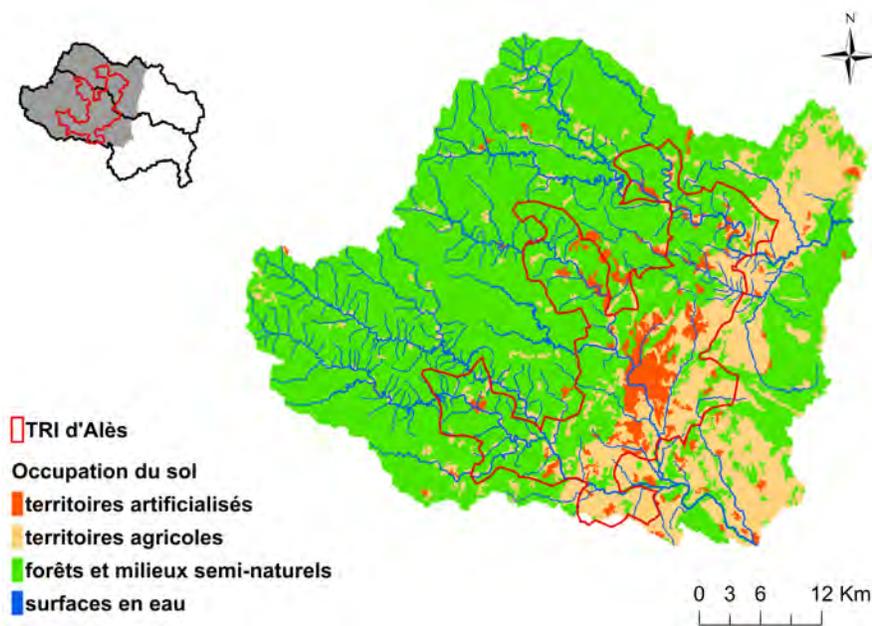


FIGURE 3.9 – Organisation spatiale de l'occupation du sol - source : Base de données Corine Land Cover 2012 (Kosztra and Arnold, 2014) et Base de données SYRAH (Valette and Cunillera, 2010)

Les sous-sols de la zone d'étude sont constitués de terrains d'âges différents et de natures variées⁴ (Rolley, 2007). Deux zones majeures se distinguent de part et d'autre de la faille des Cévennes : la zone cévenole à relief marqué et la zone des garrigues (figure 3.10).

4. OneGeology-Europe - WP6 - <http://portal.onegeology.org/OnegeologyGlobal/>

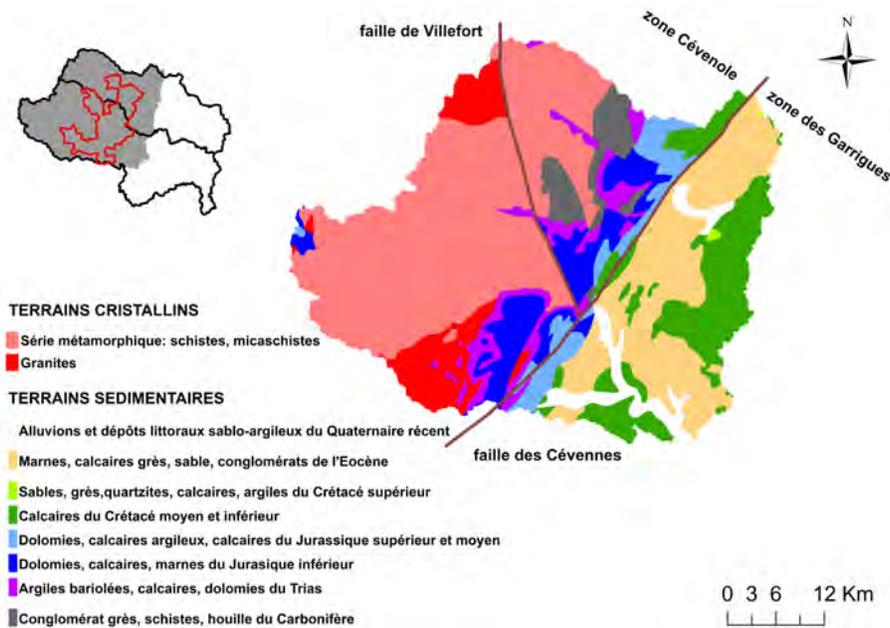


FIGURE 3.10 – Contexte géologique de la zone d'étude - source : BRGM France - WMS de la carte géologique à l'échelle du millionième (6ème édition)

La faille des Cévennes s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres. Elle sépare des terrains généralement de l'ère primaire de la zone cévenole et des terrains mésozoïques de la zone des «garrigues». Au sein de la zone Cévenol, la faille de Villefort (décrochement senestre) a entraîné les roches granitiques de l'est à 11 km vers le nord (Bousquet and Vignard, 2006). La zone d'étude illustre l'ancienne activité tectonique importante de la région.

Le croisement de l'information géologique et de celle de l'occupation du sol peut donner des indications sur les réactions hydrologiques, tout particulièrement sur des bassins versants non jaugés (Aryal, 2005, Desprats et al., 2010). Des expériences de terrain ont été menées pour connaître la capacité d'infiltration du sol en fonction de la nature de la roche mère et de l'occupation des sols à l'échelle du bassin versant du Gardon d'Anduze (figure 3.11).

Unités de sol	Occ. du sol	Infilt. (mm/h)	Unités de sol	Occ. du sol	Infilt. (mm/h)
Alluvions	Culture	26	Marnes et Argiles	Culture	19
	Forêt	30		Forêt	15
	Prairies	30		Prairies	7
	Vignes	7		Vignes	11
Calcaires	Forêt	37	Schistes	Forêt	30
	Prairies	19		Prairies	22
Granite	Forêt	49	Poudingue	Prairies	22
	Prairies	37			
Affleurements		2			

FIGURE 3.11 – Synthèse des perméabilités du sols en fonction de la nature de la roche mère et de l'occupation des sols du bassin versant du Gardon d'Anduze, d'après Desprats et al. (2010)

Ces travaux mettent en évidence les fortes variations de perméabilité des sols en fonction de

la nature du substratum et de l'occupation des sols.

3.2.3 Contexte hydro-climatique

La zone d'étude se situe à l'interface entre deux climats⁵ : méditerranéen et montagnard. Dans la partie sud-est de la zone d'étude, le climat méditerranéen domine avec des étés chauds et secs et des hivers frais et humides. En se rapprochant des Cévennes, dans la partie nord-ouest étudiée, le climat tend à être montagnard avec comme particularité des températures plus basses et des précipitations plus fortes à chaque saison de l'année.

Les reliefs des Cévennes influencent fortement les cumuls de pluie annuels recensés qui varient entre 1 000 et 1 200 mm alors qu'ils ne dépassent pas 600 mm sur la partie littoral du Gard, à 50 kilomètres de la zone étudiée (Colas and Baillet, 2007). Cette tendance se retrouve sur les cumuls des pluies journalières centennales, déterminés à partir des données enregistrées entre 1958 et 2008 sur 255 pluviomètres (figure 3.12). Ces résultats montrent que les cumuls de pluie sont plus élevés sur les montagnes des Cévennes. De plus ces reliefs ont un impact non négligeable sur les processus microphysiques et microdynamiques des précipitations : Zwiebel et al. (2016) rapporte des variations des concentrations et de la taille des gouttes entre la zone de montagne et celle des plaines des Cévennes, influençant le cycle de l'eau (exemple : évapotranspiration).

Enfin les pluies ne sont pas réparties uniformément sur l'année. Parmi les 191 événements avec des cumuls de pluie supérieur à 190 mm entre 1958 et 1993, les deux tiers ont été recensés entre septembre et décembre (Le, 2008).

La fréquence des crues-éclair sur ce territoire est élevée. D'après un recueil des crues couvrant la période du XIII^{ème} siècle au milieu du XX^{ème} siècle, disponible à la Direction Départementale de la Terre et de la Mer du Gard, un événement de crue important est enregistré tous les quatre ou cinq ans en moyenne (230 événements majeurs). Parmi ces événements figurent celui du 28 au 29 septembre 1900 à Valleraugue avec 950 mm de pluie cumulée et celui le plus meurtrier du département (105 victimes), à Bordezac le 11 octobre 1861.

Les pluies extrêmes étaient relativement stables entre 1958 et 1985 (Molinié et al., 2016). Depuis 1985, les cumuls journaliers maximums annuels semblent croître globalement dans la région (figure 3.13), ce qui laisse présager une augmentation des risques d'inondation dans les années à venir.

5. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climat-en-france/le-climat-en-metropole>

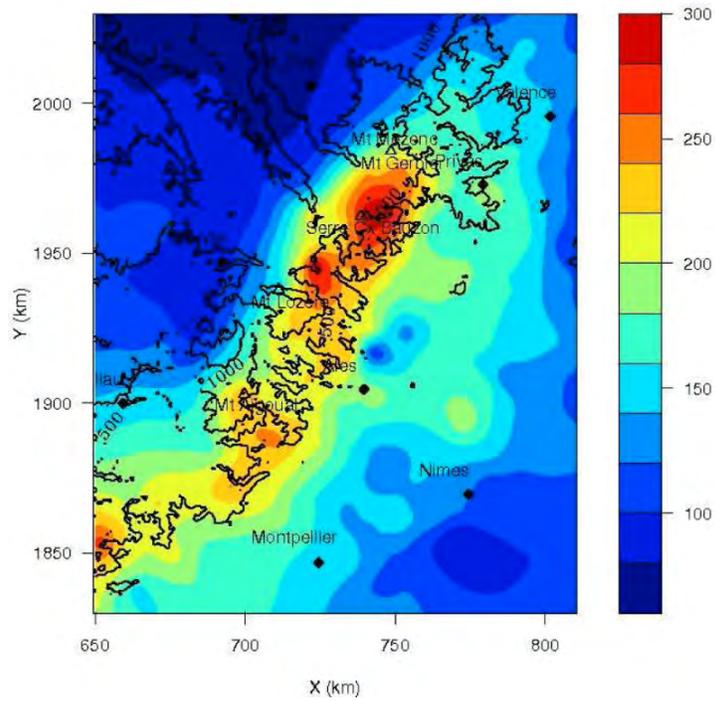


FIGURE 3.12 – Pluies journalières de période de retour centennale (mm), d'après Ceresetti et al. (2012)

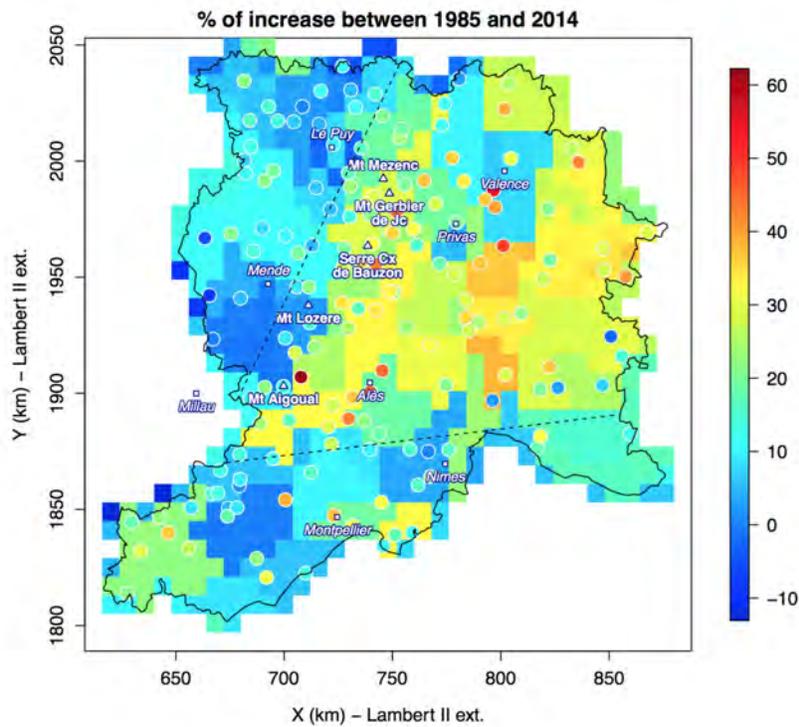


FIGURE 3.13 – Évolution (en %) du cumul journalier maximum annuel de pluie sur la période 1985-2014 par rapport la moyenne inter-annuelle des enregistrements pluviométriques (cercles de couleur) et aux moyennes spatialisées (carrés de couleur 8x8 km²), d'après Blanchet et al. (2016)

3.3 Données mobilisées

La méthode développée dans le cadre de ces travaux comporte deux étapes indépendantes : la modélisation hydrologique et la modélisation hydraulique (Cf. §3.4 et §4.2). Chacune de ces étapes a nécessité de déterminer les données d'entrée, qui sont décrites dans cette partie.

La méthode a été déployée sur un secteur géographiquement limité (TRI d'Alès), mais elle a été élaborée de manière à pouvoir être étendue à l'échelle de la France métropolitaine, ce qui sera illustré dans le [chapitre 5](#) au travers du test sur le Var. Pour cette raison, un principe général dans le choix des données d'entrée a été de se limiter à des données disponibles à l'échelle nationale, ou qui le seront dans un futur proche.

3.3.1 Données topographiques

La modélisation hydraulique est tributaire de la qualité des données topographiques utilisées. Le niveau de précision des résultats de ces modélisations est lié au niveau de précision planimétrique et altimétrique de ces données.

Les modes d'acquisition des données topographiques sont multiples : l'exploitation photogrammétrique des vues satellites ([Renaud, 2006](#), [Garcia-Pintado et al., 2015](#)), ou de photographies aériennes ([Raclot, 2003](#), [Pons et al., 2014](#)), les relevés LiDAR via des campagnes aéroportées ou des vols de drones, ou les relevés topographiques ([Smith et al., 2014](#)).

Le niveau de précision et l'extension géographique de ces données topographiques sont liés au mode d'acquisition des données. Le vol d'un drone couvre, par exemple, un territoire limité, un tronçon de rivière de 150 m demande 30 minutes d'acquisition, mais les niveaux de précision planimétrique et altimétrique sont élevés (figure 3.14).

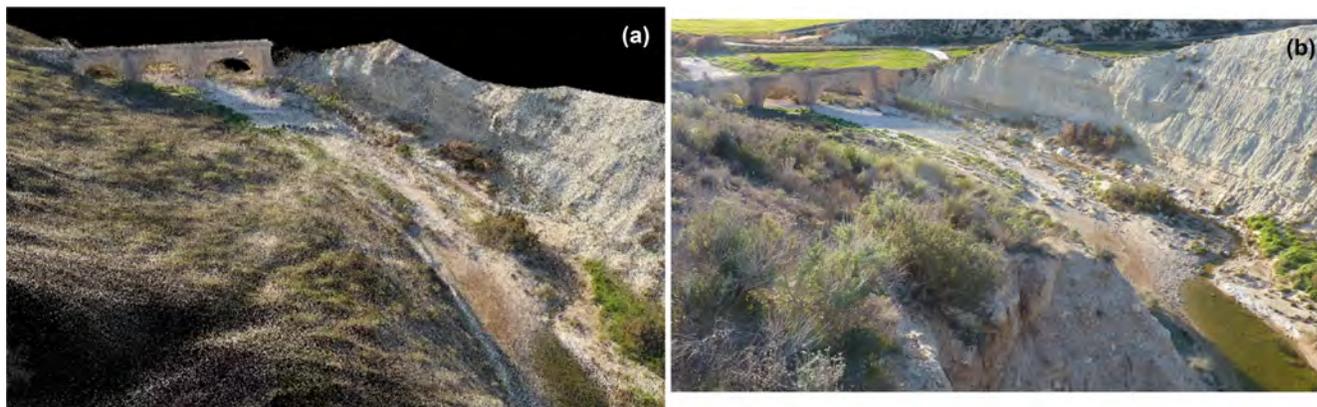


FIGURE 3.14 – *Comparaison entre (a) une image obtenue par un drone et (b) une photogrammétrie, d'après [Smith et al. \(2014\)](#)*

De plus, la date des données doit être connue dans le but de tenir compte de l'évolution éventuelle du lit des cours d'eau, des aménagements présents (habitations, digues, dragages), des évolutions floristiques (déboisement, feu de forêt) pouvant fortement influencer le contenu et la qualité des données topographiques (figure 3.2).

Deux jeux de données ont été employés dans le cadre de ces travaux : les données topo-

graphiques du Conseil Général du Gard⁶ et celles du SIG L-R⁷. Ces deux jeux de données photogrammétriques disposent de caractéristiques précisées dans le tableau 3.2. Elles sont disponibles sous la forme de dalles géoréférencées et elles couvrent l'ensemble du département du Gard (figure 3.15).

Tableau 3.2 – Description des caractéristiques des données topographiques du Conseil Général et celles de l'association SIG L-R

	Conseil Général Gard		SIG L-R
Date de production	2007		2014-02-14
Date de prise	< 2007		2012-06-12 et 2012-07-17
Précision altimétrique (cm)	zone dégagée < 20	zone boisée < 100	< 20
Précision planimétrique (cm)	50		50
Système de référence	RGF 93		RGF 93
Type de dalles	carré		carré
Taille des dalles (km)	10		5
Résolution des pixels (m)	20 interpolé à 5		5
Compléments d'information	version modifiée (CEREMA) - le système de référence - le pas des pixels	produit par TopoGEODIS - qualité contrôlée par l'IGN	

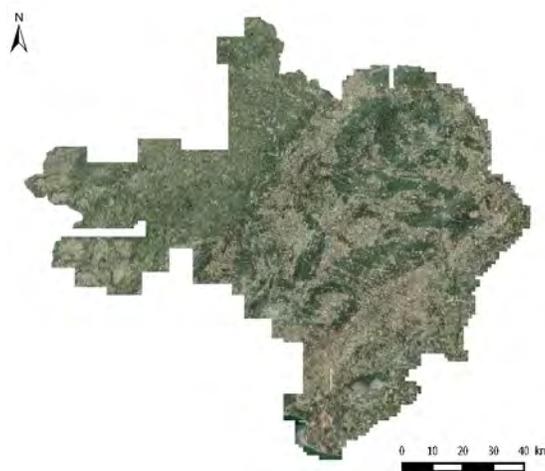


FIGURE 3.15 – Image des dalles de l'Orthophoto 2012 du SIG-LR couvrant le département du Gard

L'intérêt principal des différentes caractéristiques détaillées dans le tableau ci-dessus est la possibilité d'étudier l'influence de la qualité du MNT sur les résultats des modélisations hydrauliques effectuées.

6. http://www.esrifrance.fr/sig2008/cg30_ortho.htm

7. <http://siglr.org/>

Les résultats des modélisations hydrauliques basées sur les données topographiques du Conseil Général et celles du SIG L-R feront l'objet d'une analyse ultérieure (Cf. §4.4). Toutefois, au regard des caractéristiques de ces jeux de données les données topographiques de l'association SIG L-R apparaissent plus précises, notamment en altimétrie, donc plus favorables à des modélisations hydrauliques de bonne qualité fondées sur une définition plus précise des profils en travers et en long des cours d'eau.

Il existe des données avec des précisions plus fines, de type LiDAR, mais cette information ne couvre pas l'ensemble du territoire : l'IGN l'intègre petit à petit dans son jeu de données topographiques à grande échelle, le RGE ALTI®. Costabile et al. (2015) mettent en avant l'avantage de ce type de données, en constatant que leur utilisation permet de tendre vers des résultats de modélisations hydrauliques 2D à partir d'une modélisation hydraulique 1D.

3.3.2 Données hydrographiques

Les réseaux hydrographiques employés pendant ces travaux proviennent de deux sources de données : le réseau hydrographique CARTHAGE® de l'IGN et le réseau hydrographique de la Base Nationale des Bassins Versants (BNBV) du SCHAPI (figure 3.16).

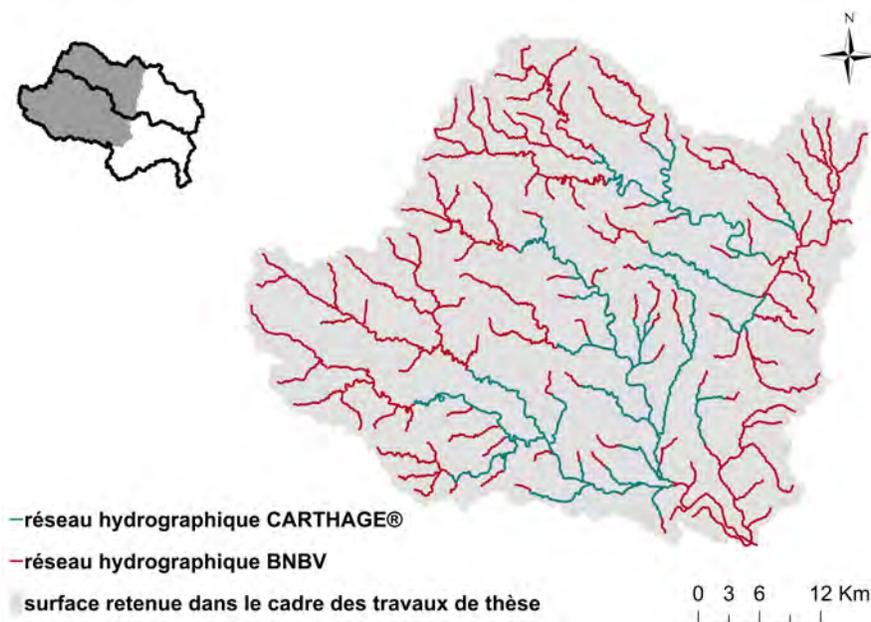


FIGURE 3.16 – Données sur les réseaux hydrographiques retenues pour les modélisations hydrologique et hydraulique

Le réseau hydrographique CARTHAGE®⁸ provient de la base de données CARtographie THématique des AGences de l'Eau. Ce réseau hydrographique est le fruit d'une collaboration entre l'IGN, le ministère chargé de l'environnement et les différentes agences de l'eau pour un résultat homogène à l'échelle de la France métropolitaine.

Il identifie le tracé des lits mineurs des cours d'eau à partir de photographies aériennes et de la connaissance du terrain (figure 3.17). Le tracé du lit des cours d'eau peut localement s'écarter sensiblement des tracés extraits de traitement de MNT, en particulier dans les secteurs à

8. <http://professionnels.ign.fr/bdCARTHAGE>

faibles reliefs et les zones anthropisées. Ce détail est fondamental pour les modélisations hydrauliques présentées dans le paragraphe 4.2. Dans la zone d'étude, ce réseau s'étend sur 300 km, il est réparti sur sept bassins versants, et comporte trente-trois confluences (figure 3.16).

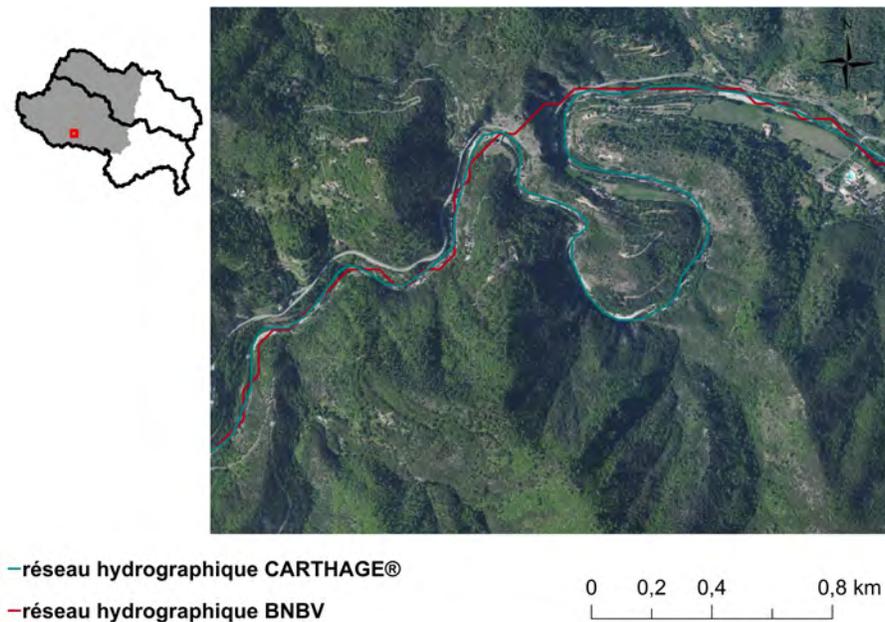


FIGURE 3.17 – Différences de l'identification du lit mineur de deux jeux de données hydrographiques

Le réseau hydrographique de la BNBV a été défini pour la mise en œuvre de la méthode AIGA sur l'évaluation de l'aléa hydrologique en temps réel (Cf. §2.1.2). Dans le cadre de la modélisation hydrologique, effectuée ici avec le modèle pluie-débit Cinecar, il a semblé plus judicieux de s'appuyer sur ce même réseau pour proposer des résultats comparables et homogènes avec le réseau hydrographique considéré par la méthode AIGA et le SCHAPI.

Les données de la BNBV ont été construites en s'appuyant sur de deux modèles numériques de terrain, à partir desquels il a été possible de produire trois types de données (Organde et al., 2013b) :

- une couche de points contenant les exutoires des bassins versants, ainsi que les informations concernant les bassins dans la table attributaire ;
- une couche de polygones contenant les biefs associés à chaque exutoire ;
- une couche de polygones contenant les bassins versants, drainant plus de 5 km², associés à chaque exutoire.

Lors de la création de ces jeux de données, la méthodologie développée a permis de placer les exutoires du réseau de drainage au niveau des points stratégiques du réseau de prévision des crues tels que les stations hydrométriques (Cf. §3.3.2).

Au sein de la zone étudiée, le nombre de biefs représentés dans la BNBV est de 453 et ils représentent 1 000 km de linéaire de cours d'eau ((figure 3.18). Ce découpage a été repris pour les simulations hydrologiques qui seront présentées ultérieurement dans ce chapitre (Cf. §3.4).

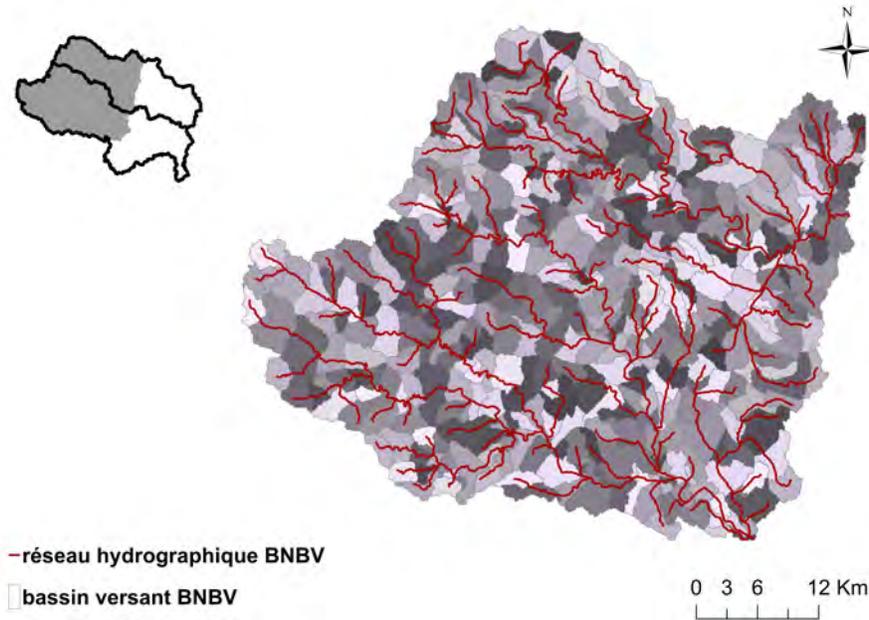


FIGURE 3.18 – Découpage de la zone d'étude en bassins versants et son réseau hydrographique - source : Base Nationale des Bassins Versants du SCHAPI

En résumé, la modélisation hydrologique prendra appui sur le découpage de la BNBV et la modélisation hydraulique sera fondée sur le tracé du réseau CARTHAGE®, plus fiable, là où celui-ci est disponible.

3.3.3 Données pluviométriques

Actuellement, la mesure des précipitations est réalisée par des dispositifs de mesure variés, dont les principes de fonctionnement, les méthodes d'exploitation et d'interprétation sont décrites, en outre, dans Roche et al. (2012).

Dans la zone étudiée, les données pluviométriques actuelles proviennent d'un réseau d'environ 47 postes pluviométriques gérés par Météo-France, Électricité de France et le Service de Prévision des Crues Grand Delta (SPC-GD), ainsi que de trois radars du réseau Aramis de Météo-France (figure 3.19).

Les réseaux pluviométriques comportent 34 pluviographes et 13 pluviomètres totalisateurs journaliers⁹. Les trois radars couvrant la zone étudiée sont de deux types : bande « S » à Nîmes et Bollène, et bande « C » à Sembadel (Cf. tableau 3.3).

9. <http://www.ohmcv.fr>

Tableau 3.3 – Caractéristiques des bandes radars - +++ = élevé; ++ = moyen; + = faible; λ = longueur d'onde; SPluie = sensibilité à l'atténuation du signal radar par les fortes précipitations; SVR = sensibilité aux variations du relief - source : *Delrieu et al. (2009)* et *Tabary et al. (2013)*

Bande	λ (cm)	portée	SPluie	coût	SVRelief
S	10	+++	+	+++	+++
C	5	++	++	++	++
X	3	+	+++	+	+

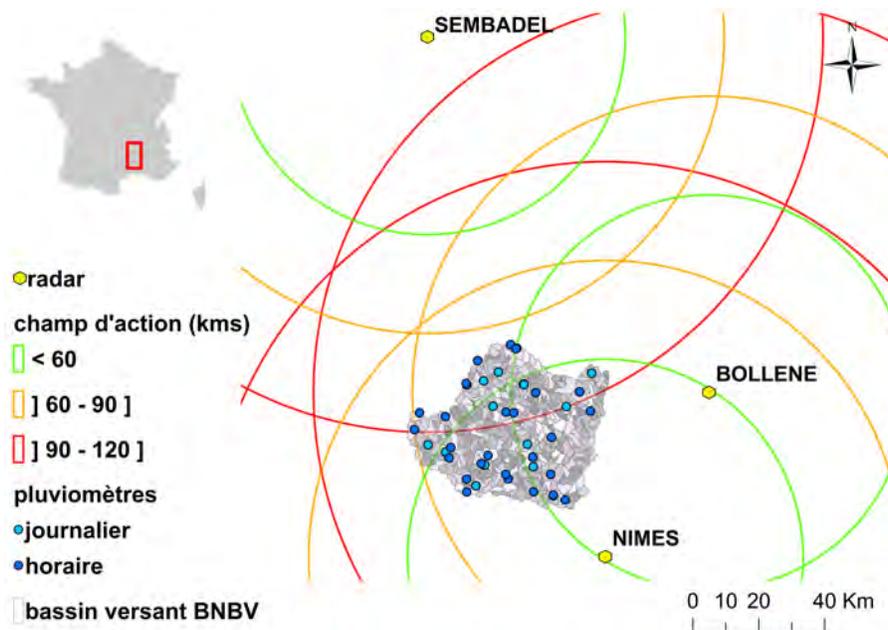


FIGURE 3.19 – Localisation des dispositifs de mesures pluviométriques dans la zone d'étude, d'après l'OHMCV

Récemment, une évolution forte de la précision des mesures pluviométriques a été obtenue par la combinaison de l'information radar avec celle provenant des réseaux de pluviomètres. Cela accroît la justesse des observations pluviométriques, au pas de temps de 15 minutes, contrairement à l'exploitation de l'information radar seule dont les erreurs peuvent être localement élevées (*Cole and Moore, 2009*).

Cette précision des mesures a été vérifiée sur la zone d'étude au cours des travaux de *Delrieu et al. (2009, 2013)*. Au delà de la mesure, la prévision des pluies extrêmes (fréquence centennale) reste complexe et incertaine sur la zone des Cévennes-Vivarais selon *Blanchet et al. (2016)*. L'exploitation des prévisions pluviométriques permettra à terme d'augmenter les horizons de prévision hydrologique. Elle n'a pas été considérée dans le cadre de cette thèse.

3.3.4 Données hydrométriques

La banque Hydro et les bases de données Barème

En France, les stations hydrométriques enregistrent les variations de hauteurs d'eau centralisées dans une base de données : la "Banque Hydro". En 2016, 3 200 stations sont fonctionnelles et disposent d'informations signalétiques (finalité, localisation précise, qualité des mesures, historique, données disponibles, jaugeages...). L'installation et la gestion de la station ainsi que la collecte, la vérification et la transmission des informations enregistrées au droit de ces stations sont assurés par différents services d'hydrométrie en charge de l'alimentation de la banque Hydro ¹⁰.

Les hydromètres en charge de la gestion des stations établissent une relation entre la hauteur d'eau et le débit au droit de chaque station hydrométrique, appelée courbe de tarage (figure 3.20). Cette relation est établie à partir des mesures directes du débit au droit de la station : les jaugeages. Les informations provenant de la courbe de tarage sont d'autant plus fiables lorsqu'elles se situent proches des débits jaugés ou des bornes de fiabilité fixées ¹¹. Au-delà de ces bornes de fiabilité, sur la partie extrapolée de la courbe de tarage, la relation hauteur/débit sera de moins en moins fiable .

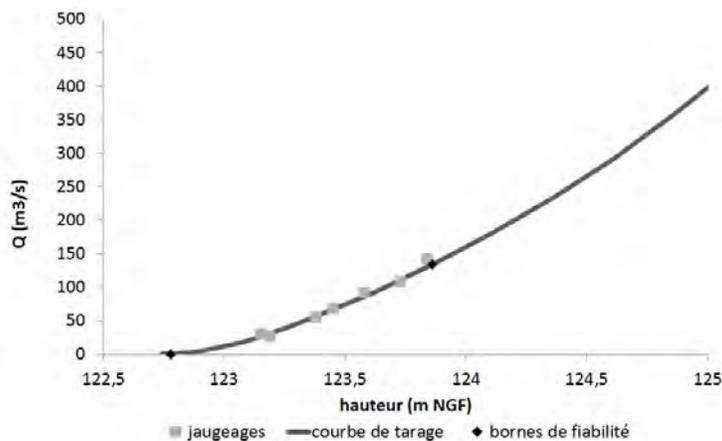


FIGURE 3.20 – Courbe de tarage de la station hydrologique d'Alès, centrée sur les jaugeages

L'ensemble des informations relatives aux courbes de tarage et à leur élaboration sont disponibles dans les bases Barème, tenue à jour par chaque service d'hydrométrie. Ces bases regroupent plusieurs informations rattachées à chaque courbe dont :

- les jaugeages enregistrés Q (m^3/s) / H (cm) ;
- les bornes de fiabilité de la courbe de tarage ;
- la hauteur du zéro de l'échelle NGF (m) ;
- la dispersion des jaugeages par rapport à la courbe de tarage retenue ;
- le profil en travers de la section.

Dans le contexte des crues-éclair, l'intensité de l'événement ne confère pas des conditions propices à la réalisation de jaugeages (Koutroulis and Tsanis, 2010). Les jaugeages disponibles se situent, généralement, dans une gamme de débit du chenal d'étiage à la crue de forte

10. <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

11. http://www.meteo.fr/cic/meetings/2014/journees_hydrometrie/presentations.html

fréquence (biennale). La performance de la courbe de tarage dans la zone interpolée contient moins d'incertitude que dans la zone extrapolée (Singh et al., 2013) ; zone la plus intéressante pour l'étude des débordements de cours d'eau dans le contexte des crues-éclair.

Dans certains cas, l'extrapolation de la courbe de tarage est assurée par des modélisations hydrauliques. Le choix d'un modèle hydraulique et d'un coefficient de rugosité s'impose pour effectuer ces modélisations de manière à ce que les résultats coïncident au mieux avec l'ensemble des jaugeages existants.

Les paragraphes suivants seront consacrés à la présentation des cinq stations hydrométriques de la zone d'étude.

Les stations hydrométriques de la zone d'étude

Le secteur du TRI d'Alès comporte cinq stations hydrométriques sur lesquelles des débits de référence sont disponibles : Alès, Corbès, Bessèges, Mialet et Banne (figure 3.21). Ces stations sont gérées par la DREAL Rhône-Alpes-Auvergne (UAPC Grand Delta).

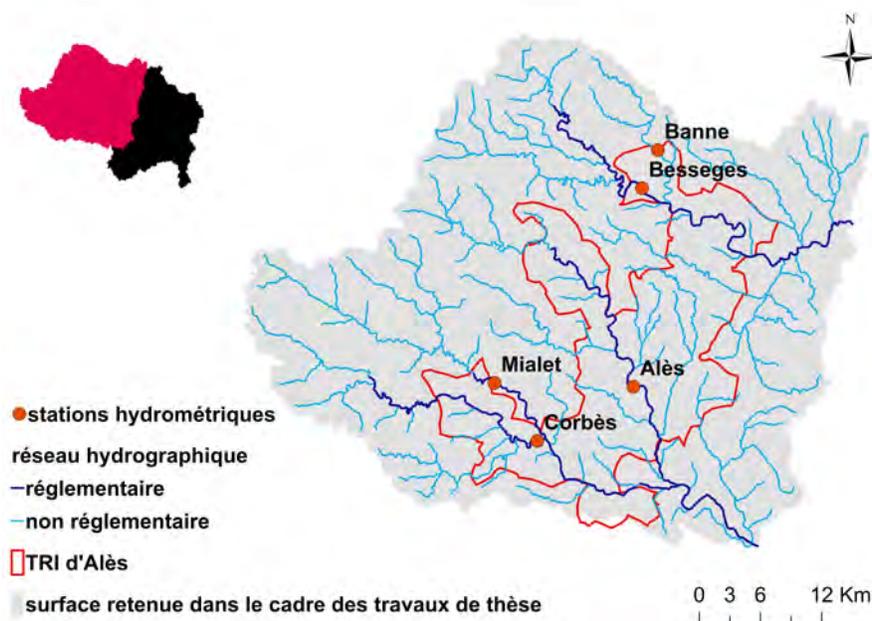


FIGURE 3.21 – Stations hydrométriques retenues de la zone d'étude

Les informations hydrologiques connues au droit de ces stations pourront être exploitées dans les phases de calage ou de validation des modèles pluie-débit et du modèle hydraulique (Gaume and Bouvier, 2004).

Station d'Alès (la rivière le Gardon d'Alès)

La station d'Alès se situe en centre-ville, au droit du vieux pont d'Alès. Le bassin versant drainé a une surface de 315 km². Le lit du Gardon au niveau de la station est rectiligne et encaissé sur les deux berges. Le profil de référence transmis par la DREAL Rhône-Alpes-Auvergne différencie bien le lit mineur du lit majeur rive gauche (figure 3.22). Le zéro de l'échelle se situe à une hauteur de 122,36 mètres NGF.

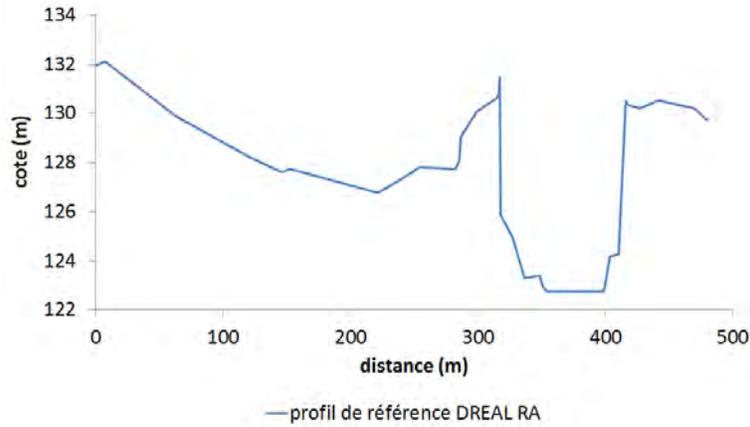


FIGURE 3.22 – Profil en travers à la station hydrométrique d'Alès, vue de l'amont vers l'aval

La courbe de tarage en vigueur s'est appuyée sur des modélisations hydrauliques avec un coefficient K de rugosité de Strickler compris entre 25 et 30 (figure 3.23). À partir de la section de référence et de la courbe de tarage, il est possible de déterminer un débit de premier débordement évalué à $1200 \text{ m}^3/\text{s}$. L'ensemble des jaugeages effectués à la station n'excède pas des débits de $132 \text{ m}^3/\text{s}$. Les bornes de fiabilité de la courbe correspondent à des débits compris entre 0,5 et $134 \text{ m}^3/\text{s}$.

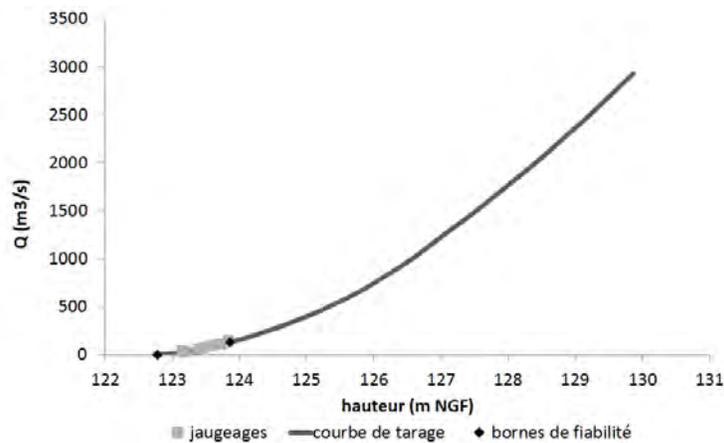


FIGURE 3.23 – Courbe de tarage de la station hydrologique d'Alès

Station de Corbès (la rivière le Gardon de Saint-Jean)

La station hydrométrique de Corbès est localisée dans un méandre entre deux seuils situés à 250 mètres en amont et en aval. Au niveau de cette station, la surface drainée est de 260 km^2 . Les informations présentes dans la base de données Barème montrent une section en travers présentant deux paliers associables aux lits moyen et majeur (figure 3.24). La rive gauche est constituée d'une plage de sable puis d'une pelouse alors que la rive droite est boisée. Le zéro de l'échelle se situe à une altitude de 132,22 mètres NGF.

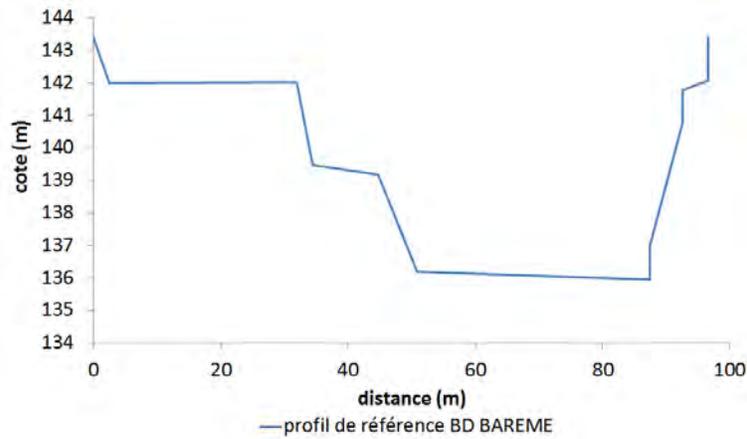


FIGURE 3.24 – Profil en travers à la station hydrométrique de Corbès, vue de l'amont vers l'aval

Le plus fort débit jaugé à cette station s'élève à $275 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 3.25). La courbe de tarage est jugée fiable pour des débits compris entre $0,25$ et $230 \text{ m}^3/\text{s}$.

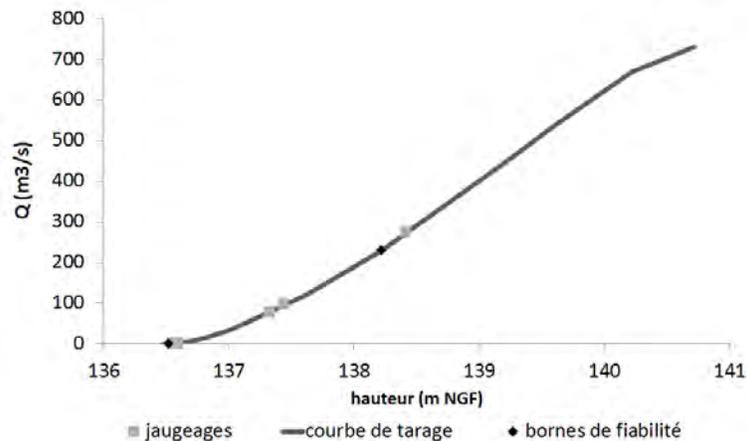


FIGURE 3.25 – Courbe de tarage de la station hydrométrique de Corbès

Contrairement à d'autres stations, l'extrapolation de la courbe n'a pas été réalisée par modélisation hydraulique.

Station de Banne (la rivière la Gagnière)

La station hydrométrique de Banne est implantée dans un secteur très végétalisé. La surface drainée à la station est de 58 km^2 . Le profil de référence met en évidence un lit mineur encaissé et un lit majeur en rive droite (figure 3.26). Le zéro de l'échelle est à $192,2$ mètres NGF.

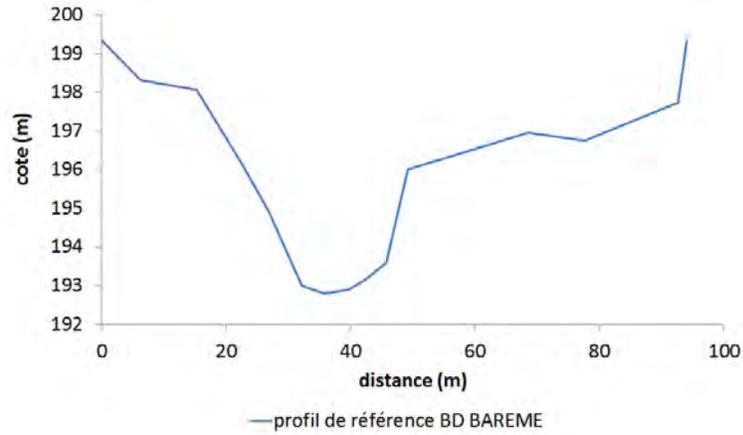


FIGURE 3.26 – Profil en travers à la station hydrométrique de Banne, vue de l'amont vers l'aval

Les jaugeages effectués n'excèdent pas un débit de $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Les bornes de fiabilité de la courbe de tarage ont été définis entre 0 et $71,8 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui paraît excessif vu le plus fort débit mesuré (figure 3.27).

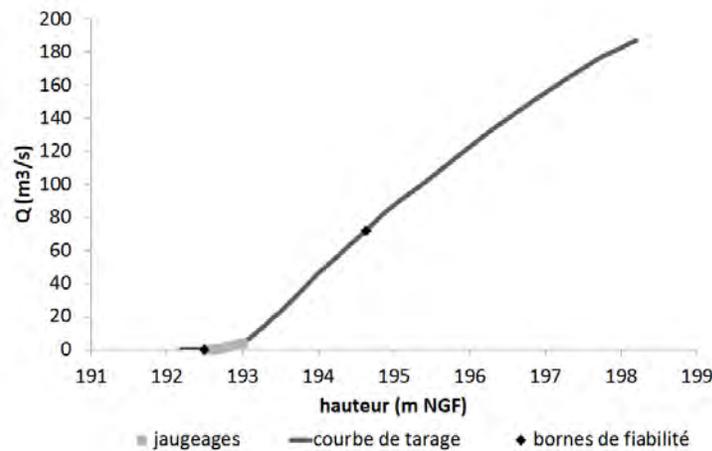


FIGURE 3.27 – Courbe de tarage de la station hydrométrique de Banne

La station de Banne n'est plus en service depuis 2011 et elle n'a pas été conçue pour les hauts débits. Le service en charge des caractéristiques des stations n'évoque pas de modélisation hydraulique effectuée à la constitution de la courbe de tarage.

Station de Mialet (la rivière le Gardon de Mialet)

La station hydrométrique de Mialet se trouve en tête de bassin versant, sur un petit cours d'eau encaissé, drainant une surface de 220 km^2 (figure 3.28). Les berges sont dépourvues de végétation au niveau des différents lits du cours d'eau. Le zéro de l'échelle se situe à 169,93 mètres NGF.

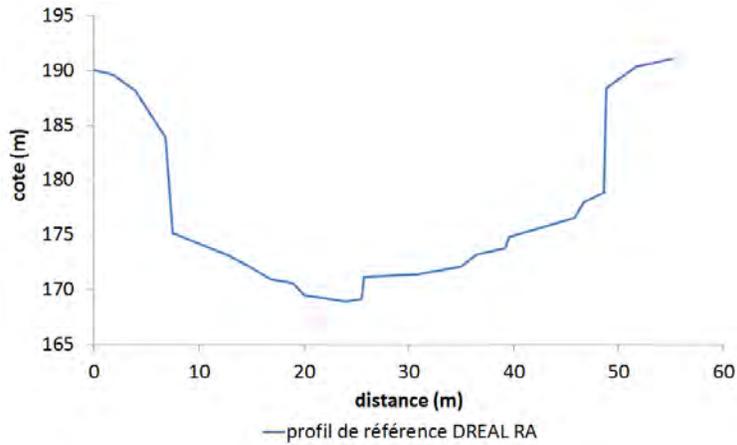


FIGURE 3.28 – Profil en travers à la station hydrométrique de Mialet, vue de l'amont vers l'aval

Le débit le plus fort mesuré à la station atteint $126 \text{ m}^3/\text{s}$. Les bornes de fiabilité de la courbe de tarage, proposées par les services hydrométriques, s'écartent fortement de la gamme des débits jaugés : elle s'étend de $0,35$ à $2780 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 3.29).

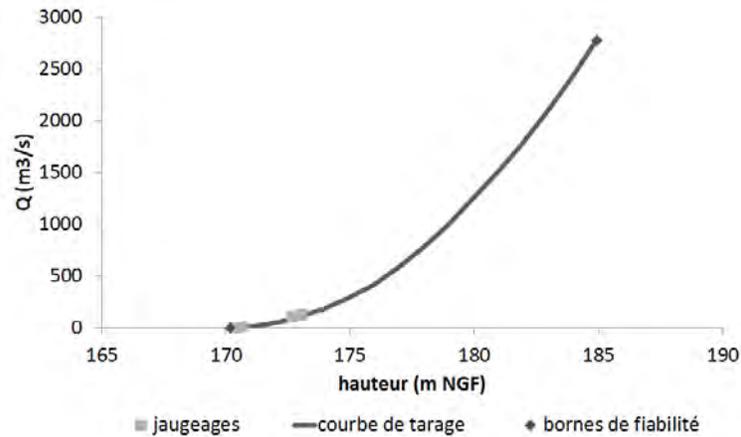


FIGURE 3.29 – Courbe de tarage de la station hydrométrique de Mialet

L'extrapolation de la courbe en vigueur s'est appuyée sur des modélisations hydrauliques. Les coefficients de rugosité de Strickler K, fixés pour ces modélisations ont été de 18 en lit mineur et de 10 en lit majeur.

Station de Bessèges (la rivière la Cèze)

La station de Bessèges est située en amont de la commune du même nom et elle draine une surface de 228 km^2 . Le lit du cours d'eau est rectiligne et encaissé avec des berges végétalisées (figure 3.30). L'altitude zéro de l'échelle se situe à $162,74$ mètres NGF.

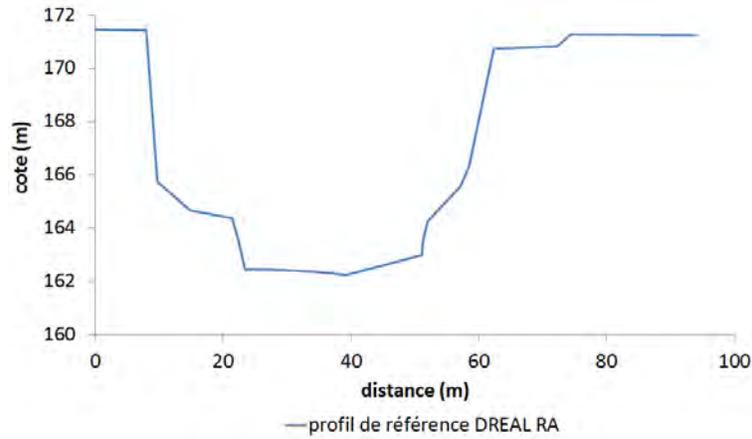


FIGURE 3.30 – Profil en travers à la station hydrométrique de Bessèges, vue de l'amont vers l'aval

A la station de Bessèges, le débit jaugé le plus élevé est 158 m³/s. La courbe de tarage associée possède des bornes de fiabilité comprises entre 36 et 80 m³/s selon le service hydrométrique (figure 3.31) : le débit jaugé le plus élevé connu n'est pas considéré fiable. L'interpolation entre les jaugages a été confirmée par analyse de la cohérence en volume avec les stations amont et aval ; ce qui n'est pas toujours possible pour les stations situées en tête de bassin ou à l'exutoire.

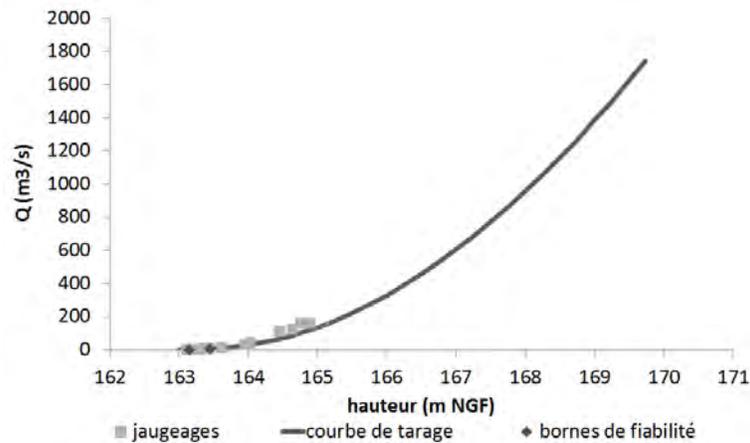


FIGURE 3.31 – Courbe de tarage de la station hydrométrique de Bessèges

L'extrapolation de la courbe en vigueur s'est appuyée sur des modélisations hydrauliques. Les coefficients de rugosité Strickler retenus pour ces modélisations sont de 25 en lit mineur et 15 en lit majeur.

3.3.5 Données hydrologiques : débits SHYREG

La méthode SHYREG a été développée dans le but de proposer une base de données informatique des débits de crues pour différentes périodes de retour (de 2 à 1000 ans), en tout point du réseau hydrographique métropolitain, similaire à celui de la base de données CARTHAGE® (Organde et al., 2013a). Ces travaux d'estimation de l'aléa hydrologique s'appuient sur une régionalisation des paramètres de modélisation pluie-débit et de modélisation stochastique de pluie (Arnaud et al., 2014). Les données de débits disponibles se présentent sous deux formes (figure 3.32). Les quantiles de débits sont d'une part proposés à l'exutoire des bassins versant de la BNBV pour chaque période de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 ans (Cf. §3.3.2). Les quantiles SHYREG sont proposés en tout point drainant plus de 5km² de surface pour chaque période de retour 10, 30, 100, 300 et 1000 ans.

Les limites de validité de cette base sont les suivantes :

- les quantiles de crues ne sont pas fiables pour les bassins versants particuliers tels que les bassins karstiques ou fortement urbanisés (Mijatovic, 1988, Gutiérrez et al., 2014). La fonte nivale ou les ouvrages hydrauliques (barrage) ne sont pas pris en compte ;
- les quantiles sont plus incertains pour les périodes de retour élevées ;
- la non prise en compte des informations hydrologiques des crues historiques ou paléohistoriques, alors que ces informations peuvent être une plus-value dans l'estimation des quantiles de crues dans les jeux de données statistiques (Payraastre et al., 2011, 2013) ;
- les quantiles ne sont calculés que sur des bassins versants variant de 5 à 5 000 km².

Les avantages de cette méthode sont multiples (Aubert et al., 2014) :

- la diminution des erreurs liées aux valeurs extrêmes des séries de données de débits courtes ;
- la genèse de séries de données hydrologiques à l'échelle nationale en tenant compte des spécificités régionales (occupation du sol, topographie, contexte hydro-météorologique, ...) ;
- la capacité de produire des quantiles de débits sur des bassins versants non jaugés ;
- le calcul d'un indice de confiance des données produites, par période de retour.

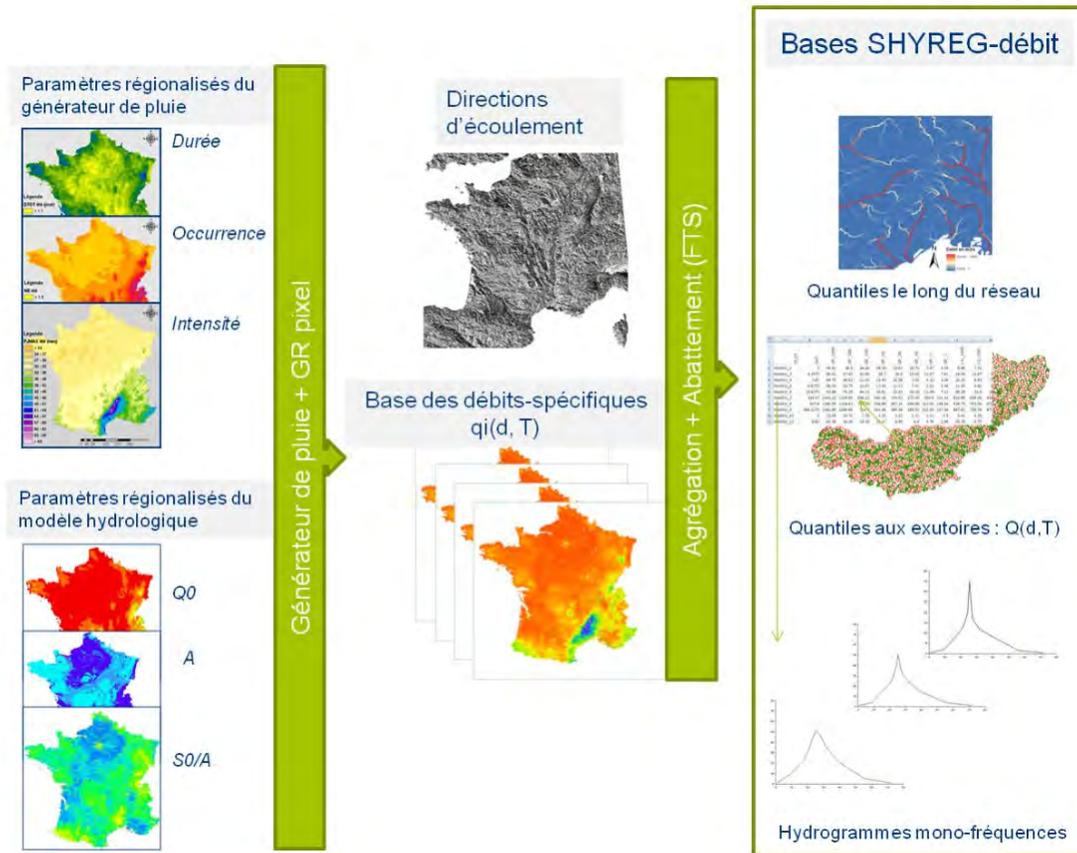


FIGURE 3.32 – *Modèle opératoire de la création de la base de données SHYREG débits - source : Arnaud et al. (2013) - $Q0$ = débit mensuel moyen ($m^3/s/km^2$); A = capacité du réservoir (mm); $S0/A$ = variable d'ajustement du modèle hydrologique GR (entre 0 et 1) correspondant un niveau de remplissage du réservoir*

3.3.6 Surfaces inondées, enjeux et dommages de référence

Cartes d'aléas de références

Au sein de la zone d'étude, la disponibilité des données historiques ou modélisées de l'extension des zones inondables est variable. L'étendue des zones inondables de ces jeux de données peut faire l'objet de comparaisons avec un événement d'inondation (Esposito, 2015). Le secteur du TRI d'Alès est couvert par les cartes de zones inondables établies lors de l'application de la directive Européenne Inondations. Ces cartes ont été élaborées pour trois scénarios (périodes de retour de 30, 300 et 1000 ans) à partir d'une modélisation hydraulique à l'aide du logiciel CARTINO et expertisée par des hydrauliciens (Cf. §4.1). Puis, elles ont fait l'objet d'une critique approfondie à partir de la connaissance locale (crues historiques connues notamment). Elles peuvent par conséquent servir de référence pour l'évaluation des étendues des surfaces inondées simulées dans le cadre de la thèse (Cf. §4.4.2).

Le rendu cartographique de chaque scénario se compose d'un jeu de carte au 1/25000^{ème} (figure 3.33).

Chaque scénario est représenté par classe de hauteurs d'eau (figure 3.34) :

- hauteur d'eau comprise entre 0 et 0,5 m ;
- hauteur d'eau comprise entre 0,5 et 1 m ;

CARTE DE SYNTHÈSE
Débordement des cours d'eau

TRI d'ALÈS - Secteur 5

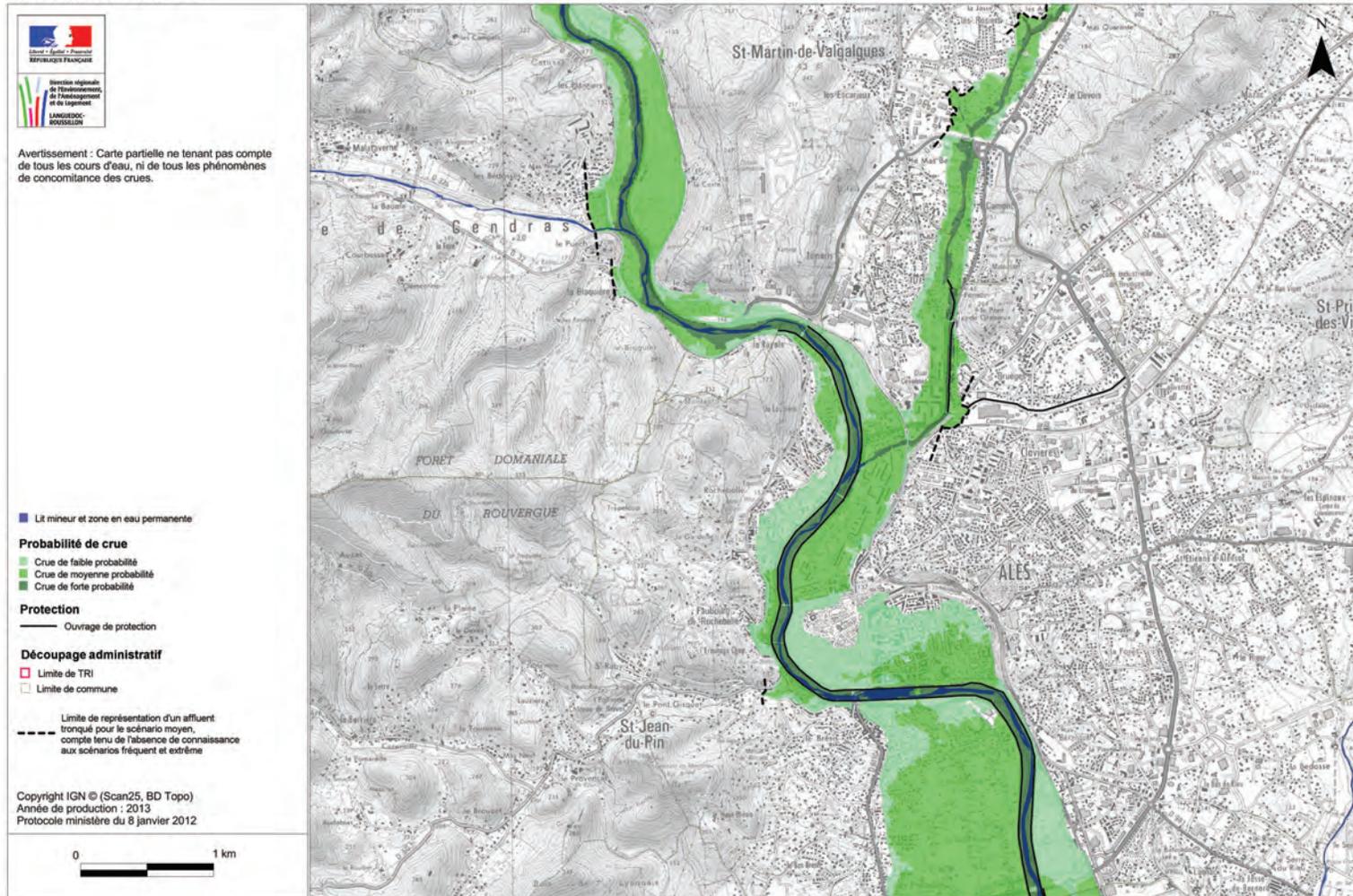


FIGURE 3.33 – Carte des surfaces inondables pour les trois scénarios retenus dans le TRI d'Alès sur la commune d'Alès, d'après la DREAL (2013b)

CARTE DES SURFACES INONDABLES - le Gardon d'Alès
Débordement des cours d'eau

TRI d'ALÈS - Secteur 5

SCENARIO FREQUENT

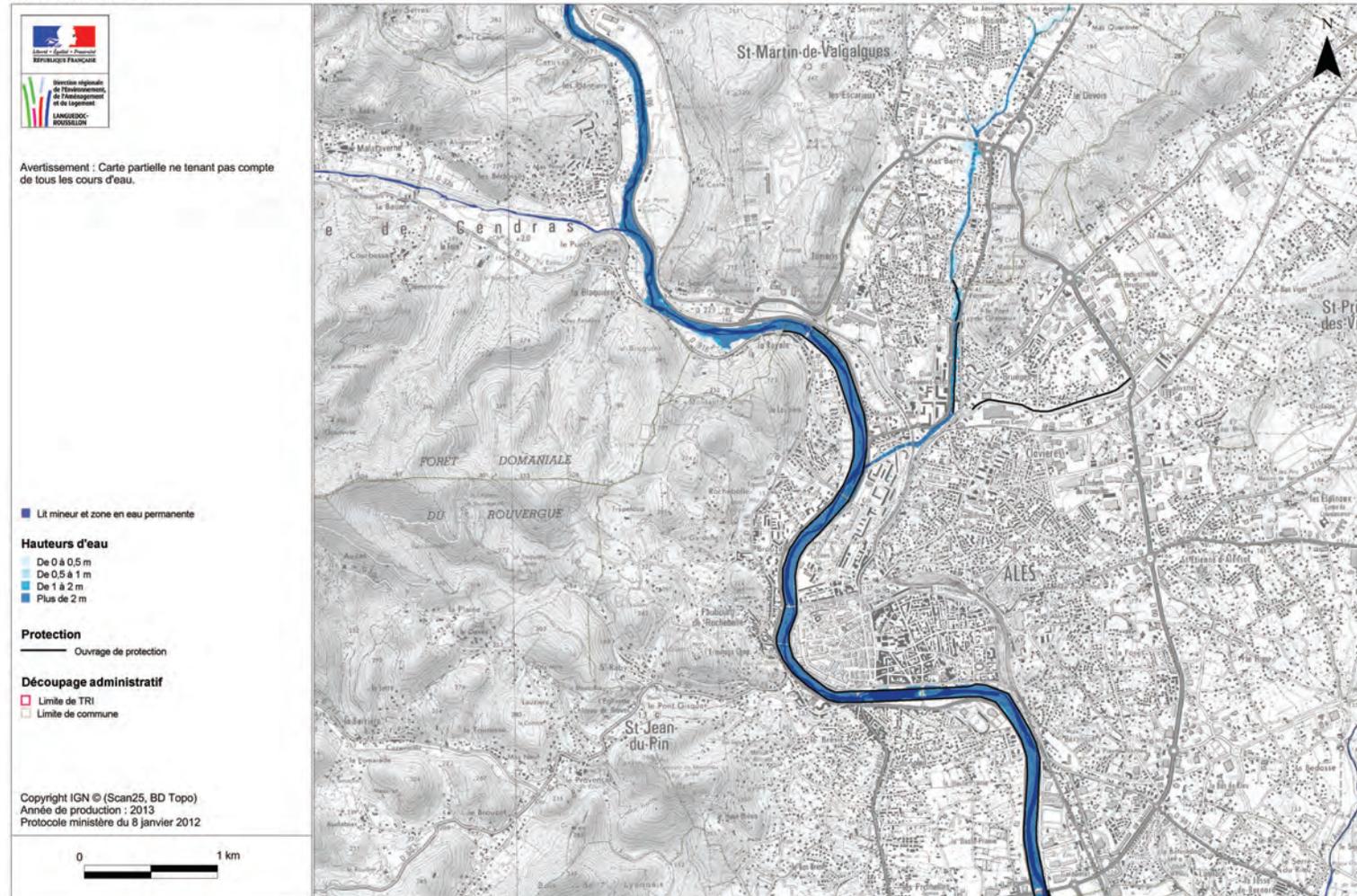


FIGURE 3.34 – Carte des surfaces inondables au droit de la commune d'Alès pour le scénario de forte fréquence du TRI d'Alès, d'après la DREAL (2013a)

- hauteur d'eau comprise entre 1 et 2 m ;
- hauteur d'eau supérieure à 2 m.

Ces surfaces de référence ont été élaborées à partir de données topographiques qui proviennent majoritairement du LiDAR au pas de 1 m (base RGEALTI de mai 2013) ou par défaut du MNT utilisé pour l'étude du PPRi d'Alès au pas de 20 à 30 m (DREAL, 2013e,b).

L'étendue de ces surfaces de référence est limitée à environ 130 km de linéaire de cours d'eau dans le cas du TRI d'Alès, sur les 300 km retenus pour les modélisations hydrauliques dans le cadre de la thèse (Cf. §3.2.1).

Les données sur les enjeux bâtis disponibles

Les données de la Caisse Centrale de Réassurance

L'une des principales missions de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) est la gestion des CATastrophes NATurelles (CATNAT) à travers des prestations de réassurance et de gestion de fonds publics. En étant habilitée à réassurer les risques de catastrophes naturelles avec la garantie de l'État, la CCR assure la solvabilité du système d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles instaurée par la loi CATNAT de 1982 en France.

Dans le cadre de ses relations avec ses clients, la CCR a constitué une base de données sur les sinistres CATNAT depuis 1995. Les informations associées à cette base de données sont multiples :

- le portefeuille des polices d'assurances souscrites (nombre de biens assurés) ;
- la localisation de ces polices, avec une précision planimétrique hétérogène (à l'adresse, rue, commune) ;
- les sinistres associés aux polices souscrites pour les événements ayant déclenché la procédure d'indemnisation CATNAT.

En s'intéressant à des événements CATNAT passés, il est donc envisageable de comparer les résultats du modèle d'impacts aux données de sinistres recensés dans la base de données de la CCR. La corrélation entre les deux sources de données pourrait apporter des précisions sur l'incertitude des prévisions du modèle développé au cours de la thèse.

À l'échelle du TRI d'Alès, l'exhaustivité des informations dans la base de données de la CCR a depuis sa mise en place fortement évolué (Cf. tableau 3.4), ce qui illustre la forte amélioration de la représentativité de la base au fil du temps. Concernant le nombre de sinistres recensés, celui-ci dépend fortement de la nature des événements d'inondation observés au cours d'une année, qui peuvent être d'intensité limitée.

Tableau 3.4 – *Évolution du nombre de biens assurés et de sinistres dans la base de données de la CCR à l'échelle de l'ensemble du TRI d'Alès (TRI) et du lit majeur (Lm.) des cours d'eau étudiés. Les biens assurés retenus concernent uniquement les polices d'assurances de risques de particuliers propriétaires de maisons individuelles qui sont géolocalisées à la rue ou à l'adresse*

Année	1995		2002		2008		2011	
Échelle géographique	TRI	Lm.	TRI	Lm.	TRI	Lm.	TRI	Lm.
Polices d'assurances	1009	115	4820	526	7675	852	17689	2033
Sinistres	19	3	588	125	31	2	10	2

L'événement de septembre 2002, avec une exhaustivité des sinistres de moins de 50% d'après la CCR, est de loin celui pour lequel le nombre de sinistres géolocalisés à l'adresse ou à la rue est le plus important. Ce nombre de sinistres pourrait être plus élevé, puisque l'estimation du nombre de sinistres total est de 25 000 sinistres dans le Gard en 2002, au détriment d'une information complexe à exploiter (bâtiments collectifs, géoréférencement moins précis, ...). Le choix de travailler qu'avec une partie des données assurantielles de la CCR permet de disposer d'un jeu de données de validation fiable et simple à interpréter (haute précision planimétrique, habitats individuels).

Les essais de validation du modèle d'impacts à partir d'une partie des informations de la CCR seront discutés dans le chapitre 5.

Les données de l'IGN

La Base de données TOPO® de l'IGN décrit de manière vectorielle les différentes structures et infrastructures de la France continentale (IGN, 2011). Cette base de données est structurée en différents thèmes dont celui des bâtiments, information qui sera utilisée pour alimenter notre modèle d'impacts.

L'exhaustivité des bâtiments recensés dans la base de données TOPO® est estimé à 95% et sa mise à jour est effectuée tous les 3 à 5 ans par le biais de la photo-interprétation. La version utilisée dans le cadre de ces travaux est celle mise à disposition en 2013 par l'IGN (version spatiale de 2011, mise à jour des attributs en 2013).

La surface du TRI d'Alès inclut plus de 80 000 bâtiments associés à des habitations ayant une surface minimale de 20 m². La zone d'étude est constituée en grande majorité de bâtiments à plusieurs niveaux (figure 3.35).

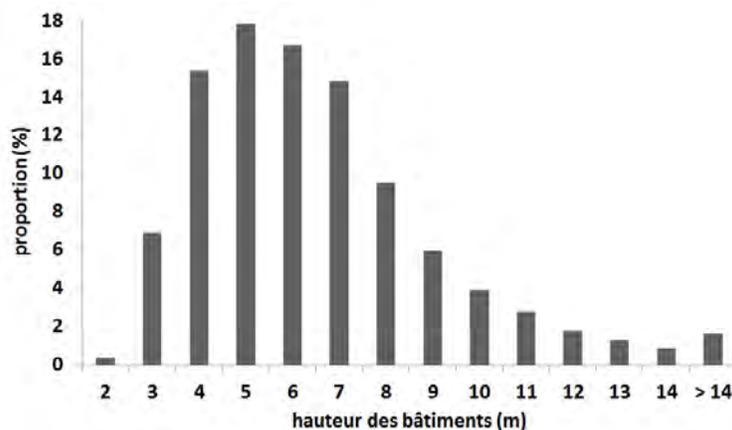


FIGURE 3.35 – Distribution des hauteurs des bâtiments de la base de données TOPO® concernés dans la zone d'étude, d'après IGN (2011)

La méthode sur l'évaluation de la précision spatiale de ces habitations est précisée en annexe C. La précision planimétrique de la position des bâtiments est variable dans la base de données TOPO® :

- 6% entre 0,5 et 1,5 m ;
- 82% entre 1,5 et 2,5 m ;
- 12% entre 2,5 et 5 m ;

La précision altimétrique de la hauteur des bâtiments est inférieure à 2,5 mètres pour 92% des entités retenues, selon les informations contenues dans la table attributaire des bâtiments situés sur le TRI d'Alès. La hauteur des bâtiments est définie par la différence entre la hauteur altimétrique maximale de la base de la toiture du bâtiment et un point situé au pied du bâtiment (figure 3.36). Cette méthode n'inclut pas les combles des bâtiments dans l'évaluation de la hauteur.



FIGURE 3.36 – Croquis du calcul de la hauteur des bâtiments de la base de données TOPO®, d'après IGN (2011)

Les bâtiments de cette base de données alimentent le modèle d'impacts détaillé dans le chapitre 5.

La résolution des pixels de l'aléa ne doit pas être trop grossière par rapport à la localisation des bâtiments de la base de données TOPO® dans le but de distinguer les bâtiments inondés des autres (Fewtrell et al., 2008).

Majoritairement, les bâtiments de la base de données TOPO® au niveau du TRI d'Alès sont mitoyens (figure 3.37), et ils possèdent une largeur moyenne supérieure à 10 m (figure 3.38). Cette largeur a été calculée à partir du périmètre des bâtiments et du postulat que les bâtiments disposent de quatre côtés : en divisant le périmètre par ce nombre de côté hypothétique on obtient la "largeur" du bâtiment.

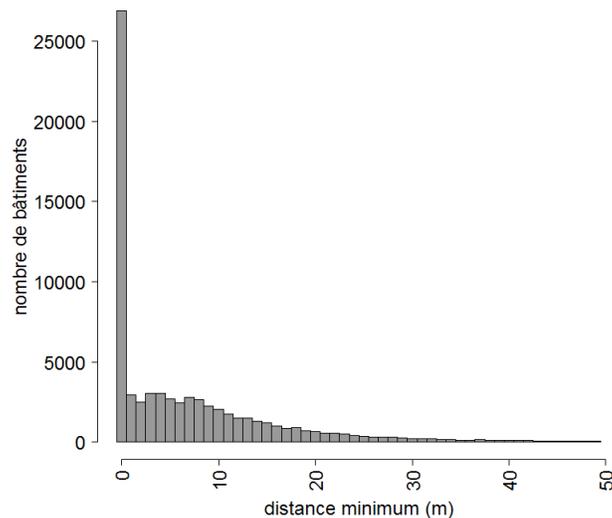
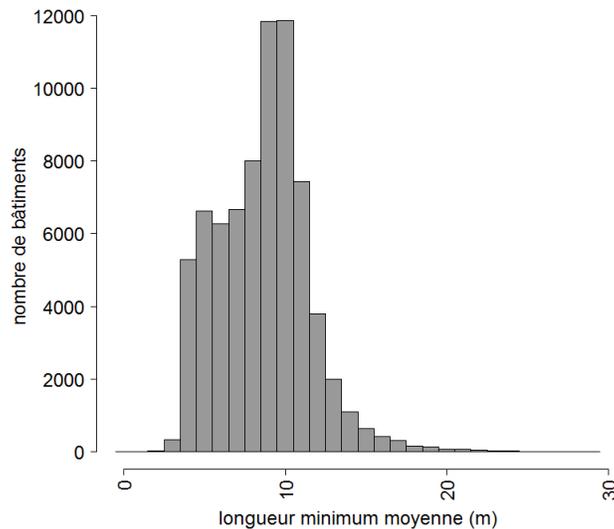


FIGURE 3.37 – Distribution de la distance minimum entre deux bâtiments

FIGURE 3.38 – *Distribution de la largeur des bâtiments*

Étant données les résolutions des deux jeux (Cf. §3.3.1), les bâtiments retenus dans les différentes surfaces simulées ne semblent pas sujets à des erreurs éventuelles sur leur localisation dans ou en dehors de la zone inondée.

3.4 Modèle pluie-débit Cinecar

Le modèle pluie-débit Cinecar n'a pas fait l'objet d'amélioration au cours de ces travaux de thèse. Toutefois, ses principes de fonctionnement, son application sur la zone d'étude et sa validation seront évoqués dans le cadre de cette partie.

3.4.1 Principes

Cinecar est un modèle hydrologique pluie-débit distribué, développé spécifiquement pour simuler les crues-éclair sur les petits cours d'eau non instrumentés. Il a déjà été utilisé à plusieurs reprises dans le Gard, initialement pour l'étude des crues de septembre 2002, puis plus récemment dans le cadre des travaux de Jean-Philippe Naulin : celui-ci a implémenté et évalué le modèle sur l'ensemble du département, avec des performances comparables voire supérieures à celles d'autres modèles pluie-débit (Naulin, 2012, Naulin et al., 2013).

Le modèle considère un bassin versant comme étant un réseau segmenté de biefs de cours d'eau, auxquels sont rattachés un ou deux versants de forme rectangulaire (Cf. §2.1.2). Le calcul est effectué en deux étapes ? Tout d'abord la transformation de la pluie en pluie efficace est effectuée par une fonction de production appliquée sur chaque versant, puis la propagation de ces pluies efficaces vers l'aval est représentée par une fonction de transfert appliquée sur chaque versant et chaque bief.

La fonction de production retenue est le modèle conceptuel du Soil Conservation Service – Curve Number (SCS-CN). Ce modèle décrit la capacité d'infiltration du sol et son aptitude à générer des écoulements. Il permet de connaître la quantité d'eau rendue disponible pour les écoulements (pluie efficace), en fonction de la valeur du CN attribuée et du cumul de pluie (figure 3.39). Typiquement, les valeurs suggérées de CN sont de 70 à 90 pour des sols cultivés,

peu drainants ou partiellement végétalisés, et de 30 pour des sols couverts de végétation et plus drainants.

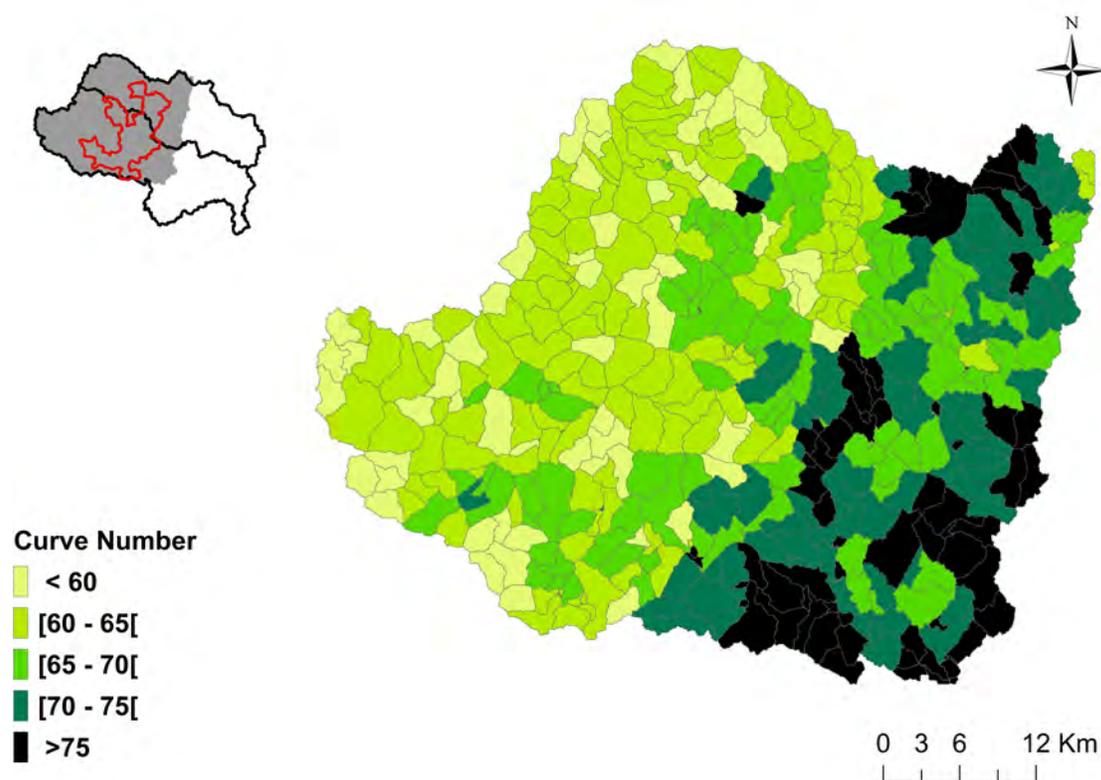


FIGURE 3.39 – Attribution des valeurs de Curve Number moyen sur les différents bassins versants de la Base Nationale des Bassins Versants du SCHAPI

Les avantages et les limites de la méthode SCS-CN ont fait l'objet de plusieurs articles ([Ponce and Hawkins, 1996](#), [Michel et al., 2005](#)). L'un des avantages de la méthode est qu'elle se base sur un paramètre, le Curve Number. L'un des inconvénients du modèle SCS est qu'il est plus adapté aux cours d'eau pour lesquels le débit de base est négligeable ou à la simulation de crues significatives. Certains ouvrages proposent des estimations des valeurs du Curve Number en fonction de la nature des sols, de leur couverture et de l'antériorité pluviométrique. Ces valeurs ne sont cependant à considérer que comme des premières estimations. Le CN est avant tout à considérer comme un paramètre de calage dans le modèle Cinecar.

Le transfert de la pluie efficace, au sein des versants puis de bief en bief, est assuré par le modèle de l'onde cinématique. Ces écoulements sont exprimés par une valeur de débit (m^3/s) à chaque pas de temps "t". Pour les biefs situés les plus à l'aval et dont la pente est inférieure à 5‰, le modèle de l'onde cinématique peut être remplacé par celui de l'onde diffusive de façon à mieux reproduire l'effet de laminage des ondes de crue. Le laminage est assimilable à un effet de stockage temporaire de l'eau (lit majeur, barrage, ...) qui entraîne une diminution du débit de pointe et un étalement dans le temps de l'hydrogramme.

3.4.2 Découpage et application du modèle sur le territoire d'étude

Afin d'utiliser le modèle Cinecar, il est nécessaire de réaliser un découpage en biefs et en versants du bassin versant à étudier. Cette étape peut être réalisée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et par l'utilisation des outils de traitements d'un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG). Ce type de découpage a déjà été mené sur le territoire d'étude (Naulin, 2012) ; il a été renouvelé dans le cadre de la thèse de façon à obtenir une représentation du réseau hydrographique cohérente avec la Base Nationale des Bassins Versants du SCHAPI (Cf figure 3.18). De plus, le découpage élaboré est cohérent avec les contraintes de modélisation existantes pour les crues-éclair citées par Defrance (2014).

Ce travail de découpage a permis d'obtenir l'ensemble des informations nécessaires au paramétrage de la fonction de transfert dont la pente moyenne et la longueur des biefs, et la pente, la longueur et la largeur des versants. Le paramétrage de la fonction de production, le Curve Number de chaque versant, ont également été définis à partir des données d'occupation et de la nature des sols (Cf. §3.2.3), en reprenant la méthode de Naulin (2012) qui s'est avérée satisfaisante dans le cas du Gard.

3.4.3 Validation du modèle

La simulation des débits par modélisation pluie-débit est inévitablement entachée d'incertitudes, tout particulièrement liées au choix du CN (Rozalis et al., 2010), aux incertitudes d'estimation des pluies. Des tests de validation permettant d'évaluer la qualité des simulations s'avèrent donc indispensables. En général, on cherche à qualifier globalement le niveau des incertitudes liées au modèle, voire même parfois la distribution statistique des erreurs. Des critères d'évaluation globaux, comme le critère de Nash (3.1), sont souvent utilisés pour comparer les résultats de la simulation aux observations.

$$\text{Critère de Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3.1)$$

où Q_{obs} est le vecteur des débits observés et Q_{sim} le vecteur des débits simulés. La valeur du critère de Nash est comprise entre $-\infty$ et 1 , cette dernière étant la valeur optimale (Moriasi et al., 2007). Pour ce qui concerne le modèle Cinecar, des tests de validation ont été conduits par Naulin (2012), pour 10 événements et à l'échelle du département du Gard. Outre l'évaluation absolue des performances de modèle à partir du critère de Nash, les résultats obtenus ont été comparés avec ceux produits par le modèle GR4J spécifiquement calé sur les bassins versants test (figure 3.40), modèle conceptuel similaire à celui utilisé par la méthode AIGA (Cf. §2.1.2). Le modèle GR4J est un modèle conceptuel global très couramment utilisé en hydrologie. Il nécessite un jeu de données relativement lourd (plusieurs années d'enregistrements) pour l'estimation de ses paramètres (calage), et ne peut donc être appliqué que sur des bassins instrumentés. Les résultats montrent que la performance du modèle Cinecar est assez proche de celle de GR4. Une comparaison plus détaillée montre que le modèle Cinecar s'avère plus performant pour les fortes crues, et moins performant pour les faibles crues.

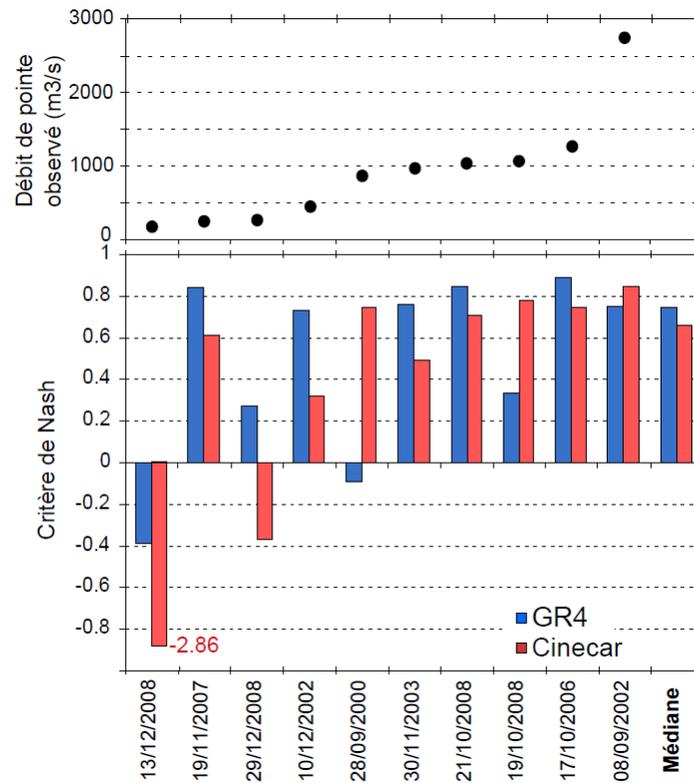


FIGURE 3.40 – Comparaison des valeurs de Nash calculées pour 10 événements par le modèle Cinécar et GR4J au niveau de la commune d'Anduze. La partie supérieure de la figure décrit les débits de pointe observés de ces événements, d'après *Naulin (2012)*

3.5 Événements passés exploités

3.5.1 Événements CATNAT recensés au sein de la zone d'étude

L'application Gaspar (Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques) correspond au système d'information principal sur les arrêtés CATNAT de la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR). Les arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sont recensés 30 jours au plus tard après leur parution au Journal Officiel, dont ceux rattachés aux inondations¹².

Les 37 communes du TRI d'Alès impactées par des inondations parues au Journal Officiel apparaissent 260 fois dans la base depuis sa création le 13 juillet 1982 (extraction juin 2016). Le nombre de communes déclarées CATNAT varie en fonction de chaque événement (figure 3.42), souvent lié à l'intensité de l'événement et à sa localisation. Bourguignon (2014) définit les différentes aires d'exposition possibles au cours d'un événement d'inondation à l'échelle d'une commune. Aucun enjeux n'est recensé dans certaines de ces aires qui subissent donc exclusivement l'intensité de l'aléa (météorologique et hydrologique). À contrario, d'autres aires peuvent être soumises à des risques d'inondation avec des dégâts visibles. Ces dégâts peuvent être classés de deux manières, ceux gérés par les sociétés d'assurances et ceux délimités dans la zone CATNAT qui seront dédommagés par la Caisse Centrale de Réassurance (figure 3.41).

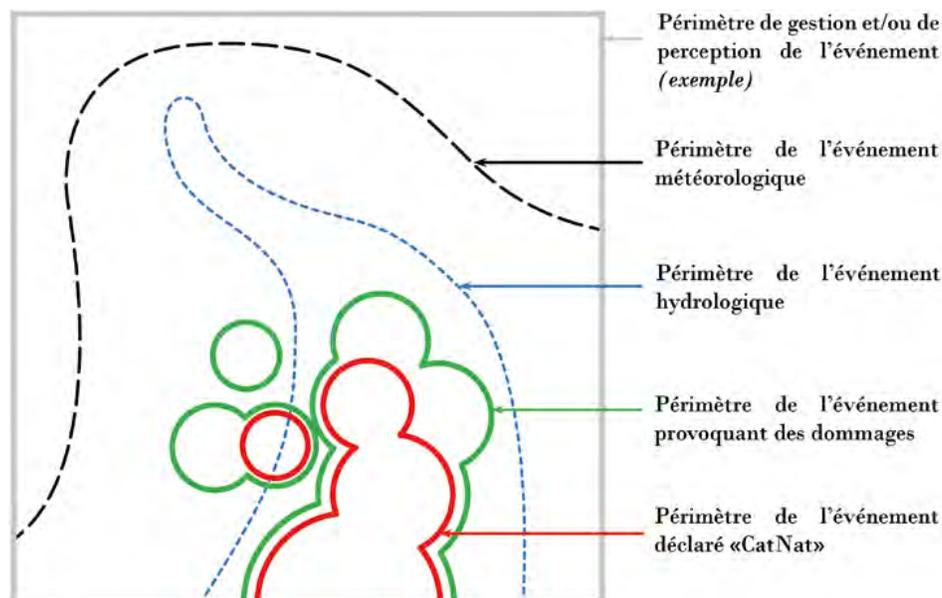


FIGURE 3.41 – Répartition des différentes surfaces géographiques soumises à un événement d'inondation, d'après Bourguignon (2014)

De plus, la distribution spatiale de la fréquence des déclarations CATNAT à l'échelle des communes n'est pas homogène. Les communes situées en aval, probablement plus exposées, font plus souvent l'objet de déclarations CATNAT : jusqu'à onze fois en trente ans (figure 3.43).

12. <http://macommune.prim.net/gaspar/>

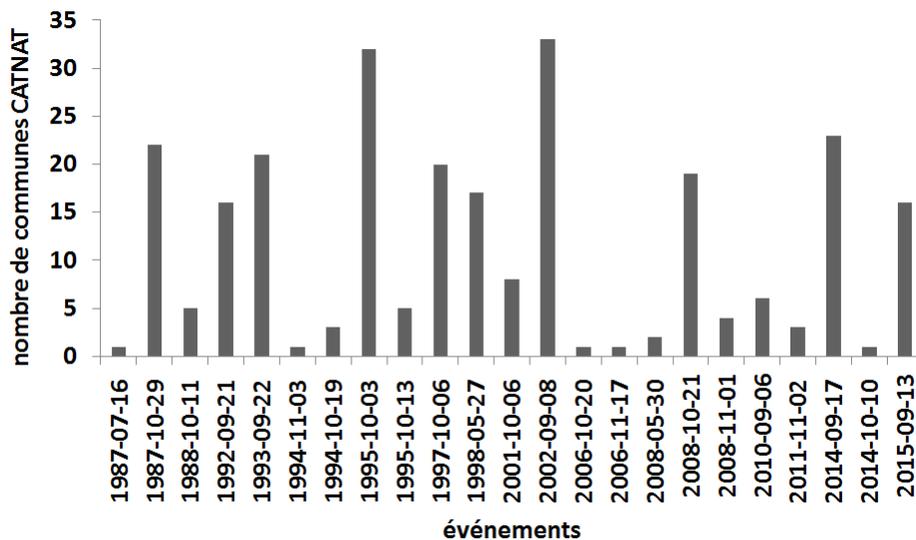


FIGURE 3.42 – Nombre de communes du TRI d'Alès déclarées CATNAT entre juillet 1982 et juin 2016, d'après la base de données Gaspar

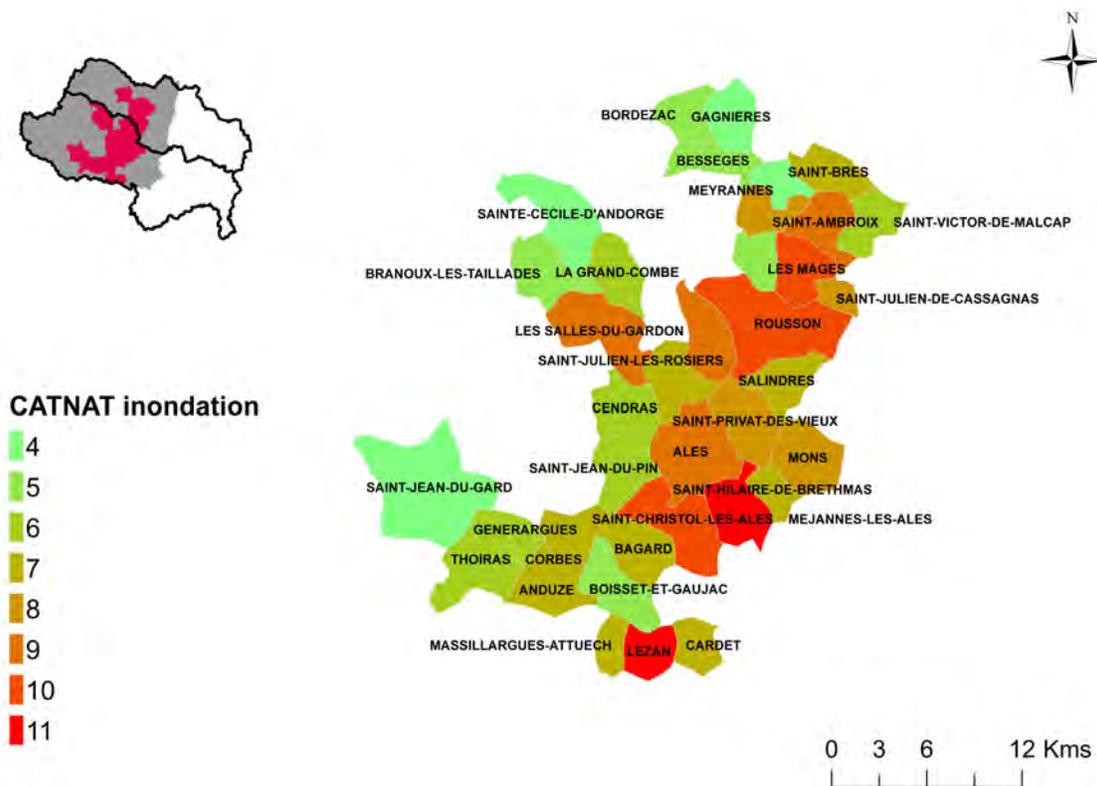


FIGURE 3.43 – Nombre de CATNAT de type "inondations et de coulées de boue", référencées dans le Journal Officiel, entre novembre 1982 et novembre 2015 à l'échelle des communes du TRI d'Alès - source : base de données Gaspar et base de données GEOFLA®

3.5.2 Événements étudiés

Les événements retenus dans le cadre de ces travaux se limitent à ceux où les données de la CCR sont disponibles (Cf. tableau 3.4), et ayant fait l'objet de nombreuses déclarations de sinistres permettant une validation (figure 3.43).

Avant 2002, la liste de polices d'assurances sélectionnées dans la base de données de la CCR est trop faible et les dernières données enregistrées dans la base datent de 2013 (délais d'intégration de leurs informations). Finalement, les événements marquants pendant cette période sont ceux du 8 au 10 septembre 2002 et du 20 au 23 octobre 2008.

Ces deux événements font partie des événements déjà simulés par le modèle pluie-débit Cinecar (figure 3.40), avec des performances de simulations estimées de bonne qualité (Naulin, 2012).

Événement du 8 au 10 octobre 2002

Les cumuls de pluie de l'événement de 2002, décrit par Delrieu et al. (2005), sont très variables au sein de la zone étudiée avec les pics journaliers record pour la région (600-700 mm). Les parties aval des deux bassins étudiés concentrent les plus forts cumuls de pluie (figure 3.44). Ces cumuls dépassent 500 mm pour 135 des 453 versants représentés dans le modèle hydrologique.

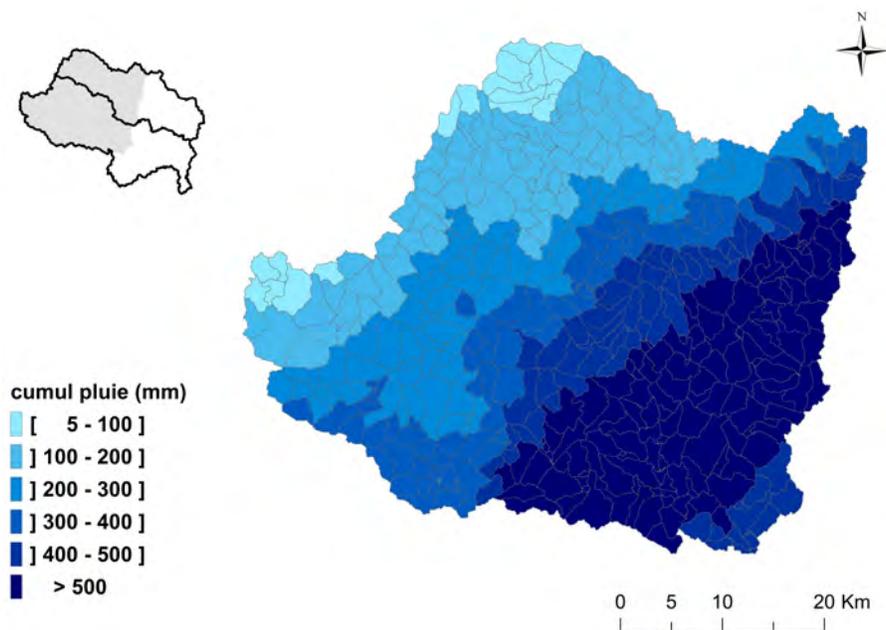


FIGURE 3.44 – Cumul des pluies (mm) à partir des lames d'eau radar réanalysées (TRADHY) de 2002 et du modèle pluie-débit Cinecar Delrieu et al. (2009)

À partir des relevés de crues effectués à la suite de cet événement d'inondation sur les bassins versants étudiés, des estimations des débits atteints ont été réalisées. Ces données ont été comparées avec les débits simulés par le modèle pluie-débit Cinecar (figure 3.45). Cette figure illustre les écarts parfois élevés entre simulation et observation (Cf. formule (3.2)), mais l'absence de biais systématique (écart de -8% en valeur moyenne).

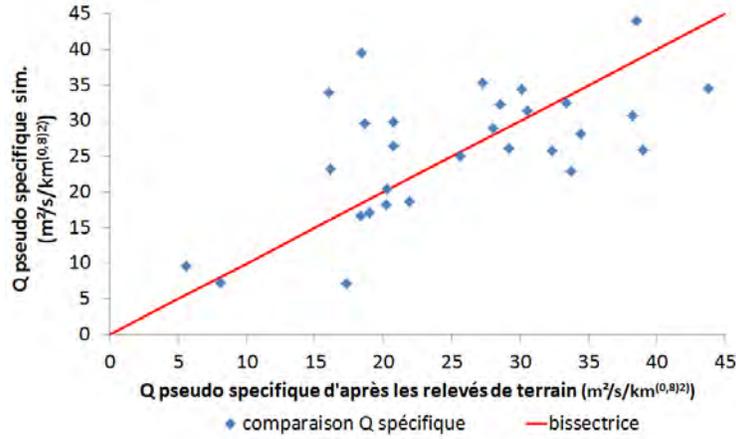


FIGURE 3.45 – Comparaison des débits pseudo spécifiques relevés suite à l'événement de 2002 ($m^3/s/km^{0.8})^2$) avec les débits simulés avec le modèle pluie-débit Cinecar

$$\text{Écart des débits pseudo spécifique (\%)} = \frac{(Q_{psR} - Q_{psS})}{(Q_{psR})} \times 100 \quad (3.2)$$

où Q_{psR} correspond au débit pseudo spécifique estimé à partir de relevés sur le terrain et Q_{psS} le débit pseudo spécifique simulé par le modèle Cinecar. Les débits ne varient pas linéairement en fonction de la surface, d'où le besoin d'élever la surface à la puissance 0,8. Ces comparaisons de débits pseudo spécifiques liés à l'événement de 2002 illustrent également la variabilité des surestimations et sous-estimations du modèle. Sur le plan spatial de ces écarts de débits pseudo spécifiques, la répartition est également relativement aléatoire (figure 3.46).

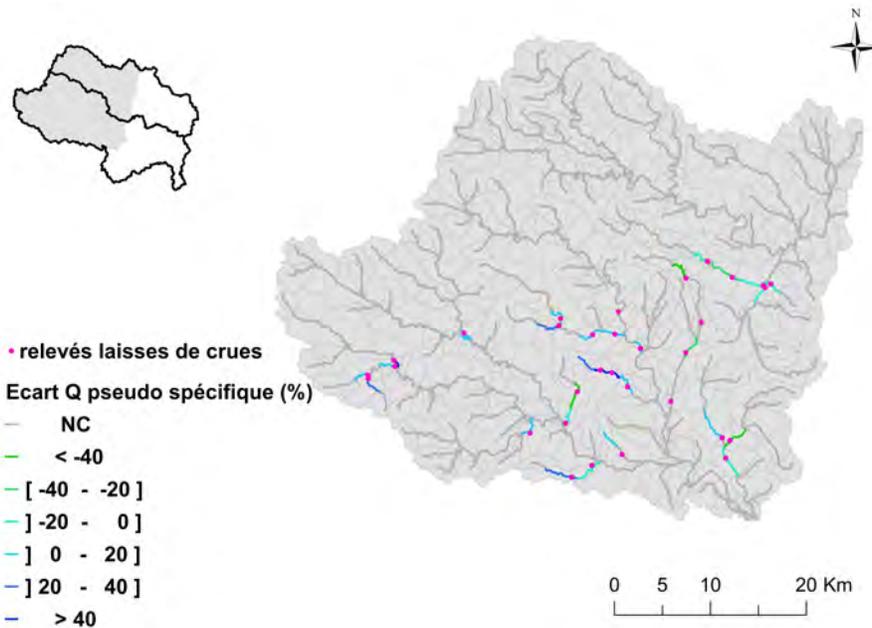


FIGURE 3.46 – Répartition des écarts des débits pseudo spécifiques de ceux relevés par rapport à ceux simulés

Événement du 20 au 23 octobre 2008

Les cumuls de pluie de l'événement de 2008 sont aussi très variables au sein de la zone étudiée (figure 3.47). La partie centrale de la zone étudiée recense les plus hauts cumuls de pluie. Trois versants du modèle hydrologique ont reçu des cumuls de pluie atteignant plus de 500 mm au cours de l'événement de 2008, ce qui est très largement inférieur au nombre de versants impactés par l'événement de 2002.

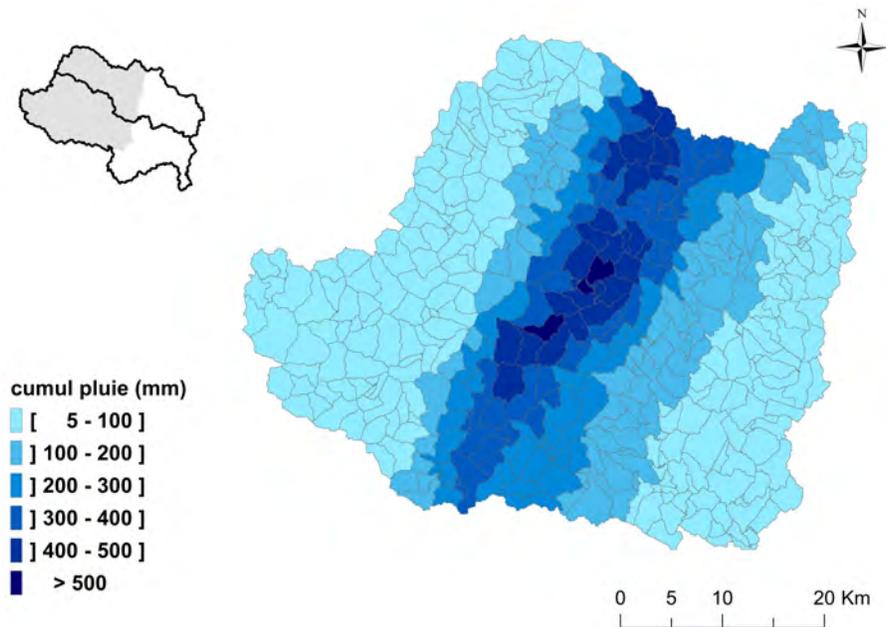


FIGURE 3.47 – Cumul des pluies (mm) à partir des lames d'eau radar réanalysées de 2008 (méthode KED) et du modèle pluie-débit Cinecar (Delrieu et al., 2013)

À partir des relevés de crues effectués à la suite de cet événement d'inondation sur les deux bassins versants étudiés, des estimations des débits atteints ont été réalisées comme pour la crue de 2002. Ces données ont pu être comparées avec les débits simulés par le modèle pluie-débit Cinecar (figure 3.48). Cette figure illustre les écarts parfois considérables entre simulation et observation, et une absence de biais systématique (écart de -3% en valeur moyenne).

Tout comme dans le cas de la crue de 2002, les comparaisons de débits pseudo spécifique sont variables avec des surestimations et des sous-estimations du modèle (figure 3.49).

L'événement de 2002 apparaît comme un événement majeur par rapport à celui de 2008, du point de vue des cumuls de pluie, des débits pseudo spécifiques et de l'extension géographique.

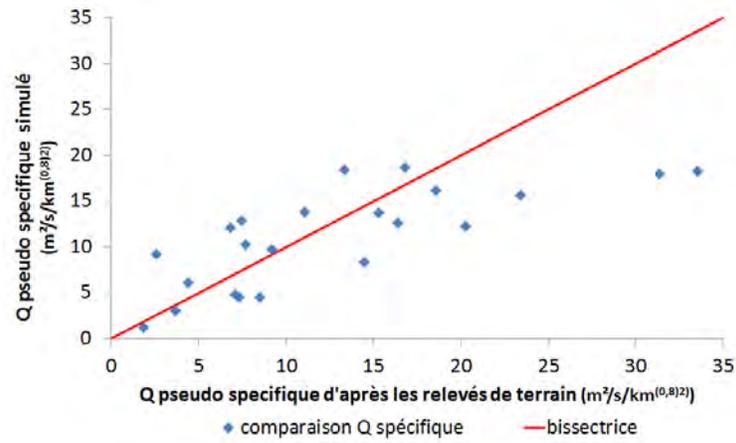


FIGURE 3.48 – Comparaison des débits pseudo spécifiques relevés suite à l'inondation de 2008 ($m^3/s/km^{(0,8)^2}$) avec les débits simulés avec le modèle pluie-débit Cinecar

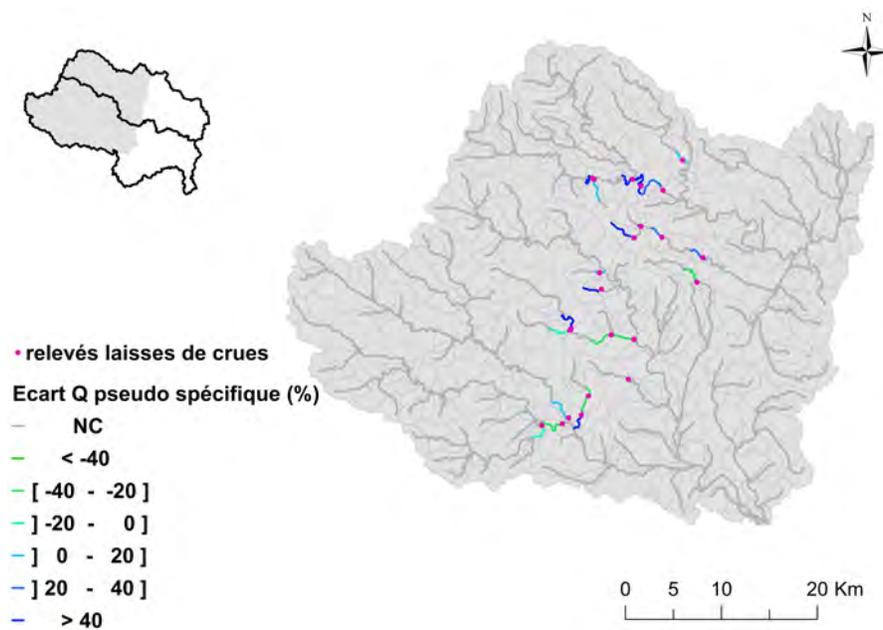


FIGURE 3.49 – Répartition des écarts des débits pseudo spécifiques de ceux relevés par rapport à ceux simulés

Synthèse

À travers la présentation des caractéristiques des bassins versants retenus et des données concernant les impacts des crues récentes, la zone d'étude retenue apparaît particulièrement propice à la genèse des crues-éclair dommageables. Les caractéristiques de cette zone d'étude ne sont cependant pas spécifiques, elles se retrouvent au sein de la région Midi-Pyrénées-Languedoc-Roussillon (Garambois et al., 2015), et sur d'autres régions françaises soumises au climat méditerranéen et au relief marqué comme la région Rhône-Alpes-Auvergne ou celle de Provence-Alpes-Côte-D'Azur (Defrance, 2014).

Les différents jeux de données présentés participent à l'élaboration et l'application de la chaîne de calcul pluie-débit-impacts à l'échelle de la zone d'étude. De nombreuses données sont récupérées dans le but d'évaluer les résultats de ces modélisations hydrologiques et hydrauliques : cotes observées et débits estimés aux stations hydrométriques, emprises des zones inondées et inondables (DREAL, 2013b). Les sinistres recensés par les assurances (Moncoulon and Quantin, 2013, Moncoulon et al., 2014) serviront à valider le modèle d'impacts.

Le modèle pluie-débit distribué Cinecar a été utilisé sur la zone d'étude à travers les travaux de thèses de Versini (2007) et de Naulin (2012), où les performances du modèle avaient été évaluées satisfaisantes sur des événements de crues intenses. Le découpage des bassins versants dans le modèle a été repris afin de coïncider avec les informations des services de prévisions des crues (SCHAPI) et d'être cohérent avec le réseau hydrographique de prévision des crues actuel.

Deux événements passés, du 8 au 10 septembre 2002 et du 20 au 23 octobre 2008, ont été retenus pour mettre en œuvre et valider la méthode d'estimation des impacts proposée dans le cadre des travaux de cette thèse. Les performances du modèle hydrologique Cinecar sur ces deux crues se sont révélées de très bonne qualité (Naulin, 2012). Les débits pseudo spécifiques simulés par Cinecar ont été comparés avec les estimations de débits pseudo spécifiques effectués à partir des relevés de laisses de crues post-catastrophe et montre une bonne concordance simulation/observation. Cette concordance simulation/observation permettra de mieux évaluer les incertitudes associées aux deux composantes originales de la thèse : la modélisation des emprises inondées via un modèle hydraulique simplifié et le modèle d'évaluation des impacts (nombre de bâtiments inondés).



Chapitre 4

Construction et évaluation d'un catalogue d'emprises inondées

Objectifs du chapitre :

- *Présenter le fonctionnement du modèle hydraulique retenu pour la réalisation du catalogue de surfaces inondées.*
- *Préciser les modifications apportées pour mieux représenter les premiers débordements des cours d'eau.*
- *Construire le catalogue de surfaces inondées mono-fréquences sur l'ensemble de la zone d'étude.*
- *Évaluer la qualité des simulations à partir des informations disponibles : courbes de tarage des stations hydrométriques et cartes de surfaces inondées de référence.*

4.1 Fonctionnement de CARTINO PC

L'OUTIL CARTINO (CARTographie des INondations) a été développé pour faciliter l'application de la phase cartographie de la Directive Européenne Inondation en France. L'objectif était de pouvoir modéliser rapidement les étendues des surfaces inondables dans les zones non encore couvertes, en particulier pour les événements extrêmes (Pons et al., 2014).

CARTINO permet de réaliser de manière semi-automatique des modélisations hydrauliques 1D (Flutor-Mascaret), à partir de données hydrologiques et de données topographiques. Ces modélisations aboutissent à une estimation de l'étendue des surfaces inondées et des niveaux d'eau associés au droit de chaque pixel (figure 4.1). Les paragraphes suivants seront dédiés à la description des données d'entrée, à la présentation des étapes et à celle des paramètres du modèle CARTINO.

4.1.1 Les données utilisées

La modélisation des surfaces inondées avec CARTINO nécessite trois jeux de données d'entrée : tout d'abord des quantiles de débits au format raster, qui seront ici des débits SHYREG (Cf. §3.3.5); ensuite un Modèle Numérique de Terrain (Cf. §3.3.1) et enfin une première estimation "a priori" des zones inondées en format vecteur et raster, fournie par l'outil EXZECO (Pons et al., 2010).

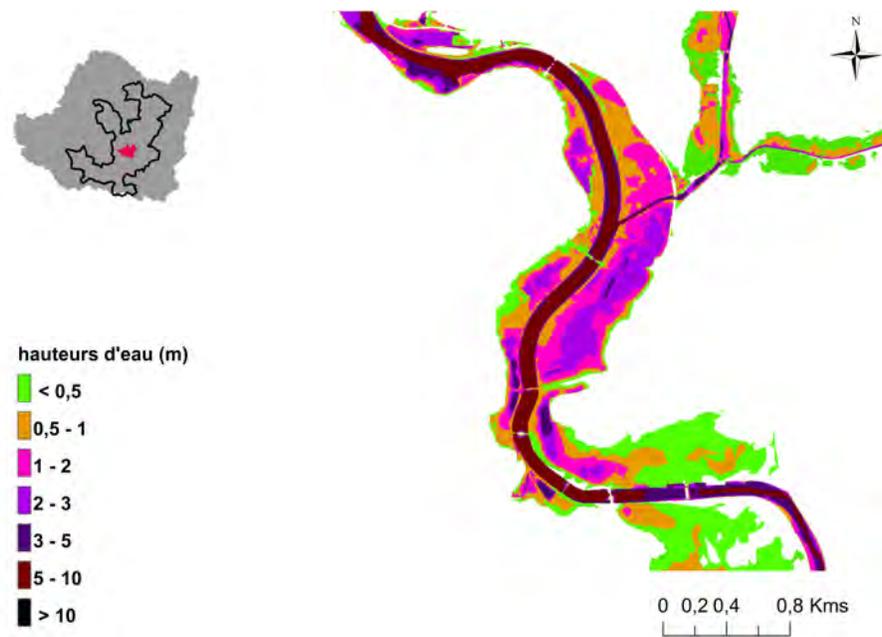


FIGURE 4.1 – Résultats de la méthode CARTINO : étendue des surfaces inondées et hauteurs d'eau associées

4.1.2 Les étapes de traitement

Les étapes de calcul suivies par CARTINO sont synthétisées dans les paragraphes qui suivent. L'outil est semi-automatique car l'utilisateur a la possibilité de contrôler les résultats de calcul en sortie de chacune des étapes. Au cas où les résultats ne répondent pas aux souhaits de l'utilisateur, l'étape peut être reprise.

Modélisation d'un réseau hydrographique

Cette étape consiste à créer un réseau hydrographique à partir de l'enveloppe vecteur représentant l'estimation initiale des zones inondées (dénommée enveloppe initiale par la suite). L'objectif est de simplifier le réseau hydrographique tout en restant cohérent avec la localisation des zones inondables (Pons et al., 2010). Pour cela, la médiane de l'enveloppe initiale est calculée et utilisée en guise de réseau hydrographique (figure 4.2). Cette méthode est adaptée pour représenter des réseaux hydrographiques détaillés (faible surface drainée élémentaire).

Définition des sens d'écoulement du réseau hydrographique

L'ensemble du réseau hydrographique est orienté de telle sorte qu'il respecte le sens des écoulements de l'eau. La méthode s'appuie sur l'information des surfaces drainées fournie par les sorties d'EXZECO pour diriger le réseau hydrographique de la plus petite à la plus grande surface drainée.

Positionnement des profils et calculs hydrauliques (étape itérative)

Cette étape se divise en trois phases : la préparation des fichiers de calculs, les calculs hydrauliques et la création des fichiers post-traitement.

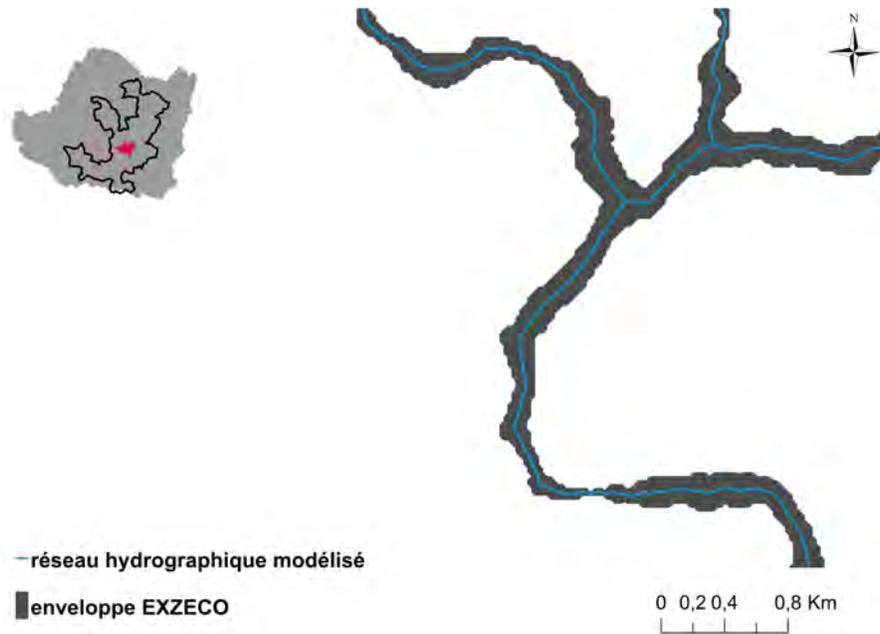


FIGURE 4.2 – Modélisation d'un réseau hydrographique à partir de l'outil CARTINO

La première phase consiste à positionner des profils en travers le long du cours d'eau et d'extraire les caractéristiques topographiques (coordonnées x, y, z des points constituant la section d'écoulement) et hydrologiques (débit à simuler) au droit de chaque profil (figure 4.3). La distance entre les profils et leur largeur initiale sont contrôlées par des paramètres du modèle (Cf. §4.1.3).

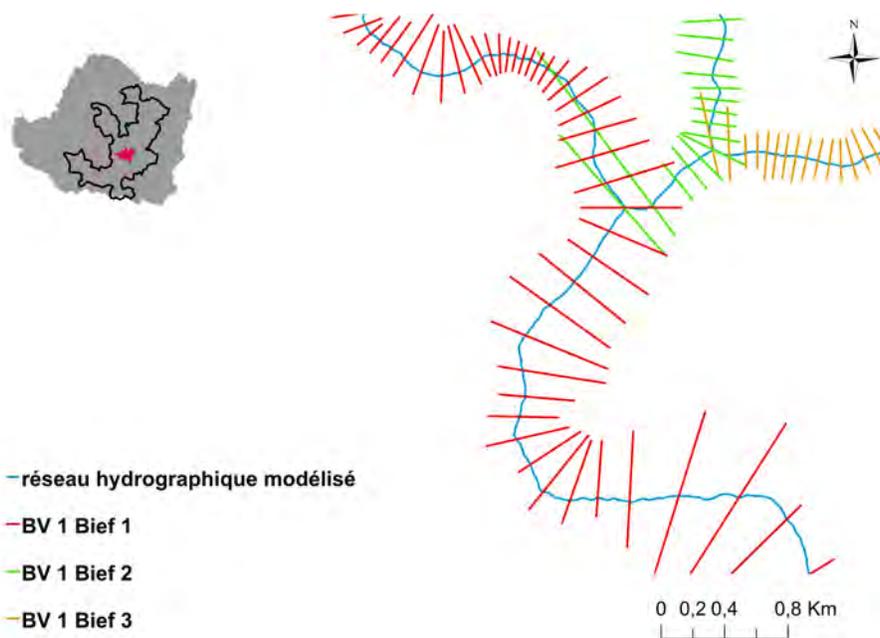


FIGURE 4.3 – Construction automatique des profils en travers avec l'outil CARTINO

La seconde phase consiste à effectuer des calculs hydrauliques 1D sur chaque branche du

réseau hydrographique de l'aval vers l'amont.

Cette phase est itérative de manière à assurer que les écoulements soient contenus dans l'ensemble des profils définis. À l'issue de chaque tour de calcul, une vérification de la largeur des profils est effectuée. À chaque extrémité du profil, l'altitude de la ligne de charge modélisée doit être inférieure à celle des extrémités du profil (topographie), sinon un élargissement du profil est nécessaire (figure 4.4). L'ensemble des profils identifiés comme insuffisamment larges feront l'objet :

- d'un élargissement en rive gauche, en rive droite ou les deux en respectant le paramétrage fixé (Cf. §4.1.3) ;
- d'une reprise des actions de la première phase (positionnement et extraction des caractéristiques topographiques).

Ensuite un nouveau calcul hydraulique a lieu sur l'ensemble des profils en travers, et une nouvelle itération a lieu si certains profils restent à élargir.

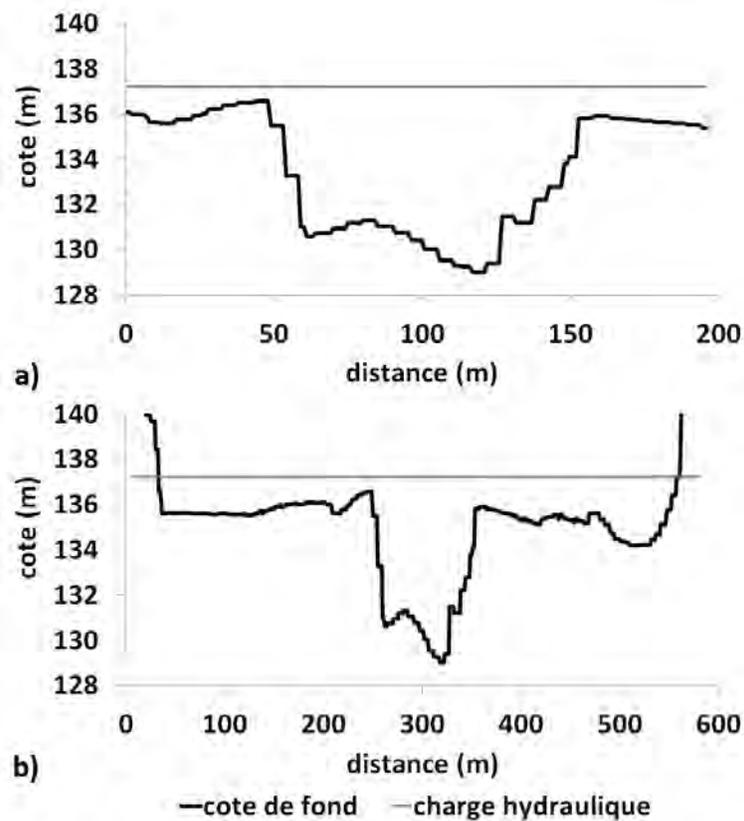


FIGURE 4.4 – Profil en travers avec sa charge hydraulique, a) en cours de construction et b) terminé

La dernière phase exécute une succession de fonctions SIG dans le but :

- d'exporter les profils en travers finaux sous forme de vecteur ;
- d'interpoler les cotes d'eau entre les différents profils et de créer une couche raster des hauteurs d'eau, en fonction des valeurs d'altitude fournie par le MNT.

L'information finale indique la hauteur d'eau simulée au droit de chaque pixel : un exemple est présenté sur la figure 4.1 pour une surface inondée correspondant à un débit millénal.

Reprise des calculs

Cette dernière étape est facultative mais fortement recommandée ; elle fait appel aux compétences d'expertise de l'utilisateur. Elle lui offre la possibilité de modifier la position et la largeur des profils définis, puis d'exécuter de nouveau une série de calculs hydrauliques. Les hauteurs d'eau sont à nouveau calculées puis des rasters de hauteurs d'eau déduits. Il est également possible de modifier les débits injectés ou d'attribuer un coefficient de rugosité plus fort dans le modèle au cours de cette étape. En revanche, le travail itératif d'élargissement des profils n'est pas repris au cours de cette étape.

Cette dernière étape donne donc la possibilité d'agir sur les modalités de calcul initialement proposées par CARTINO.

4.1.3 Le paramétrage du modèle

Les paramétrages du modèle sont décrits dans une notice technique rédigée par le CEREMA (Alquier et al., 2013). Certains paramètres doivent être modifiés, afin de répondre à l'environnement de l'utilisateur ou à la résolution et au nom des données d'entrée.

D'autres paramètres sont considérés comme optionnels : ils offrent la capacité à l'utilisateur d'adapter les modalités du calcul au cours des différentes étapes (Cf. §4.1.2), dont :

- l'espacement entre deux profils (DPNC). Cet espacement correspond à un pourcentage de la distance entre le réseau hydrographique et l'enveloppe initiale. Ce ratio constitue le premier paramètre à définir. L'espacement est également borné par deux autres paramètres indiquant les distances minimale et maximale entre profils. La première itération permet d'appliquer un paramétrage spécifique de l'espacement entre profils (Cf. tableau 4.1) ;
- la vitesse d'élargissement des profils, dont le réglage est également fixé par trois paramètres : pourcentage de la distance entre réseau hydrographique et enveloppe donnant une valeur d'élargissement par défaut, et valeurs minimales et maximales d'élargissement en mètres (Cf. tableau 4.1) ;
- le coefficient de rugosité du lit. Ce coefficient est unique et identique pour le lit mineur et le lit majeur ;
- le nombre maximal d'itérations effectuées pour élargir les profils.

Tableau 4.1 – Paramétrage initial de la méthode CARTINO

Paramétrage initial	ratio	minimum (m)	maximum (m)
élargissement 1er tour	0,33	5	50
élargissement tour suivant	0,2	10	150
DPNC	0,33	10	500

À la fin du premier cycle de calculs, l'enveloppe de la zone inondable obtenue est utilisée comme enveloppe initiale pour les calculs du cycle suivant.

4.1.4 Les limites et les difficultés identifiées pour l'application visée dans la thèse

CARTINO a été initialement utilisé pour la cartographie des événements extrêmes, lors de l'application de la Directive Européenne Inondation 2007/60/CE¹.

Il a par exemple été exploité pour la cartographie des zones inondables du TRI d'Alès (DREAL, 2013e), en adoptant un paramétrage adapté aux objectifs fixés et en mobilisant une expertise importante pour l'optimisation des résultats (DREAL, 2013d). Au cours de cette expertise, les limites suivantes ont été identifiées :

- l'outil CARTINO s'appuie sur une modélisation hydraulique 1D, rendant les calculs complexes dans les zones de plaines en toit, de lits perchés et de rivières avec plusieurs chenaux ;
- la bathymétrie n'étant pas intégrée aux données topographiques, une surestimation des cotes de charge est envisageable tout particulièrement dans les gammes des faibles débits ;
- les ouvrages hydrauliques, influençant les écoulements, ne sont pas parfaitement identifiés par les données topographiques ce qui complexifie la modélisation des premiers débordements ;
- la méthode CARTINO comporte une succession d'étapes impliquant des interventions manuelles. L'utilisateur profite de ces interventions pour y apporter une expertise. Celle-ci accroît considérablement les temps de modélisation.

Finalement, l'usage de l'outil CARTINO visé lors de la thèse diffère significativement de l'application initiale effectuée dans le cadre de la Directive Européenne Inondation. De façon à pouvoir effectuer des simulations pour une large gamme de débits et sur un grand linéaire de cours d'eau, les principales évolutions nécessaires sont les suivantes :

- permettre un calcul limité au lit mineur pour représenter les faibles débits ;
- optimiser les temps de calculs et le nombre d'étapes intermédiaires ;
- réduire le nombre d'interventions manuelles entre chacune des étapes.

1. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000523817&dateTexte=>

4.2 Adaptation de l'outil CARTINO PC

Cette partie présente l'adaptation proposée de la méthode CARTINO, en limitant l'expertise de l'utilisateur, pour permettre la modélisation de l'étendue des surfaces inondées sur des échelles géographiquement larges et pour des débits de forte fréquence (type biennal ou supérieur).

4.2.1 Substitution des données sources du modèle

Sélection d'un réseau hydrographique

La construction du réseau hydrographique sous CARTINO, initialement réalisée à partir d'une enveloppe EXZECO, s'est avérée adaptée aux besoins définis dans le cadre de la Directive Européenne Inondation, à savoir la modélisation des événements de fréquence rare. Toutefois, la position de ce réseau "simplifié" ne se superpose pas à la position réelle du lit mineur hydrogéomorphologique (figure 4.5).

Lorsque l'on s'intéresse à des faibles débits, la position du réseau hydrographique est déterminante pour pouvoir positionner des profils en travers perpendiculaires aux directions d'écoulements en lit mineur. Si ces profils représentent correctement les méandres et les changements de direction du réseau hydrographique, ils permettront une modélisation de l'étendue des surfaces inondées de meilleure qualité.

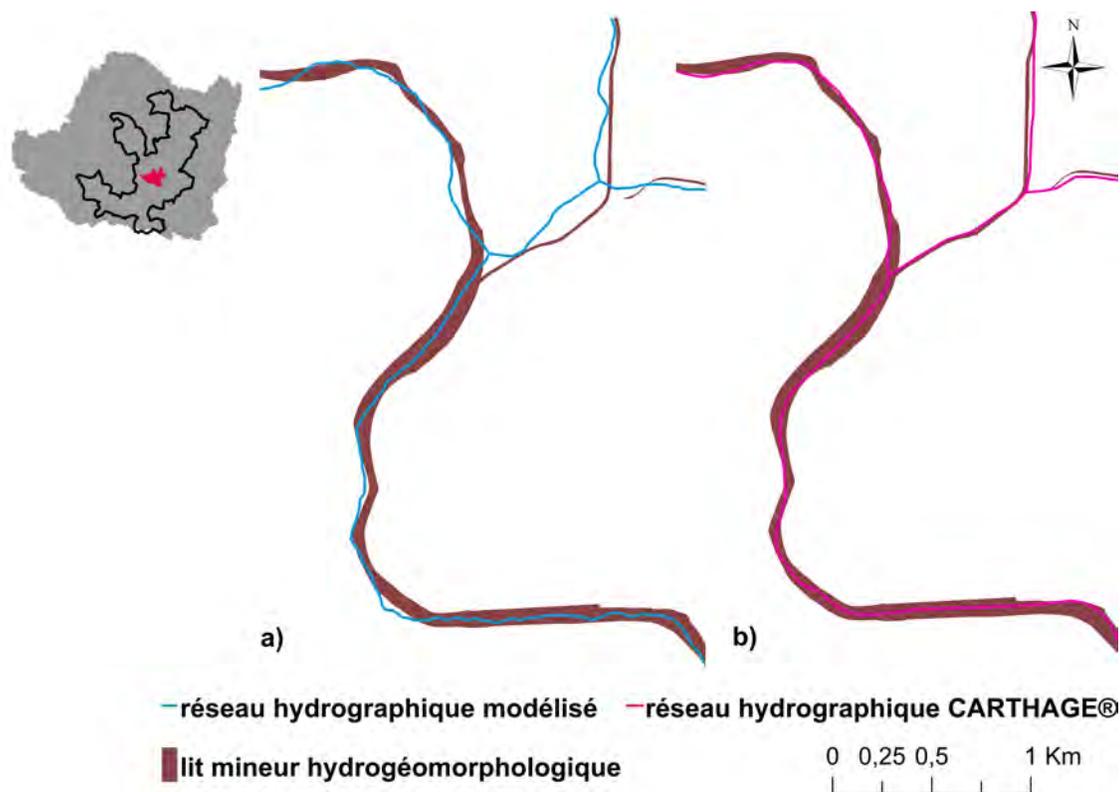


FIGURE 4.5 – Illustration des différences spatiales entre le lit mineur hydrogéomorphologique de la DREAL Languedoc-Roussillon et le réseau hydrographique a) modélisé par CARTINO à partir d'une emprise EXZECO, b) provenant de la base de données CARTHAGE®

Pour cette raison, l'application de CARTINO réalisée ici s'est basée sur le réseau hydrographique CARTHAGE® (Cf. §3.3.2). La position de ce dernier se superpose davantage au lit mineur par rapport au réseau hydrographique généré à partir de l'enveloppe initiale EXZECO (figure 4.5).

Choix de l'enveloppe initiale

La forme de l'enveloppe inondable initiale, combinée à un paramétrage fixé (Cf. §4.1.3), influent sur l'espacement entre les profils et leur largeur initiale. En s'appuyant sur l'enveloppe initiale EXZECO et le paramétrage initial de CARTINO, la première largeur proposée dépasse généralement largement celle du lit mineur, alors que les débits pourraient parfois y être contenus (figure 4.6). Ceci peut occasionner un remplissage inopportun par le modèle hydraulique de dépressions situées hors du lit mineur.

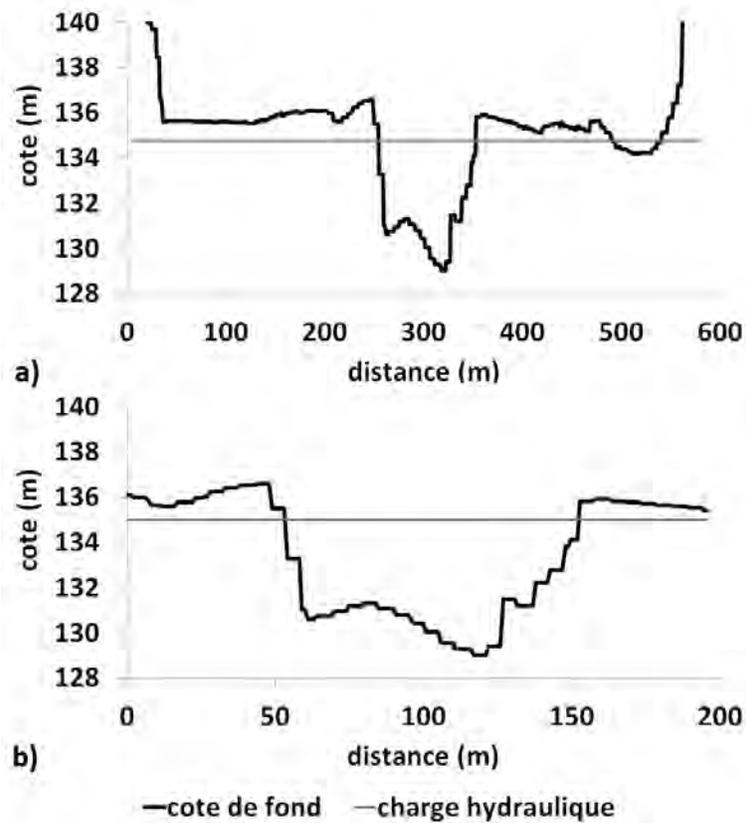


FIGURE 4.6 – Construction d'un profil en travers avec sa charge hydraulique simulée, a) sans contrainte spatiale et b) centré sur le lit mineur

Pour compenser ces conséquences, le choix a été fait de remplacer l'enveloppe EXZECO par une autre source de données avec pour objectif de partir d'une enveloppe initiale plus étroite afin d'éviter une largeur initiale trop importante des profils. Une zone tampon d'un mètre autour du réseau hydrographique CARTHAGE® a ainsi été retenue en guise d'alternative.

4.2.2 Adaptation des paramètres du modèle

Les adaptations proposées du paramétrage CARTINO se focalisent sur la manière d'élargir les profils et la distance acceptable d'un profil à l'autre. Le choix du coefficient de rugosité (ou coefficient de Strickler) a été fixé à $K = 20$, valeur définie en fonction des retours d'expériences sur les dernières crues-éclair (Lumbroso and Gaume, 2012).

Toutefois, une étude de l'influence du coefficient de rugosité sur les résultats sera présentée ultérieurement dans ce chapitre (Cf §4.4.1).

Élargissement des profils

La substitution de l'enveloppe initiale ne suffit pas à répondre pleinement aux objectifs visés : les profils obtenus sont en effet souvent élargis au delà du lit mineur lors des simulations pour des faibles débits (figure 4.6(a)). Cet élargissement exagéré entraîne parfois une connexion indésirable avec les dépressions présentes dans le lit majeur, alors que le lit mineur a une section suffisante pour faire passer l'ensemble du débit (figure 4.6(b)). Pour éviter cet effet, il faut parvenir à stopper l'élargissement au niveau des rives du lit mineur.

Afin de solutionner cette difficulté, il est apparu préférable de modifier le paramétrage de CARTINO, de façon à élargir les profils plus progressivement, afin de bien détecter les berges du lit mineur pour les débits à forte fréquence (PDR 2 à 10 ans) pouvant s'écouler entre les berges. Avec le paramétrage présenté dans le tableau (Cf. tableau 4.2), le profil est élargi petit à petit à chaque itération afin de ne pas dépasser soudainement les éléments de topographie comme les berges ou éventuellement des ouvrages de protection contre les inondations (digues).

Tableau 4.2 – Paramétrage retenu pour l'élargissement des profils

Paramétrage modifié	ratio	minimum (m)	maximum (m)
élargissement 1er tour	0,05	0,1	1
élargissement tour suivant	0,1	1	10

La conséquence principale de ce nouveau paramétrage est l'augmentation du nombre d'itérations nécessaires à l'élargissement des profils, en particulier en zone de plaines inondables. Parallèlement, ce choix permet d'assurer une meilleure qualité des modélisations pour les faibles débits.

Distance entre les profils

L'augmentation du nombre de profils permet en théorie de mieux représenter les variations de forme du lit du cours d'eau, mais elle accroît en parallèle les temps de calculs, et elle peut même dans certains cas détériorer la qualité des surfaces inondées modélisées (figure 4.7(a)). En effet, les ponts et ouvrages traversant les cours d'eau peuvent rester visibles sur les données topographiques utilisées (Cf. §3.3.1). Concrètement, l'information topographique au droit d'un pont peut correspondre au tablier du pont, ce qui a pour effet de supprimer localement et artificiellement l'information relative à la section d'écoulement et génère un effet de remous à l'amont (figure 4.8).

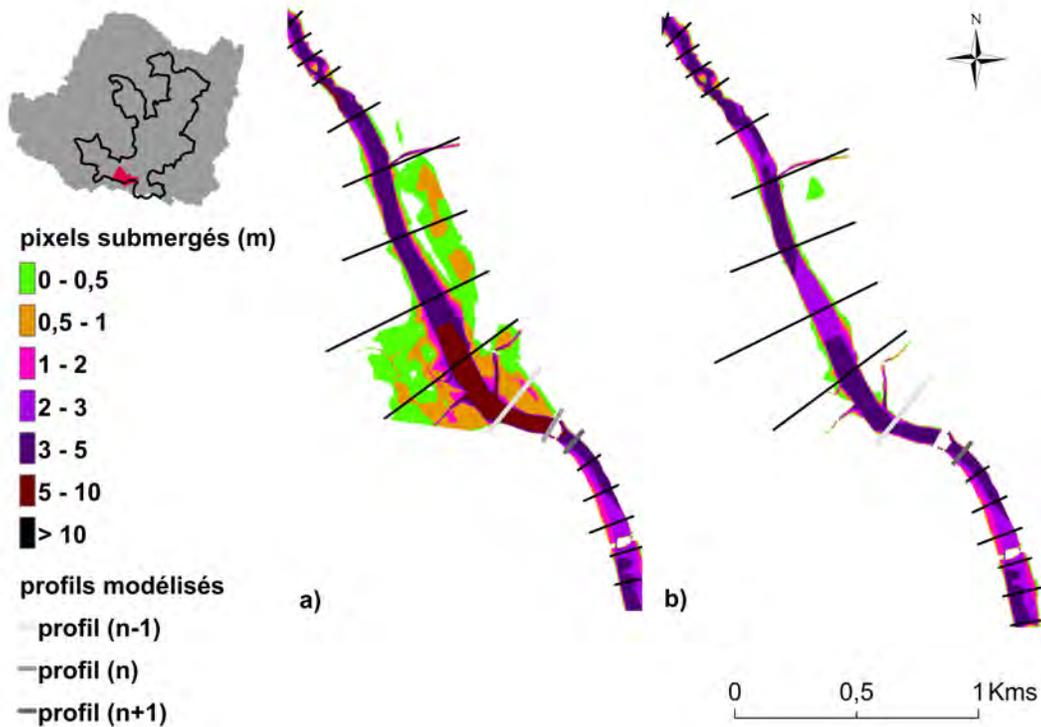


FIGURE 4.7 – Les effets d'un profil positionné au droit d'un pont dont le tablier apparaît dans le MNT, (a) au cours de l'étape des calculs hydrauliques, (b) au cours de l'étape de reprise des calculs en l'absence du profil "n"

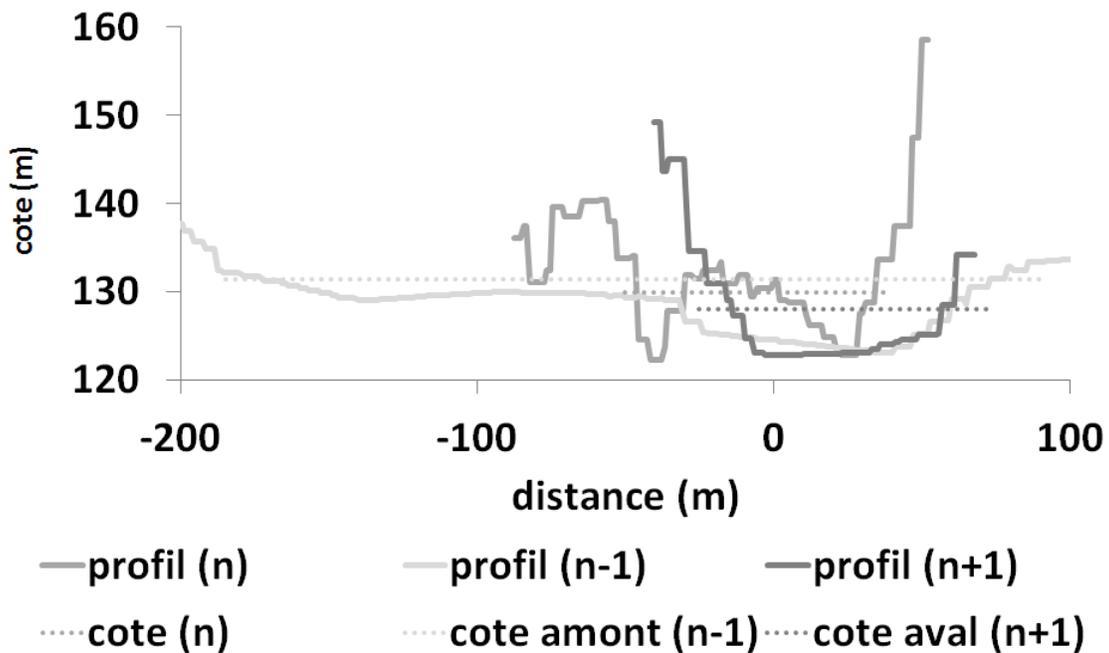


FIGURE 4.8 – Impact d'une réduction artificielle de la section d'écoulement dans un profil sur la hauteur d'eau simulée et la largeur du profil en amont

Les conséquences de cette réduction artificielle de la section d'écoulement impliquent des modifications en amont sur les vitesses d'écoulement, la superficie de la section mouillée et la hauteur d'eau simulée (Cf. tableau 4.3).

Il est possible de pallier ce problème en déplaçant ou supprimant ces profils indésirables sous SIG et d'exécuter l'étape CARTINO de reprise des calculs (figure 4.7(b)).

On peut remarquer que les résultats des caractéristiques du profil en amont sont très différentes suite à cette modification (Cf. tableau 4.4).

Tableau 4.3 – *Caractéristiques des profils à l'amont (n-1) et à l'aval (n+1) du profil dont la section d'écoulement est artificiellement réduite (n)*

	profil amont (n-1)	profil (n)	profil aval (n+1)
vitesse (m ² /s)	0,78	5,71	2,47
surface mouillée (m ²)	859,04	118,1	272,57
cote de fond (m NGF)	123	122,25	122,75
cote d'eau (m NGF)	131,31	128,25	127,64

Tableau 4.4 – *Caractéristiques des profils amont et aval suite à l'étape de reprise des calculs en absence du profil indésirable*

	profil amont (n-1)	profil aval (n+1)
vitesse (m ² /s)	1,91	2,5
surface mouillée (m ²)	352,11	269,84
cote de fond (m NGF)	123	122,75
cote d'eau (m NGF)	128,44	127,64

Ces manipulations supplémentaires ne répondent pas aux objectifs d'automatisation de la procédure de réduction des temps de calculs.

En augmentant la distance entre les profils en travers (Cf. tableau 4.5), les temps de calculs sont optimisés en raison de la réduction du nombre de profils nécessaires à la couverture du réseau hydrographique et de la diminution des probabilités de modéliser des profils au droit d'un pont.

Tableau 4.5 – *Modification du paramétrage contrôlant la distance entre les profils*

DPNC	ratio	minimum (m)	maximum (m)
paramétrage modifié	0,75	30	300

Par ailleurs, bien que l'espacement plus important des profils ne permette pas de représenter aussi fidèlement les variations de forme et de direction du lit mineur, cette modification du paramétrage ne semble pas nuire significativement à la bonne représentation des zones inondées au niveau des méandres (figure 4.9).

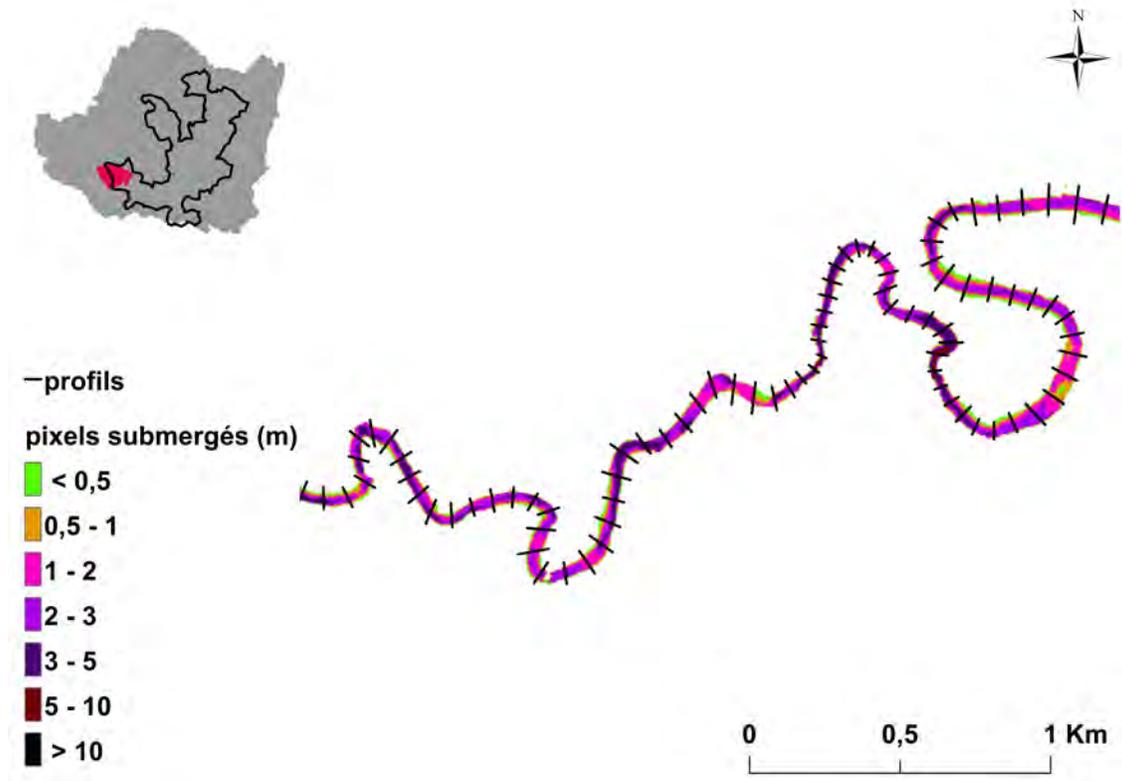


FIGURE 4.9 – Optimisation du nombre de profils nécessaire à la couverture du réseau hydrographique : cas d'un méandre en tête de bassin versant

4.2.3 Modification des étapes de traitement

Le fait d'exploiter le réseau hydrographique CARTHAGE® et sa zone tampon d'un mètre permet de se passer de la phase de modélisation d'un réseau hydrographique à partir d'une enveloppe.

L'orientation du réseau hydrographique reste en revanche à effectuer et peut s'appuyer sur l'information sur les surfaces drainées fournies par les données EXZECO (Cf §4.1.2). Ces informations peuvent également être remplacées par des données hydrologiques (quantiles de débits) ou topographiques (MNT) de façon à réduire les sources de données utilisées en entrée du modèle (les données EXZECO n'étant alors plus utilisées).

Les résultats des modélisations effectuées à partir de la combinaison de nouvelles données (réseau hydrographique et enveloppe initiale), du nouveau paramétrage (élargissement et DPNC) et de modification des étapes de traitements répondent davantage aux objectifs :

- de représenter correctement les écoulements en lit mineur en limitant l'élargissement des profils ;
- d'optimiser les temps de calculs par la diminution du nombre de profils modélisés.

4.2.4 Identification automatique des profils à reprendre

Malgré les efforts d'adaptation des données d'entrée et des paramètres de CARTINO, des centaines d'erreurs de modélisation persistent dont quelques profils situés aux droits d'ouvrages du génie civil et générant artificiellement des remous, qu'on nommera profils indésirables par la suite (figure 4.7 (a)).

La phase de reprise des calculs est inévitable, consistant tout d'abord à supprimer les profils indésirables à l'origine de ces remous, puis à ré-effectuer des calculs hydrauliques sur l'ensemble des profils en tenant compte des modifications éventuelles.

La suppression des profils indésirables corrige les anomalies identifiées et rétablit des écoulements normaux dans le lit mineur, si celui-ci est en capacité de contenir le débit (figure 4.7 (b)). Toutefois, cette étape est chronophage puisqu'elle demande une identification de l'ensemble des profils problématiques.

À partir des caractéristiques hydrauliques obtenues sur chaque profil à l'issue des premiers calculs, il est néanmoins possible d'automatiser la procédure d'identification des profils indésirables impactant le bon déroulement des calculs hydrauliques.

La surface mouillée de la section du profil est régie par la vitesse et le débit (Degoutte, 2012). Une diminution brutale de cette surface d'un profil amont ($n-1$) vers un profil aval (n) influe sur le régime d'écoulement.

En s'appuyant sur ce principe, une liste des profils pour lesquels la surface mouillée du profil amont dépasse de plus de 200% celle du profil considéré est établie, ce qui revient à appliquer la formule de sélection suivante (4.1) :

$$\frac{S_{(n-1)} - S_{(n)}}{S_{(n)}} > 2 \quad (4.1)$$

où S_n est la surface mouillée associée au profil n .

Ensuite, ces profils sélectionnés sont visualisés pour confirmer leur exclusion avant la reprise des calculs hydrauliques.

À titre d'illustration, dans l'étude de cas menée sur le TRI d'Alès, le réseau hydrographique est couvert par 5005 profils au cours de la simulation biennale. Sur ce lot de profils simulés, 128 (2,56%) sont identifiés : parmi eux 44 (0,88%) font finalement l'objet d'une suppression après vérification visuelle.

Les profils conservés se localisent généralement à proximité des confluences, zones où la largeur du profil amont couvre le cours d'eau principal et la confluence, d'où les diminutions de section à l'aval de la confluence (figure 4.10). Ces types de profils sont anormaux, ils représentent une limite de la méthode. Toutefois, ils génèrent des erreurs de nature différente de celles auxquelles nous nous intéressons ici (remous dus à une réduction artificielle de la section d'écoulement).

Après élimination des profils indésirables sur l'ensemble du réseau hydrographique, l'étape de reprise des calculs hydrauliques est réalisée pour obtenir de nouvelles surfaces inondées qui feront abstraction des difficultés rencontrées précédemment.

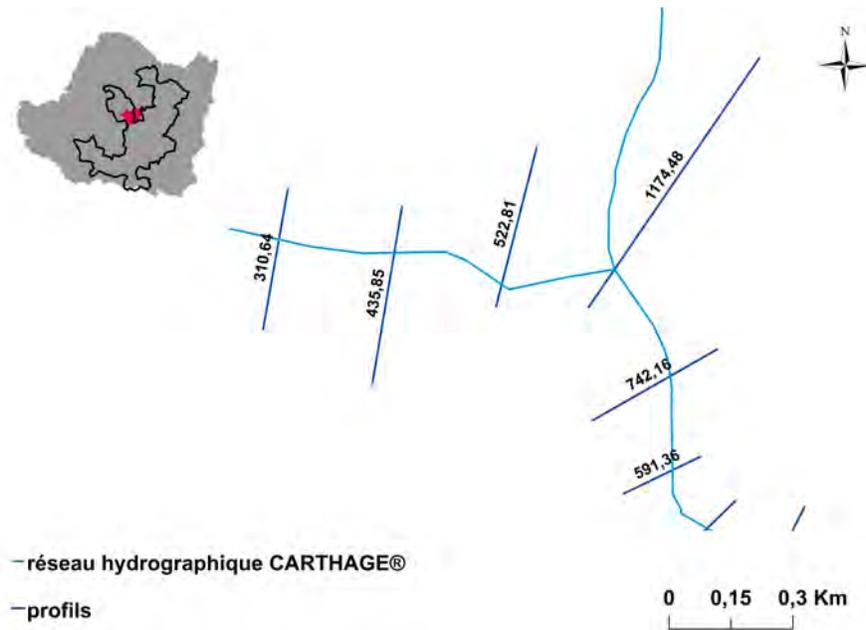


FIGURE 4.10 – Série de profils modélisés à proximité d'une confluence. Les sections mouillées sont indiquées en m^2

4.2.5 Élimination des surfaces inondées déconnectées du lit mineur

Malgré l'ensemble des modifications et des adaptations apportées à l'outil CARTINO, les résultats de calcul de l'étendue des surfaces inondées pour le débit biennal comportent toujours des secteurs inondés déconnectés du lit mineur (figure 4.11(a)). Poulin et al. (2012)

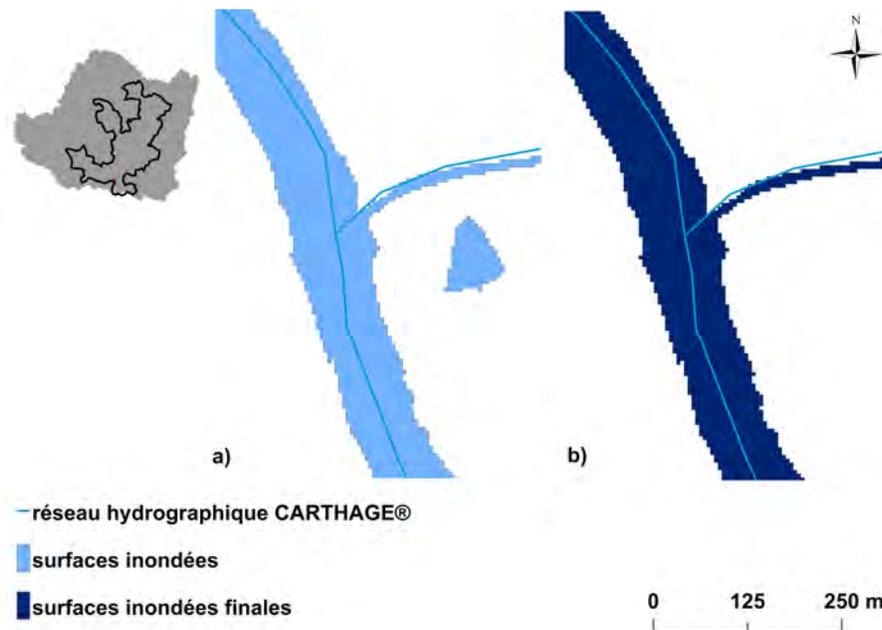


FIGURE 4.11 – Surfaces inondées modélisées sous CARTINO (a) avec une surface en eau déconnectée, (b) sans surface en eau déconnectée

proposent une méthode de suppression de ces surfaces déconnectées du lit mineur. De la même manière, le choix a été fait ici de s'affranchir des surfaces inondées déconnectées du réseau hydrographique CARTHAGE® (figure 4.12).

Ainsi, toutes les surfaces non intersectées par le réseau hydrographique CARTHAGE® ont été exclues des surfaces simulées. L'étendue des surfaces inondées retenue est ainsi nettoyée d'une partie des artefacts inhérents au fonctionnement de CARTINO (figure 4.11(b)).



FIGURE 4.12 – Méthode de suppression des surfaces inondées déconnectées du lit mineur, d'après Poulin et al. (2012)

4.3 Constitution d'un catalogue d'emprises inondées

À l'échelle du TRI d'Alès, le catalogue des surfaces inondées a été constitué à partir de dix simulations pour les périodes de retours 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500 et 1000 ans. Les calculs débutent avec les débits de fortes fréquences (PDR 2 ans) vers ceux de faibles fréquences (PDR 1000 ans).

4.3.1 Paramétrage de CARTINO

Les travaux de modélisations hydrauliques distinguent deux types de lits, mineur et majeur, de forme analogue à l'approche hydrogéomorphologique (figure 4.13).

Les débits de débordement hors du lit mineur ne peuvent pas être rattachés à une période de retour précise. Toutefois, les limites de la crue centennale se rapprochent systématiquement de l'étendue du lit majeur d'après les différents retours d'expériences (Ballais et al., 2011).

En s'appuyant sur ces éléments pour la constitution du catalogue d'emprises inondées, les modalités d'utilisation et les paramétrages de CARTINO ont été définis de deux manières :

- en prenant en compte toutes les modifications décrites au paragraphe 4.2, pour les débits faibles ; cas où l'étendue des surfaces inondées submerge partiellement ou totalement le lit mineur ($< \text{PDR } 100 \text{ ans}$) ;
- en reprenant des valeurs de paramètres d'élargissement des profils identiques à celles qui avaient été fixés pour la cartographie des événements de fréquence rare dans le cadre de la Directive Européenne Inondation ; cas où l'étendue des surfaces inondées se rapproche de l'étendue du lit majeur ($\geq \text{PDR } 100 \text{ ans}$).

La première manière d'utiliser CARTINO est adaptée pour représenter progressivement l'augmentation du niveau de l'eau dans le lit mineur jusqu'aux premiers débordements.

Cependant, cette méthode génère une augmentation importante des temps de calculs ($\times 3$) par rapport à la méthode proposée dans le cadre de la la Directive Européenne Inondation,

d'où l'intérêt de basculer sur le second paramétrage afin d'optimiser les temps de calculs, lorsque les étendues inondées atteignent le lit majeur.

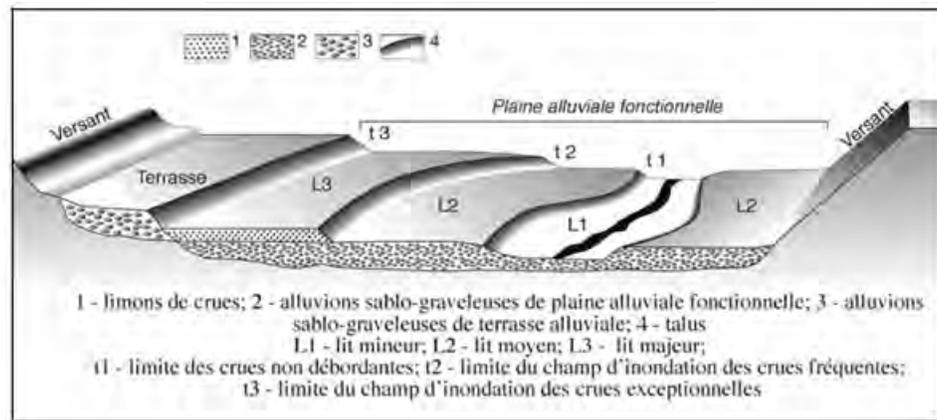


FIGURE 4.13 – Distinction des lits hydrogéomorphologiques, d'après *Ballais et al. (2005)*

4.3.2 Valorisation des surfaces inondées précédemment modélisées

Chaque surface inondée obtenue est réutilisée à deux reprises pour la modélisation du débit supérieur.

Elle est d'abord utilisée comme enveloppe initiale pour la construction des profils, diminuant ainsi le nombre d'itérations nécessaires (Cf. §4.2.2).

Ensuite dans un souci de cohérence entre les simulations, les étendues des surfaces inondées obtenues avec la période de retour inférieure ont été systématiquement intégrées à l'étendue des surfaces inondées issue de la nouvelle simulation.

4.4 Évaluation des hauteurs d'eau et des surfaces modélisées

Dans ce paragraphe, deux évaluations vont être présentées sur la qualité des simulations effectuées avec CARTINO pour aboutir au catalogue d'emprises inondées.

Dans un premier temps les hauteurs d'eau simulées pour les différents débits seront confrontées aux courbes de tarage établies au droit des stations de jaugeage recensées sur la zone d'étude (Cf. §3.3.4).

Par la suite, les surfaces inondées obtenues feront l'objet de comparaisons à des données observées et expertisées afin d'évaluer leur fiabilité (*Herold and Mouton, 2011, Chang et al., 2014, Laganier et al., 2014, Nguyen et al., 2015a, Wei, 2015, Merkuryeva et al., 2015, Kvočka et al., 2015*). Les cartographies réalisées sur le TRI d'Alès dans le cadre de la Directive Européenne Inondation seront utilisées comme référence.

4.4.1 Comparaison avec les courbes de tarage des stations hydro-métriques

Les valeurs de hauteurs/débits simulées (dénommées ci-après HQsim) au niveau des profils situés à proximité des stations hydrométriques (Cf. §3.3.4) ont été comparées aux

hauteurs/débits de référence (dénommées ci-après HQref) issus des courbes de tarage.

Les données hauteurs/débits simulées ont été interpolées linéairement lorsque cela a été nécessaire entre les profils simulés en amont et en aval de chaque station (figure 4.14).

Les différences notables entre les valeurs de références et celles simulées peuvent provenir :

- de l'incertitude des mesures de débits (jaugeages) ;
- des incertitudes associées à la courbe de tarage liée à l'interpolation entre les différents points de jaugeage et à l'extrapolation au-delà du plus haut jaugeage connu (Singh et al., 2013) ;
- des différences de localisation entre les profils de référence au droit des stations et ceux simulés par l'outil CARTINO (figure 4.14) ;
- des discordances topographiques entre les profils relevés sur le terrain et ceux modélisés à partir du jeu de données topographiques sélectionné (Cf. §3.3.1)
- de la valeur du coefficient de rugosité trop différente de celui défini génériquement sous l'outil CARTINO (Kvočka et al. (2015), Cf. §3.2.3 et §4.2.2) ;
- plus généralement, de la validité des hypothèses hydrauliques à la modélisation 1D effectuée par CARTINO.

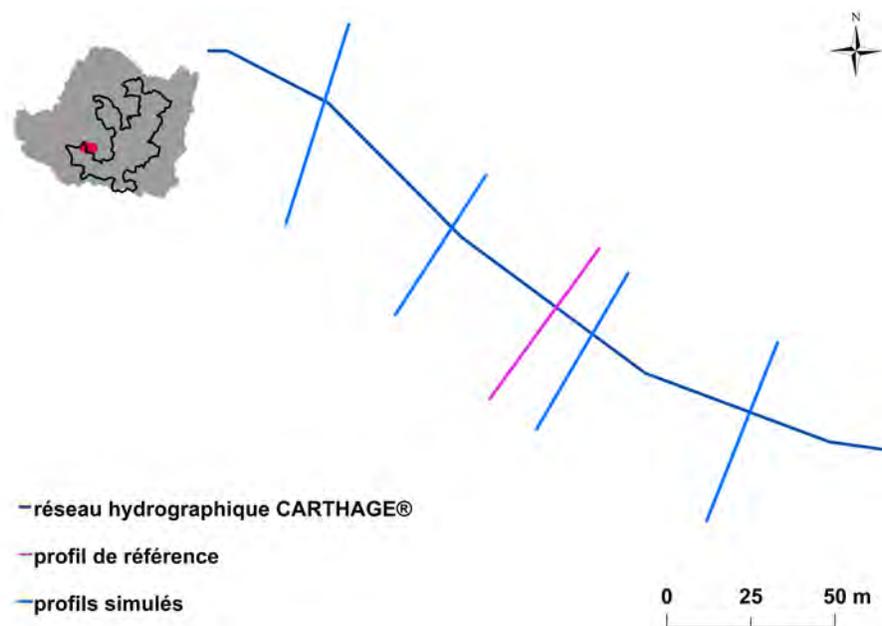


FIGURE 4.14 – Localisation des profils utilisés pour les calculs hydrauliques et du profil de référence de la station de Mialet

Cas de la station de Mialet

Les HQsim à la station hydrométrique de Mialet font l'objet d'une comparaison avec la courbe de tarage disponible. Les valeurs de HQsim s'avèrent très proches en particulier pour les plus faibles débits (<1000 m³/s) ; à tel point qu'elles se superposent avec la partie extrapolée de la courbe de tarage (figure 4.15). Le cas de Mialet est le premier à montrer ce niveau de proximité entre la courbe de tarage et les HQsim dans la gamme des faibles débits.

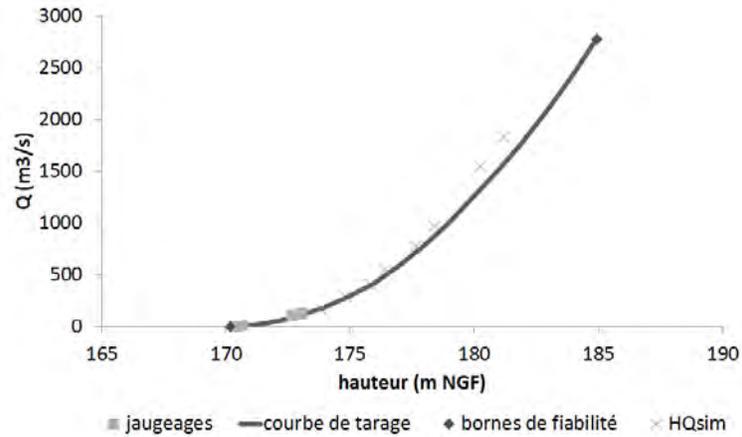


FIGURE 4.15 – Courbe de tarage de la station hydrologique de Mialet et les HQsim

Le coefficient de rugosité est fixé à 18 pour la modélisation de la courbe de tarage (extrapolée par modélisation hydraulique), valeur légèrement plus basse que celle employée de manière générique sur la zone d'étude. Les discordances observées entre les fortes valeurs de HQsim et la partie extrapolée de la courbe de tarage peuvent provenir de cette différence de coefficient de rugosité.

Les profils en travers simulés par CARTINO à partir de trois jeux de données topographiques représentent correctement le profil de référence de la DREAL Rhône-Alpes-Auvergne qui gère la station (figure 4.16). Ces résultats peuvent s'expliquer par une bonne qualité générale des données topographiques dans le secteur, probablement liée à l'environnement dégagé de toute végétation et à la morphologie simple du lit.

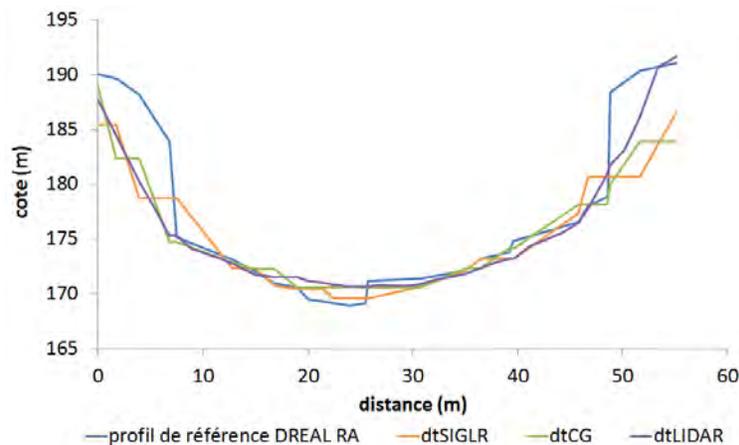


FIGURE 4.16 – Comparaison du profil de référence vis-à-vis de profils simulés par CARTINO à partir de trois jeux de données topographiques différents au droit de la station de Mialet

La station de Mialet semble finalement présenter un environnement favorable à une modélisation hydraulique 1D de bonne qualité à partir de l'outil CARTINO. Les résultats des simulations sont conformes aussi bien du point de vue du profil simulé que des valeurs des hauteurs/débits simulées pour toute la gamme des débits.

Cas de la station de Corbès

Au niveau de la station hydrométrique de Corbès, les dix valeurs de hauteurs/débits simulées avec CARTINO sont comparées à la courbe de tarage disponible sur la figure 4.17. La majorité de ces valeurs simulées ne sont pas couvertes par la courbe de tarage à l'exception des trois premières, qui correspondent aux débits biennal, quinquennal et décennal. Le débit biennal donné par la base de données SHYREG est de $280 \text{ m}^3/\text{s}$, très proche du plus haut débit jaugé (Cf. §3.3.4).

De plus, le profil en travers simulé par CARTINO au droit de la station à partir du MNT du Conseil Général présente une cote de fond du lit proche de celle du profil de référence, même si la démarcation des différents lits n'est pas bien représentée. Le cas de Corbès illustre la qualité suffisante du MNT (résolutions planimétrique et altimétrique) pour l'identification du profil en travers du lit mineur (figure 4.18).

Le profil en long illustre une stabilité forte du fond du lit et une évolution progressive de la cote de la ligne d'eau entre les simulations effectuées (figure 4.19). Ces bons résultats confirment, en grande partie, de la forme du lit simple dans le secteur. Malgré cela, les résultats des autres simulations (débits supérieurs au débit décennal) restent cohérents avec la courbe de tarage disponible.

Par ailleurs, cette surestimation des trois premières valeurs de hauteur/débit simulées, les hauteurs simulées ne permettent pas de débordements au droit de la section de référence (figures 4.17 et 4.18).

À Corbès, les résultats obtenus, sans être parfaits, s'avèrent donc plutôt rassurants sur le mode opératoire adopté pour la modélisation des hauteurs/débits avec CARTINO.

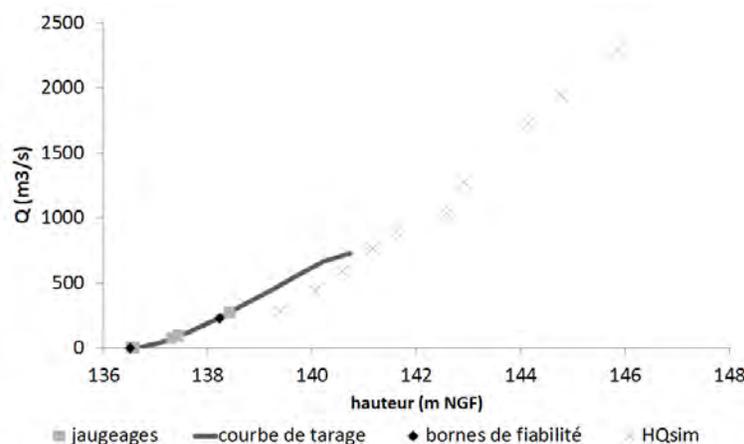


FIGURE 4.17 – Courbe de tarage de la station hydrologique de Corbès et les valeurs des hauteur/débit simulées

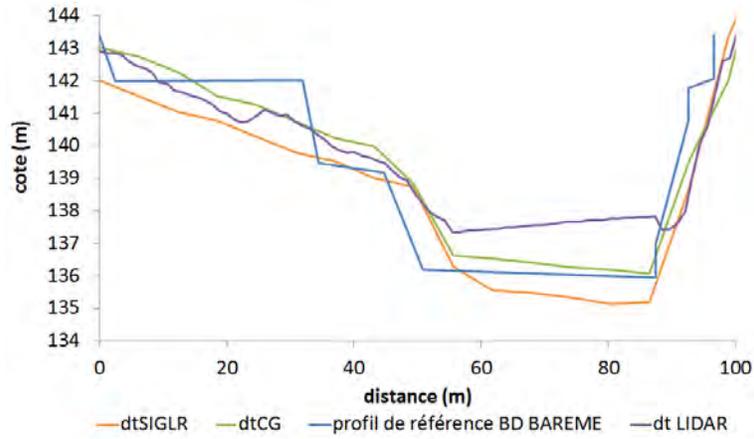


FIGURE 4.18 – Comparaison du profil de référence aux profils simulés avec CARTINO au droit de la station de Corbès

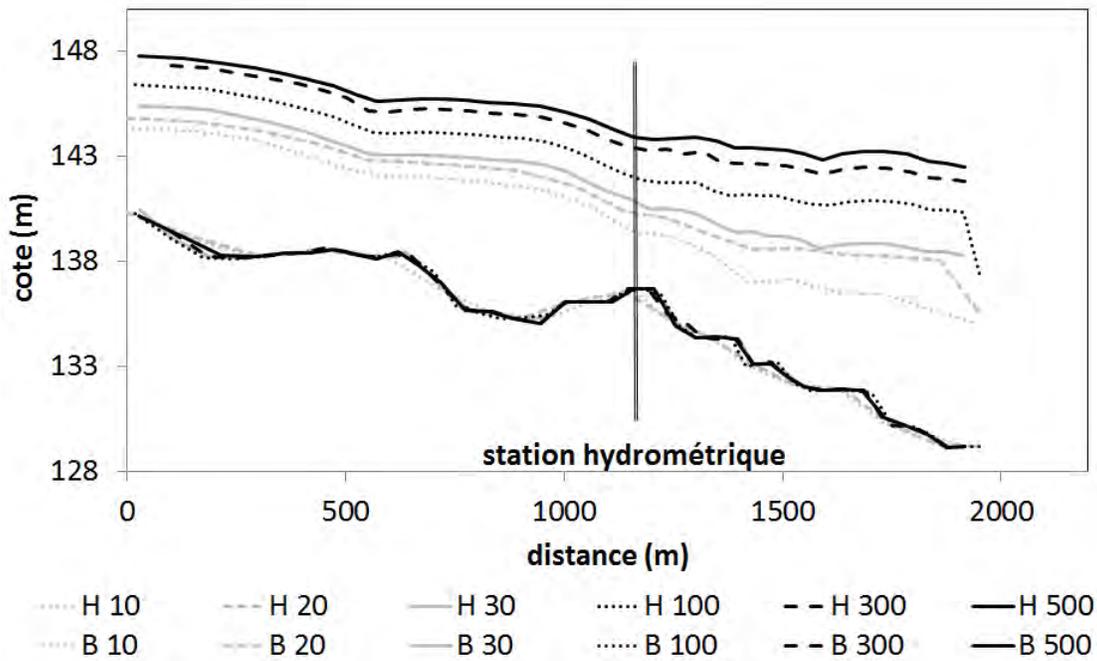


FIGURE 4.19 – cotes de fond (B) et Hsim (H) le long de la station hydrologique de Corbès

Cas de la station de Banne

Les valeurs de hauteurs/débits simulées au droit de la station de Banne ont été comparées avec la courbe de tarage. Il s'avère que l'ensemble de ces valeurs simulées sous CARTINO se situe exclusivement au-delà de la partie extrapolée de la courbe de tarage (figure 4.20).

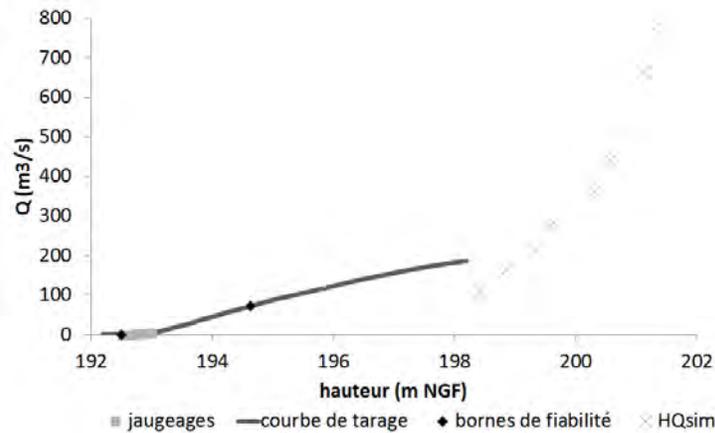


FIGURE 4.20 – Courbe de tarage de la station hydrologique de Banne et les valeurs de hauteur/débit simulées avec CARTINO

Les profils simulés au droit de la station ne concordent pas avec le profil de référence (figure 4.21). Ces discordances non négligeables atteignent des différences de cote de l'ordre de 2 mètres avec celles de référence. Ces différences peuvent provenir :

- de données topographiques erronées (dtCG et dtSIGLR) ;
- d'un profil de référence effectué en aval de la station ;
- d'une erreur réalisée au cours du lever de référence ;
- d'un problème de conversion des valeurs relatives (cm) en valeurs absolues (m NGF) introduisant une erreur systématique.

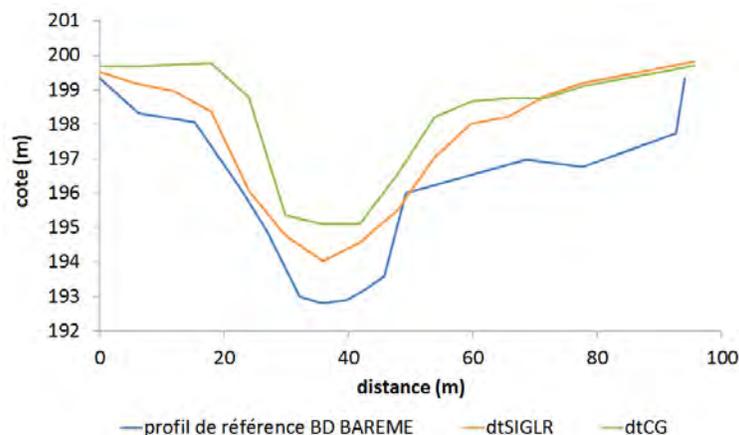


FIGURE 4.21 – Comparaison du profil de référence aux profils simulés au droit de la station de Banne

La première hypothèse semble de loin la plus plausible : la végétation aux abords du lit mineur est dense et elle empêche un lever photogrammétrique de haute précision, du moins au niveau des berges. Les données topographiques n'arrivent probablement pas à dissocier de manière absolue la cime des végétaux du sol. Cependant, cette raison n'explique pas la différence relevée entre les deux jeux de données topographiques (supérieure à 1 m).

Les deux hypothèses suivantes paraissent peu probables : suite à plusieurs échanges avec les services de la DREAL Rhône-Alpes-Auvergne, en charge de la gestion et la maintenance des différentes stations de jaugeages, ont permis de confirmer la bonne qualité du profil de référence.

Toutefois, la courbe de tarage ne semble pas en cohérence avec le profil de référence (figures 4.21 et 4.20). Effectivement, la variation de la section mouillée est importante entre les hauteurs 196 et 198 mètres. Un débordement majeur est visible entre ces deux cotes au niveau du profil de référence (figure 4.22).

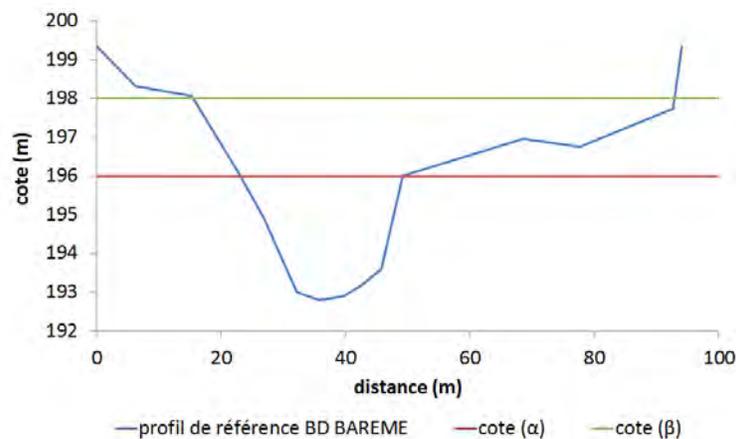


FIGURE 4.22 – Observation de la variation de la section mouillée lors du débordement en lit majeur à Banne

Ce débordement n'implique aucune modification de la pente sur la partie extrapolée de la courbe de tarage entre les cotes α et β sélectionnées (figure 4.20) ; renforçant l'incohérence entre les données de référence.

De plus, la courbe de tarage proposée dans BAREME n'a pas été obtenue par une méthode de modélisation hydraulique (Cf. §3.3.4), ce qui peut expliquer une extrapolation hasardeuse de cette courbe. Au final, la courbe de tarage semble fiable dans la gamme des débits faibles, mais l'incertitude associée à son extrapolation apparaît forte, au regard de la gamme des débits jaugés (Singh et al., 2013) et de la forme du profil en travers de référence.

En admettant la dernière hypothèse du MNT surélevé par rapport au relevé de terrain, une correction de 2 mètres ne suffirait pas à expliquer les différences entre la courbe de tarage et les valeurs de hauteurs/débits simulées. En revanche, la correction de 2 mètres sur l'ensemble des valeurs de hauteurs/débits simulées coïncident avec la rupture de pente attendue liée au premier débordement entre 196 et 198 m (figure 4.23).

Finalement, le contexte rend difficile la comparaison des hauteurs/débits simulées aux données de référence de la station de Banne, les différences observées semblant provenir à la fois d'erreurs dans les données topographiques, et d'une courbe de tarage peu fiable dans sa partie extrapolée.

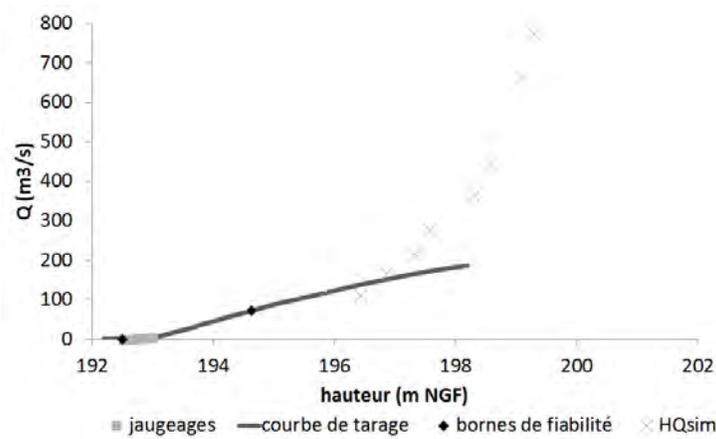


FIGURE 4.23 – Effet d'une correction de deux mètres appliquée à l'ensemble des hauteurs/débits simulés à Banne

Cas de la station de Bessèges

Les hauteurs/débits simulés à la station hydrométrique de Bessèges sont confrontés à la courbe de tarage disponible sur la figure 4.24. Il s'avère que l'ensemble de ces valeurs est surestimé par rapport à la partie extrapolée de la courbe de tarage. Cette surestimation augmente de l'événement biennal à l'événement millénal.

De plus, le débit biennal issu de la base de données SHYREG est de $180 \text{ m}^3/\text{s}$, soit supérieur de 13% par rapport au plus haut jaugeage effectué (Cf. §3.3.4). Ceci ne facilite pas la comparaison qui ne porte que sur la partie extrapolée de la courbe de tarage.

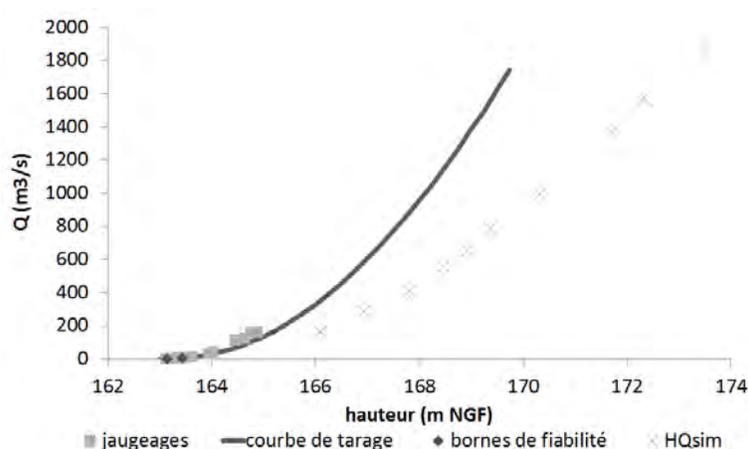


FIGURE 4.24 – Courbe de tarage de la station hydrométrique de Bessèges et hauteurs/débits simulés avec CARTINO

Ces différences ne sont pas liées au coefficient de rugosité K entre les travaux de modélisation et l'élaboration de la courbe de tarage, puisque ce coefficient est identique dans les deux situations ($K = 20$).

Les profils simulés sont cohérents avec celui de référence (figure 4.25) n'apportant pas de réponse sur le problème des valeurs de hauteurs/débits surestimées.

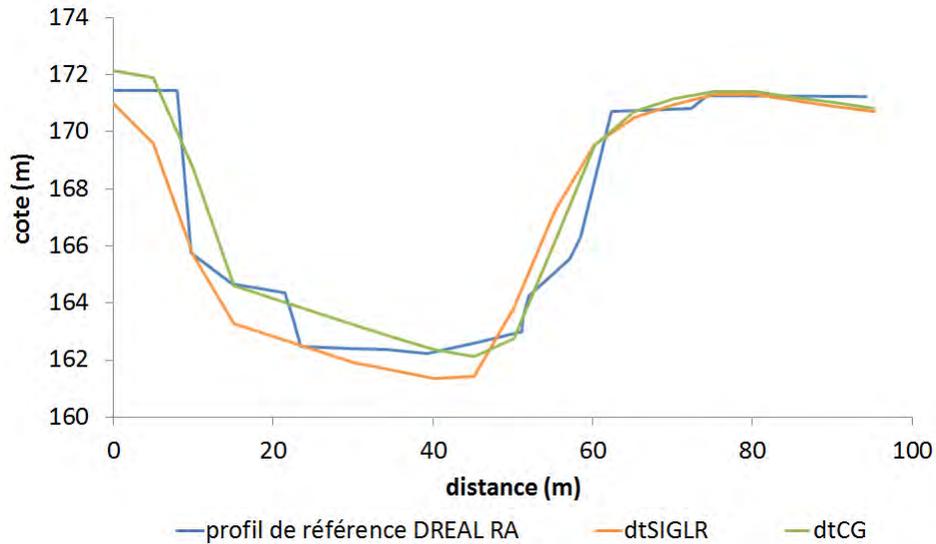


FIGURE 4.25 – Profil en long présentant les altitudes de fond du lit (B) simulées et de référence à l’aval de la station hydrométrique de Bessèges

Les profils en long des simulations CARTINO dévoilent une pente du fond assez chahutée au niveau de la station (figure 4.26).

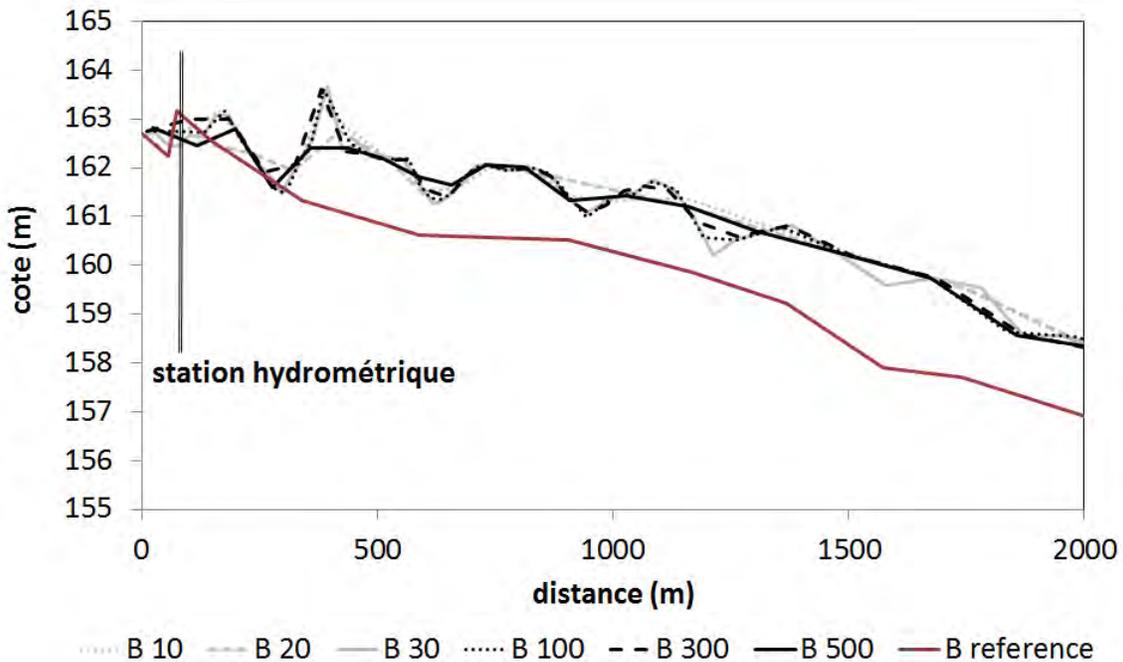


FIGURE 4.26 – cotes de fond (B) simulées et celle de référence le long de la station hydrométrique de Bessèges

Les distinctions entre le profil en long de référence et ceux simulés sont fortes, à tel point qu’elles doivent contribuer aux discordances constatées ici entre les hauteurs/débits simulés et la courbe de tarage.

En aval de la station, l'ensemble des profils en long simulés présentent en effet une succession de seuils dont un situé à 150 m seulement de la station. Ceci a pour effet d'augmenter les altitudes des lignes d'eau modélisées en amont. Les données topographiques exploitées ne prennent pas en compte la bathymétrie contrairement au relevé de référence, ce qui pourrait expliquer ces différences.

Ces différences de profils en long se traduisent également par une différence de pente, qui influe sur le calcul de la formule de Strickler (Degoutte, 2012) :

$$Q = KSi^{1/2}R^{2/3} \quad (4.2)$$

où Q correspond au débit (m^3/s), K le coefficient de rugosité $m^{1/3}/s$, S la section mouillée m^2 , i la pente (m/m) et R le rayon hydraulique (m) assimilable au rapport de la section mouillée par rapport au périmètre mouillé.

Ce phénomène de pente très local influe considérablement sur la surestimation des hauteurs effectuées de l'ensemble des simulations expliquant le décrochement entre les hauteurs/débits simulés et la courbe de targe.

Concernant la surestimation progressive des simulations, elle n'est pas expliquée. Toutefois, les premiers débordements du profil de référence sont estimés à une hauteur de 171 mètres soit des débits supérieurs à la PDR 300 ans. Ces gammes de débits à fréquence rare sont souvent associées à des risques d'inondation certains.

Le cas de Bessèges dévoile une nouvelle limite de la méthode utilisée et développée dans le cadre des travaux de thèse : la surestimation de la cote d'eau à l'aval de la station et l'absence de la bathymétrie.

Pour donner des résultats précis, certaines simulations nécessiteraient une expertise à l'échelle locale qui ne peut pas être mise en œuvre dans le cadre d'une procédure automatique à l'échelle où les travaux de thèse sont souhaités.

Cas de la station d'Alès

Au niveau de la station hydrométrique d'Alès, les dix couples hauteurs/débits simulés ont été comparés à la courbe de tarage disponible sur la figure 4.27. Ces valeurs se situent exclusivement sur la partie extrapolée de la courbe de tarage : le débit biennal de la base de données SHYREG, de $430 m^3/s$, est trois fois supérieur au plus haut jaugeage connu à la station.

Les couples hauteurs/débits simulés suivent globalement la même tendance que la courbe de tarage avec une surestimation générale des valeurs de hauteur. Lorsque l'on s'intéresse exclusivement aux hauteurs/débits simulés, on observe à deux reprises une diminution des hauteurs simulées malgré l'augmentation des débits ($T = 20$ et 1000 ans).

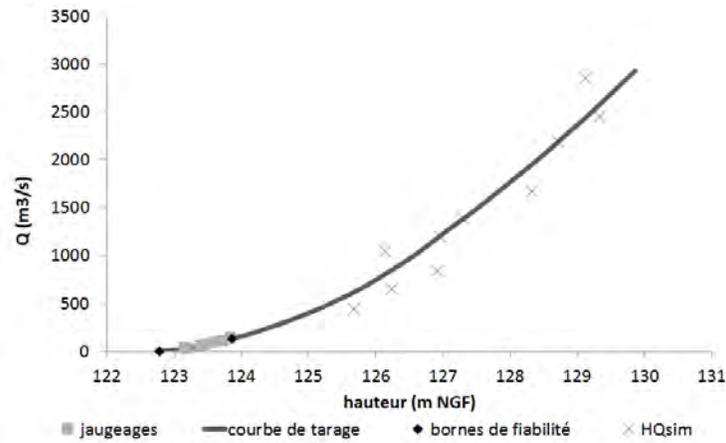


FIGURE 4.27 – Courbe de tarage de la station hydrométrique d'Alès et hauteurs/débits simulés avec CARTINO

Les paragraphes suivants tentent de trouver une explication à ces deux incohérences apparentes (surestimation générale des hauteurs simulées et diminution des hauteurs pour certaines augmentations de débit).

a - L'influence des données topographiques

À partir du MNT du SIGLR, deux nouvelles simulations ont été effectuées pour des débits de périodes de retour 30 et 300 ans. Ces nouvelles simulations ont été comparées avec celles obtenues initialement à partir du MNT du Conseil Général du Gard, dans le but d'identifier l'influence des données topographiques sur les hauteurs d'eau simulées (figure 4.28).

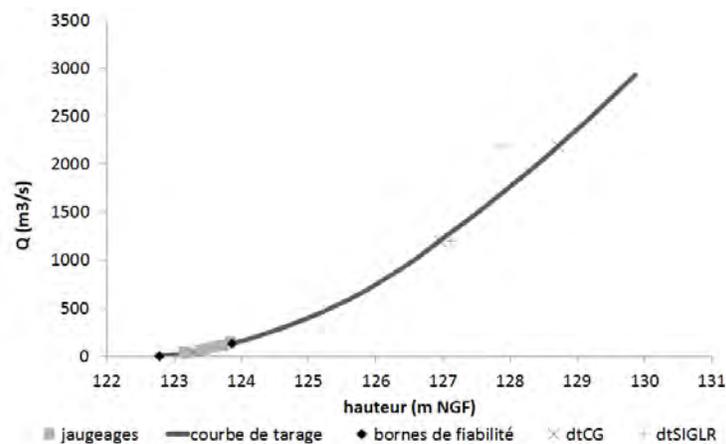


FIGURE 4.28 – Courbe de tarage de la station hydrométrique d'Alès et couples hauteurs/débits simulés pour deux jeux de données topographiques

Les couples hauteurs/débits simulés avec le MNT du SIGLR restent proches de la partie extrapolée de la courbe de tarage même si ces valeurs semblent moins précises que celles modélisées à partir du MNT du Conseil Général, en particulier pour le débit de période de retour 300 ans.

La figure 4.29 permet de comparer le profil en travers de référence fourni par la DREAL Rhône-Alpes-Auvergne au droit de la station, avec les profils extraits par CARTINO à partir des deux jeux de données topographiques employés.

Par rapport au profil de référence, le fond du lit mineur est mieux identifié par le MNT du Conseil Général que celui du SIGLR. La berge en rive gauche est plus basse avec le MNT du SIGLR, entraînant des débordements précoces. Ceci est sûrement lié à la chute de la valeur de hauteur/débit simulée avec la PDR 300 ans.

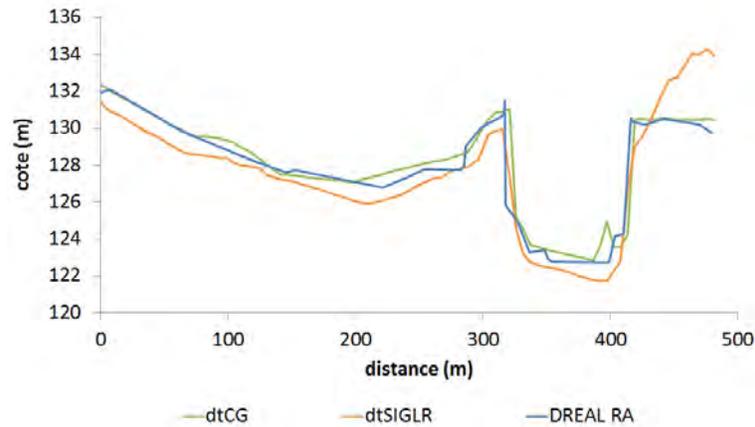


FIGURE 4.29 – Comparaison du profil de référence aux profils simulés au droit de la station d'Alès

Bien que les profils étudiés au droit de la station d'Alès soulignent la meilleure qualité du profil extrait du MNT du Conseil Général, cette conclusion n'est pas générique. À 300 m en aval de la station par exemple, une comparaison similaire effectuée avec un profil en travers relevé sur le terrain, aboutit à la conclusion inverse (figure 4.30) : cette fois ci, c'est à partir du MNT du SIGLR que le fonds du lit mineur est le mieux représenté.

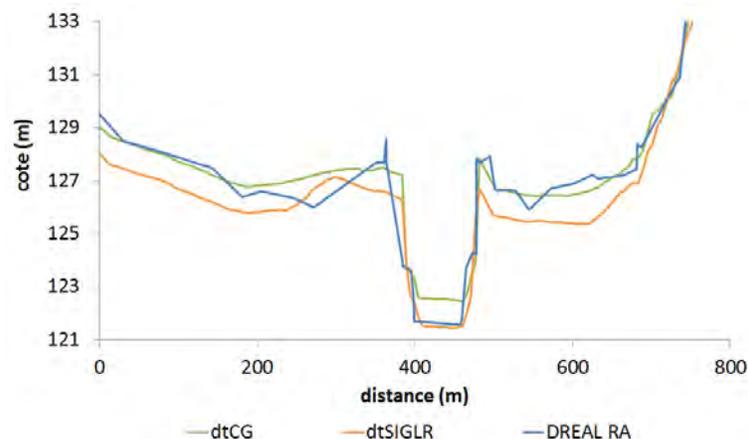


FIGURE 4.30 – Comparaison des profils simulés à 300 m en aval de la station d'Alès avec un profil de référence issu d'un levé de terrain

L'influence des données topographiques sur les hauteurs/débits simulés semble finalement assez limitée, et n'est dans tous les cas pas de nature à expliquer la surestimation générale des hauteurs simulées.

b - Un cas d'étude complexe

L'évolution du profil en long et de la hauteur simulées sont observables sur l'ensemble des dix simulations de la figure 4.31.

D'un point de vue hydraulique, la cote de fond se doit d'être stable tandis que la hauteur d'eau doit croître entre les simulations. Cependant, les résultats ne suivent pas cette tendance : la ligne d'eau n'évolue pas de manière croissante d'une simulation à l'autre (figure 4.33). En amont de la station hydrométrique, l'ordre des hauteurs d'eau est pourtant bien respecté. En revanche en aval de la station, des chutes de hauteurs d'eau sont remarquées entre les débits décennal et vingtennal. Ces chutes de hauteur peuvent être liées à des profils en travers trop élargis qui amènent CARTINO à prendre en compte une partie de la section située hors du lit mineur (dépressions déconnectées du lit mineur, cf figure 4.32). L'effet indirect est la chute du niveau d'eau atteint dans toute la zone située en amont du profil incriminé.

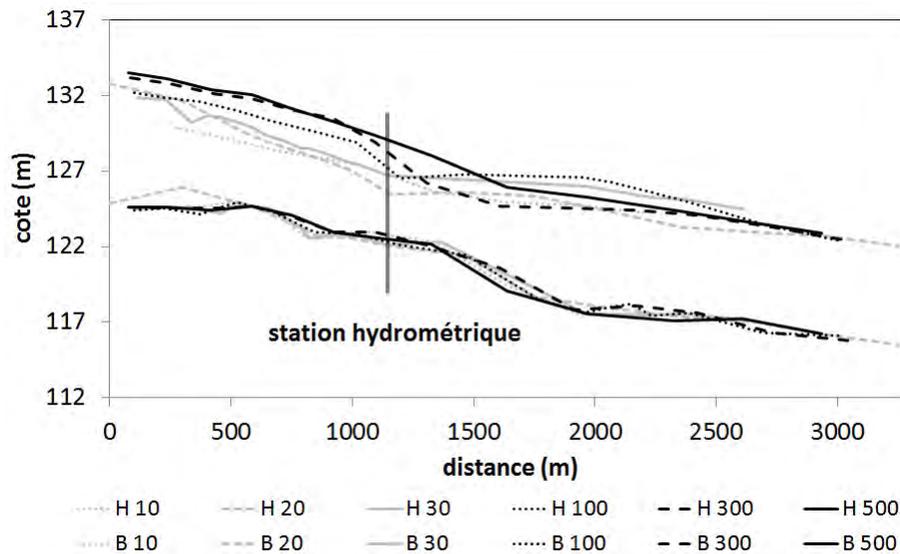


FIGURE 4.31 – Profil en long présentant les cotes du fond du lit (B) et les hauteurs d'eau simulées (H) à proximité de la station hydrométrique d'Alès

Ce problème de diminution de la hauteur d'eau simulée en aval de la station avec le débit de période de retour 20 ans se répercute directement sur la ligne d'eau au droit de la station, où la cote de la ligne d'eau obtenue pour le débit vingtennal est plus basse de 0,76 mètre que celle correspondant au débit décennal. (figure 4.33).

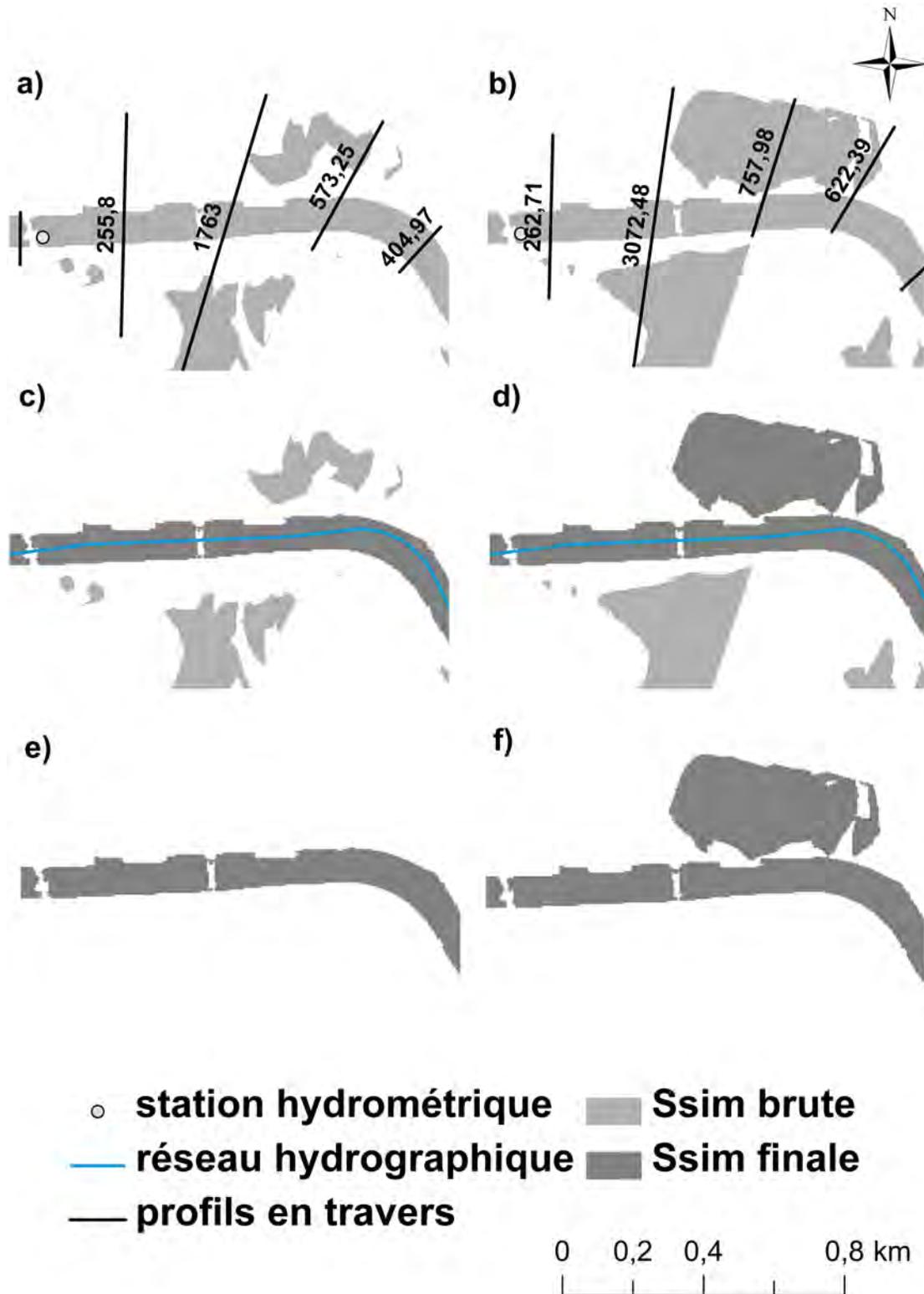


FIGURE 4.32 – Visualisation des différences entre les simulations à l'aval de la station d'Alès :(a) Profils Q10 (m^2), (b) Profils Q20 (m^2); (c) Ssim Q10 brute; (d) Ssim Q20 brute; (e) Ssim Q10 finale; (f) Ssim Q20 finale

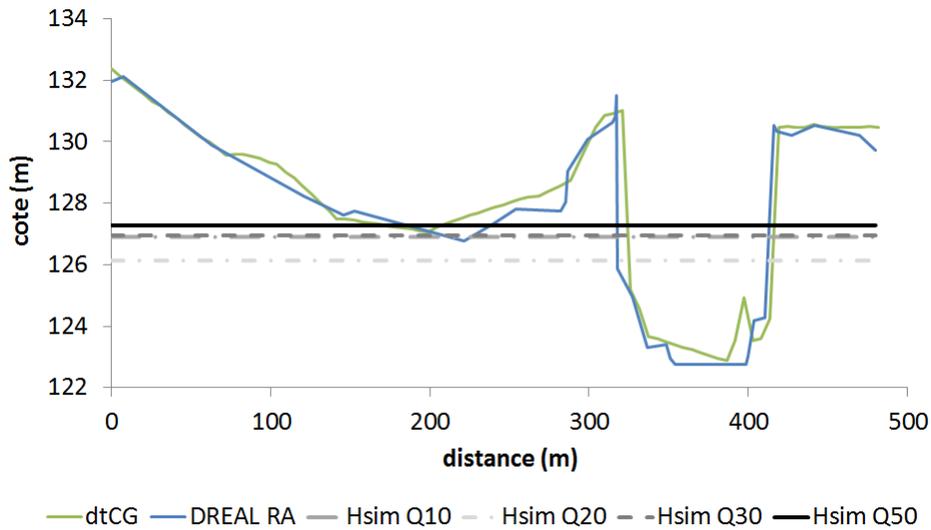


FIGURE 4.33 – Vue du profil en travers avec les résultats des hauteurs simulées pour les débits de PDR 10, 20, 30 et 50 ans

c - Modification du coefficient de rugosité

Le coefficient de rugosité fixé dans le cadre des travaux est différent de celui adopté lors de la modélisation de la courbe de tarage (Cf. §3.3.4 et §4.2.2).

Une reprise des calculs est effectuée sous CARTINO avec les jeux de profils des dix simulations, en modifiant uniquement le coefficient de rugosité de $K=20$ à $K=22$ (Cf. §4.1.2). Avec ce nouveau coefficient, les vitesses d'écoulements augmentent et elles font diminuer modestement les valeurs de hauteur/débit simulées (figure 4.34 et 4.35).

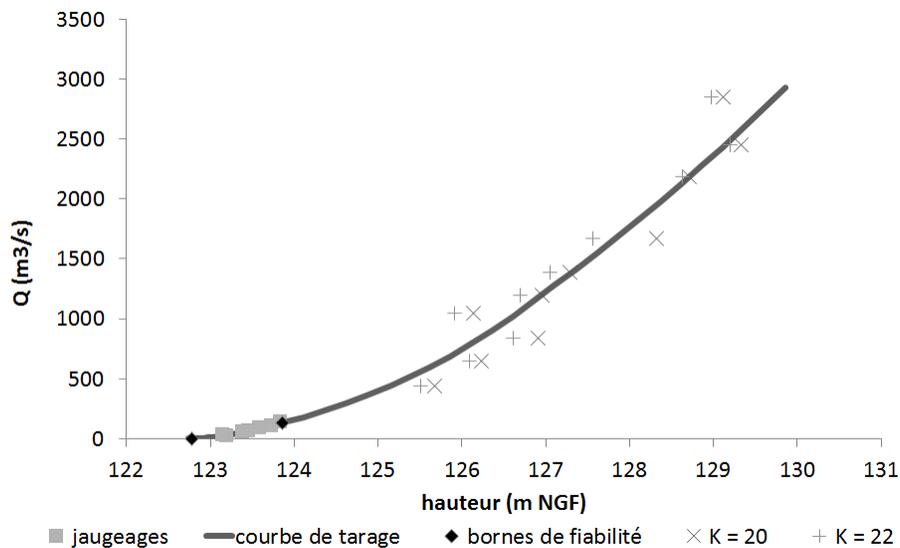


FIGURE 4.34 – Courbe de tarage de la station hydrométrique d'Alès et influence du coefficient de rugosité sur les hauteurs simulées

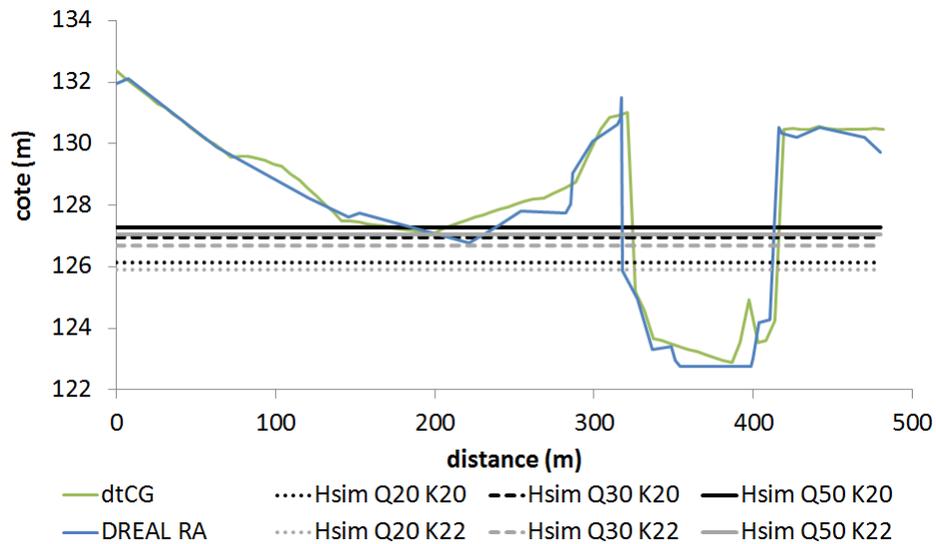


FIGURE 4.35 – Profil en travers à la station hydrométrique d'Alès et influence du coefficient de rugosité sur les hauteurs simulées

Même après cette augmentation du coefficient de rugosité, la surestimation des hauteurs simulées reste remarquable pour les faibles débits. Au delà des débits de période de retour 20 ans, les hauteurs sont sous-estimées et semblaient plus correctes avec le coefficient $K=20$. L'effet du coefficient de rugosité sera plus important sur la hauteur simulée que l'étendue inondée (Nguyen et al., 2015a, Rodríguez-Rincón et al., 2015). Or dans le cadre de nos travaux, la modélisation de l'étendue inondée reste la priorité.

d - Conclusion des observations sur la station hydrométrique d'Alès

Malgré quelques imperfections, il existe une bonne correspondance d'ensemble entre les couples hauteurs/débits simulés et la courbe de tarage au niveau de la station d'Alès. La précision des données topographiques contribue à la cohérence des hauteurs/débits simulés à la station d'Alès par rapport à la courbe de tarage. Dans ce cas-ci, la précision des MNT du SIGLR et du Conseil Général concordent avec les profils relevés à la station (figure 4.29 et 4.30).

Les imperfections proviennent principalement du positionnement des profils mais surtout de leur élargissement aléatoire et parfois trop important, accentué dans les secteurs avec des lits composés et/ou des dépressions en lit majeur (figure 4.6(a)).

Secondairement, L'influence du choix du coefficient de rugosité n'est pas négligeable mais reste de second ordre. La valeur de rugosité fixée de manière générique dans le cadre de ces travaux ($K=20$), correspond en effet approximativement à celle utilisée pour la modélisation de la courbe de tarage de la station d'Alès.

Bilan de la comparaison avec les courbes de tarage des stations hydrométriques

Globalement, les informations fournies par les courbes de tarage et les profils en travers au niveau des stations hydrométriques s'avèrent intéressantes pour l'évaluation des simulations effectuées sous CARTINO. Les comparaisons effectuées montrent que sans recalage particulier, CARTINO propose des profils en travers et des valeurs de hauteurs simulées d'assez bonne qualité. Les sites des stations hydrométriques présentent par ailleurs une grande diversité de configurations qui permettent de bien illustrer les différences sources d'erreurs possibles :

- la forme du lit influe directement sur la qualité des résultats de modélisation, dont la hauteur d'eau simulée (cf. lit complexe d'Alès ou profil en long de Bessèges versus lit simple de Corbès) ;
- la qualité des données topographiques est fondamentale pour une exécution juste des calculs hydrauliques (cf. exemple de Banne et de Bessèges) ;
- les données de référence aux stations doivent faire l'objet d'une analyse pour vérifier leur fiabilité (cf. cas de la station Banne).

4.4.2 Comparaison avec les emprises expertisées dans le cadre de la Directive Européenne Inondations (TRI d'Alès)

L'échelle retenue pour l'évaluation des surfaces inondées simulées est celle des versants du modèle pluie-débit (Cf. §3.2.2). C'est en effet à cette échelle (celle du versant connecté à un bief de cours d'eau) que la construction des modèles d'impacts est envisagée. Les contours des versants du modèle hydrologique ont donc été utilisés pour découper les emprises inondées simulées avec CARTINO, ainsi que les surfaces de références produites lors de l'application de la Directive Européenne Inondations. La part d'erreur de la simulation par rapport à la référence peut ainsi être évaluée à l'échelle de chaque tronçon ou bief de cours d'eau.

Cette évaluation a été menée sur l'ensemble des tronçons pour lesquels les surfaces de référence étaient disponibles. Pour l'ensemble des tronçons concernés, les surfaces simulées (S_{sim}) sous CARTINO ont pu être comparées avec celles de référence (S_{ref}) pour deux niveaux de débits, correspondant aux périodes de retour 30 et 300 ans (Cf. §3.3.6 et figure 4.36(a), (b), (d) et (e)).

La comparaison pour les débits de périodes de retour 30 ans a porté sur 71 tronçons, et sur 84 tronçons pour la période de retour 300 ans (figure 4.36(c) et (f)). Cette différence du nombre de tronçons entre les deux niveaux de débits est en grande partie liée à l'inondation du lit majeur pour les débits de période de retour 300 ans, pour lesquels la zone inondée s'étend sur une plus grande surface et remonte sur certains affluents.

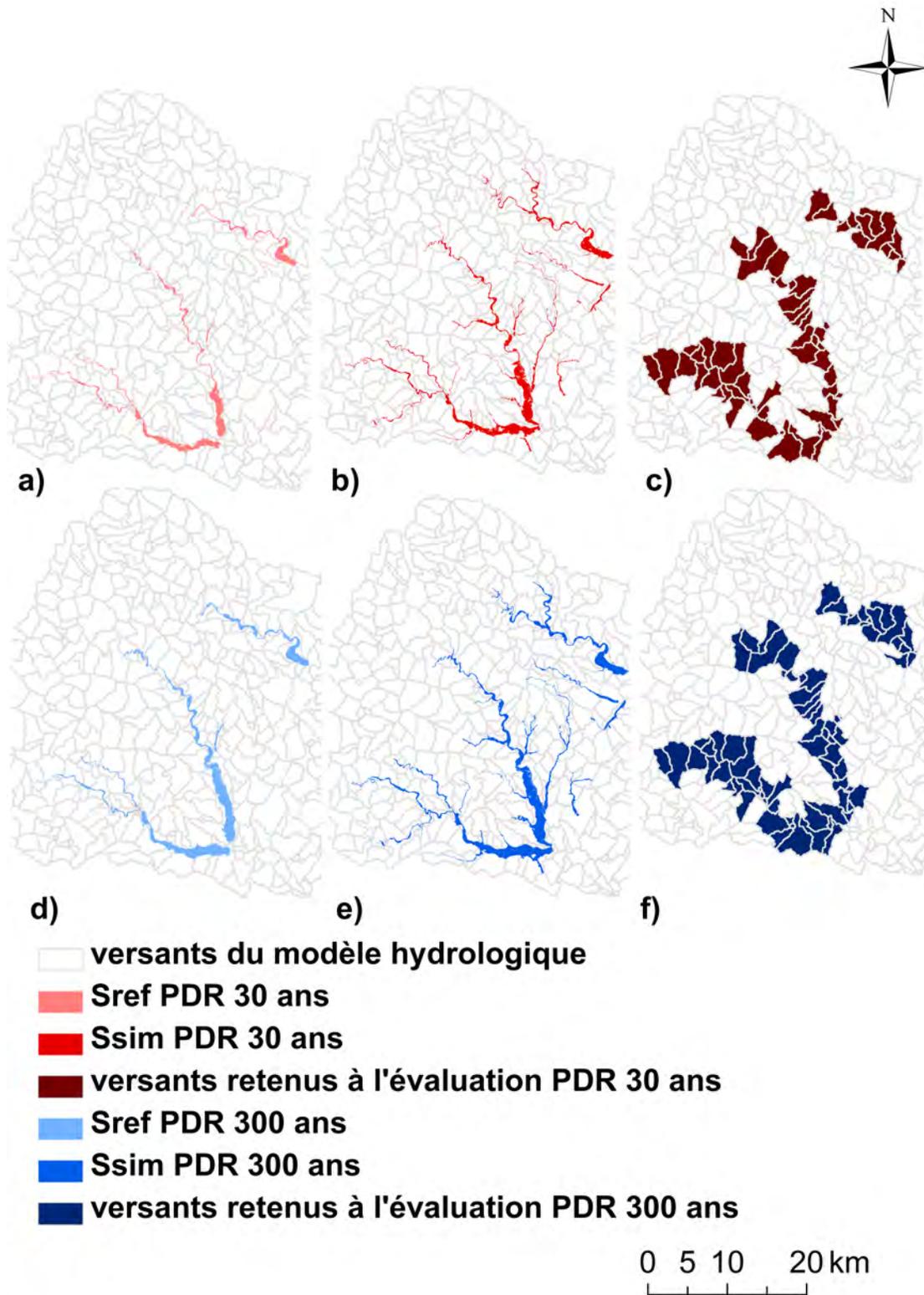


FIGURE 4.36 – Cartes à l'échelle du TRI d'Alès (a) de la surface inondée de référence (Sref) pour la période de retour 30 ans, (b) de la surface modélisée sous CARTINO (Ssim) pour la période de retour de 30 ans, (c) de l'échelle d'évaluation retenue pour la comparaison des Ssim et Sref pour la période de retour 30 ans, (d) de la surface de référence pour la période de retour 300 ans, (e) de la surface modélisée pour la période de retour 300 ans, (f) de l'échelle d'évaluation retenue pour la comparaison des Ssim et Sref pour la période de retour 300 ans

On peut noter ici que les débits utilisés dans les deux cas (Ssim et Sref) sont issus de la même base de données (Cf. §3.3.5) et sont donc identiques. La comparaison effectuée permet donc d'illustrer l'effet de la procédure de calcul simplifiée et automatisée mise en œuvre sous CARTINO (cf. §4.2), par comparaison à une modélisation hydraulique plus classique dont les résultats reposent beaucoup plus sur l'expertise de l'hydraulicien.

Pour effectuer ces comparaisons, la surface en eau permanente, correspondant au lit mineur hydrogéomorphologique, n'a pas été prise en compte. Ainsi, la comparaison a porté exclusivement sur les surfaces de débordement, qui sont les surfaces qui nous intéressent pour l'élaboration des modèles d'impacts (figure 4.37).

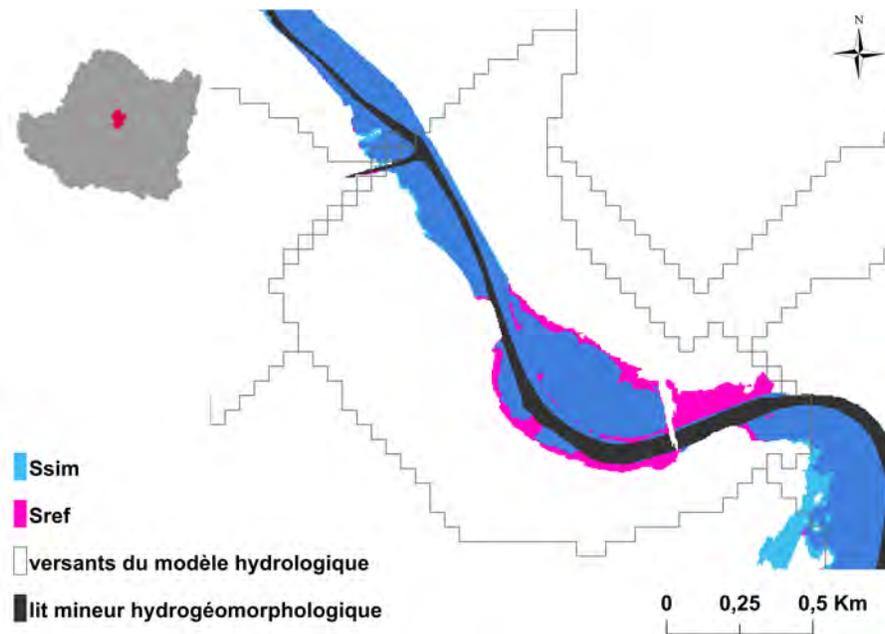


FIGURE 4.37 – Comparaison des emprises simulées Ssim et de référence Sref (DREAL, 2013b) à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau

De façon à définir un critère objectif de comparaison (Nguyen et al., 2015a, Esposito, 2015), trois types de surfaces ont été définies en superposant les emprises simulées Ssim à celles de référence Sref :

- "surface commune", surface de chevauchement entre les deux emprises (Sc) ;
- "surface en excès", partie de Ssim débordant de la Sref (Se) ;
- "surface en défaut", partie de Sref non recouverte par la Ssim (Sd).

Idéalement, l'étendue de la surface simulée devrait se superposer à la surface de référence de telle sorte que les surfaces en excès Se et en défaut Sd soient nulles.

Pour faciliter la comparaison, un indicateur du taux de surface incohérente (TSI), traduisant l'importance de ces surfaces Se et Sd, sera utilisé par la suite pour rendre compte de la qualité des emprises simulées Ssim. Le TSI est défini par la formule (4.3) :

$$TSI = \left(\frac{Se}{Sref} * 100 \right) + \left(\frac{Sd}{Sref} * 100 \right) \quad (4.3)$$

Analyse globale des valeurs de TSI obtenues

La figure 4.38 présente la distribution des valeurs de taux de surfaces incohérentes obtenues. On peut en premier lieu remarquer que des valeurs très satisfaisantes, inférieures à 10 %, sont obtenues pour :

- 21% des tronçons pour la période de retour 30 ans ;
- 65% des tronçons pour la période de retour 300 ans.

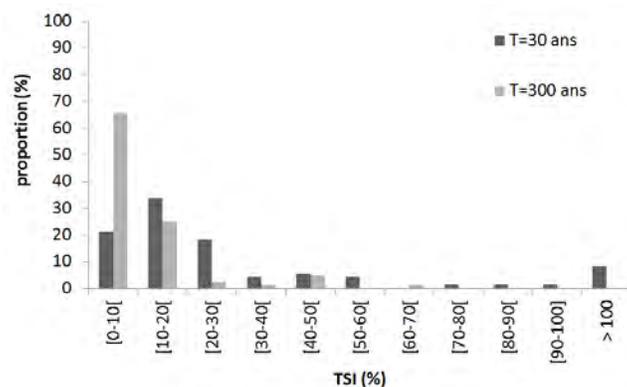


FIGURE 4.38 – distributions de valeurs des TSI pour les débits de périodes de retour 30 et 300 ans

On remarque également que certains tronçons présentent de valeurs de TSI très fortes (supérieure à 100 %) dans le cas de la période de retour 30 ans, ce qui témoigne de la difficulté à modéliser correctement les premiers débordements.

Ceci se confirme en regardant la répartition des valeurs de TSI en fonction de la surface de référence Sref (Cf figure 4.39) : on constate que les TSI les plus élevés (supérieur à 30 %) sont très majoritairement atteints dans les secteurs pour lesquels la surface de référence est inférieure à 0,1 km², donc pour les faibles débordements.

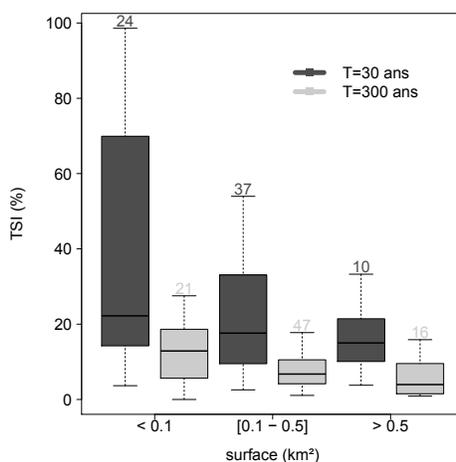


FIGURE 4.39 – distributions des valeurs des TSI en fonction de l'étendue de la Sref pour les périodes de retour 30 et 300 ans - médiane (trait épais), boîte correspondant aux quartiles 0,25 et 0,75, et moustaches d'une longueur d'au maximum 1,5 fois la distance interquartile. $Q_{0,25}-1,5IQR$ et $Q_{0,75}+1,5IQR$ - valeurs extrêmes non représentées

Cette première analyse des valeurs des TSI apporte finalement quatre informations majeures :

- la méthode développée dans le cadre de la thèse propose des surfaces simulées d'une qualité globalement bonne, proche des surfaces de référence ;
- les événements de fréquences rares sont plus simples à modéliser ;
- plus l'étendue de la surface inondée est faible ($< 0,1 \text{ km}^2$), plus il sera difficile d'obtenir une surface simulée cohérente avec la surface de référence ;
- le TSI le plus fort est atteint pour le bief traversant la ville d'Alès : cas d'autant plus compliqué qu'il s'agit d'un secteur urbanisé aux enjeux humains importants.

Influence de la surface drainée sur les valeurs des TSI

Les travaux menés dans le cadre de la thèse s'intéressent tout particulièrement aux tronçons situés hors du réseau réglementaire de la prévision des crues : ces zones situées en tête de bassin avec des surfaces drainées faibles (Cf. §3.3.2) sont en effet particulièrement propices aux crues soudaines et actuellement non couvertes par le dispositif de prévision des crues. Il paraît donc important de connaître l'influence de la surface drainée sur les valeurs de TSI obtenues.

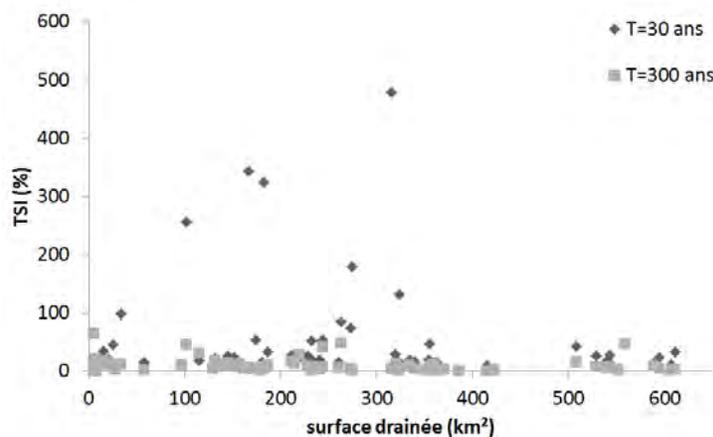


FIGURE 4.40 – répartition des valeurs des TSI en fonction de la surfaces drainée par les tronçons

La figure 4.40 montre que la surface drainée ne semble pas particulièrement expliquer la répartition des valeurs de TSI obtenues :

- les valeurs paraissent aléatoires et elles ne sont pas liées aux têtes de bassin spécifiquement ;
- au delà de 300 km^2 , il n'y pas d'erreurs importantes pour la PDR 30 ans. Toutefois, seuls une dizaine de tronçons sont concernés, et cet effet peut être lié à l'échantillon étudié.

Influence du jeu de données topographiques sur les valeurs des TSI

Les dix simulations initiales ont été réalisées à partir d'un MNT produit par le Conseil Général du Gard (Cf. §3.3.1).

Ce jeu de données a été remplacé par le MNT du SIGLR, dans le but d'analyser l'influence des données topographiques sur la qualité des emprises inondées modélisées. Ce nouveau jeu de données topographiques présente une résolution plus fine et des précisions altimétrique et planimétrique annoncées au moins équivalentes à celles provenant des données du Conseil Général. Dans cette configuration, les surfaces obtenues devraient donc s'avérer plus proches des surfaces de références que celles obtenues à partir du MNT du Conseil Général.

Les TSI obtenus à partir des données SIGLR sont présentés sur la figure 4.41. Ils sont inférieurs à 10% pour :

- 12 % des tronçons pour la période de retour 30 ans ;
- 38 % des tronçons pour la période de retour 300 ans.

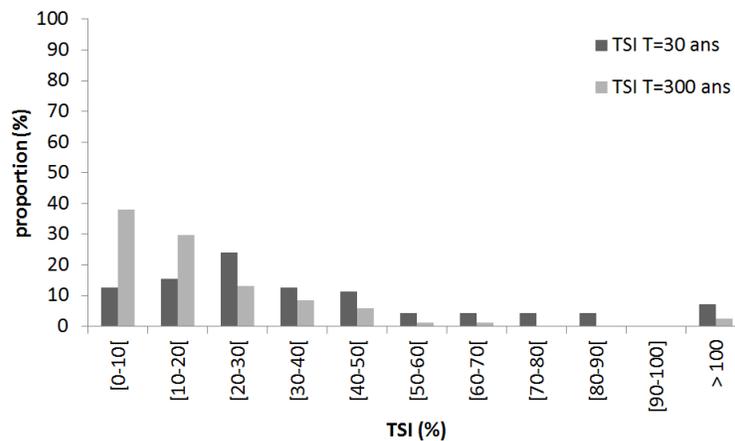


FIGURE 4.41 – Distributions des TSI obtenues à partir des données topographiques du SIGLR

Dans les deux cas ces valeurs sont presque deux fois moins élevées que celles obtenues à partir du MNT du Conseil Général (cf. figure 4.38), traduisant plutôt une dégradation de la qualité des simulations.

Toutefois, les conclusions tirées précédemment se confirment à nouveau avec les données du SIGLR (figure 4.42) :

- plus l'étendue de la surface inondée est faible, plus les erreurs de simulation sont importantes ;
- la qualité des résultats s'améliore pour les forts débits (période de retour 300 ans).

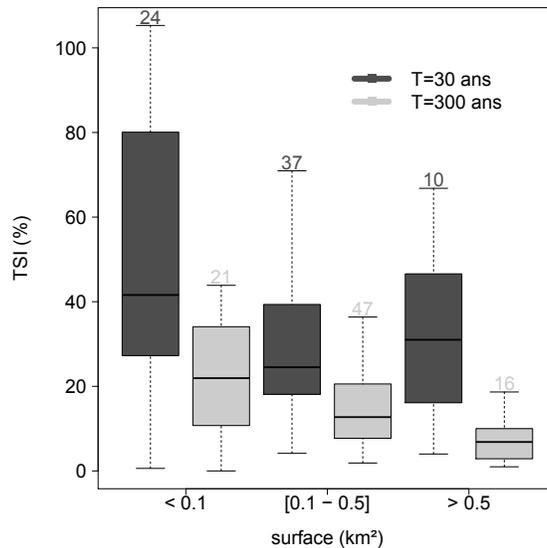


FIGURE 4.42 – répartition des TSI obtenus à partir des données topographiques du SIGLR, en fonction de l'étendue de la Sref - médiane (trait épais), boîte correspondant aux quartiles 0,25 et 0,75, et moustaches d'une longueur maximum de 1,5 fois la distance interquartile. $Q_{0,25}-1,5IQR$ et $Q_{0,75}+1,5IQR$ - valeurs extrêmes non représentées

Bilan de évaluation des calculs automatisés d'emprises

De manière générale, les résultats obtenus illustrent des différences significatives entre les Ssim et les Sref, témoignant des imperfections des modélisations obtenues sans expertise avec une procédure automatisée à l'extrême. Les résultats de cette évaluation sont néanmoins positifs et encourageants. Les valeurs des TSI obtenues restent en effet limitées dans une majorité de cas. Elles sont par exemple inférieures à 20% pour :

- 65% des tronçons pour la période de retour 30 ans ;
- 90% des tronçons pour la période de retour 300 ans.

La surface drainée par les tronçons considérés n'influence pas particulièrement les valeurs des TSI obtenues, ce qui semble indiquer que les petits cours d'eau n'ont pas posé plus de difficulté de modélisation (ce qui pouvait être attendu compte tenu de la plus faible largeur des lit mineurs).

De façon surprenante le MNT du SIGLR, en théorie d'une meilleure précision que le MNT du Conseil Général, ne permet pas d'améliorer la qualité des simulations. L'origine de ce résultat reste inexpliquée.

Les débits de faible période de retour (30 ans) restent plus difficiles à simuler malgré une méthode spécifique développée à partir de l'outil CARTINO (Cf. §4.1). Pour rendre visible les erreurs parfois plus importantes, il serait utile de pouvoir attribuer à l'échelle de chaque tronçon un niveau d'incertitude de la qualité de l'emprise simulée. Cette incertitude semble pouvoir être évaluée dans les régions où des données de référence, de quelque origine qu'elles soient, existent sur une partie du réseau hydrographique, comme l'ont montré les travaux présentés ici.

Toutefois, les tronçons situés en amont des bassins versants ne permettront que rarement de disposer de données de référence et devront faire l'objet d'une autre réflexion pour l'évaluation

de la validité des emprises simulées. Des informations provenant des campagnes de relevés de laisses de crue permettraient par exemple de continuer le travail de validation de ces secteurs dont la cartographie n'est pas prioritaire dans le cadre de la Directive Européenne Inondation.

La qualité des surfaces inondées intégrées au catalogue d'emprises pourra également faire l'objet d'améliorations notamment par l'intégration des surfaces inondables disponibles estimées à partir d'une modélisation hydraulique expertisée.

Par exemple, les surfaces de références obtenues dans le cadre de la Directive Européenne Inondation, utilisées ici uniquement pour l'évaluation des résultats, pourrait être intégrées directement au catalogue, là où elles sont disponibles.

Malgré les différences existantes entre les surfaces simulées et les données de références disponibles, leur exploitation pour l'estimation des enjeux et impacts à l'échelle de chaque tronçon semble présenter un réel intérêt.

À partir des données sur les bâtiments de la base de données TOPO® (Cf. §3.3.6), le nombre de bâtiments présents au sein des surfaces de références et des surfaces simulées a par exemple été comparé (figure 4.43 (a), (b), (d) et (e)). Cette figure confirme que le nombre de bâtiments croît de l'événement de fréquence trentennale à celui de fréquence tricentennale en lien avec l'inondation du lit majeur, que ce soit pour les surfaces de références et/ou celles simulées.

Pour chaque période de retour, les erreurs relatives β , entre le nombre de bâtiments présents dans la surface simulée et dans la surface de référence sont présentées (figure 4.43 (c) et (f)). Les erreurs restent parfois importantes, et sont significativement plus faibles pour la période de retour 300 ans que pour la période de retour 30 ans, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus sur l'évaluation des emprises.

Néanmoins, la comparaison cartographique présentée sur la figure montre que la répartition cartographique des bâtiments présents dans les emprises simulées et de référence apparaît dans l'ensemble similaires malgré les imperfections locales d'étendues inondées détaillées dans ce chapitre et plus particulièrement pour les simulations de fortes fréquences (PDR 30 ans). Ceci semble indiquer que le niveau de précision des emprises simulées reste en accord avec les objectifs poursuivis, à savoir une restitution cartographique permettant de hiérarchiser les impacts attendus sur les différents tronçons de cours d'eau.

Ces premières conclusions ont fait l'objet d'un article et d'une présentation orale au cours d'une conférence internationale (Cf. annexe D).

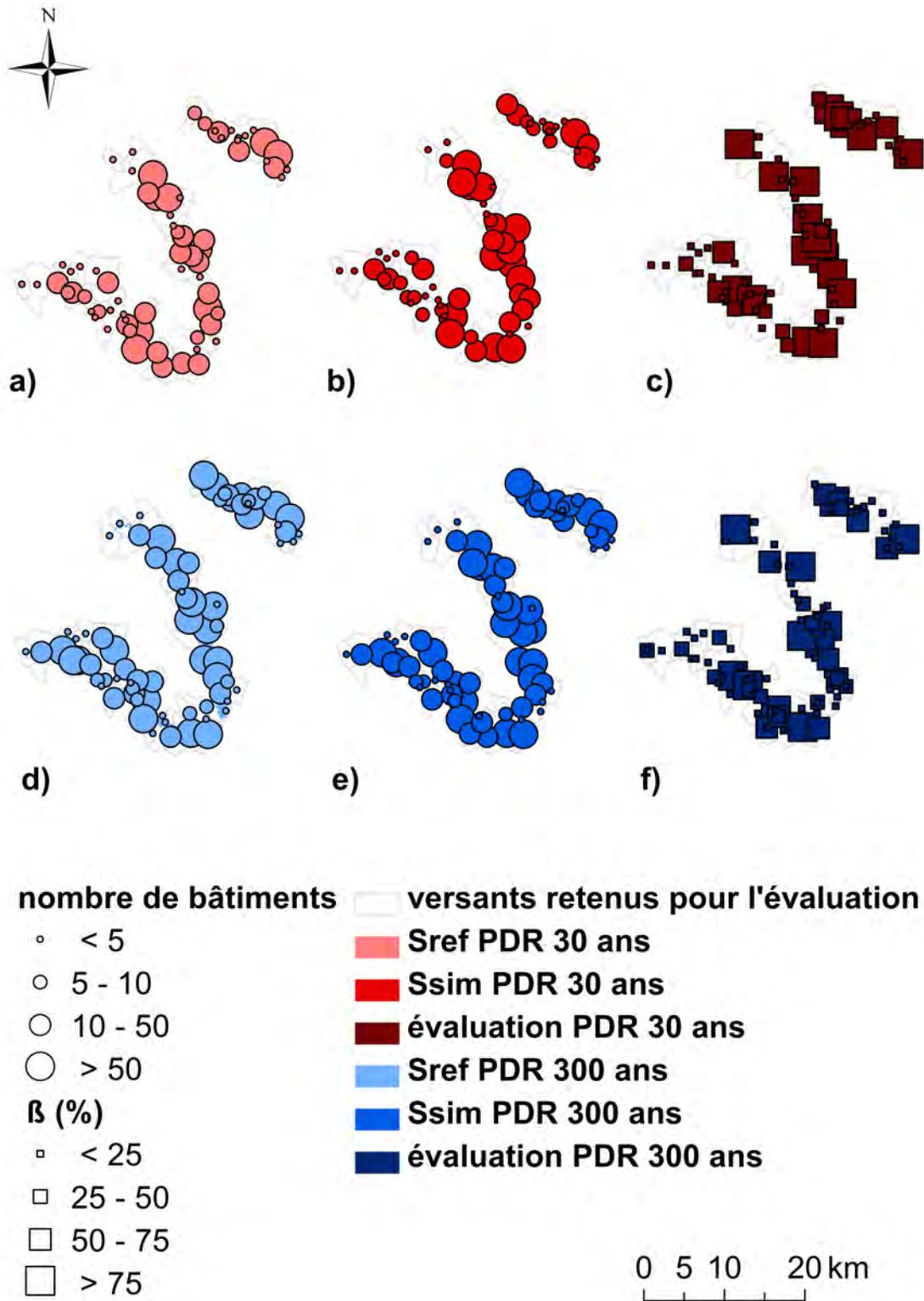


FIGURE 4.43 – Cartographie, sur les tronçons retenus pour l'évaluation : du nombre de bâtiments identifiés dans les surfaces de référence (a) et modélisée (b) pour la période de retour 30 ans, dans les surfaces de référence (d) et modélisée (e) pour la période de retour 300 ans ; des différences relatives β du nombre de bâtiments identifiés entre les surfaces simulées et de référence pour les périodes de retour 30 ans (c) et 300 ans (f)

4.4.3 Améliorations possibles

À l'issue de l'évaluation des surfaces simulées par rapport aux informations de référence disponibles (stations hydrométriques et cartographies produites dans le cadre de la Directive Européenne Inondation), les résultats obtenus montrent que quelques précautions utiles peuvent être prises quant à l'exploitation des données simulées.

Tout d'abord, les stations hydrométriques, disséminées sur l'ensemble du réseau hydrographique, resteront un bon moyen de vérification des valeurs de hauteurs/débits simulées obtenues pour les faibles périodes de retour. Elles permettent notamment de valider les résultats lorsque les couples hauteurs/débits simulés sont proches des jaugeages effectués à la station.

En parallèle, pour les tronçons où des surfaces de référence expertisées existent et où les surfaces simulées semblent trop différentes, il est possible :

- de substituer, pour les périodes de retour disponibles, les surfaces de référence à celles modélisées. Dans notre zone d'étude, les surfaces de références pour trois niveaux de débits étaient par exemple accessibles (T= 30, 300 et 1000 ans) ;
- de contraindre l'étendue des surfaces simulées pour les périodes de retour non disponibles dans les données de référence. Dans le cas traité, l'étendue des surfaces simulées pour les périodes de retour inférieures à 30 ans pouvait être limitée à la surface de référence associée à cette même période de retour, et ainsi de suite.

Enfin, suite à ces premiers résultats, des possibilités d'adaptation de la méthode CARTINO pour améliorer les résultats des simulations restent à explorer.

L'une d'entre elle consisterait à repartir des profils produits lors de la simulation précédente et de les ré-élargir directement (sans repositionner les profils) jusqu'à ce que les sections mouillées soient en capacité de faire circuler les nouveaux débits injectés dans le modèle. Ceci permettrait de valoriser de façon plus directe les résultats de chaque modélisation, en évitant de nouveaux calculs inutiles et en tirant parti du travail de critique (suppression des profils problématiques notamment) effectué pour chaque simulation.

L'autre idée concerne la procédure d'élargissement des profils. L'ajustement de la largeur des profils pourrait en effet se faire de manière plus progressive, en partant des profils situés à l'aval et en remontant vers l'amont. Ceci permettrait de déclencher l'élargissement des profils amont à bon escient, en garantissant que hauteur de la ligne d'eau n'est pas surévaluée du fait de l'élargissement non terminé des profils aval.

4.4.4 Bilan de l'évaluation des simulations

Dans le contexte de ces travaux, le fait de simplifier et d'automatiser de façon poussée le processus de modélisation sous CARTINO aurait pu compromettre la qualité des emprises inondées simulées. Or, les différentes données de référence disponibles (courbes de tarage, profils en travers, emprises) sur le secteur étudié paraissent globalement en adéquation avec les résultats de modélisation obtenus, malgré des erreurs ponctuellement significatives, en particulier liées aux premiers débordements des cours d'eau.

Les choix méthodologiques effectués pour la production d'un catalogue de surfaces inondées paraissent finalement adaptés aux objectifs poursuivis. En effet, la finalité de ces modélisations reste de construire un modèle d'impacts qui permettra de comparer à grande échelle les enjeux compris dans les différentes étendues inondées modélisées. Les résultats obtenus, même imparfaits, semblent de qualité suffisante pour répondre à cet objectif.

La prochaine étape des travaux consiste désormais à simuler des événements de crue passés et à estimer les enjeux potentiellement touchés pour ces événements à partir du catalogue d'emprises produits. Ceci va permettre d'évaluer l'ensemble de la chaîne de prévision pluie-débit-impacts dans des conditions proches de ce qui pourrait être produit en situation réelle.

Synthèse

L'objectif de développer un catalogue de surfaces inondées pour différents niveaux de débit, de forte fréquence (PDR = 2 ans) à faible fréquence (PDR = 1000 ans) a demandé des adaptations de la méthode CARTINO. Le paramétrage ou les données d'entrée initialement choisies dans le cadre de la Directive Européenne Inondation ne correspondaient pas aux attentes de simuler les premiers débordements des cours d'eau de la zone d'étude. De nombreux ajustements ont été apportés tout en gardant à l'esprit la volonté d'automatiser au maximum la procédure pour pouvoir par la suite l'appliquer à une échelle régionale voire nationale.

Les modélisations ont été effectuées pour des débits de 10 périodes de retour différentes : 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500 et 1000 ans dans le but d'appréhender l'évolution de l'extension des surfaces inondées à l'échelle de la zone d'étude.

Deux informations distinctes ont été valorisées dans le but d'évaluer la qualité des résultats obtenus. Les courbes de tarage établies aux stations hydrométriques ont pu être comparées aux hauteurs d'eau simulées par le modèle, révélant des différences notables liées aux limites de la modélisation hydraulique 1D et parfois à l'imprécision des données topographiques. Dans un deuxième temps, la comparaison par rapport aux cartographies de référence produites dans le cadre de la Directive Européenne Inondation ([DREAL, 2013b,c](#)) s'est révélée rassurante sur la qualité des emprises simulées. L'adaptation et l'automatisation de la procédure de calcul sous CARTINO semblent finalement aboutir à des emprises dont le niveau de précision reste en rapport avec les objectifs poursuivis.



Chapitre 5

Simulation des impacts potentiels par bief et validation

Objectifs du chapitre :

- Appliquer et évaluer la méthode retenue pour l'estimation du nombre de bâtiments inondés au cours d'un événement d'inondation observé sur le Territoire à Risque Important d'inondation d'Alès.
- Transposer et évaluer la méthode dans un autre secteur : le bassin de l'Argens dans le Var.
- Présenter des pistes de validation du modèle d'impacts pour l'avenir.

5.1 Application au cas du TRI d'Alès pour l'événement de septembre 2002

L'OBJECTIF de la thèse est de rendre compte des impacts éventuels au cours d'un événement d'inondation. Pour cela, le modèle d'impacts proposé dans le cadre de ces travaux va être construit et connecté à la sortie d'un modèle pluie-débit, pour obtenir une chaîne de modélisation pluie-débit-impacts.

Cette partie présente ce travail d'application pour l'événement de septembre 2002 sur le TRI d'Alès, ainsi que la validation associée à partir des données de sinistres assureurs (André et al., 2013).

5.1.1 Mise en œuvre de la chaîne de simulation

Construction du modèle d'impacts

Suite à l'élaboration du catalogue de surfaces inondées obtenu à partir du modèle CARTINO (Cf. §4.3), chaque surface simulée a été découpée selon les biefs de cours d'eau de la Base Nationale des Bassins Versants (BNBV) du SCHAPI (Cf. §3.4), cette échelle étant celle retenue pour la restitution des résultats.

Pour chaque bief de la BNBV, les bâtiments de la base de données TOPO® ont été sélectionnés au sein des différentes surfaces simulées (Cf. §3.3.6). Ainsi, un nombre de bâtiments est rattaché à chacune des dix surfaces simulées, ce qui permet d'obtenir une courbe d'évolution croissante du nombre de bâtiments inondés en fonction de la surface inondée et donc du débit prévu (figure 5.1).

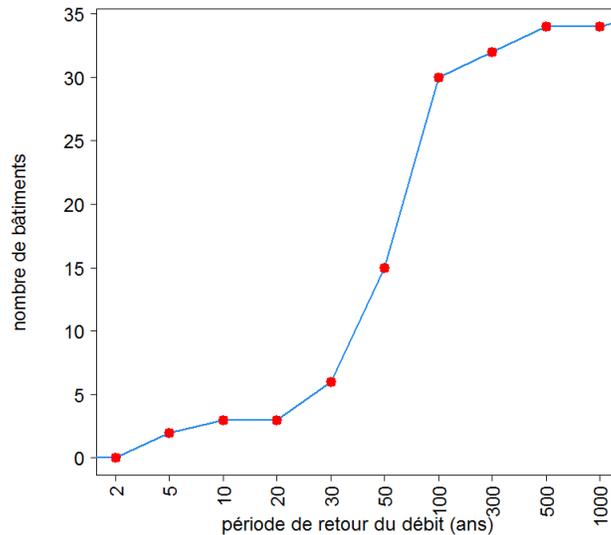


FIGURE 5.1 – Exemple d’une courbe d’impacts obtenue à partir du nombre de bâtiments inventoriés dans la base de données TOPO® à l’échelle d’un tronçon de la BNBV du SCHAPI

Pour construire cette courbe, les valeurs ont été interpolées linéairement entre les dix valeurs calculées pour les dix emprises de référence. L’interpolation linéaire est le choix le plus simple compte tenu de l’ignorance sur la progression du débordement entre deux débits simulés. La courbe étant reconstituée pour chaque bief par interpolation, un nombre de bâtiments potentiellement inondés peut être associé à toute valeur de débit simulée.

Calcul de l’évolution des impacts au cours d’un événement de crue passé

Les impacts au cours d’un événement sont estimés à partir des sorties du modèle pluie-débit Cinecar (Cf. §3.4), appliqué à partir des données lames d’eau radar issues de la base de données de l’OHMCV dans le cas du Gard (Cf. §3.3.3).

Le modèle pluie-débit produit une valeur de débit pour chaque bief au pas de temps de 15 minutes : c’est à cette échelle temporelle que les impacts sont donc restitués. Ce pas de temps (15 minutes) suit les recommandations de [Atencia et al. \(2011\)](#) et [Peleg et al. \(2013\)](#). Il assure un compromis entre une nécessaire précision temporelle des prévisions et un certain niveau de robustesse. Les estimations radars des pluies sont fluctuantes et incertaines à pas de temps plus court, en particulier lorsqu’on s’intéresse à de petites surfaces : petits bassins versants de 10 à 100 km². Par ailleurs il n’est pas certain que les services de gestion de crises soient en mesure de réellement exploiter des prévisions remises à jour trop fréquemment. Le pas de temps de mise à jour du système AIGA est aussi de 15 minutes.

À chaque pas de temps de la simulation hydrologique au droit de chaque bief, le débit simulé est comparé aux différents niveaux de débits de la base de données SHYREG pour connaître la période de retour atteinte. Puis, le nombre de bâtiments est estimé par interpolation, comme indiqué sur la figure 5.1, ce qui revient à appliquer la formule suivante :

$$\text{nombre de bâtiments interpolés}_x = \text{bâtiments}_{s_n} + \left[(Q_{sim} - Q_n) \times \frac{(\text{bâtiments}_{s_{n+1}} - \text{bâtiments}_{s_n})}{(Q_{n+1} - Q_n)} \right] \quad (5.1)$$

où Q_n et Q_{n+1} sont les débits SHYREG encadrant le débit simulé Q_{sim} , et bâtiments_{s_n} et $\text{bâtiments}_{s_{n+1}}$ sont le nombre de bâtiments dans les surfaces inondées associées.

Construction de cartes présentant l'évolution temporelle des impacts

À chaque pas de temps de la simulation, une restitution cartographique du nombre de bâtiments potentiellement inondés, estimés par la chaîne de simulation, peut être effectuée. De même, les valeurs maximales calculées pour chaque bief peuvent être cartographiées. Pour cette restitution, un point est associé à chaque bief du cours d'eau, qui varie en taille et en couleur en fonction de l'ampleur du nombre d'impacts maximums estimés par la chaîne de simulation (figure 5.2) :

- cercle noir non rempli, entre 1 à 5 bâtiments inondés ;
- cercle vert plein, entre 5 et 20 bâtiments inondés ;
- cercle jaune plein, entre 20 et 50 bâtiments inondés ;
- cercle orange plein, entre 50 et 200 bâtiments inondés ;
- cercle rouge plein, entre 200 et 500 bâtiments inondés ;
- cercle noir plein, supérieur à 500 bâtiments inondés.

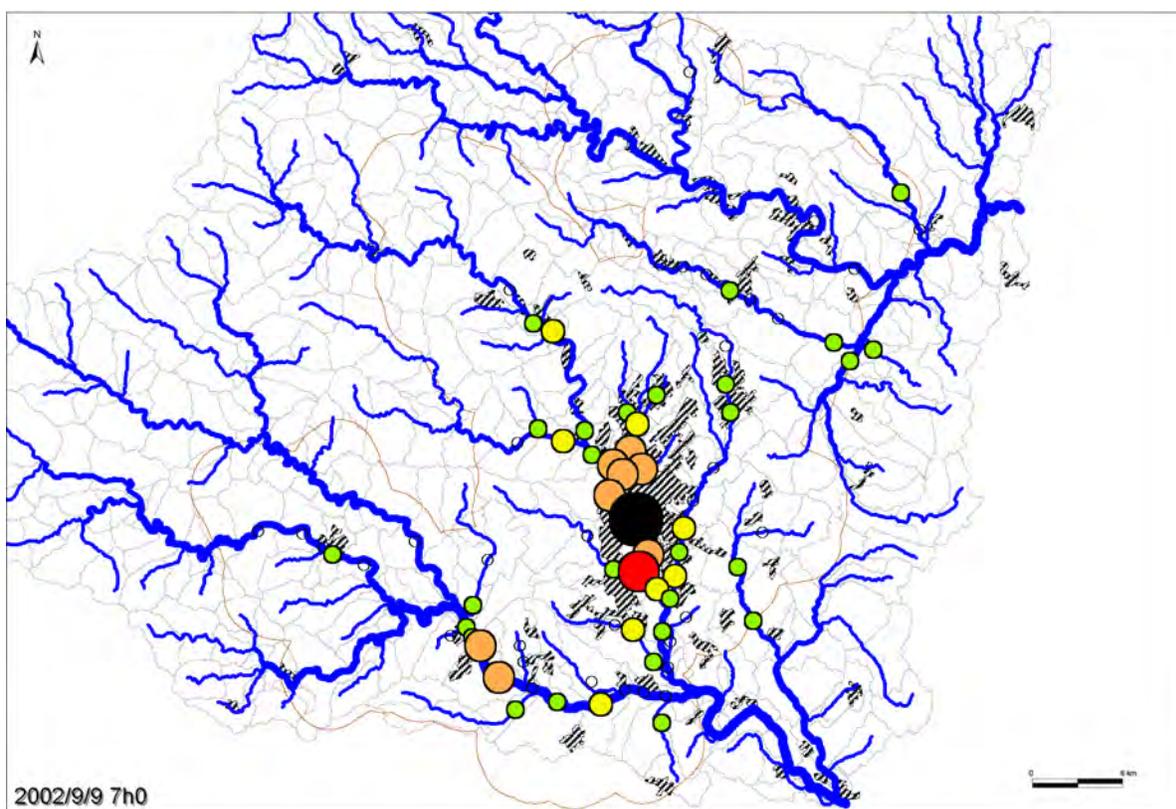


FIGURE 5.2 – Exemple de restitution du nombre d'impacts maximums estimés par la chaîne de simulation pour le TRI d'Alès, le 9 septembre 2002 à 7h00

Un exemple de simulation complète est proposé en annexe E. On notera que ces classes ont été déterminées de manière arbitraire. Elles ont été conçues sans l'avis de gestionnaires de crise et ne sont qu'un exemple de restitution possible de l'évolution des impacts au cours d'un événement.

Ces modalités de restitution restent à discuter avec les gestionnaires de crise tels que les SDIS, les services de protection civile des préfectures ou les référents départementaux inondation dans les Directions Départementales du Territoires.

5.1.2 Données de validation retenues

Choix des données

L'évaluation complète des résultats des simulations obtenues nécessiterait un jeu de données détaillées, décrivant l'événement pour les différentes étapes de la chaîne de simulation : débits atteints, emprises inondées et impacts associés (Falter et al., 2016).

À partir de l'éventail de ces informations, les causes des différences entre les sinistres recensés et le nombre maximum d'impacts estimé par la chaîne de simulation pourraient être identifiées. Toutefois, les jeux de données évoqués sont rarement accessibles dans le cas des crues rapides, même si pour la crue de 2002 dans le Gard on dispose de nombreuses estimations de débits (Cf §3.3.4) et d'emprises inondées sur le TRI d'Alès.

La modélisation pluie-débit Cinecar a fait l'objet d'évaluations sur l'événement de septembre 2002 au cours des travaux de Gaume and Bouvier (2004), Naulin (2012) : le critère de Nash sur la comparaison entre les débits de pointe observés et simulés est supérieur à 0,8 (figure 3.39), révélant une restitution du débit de pointe correcte du modèle Cinecar au cours de l'événement (Cf. §3.4).

L'étendue de la surface inondée observée au cours de l'événement du 8 septembre 2002 est disponible auprès des services de la DREAL Languedoc-Roussillon. Cette étendue représente la surface inondée de référence de la zone d'étude.

Sélection des données

Les premiers tests de validation présentés ici ont été menés à partir des informations recueillies par la Caisse Centrale de Réassurance sur les sinistres assureurs lors des événements CATNAT (Moncoulon and Quantin, 2013). Bien que ces données de sinistres constituent une source d'informations intéressantes sur la réalité des impacts (Cf. §3.3.6), la mise en place de cette comparaison à partir des données de la CCR laisse entrevoir quelques difficultés telles que :

- le caractère récent de la base de données. Elle est alimentée depuis 1995, ce qui limite le nombre d'événements d'inondations passées pouvant être simulés et testés ;
- l'aléa à l'origine des sinistres. Les sinistres ne se distinguent pas les dégâts provenant exclusivement des débordements de cours d'eau. Une part des sinistres est probablement associée au ruissellement (Moncoulon et al., 2014, Poulard et al., 2015) ;
- la non-exhaustivité de la base de données de la CCR. Seules les données des compagnies d'assurance réassurées auprès de la CCR figurent dans la base. Ce taux était de 37% en 2002 dans l'emprise des zones inondables du TRI d'Alès (figure 5.3) ;
- l'hétérogénéité et l'évolution dans le temps de la précision des biens assurés (à l'adresse, à la rue, à la commune, voir non classées). Seules les polices géolocalisées ont été prises en compte dans ce travail, ce qui limite le taux de couverture de la base de données exploitables. De plus c'est l'adresse de la police qui semble figurer dans la base, qui n'est pas nécessairement l'adresse du bien assuré.

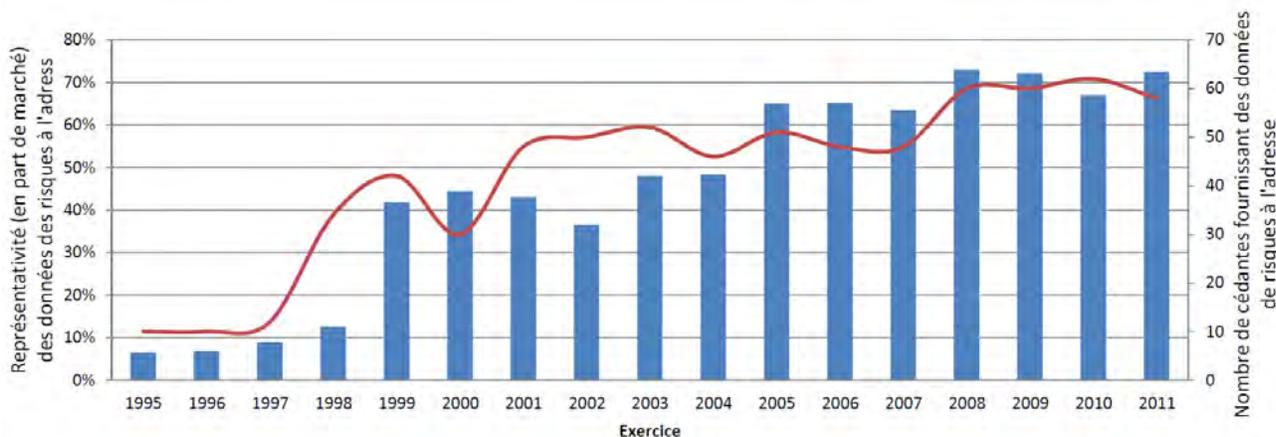


FIGURE 5.3 – Évolution du nombre de cédantes fournissant des données des risques à l'adresse et de leur représentativité de 1995 à 2011, d'après *Bidan and Quantin (2013)*

Pour faciliter la comparaison entre les données de sinistres et le nombre de bâtiments dans les zones inondées, estimé par la chaîne de simulation, les données de sinistres ont été sélectionnées de la façon suivante :

- polices bien géolocalisées (rue et adresse), afin de bien recenser les sinistres situés dans la surface inondée atteinte au cours de l'événement ;
- polices d'habitats individuels. Effectivement, les immeubles sont difficiles à inclure dans la méthode développée car ils peuvent posséder des polices d'assurances jamais sinistrées (appartement en étage), et plusieurs sinistres peuvent être enregistrés à la même adresse (deux polices au rez-de-chaussé d'un immeuble) ;
- assureurs fournissant des données de sinistres exhaustives (plus de 80% des données disponibles) ;
- les tronçons disposant de plus de 20 polices. Ainsi, il est possible d'assurer une confidentialité à laquelle la CCR est tenue vis-à-vis de clients assureurs. Dans le cas du TRI d'Alès cela représente 72 des 193 tronçons où les modélisations hydrauliques ont été effectuées.

En parallèle, le décompte des bâtiments effectué pour construire le modèle d'impacts a été adapté pour mieux correspondre à de l'habitat individuel. Une des caractéristiques de différenciation majeure de ces logements par rapport aux logements collectifs est la hauteur du bâtiment. De manière générale, un bâtiment individuel a une hauteur plus faible que celle d'un bâtiment collectif. À partir d'une hauteur seuil à déterminer, il est donc possible d'isoler globalement les habitations individuelles des bâtiments collectifs.

Ceci est confirmé par les données de l'administration Suisse qui alimente depuis les années 2000 une base de données sur les caractéristiques des bâtiments à l'usage exclusif d'habitation (*OFS, 2016*). En 2013, la Suisse comptabilise 1 405 496 bâtiments exclusifs à usage d'habitations sur l'ensemble de son territoire. Les habitats individuels représentent 69% de ces logements. Au sein des deux types d'habitats, il est possible de connaître le nombre d'étages moyen.

Le tableau 5.1 représentant la répartition en nombre de niveaux suivant le type de logement (individuel ou collectif) montre que la valeur de deux niveaux semble être la valeur seuil permettant de grouper la majorité des habitations individuelles (70%) et un minimum de logements collectifs (24%).

Tableau 5.1 – Répartition du nombre d'étages dans les habitats individuels et collectifs en Suisse

2013 nombre de niveaux	habitats individuels		habitats collectifs	
	absolue	relatif (%)	absolue	relatif (%)
1	100150	10,35	3535	0,81
2	590055	60,95	98516	22,52
3	255822	26,43	173182	39,59
4	19781	2,04	96098	21,97
5	2081	0,21	39078	8,93
>5	142	0,01	27056	6,19

Cette valeur de deux niveaux, permet d'estimer une hauteur seuil départageant les habitats dits "individuels" de ceux dits "collectifs". Cette valeur a été fixée à 7 mètres de manière à tenir compte de la hauteur des paliers et en considérant une hauteur moyenne sous plafond de 2,5 mètres (en accord avec la législation française sur la hauteur minimal d'un niveau habitable (DIHAL, 2013)).

En appliquant ce seuil aux bâtiments de la base de données TOPO® au niveau du centre ville d'Alès, les résultats semblent cohérents : les bâtiments collectifs identifiés sont concentrés dans le centre-ville (figure 5.4).

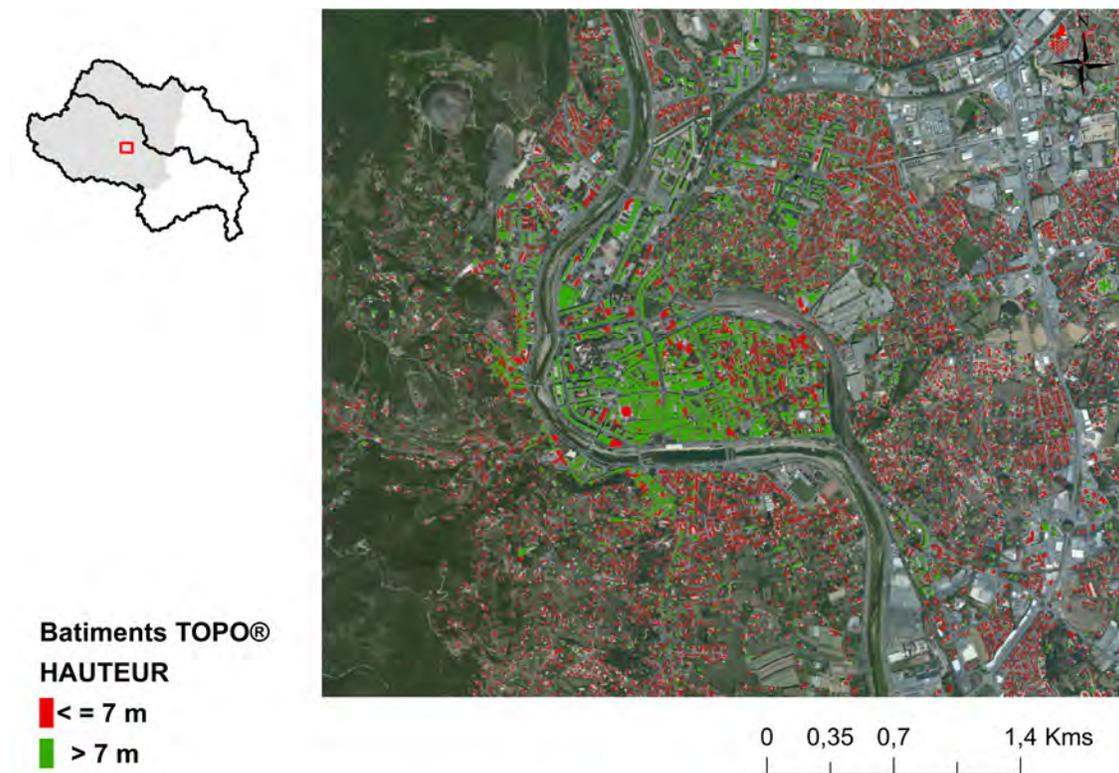


FIGURE 5.4 – Répartition des bâtiments de la base de données TOPO® en fonction de leur hauteur, centrée sur le centre-ville d'Alès - fond de carte : Imagery (ArcMap)

Seuls les bâtiments de la base de données TOPO® d'une taille égale ou inférieure à 7 mètres ont été retenus pour la construction du modèle d'impacts et la comparaison avec les infor-

mations de sinistres recensés en provenance de la Caisse Centrale de Réassurance.

Relation entre la liste de polices d'assurances sélectionnées au sein de la base CCR en 2002 et le nombre de bâtiments identifiés au sein de la base de données TOPO®

Pour chaque tronçon de la BNBV, la comparaison entre la liste de polices d'assurances sélectionnées et le nombre de bâtiments TOPO® a été effectuée à différentes échelles : tronçon complet et ses versants associés, puis surfaces inondées de fréquence 1000, 50 et 10 ans (figure 5.5).

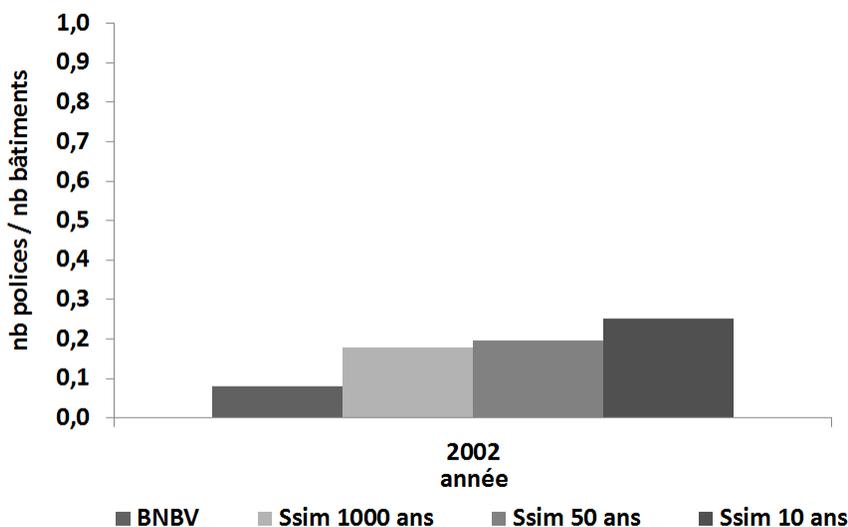


FIGURE 5.5 – Ratio moyen entre le nombre de polices d'assurances dans la base CCR et le nombre de bâtiments de la base de données TOPO obtenus à l'échelle des biefs de la BNBV, et des surfaces simulées de PDR 1000, 50 et 10 ans

Cette figure montre que la proportion de polices d'assurances répertoriées dans la base de la CCR est globalement faible par rapport au nombre de bâtiments alors que le taux d'assurance des bâtiments est proche de 100% en France. Ceci peut être attribué à l'exhaustivité limitée de la base de données de la CCR en 2002 (Bidan and Quantin (2013), Moncoulon and Quantin (2013)), mais également aux filtres mis en œuvre pour disposer de données de qualité sur les sinistres, évoqués précédemment.

Le ratio polices d'assurances / nombre de bâtiments (P/B) est plus élevé lorsque l'on se rapproche du cours d'eau. À titre d'exemple, le rapport moyen à l'échelle des versants est de 0,08 et croît jusqu'à 0,25 dans la surface simulée de fréquence décennale. La représentativité des données sur les polices d'assurances semble donc meilleure au sein des zones inondables nous intéressant ici.

Le ratio moyen est de 21% au sein de l'étendue inondée maximale estimée (PDR 1000 ans). La répartition géographique des ratios P/B est néanmoins hétérogène à l'échelle des 62 biefs disposant d'au moins un bâtiment dans leur surface inondable : il n'y a pas de distinction majeure entre le réseau réglementaire du SCHAPI et le réseau non surveillé, et la répartition des ratios semble relativement aléatoire (figure 5.6).

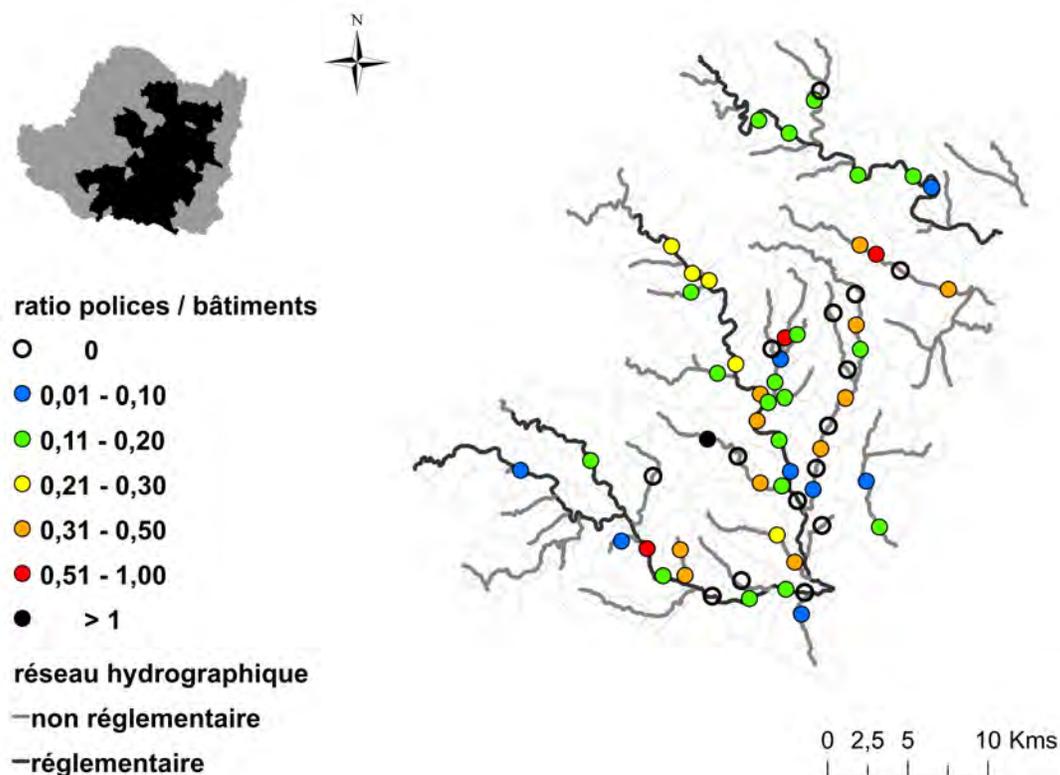


FIGURE 5.6 – Carte des ratios nombre de polices d’assurances / nombre de bâtiments à l’échelle de la zone inondable (période de retour 1000 ans)

Relation entre le nombre de sinistres et le nombres de polices d’assurance au cours de l’événement de 2002

Le taux de sinistralité est obtenu par le rapport entre la somme des sinistres recensés dans le base de données de la CCR au cours de l’événement de 2002 et la somme des polices d’assurances référencées dans cette même base de données au cours du même événement. Au cours de l’événement de 2002, ce taux de sinistralité oscille entre 16% et 33% dans la zone inondable, selon l’étendue considérée : emprise décennale, entre les emprises décennale et cinquantennale, et entre les emprises cinquantennale et millénale (figure 5.7). Le taux de sinistralité moyen dans la zone inondable est de 27%.

La proportion de sinistres la plus importante (33%) est obtenue au sein de l’emprise décennale, puis elle diminue en s’éloignant des cours d’eau ce qui semble logique en raison de l’extension limitée de l’emprise inondée sur certains biefs et des hauteurs de submersion plus faibles. Certains bâtiments peuvent être situés dans les emprises inondées, mais étant surélevés ils sont donc non sinistrés.

On remarque également qu’une proportion significative de sinistres est observée hors de l’emprise inondable millénale. Ces sinistres ne sont pas représentés par notre catalogue des surfaces inondées pour diverses raisons :

- la limite du réseau hydrographique représentée dans le cadre de ces travaux est de 5 km² de surface drainée. La représentation d’un réseau plus dense pourrait en partie réduire le nombre de sinistres situés en dehors des étendues inondées simulées.
- une proportion significative des sinistres semble liée à des phénomènes locaux (accumu-

lation d'eau dans des point bas, ruissellement, débordements de gouttières ou caniveaux) qui ne sont pas considérés dans le cadre de ces travaux mais qui s'avèrent néanmoins significatifs en termes de dégâts quelles que soient les inondations d'après les données des assureurs (Moncoulon et al., 2014).

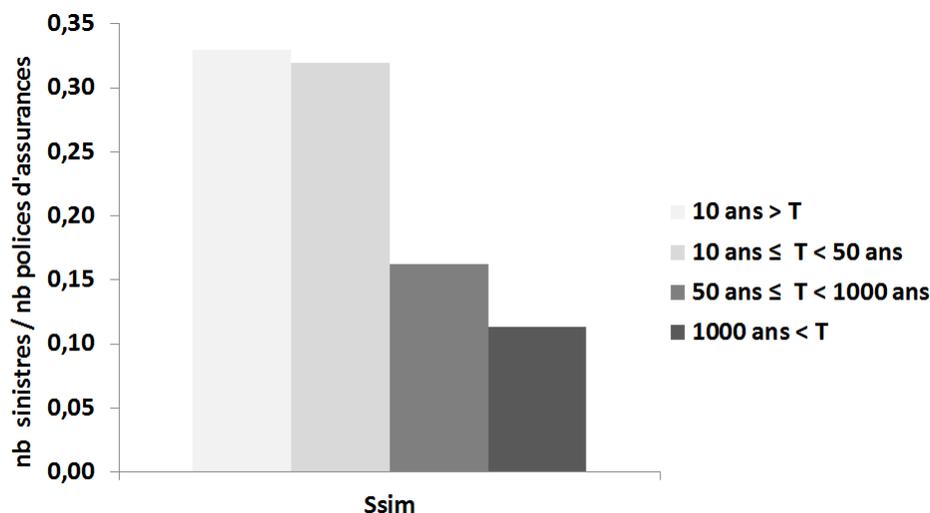


FIGURE 5.7 – Présentation des taux de sinistralité moyens au sein des différentes surfaces inondées simulées ($T=10, 50$ et 1000 ans) et en dehors de la zone inondable simulée

La proportion importante de sinistres situés en dehors des emprises de zones inondables rend plus complexe la comparaison entre les simulations et les données de la base CCR. Deux comparaisons seront effectuées afin de valoriser au mieux les données de la CCR :

- le nombre de bâtiments inondables estimés au sein des emprises calculées pour chaque bief sera comparé au nombre de sinistres répertoriés au sein de ces mêmes emprises. Si l'on fait l'hypothèse que la proportion de sinistres est effectivement plus importante au sein des zones réellement inondées, cette comparaison permettra de détecter une surestimation des emprises, mais ne permettra pas de mettre en évidence une sous-estimation des emprises inondées ;

- le nombre de bâtiments inondables estimés au sein des emprises calculées pour chaque bief sera aussi comparé au nombre de sinistres répertoriés au sein de l'emprise maximale possible d'inondation par débordement de cours d'eau (emprise millénale). Cette seconde approche vise à mieux intégrer les incertitudes associées dans les calculs à l'estimation des emprises inondées. Elle a pour inconvénient d'intégrer dans la comparaison des sinistres de la base de données de la CCR qui ne sont pas directement liés au débordement de cours d'eau, mais dont on peut espérer que le nombre est corrélé aux sinistres dus aux débordements.

Les deux modes de comparaison ne sont pas parfaits, mais l'association des deux approches offre la meilleure façon de valoriser la base de données de la CCR sur les sinistres.

Enfin le tableau 5.2 illustre le faible nombre de sinistres finalement disponible au sein de l'emprise inondable pour valider les calculs d'impacts, malgré le caractère très exceptionnel de cette crue. En résumé, un sinistre au moins est répertorié dans l'emprise inondée en 2002 pour seulement 33% des tronçons de la zone considérée. Très peu de tronçons ont un nombre

de sinistres répertoriés supérieur à 10 (figure 5.8). Bien que le Gard soit régulièrement touché par des crues soudaines dommageables, seul le jeu de données inventorié pour la crue de 2002 s'est avéré suffisamment riche pour permettre une validation de l'approche proposée. Ce constat a conduit à rechercher un autre jeu de validation possible : un territoire touché par des inondations exceptionnelles avec un nombre de sinistres répertoriés suffisamment important. C'est le cas de la crue de 2010 qui a été retenue compte tenu de ces critères.

Comme cela a déjà été indiqué, ceci est probablement dû à l'alimentation partielle de la base de données de la CCR en 2002 et aux filtres multiples mis en place dans la sélection des données.

Néanmoins ces chiffres de sinistres ne coïncident pas avec les impacts observés de l'événement de 2002, qui est véritablement un événement hors norme dans la région : comme l'illustre par exemple la figure 5.9 qui présente les périodes de retour des débits simulés par Cinecar. Le taux de déclarations de sinistres, inférieur à 50%, pour les polices situées dans les emprises inondées est surprenant. Cela semble être une autre constante des données des assureurs quelle que soit la crue (Moncoulon et al., 2014).

Tableau 5.2 – Distribution de la liste des polices d'assurances sélectionnées et du nombre de sinistres associés au cours de l'événement du 8 septembre 2002 dans le Gard

Zone (PDR ans)	\sum polices	\sum sinistres	% polices	% sinistres
< 10	103	34	2,47	6,33
10 - 50	147	47	3,52	8,75
50 - 1000	222	36	5,32	6,70
> 1000	3698	420	88,68	78,21

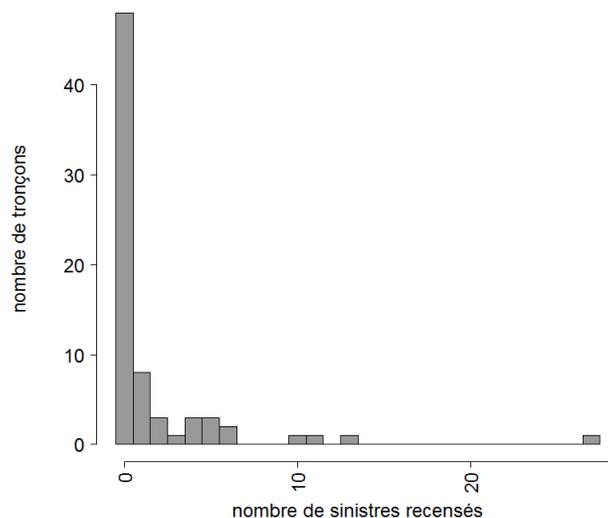


FIGURE 5.8 – Distribution du nombre de sinistres disponibles dans la zone inondable à l'échelle des biefs, au cours de l'événement du 8 septembre 2002 dans le Gard

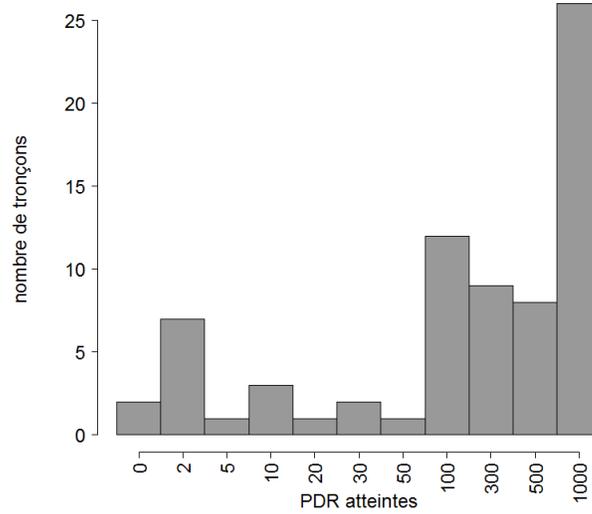


FIGURE 5.9 – Distribution des débits de pointe simulés atteints par le modèle hydrologique Cinécar au cours de l'événement du 8 septembre 2002 par comparaison aux quantiles de débits SHYREG sur les différents tronçons du modèle

5.1.3 Comparaison des résultats de simulations avec les sinistres

Comparaison en valeurs

La figure 5.10 présente une première comparaison des sinistres recensés et des bâtiments dans la zone inondable de période de retour millénale, sachant que quelle que soit l'emprise inondée, des sinistres sont observés dans l'emprise millénale et au-delà et qu'il existe des incertitudes sur l'emprise inondée calculée.

Cette comparaison illustre des différences importantes. Tout d'abord, le nombre de bâtiments identifiés est bien plus élevé que celui des sinistres recensés. Ceci est en partie le résultat de l'effet combiné du ratio entre les polices répertoriées et les bâtiments dans le secteur étudié en 2002 et du taux de sinistralité limité évoqué dans les paragraphes précédents. D'après ces deux ratios moyens calculés sur l'ensemble de la zone d'étude, respectivement de 21% et 27%, le ratio entre le nombre de sinistres et le nombre de bâtiments inventoriés devrait se situer aux alentours de 6% : produit de 0,21 et de 0,27. La surestimation peut aussi être attribuée au fait que l'emprise millénale a été considérée dans cette première comparaison alors qu'elle n'est pas atteinte sur tous les tronçons. En revanche, les points apparaissent très dispersés sur la figure 5.10, signe que les sinistres recensés sont peu corrélés aux nombres de bâtiments présents dans les emprises.

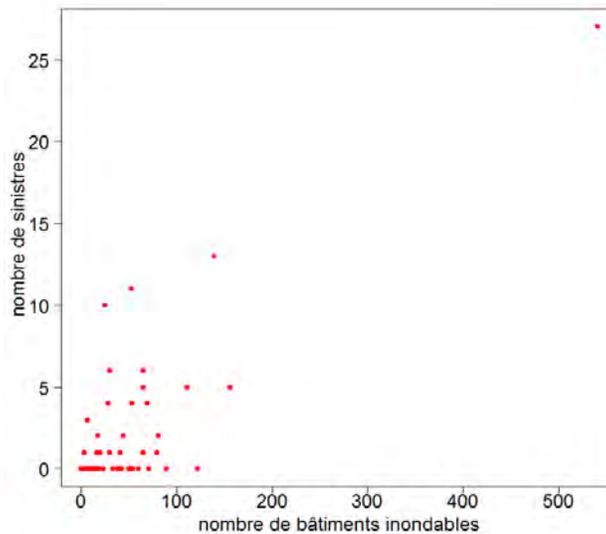


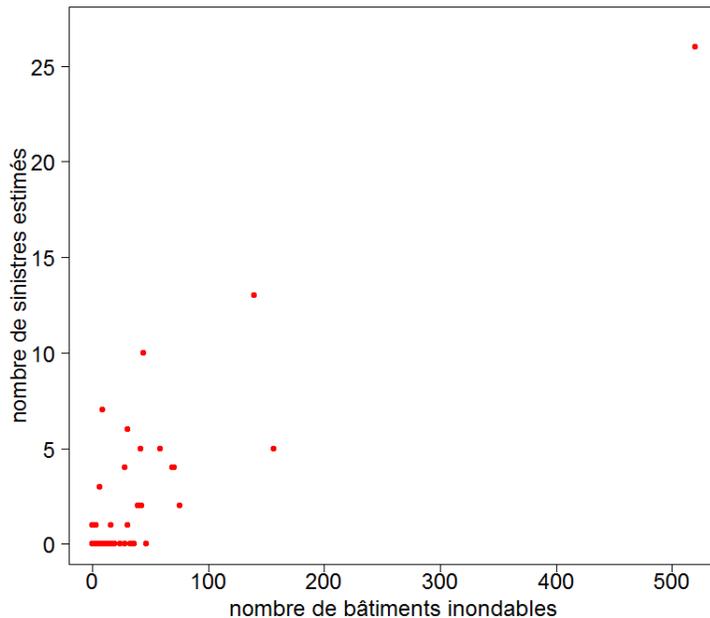
FIGURE 5.10 – Comparaison du nombre de bâtiments et du nombre de sinistres dans la zone inondable (période de retour 1000 ans)

Au cours de l'événement de 2002, la zone inondable millénale ne correspond pas toujours à l'emprise inondée au cours de l'événement. Une seconde comparaison est conduite en se limitant à l'emprise inondée calculée pour chaque bief. Les sinistres seront interpolés pour mieux correspondre aux nombres de sinistres entre deux surfaces inondées du catalogue d'emprises en suivant la formule (5.2) :

$$\text{nombre de sinistres interpolés}_x = \text{sinistres}_n + \left[(Q_{sim} - Q_n) \times \frac{(\text{sinistres}_{n+1} - \text{sinistres}_n)}{(Q_{n+1} - Q_n)} \right] \quad (5.2)$$

où Q_n et Q_{n+1} sont les débits SHYREG encadrant le débit simulé Q_{sim} , et $sinistres_n$ et $sinistres_{n+1}$ sont le nombre de sinistres dans les surfaces inondées associées. Le nombre de sinistres interpolés correspond au nombre de sinistres maximum estimé par la chaîne de simulation.

La figure 5.11 montre la comparaison des sinistres interpolés avec le nombre de bâtiments situés dans les emprises inondées estimé par la chaîne de simulation pour l'événement de 2002. Les différences entre les deux jeux de données sont toujours aussi importantes.



$$\text{sinistres } \delta_{(x)} = \text{nombre de sinistres interpolés}_{(x)} \times \frac{\overline{(\text{Polices}/\text{Bâtiments})}_{\text{interpolés}_{PDRatteinte(x)}}}{(\text{Polices}/\text{Bâtiments})_{\text{interpolés}_{PDRatteinte(x)}}} \quad (5.5)$$

où $\overline{(\text{Polices}/\text{Bâtiments})}_{S_{sim1000ans}}$ est le ratio moyen entre le nombre de polices d'assurances et le nombre de bâtiments dans l'emprise simulée millénaire, $(\text{Polices}/\text{Bâtiments})_{S_{sim1000ans(x)}}$ le ratio entre le nombre de polices d'assurances et le nombre de bâtiments dans l'emprise millénaire du tronçon $_{(x)}$, $\overline{(\text{Polices}/\text{Bâtiments})}_{\text{interpolés}_{PDRatteinte(x)}}$ le ratio moyen entre le nombre de polices d'assurances et le nombre de bâtiments de l'emprise simulée pour la tronçon $_{(x)}$ et $(\text{Polices}/\text{Bâtiments})_{\text{interpolés}_{PDRatteinte(x)}}$ le ratio entre le nombre de polices d'assurances et le nombre de bâtiments de l'emprise simulée pour le tronçon $_{(x)}$.

Ces deux corrections sont destinées à compenser les variations des ratios polices/bâtiments présentées sur la figure 5.6 et à ramener le nombre de sinistres à celui qui aurait dû être observé pour un ratio polices/bâtiments "moyen" sur chaque bief :

- dans le cas de la correction α , celle-ci est appliquée à partir des ratios estimés dans l'emprise T=1000 ans ;
- dans le cas de la correction δ , celle-ci est appliquée à partir des ratios estimés dans l'emprise de période de retour atteinte au cours de la simulation.

Ces deux corrections prennent donc en compte la variabilité du taux de couverture des polices/bâtiments. Ainsi, après correction, la variabilité des sinistres observés dépend uniquement du taux de sinistralité évoqué précédemment. Les figures 5.12 et 5.13 illustrent ensuite les effets de ces deux corrections sur les sinistres estimés.

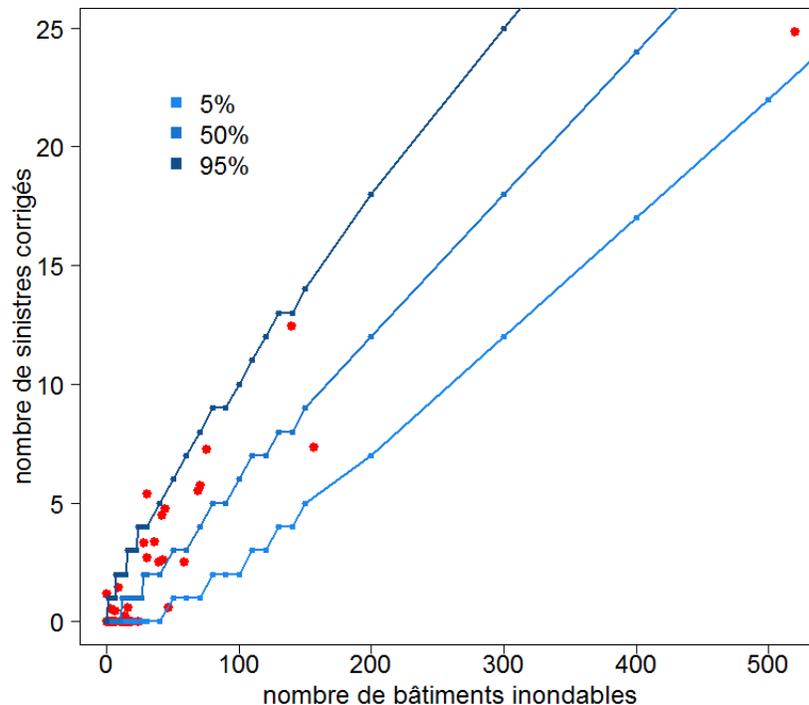


FIGURE 5.12 – Sinistres répertoriés corrigés (coefficient α) en fonction du nombre N de bâtiments calculé au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale de N tirages et probabilité de succès de 6%

Les diverses corrections améliorent nettement la similitude entre les sinistres et les impacts. La dispersion résiduelle peut être attribuée au caractère aléatoire du ratio sinistres/polices. Ce caractère aléatoire peut être représenté par une loi binomiale dont le taux de succès est le taux sinistres/polices moyen (Cf. tableau 5.3). Les graphiques présentent les probabilités 5%, 50% et 95% associées aux sinistres interpolés (figure 5.12 et 5.13), en considérant ce processus binomial.

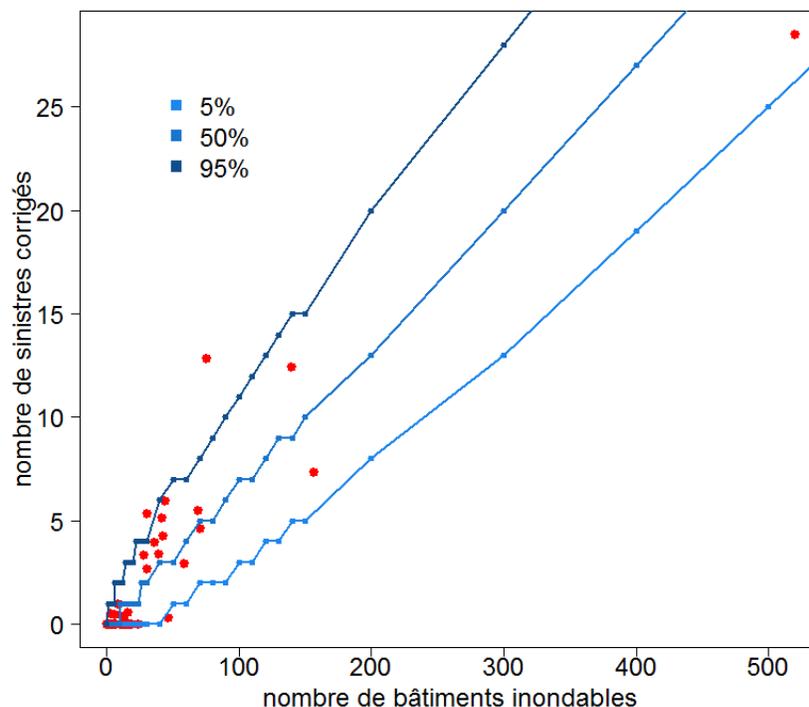


FIGURE 5.13 – Sinistres répertoriés corrigés (coefficient δ) en fonction du nombre N de bâtiments calculé au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale de N tirages et probabilité de succès de 6%

Tableau 5.3 – Taux sinistres/bâtiments moyens appliqués pour définir les intervalles à 90% présentés sur les figures 5.12 et 5.13 - S/P = sinistres/polices ; P/B = polices/bâtiments

expérience	taux S/P(%)	taux P/B(%)	probabilité de réussite(%)	nombre de tronçons
correction α	29,66	20,40	6,05	47
correction δ	33,20	20,42	6,78	41

On remarque finalement que la dispersion des points de la figure 5.12 et celle des points de la figure 5.13 correspondent au seuil d'erreur théorique à 10% avec 3 points dans chaque cas situés en dehors de l'intervalle 5-95%.

Toutefois certains points sont fortement éloignés de l'intervalle pour des raisons qui seront détaillées dans le paragraphe 5.2.3).

Cet intervalle de confiance est très large cependant et le nombre moyen de sinistres répertoriés est limité en général sur les biefs du fait du ratio très faible sinistres/bâtiments (6%). La base

de donnée de la CCR est, en l'état actuel des choses, une source d'information qui ne permet pas une réelle validation du modèle d'impacts sauf pour un nombre limité de biefs : les biefs comportant un très grand nombre de bâtiments en zone inondable.

Comparaison cartographique

La figure 5.14 présente une comparaison cartographique des impacts simulés et du nombre de sinistres présentés sur la figure 5.13. Pour faciliter la comparaison suivant une échelle unique, le nombre de sinistres a été ajusté (formule (5.6)) en tenant compte du ratio moyen présenté dans le tableau 5.3.

$$\text{sinistres ajustés}_{(x)} = \frac{\text{sinistres correction } \delta_x}{\text{probabilité de réussite } \delta} \quad (5.6)$$

La différence relative entre les deux informations est illustrée sur la figure 5.15, en suivant la formule (5.7).

$$\text{différence relative entre impacts et sinistres } \delta_x = \frac{\text{nb. de bâtiments } \max_x - \text{nb. de sinistres ajustés}_x}{\text{nb. de sinistres ajustés}_x} \quad (5.7)$$

Ces cartes montrent finalement que, malgré des différences locales significatives pour quelques biefs, la hiérarchisation des cours d'eau pour lesquels les principaux impacts sont observés ou prévus est la même.

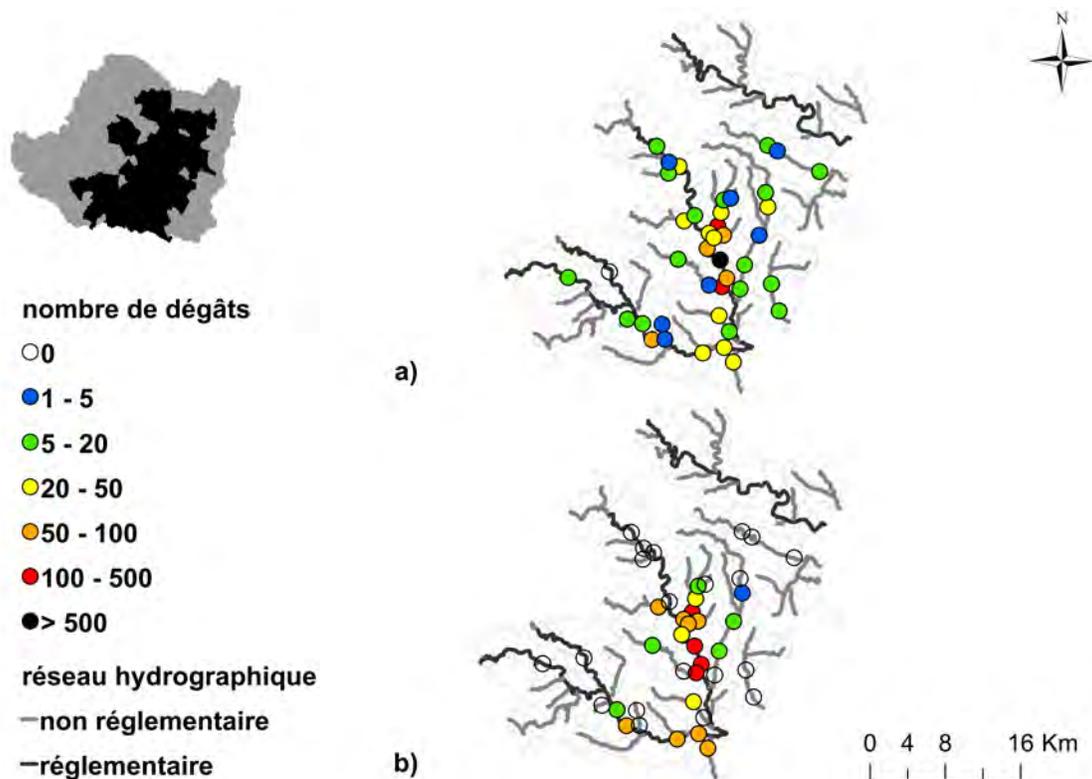


FIGURE 5.14 – Cartes des dégâts au cours de l'événement à l'échelle de 41 tronçons, a) nombre de bâtiments inondés estimés, b) nombre de sinistres recensés (après ajustement δ)

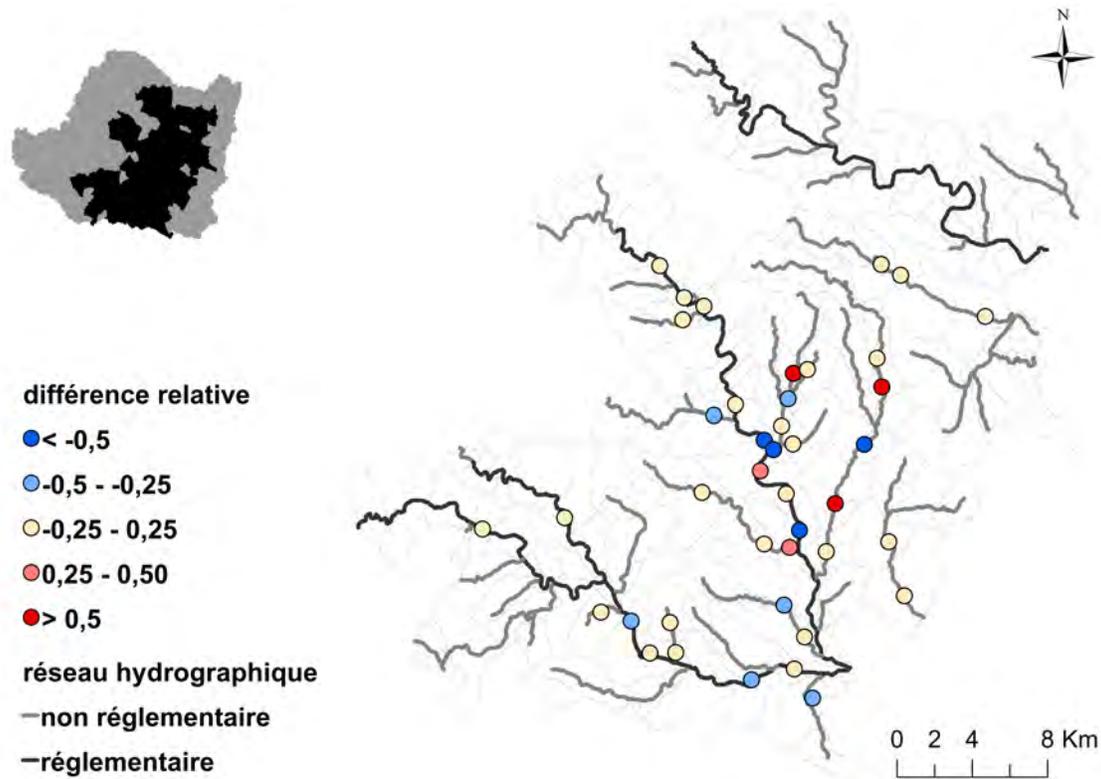


FIGURE 5.15 – Cartes des différences relatives entre les sinistres recensés (après ajustement δ) et le nombre de bâtiments estimés au cours de l'événement à l'échelle de 41 tronçons

5.1.4 Comparaison des emprises simulées avec les emprises observées

En complément de la validation au travers de la base des données de sinistres, dont nous avons souligné les limites, les étendues maximales des emprises inondées, estimées pour l'événement 2002, ont été comparées aux emprises relevées après la crue. Les écarts sur les emprises proviennent des incertitudes des simulations hydrologiques et du modèle hydraulique.

Le modèle indique des valeurs d'impacts importantes sur certains affluents hors réseau réglementaire comme le Grabieux, l'Avène, l'Alzon, le Galeizon et l'Amous, secteurs sur lesquels l'absence d'emprise de référence n'avait pas permis l'évaluation de la partie hydraulique de la chaîne de prévision proposée. Ce sont les emprises calculées sur ces affluents qui sont présentées ci-dessous (figure 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 et 5.20).

La surface inondée de référence couvre uniquement l'aval de l'Alzon, ce qui rend les comparaisons avec la surface simulée limitées sur cette rivière (figure 5.19).

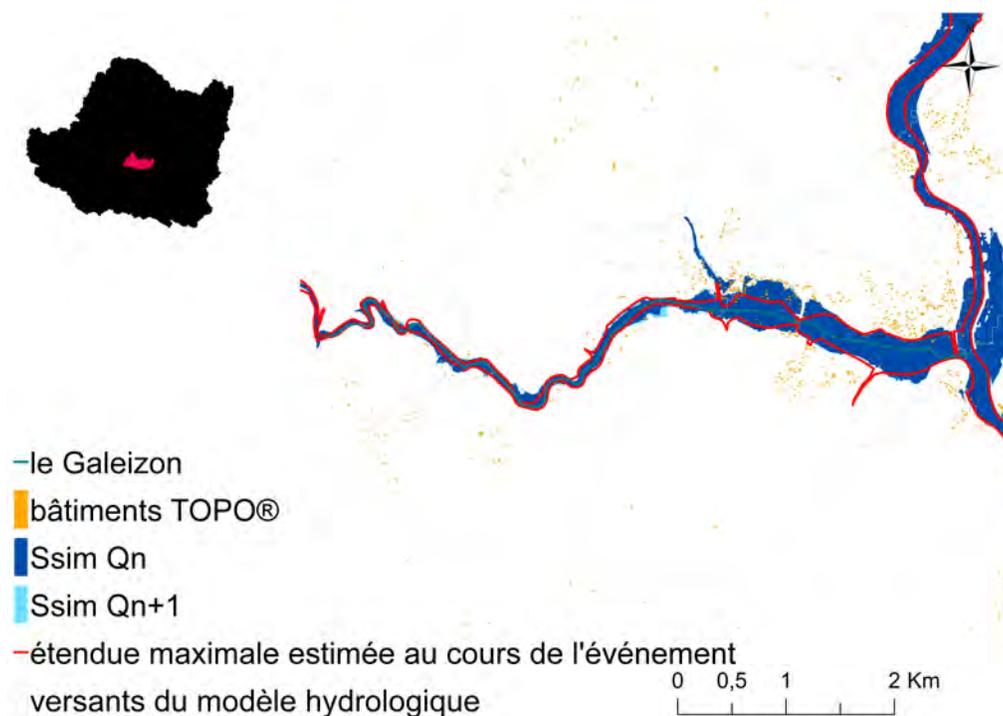


FIGURE 5.16 – Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinécar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur le Galeizon au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon

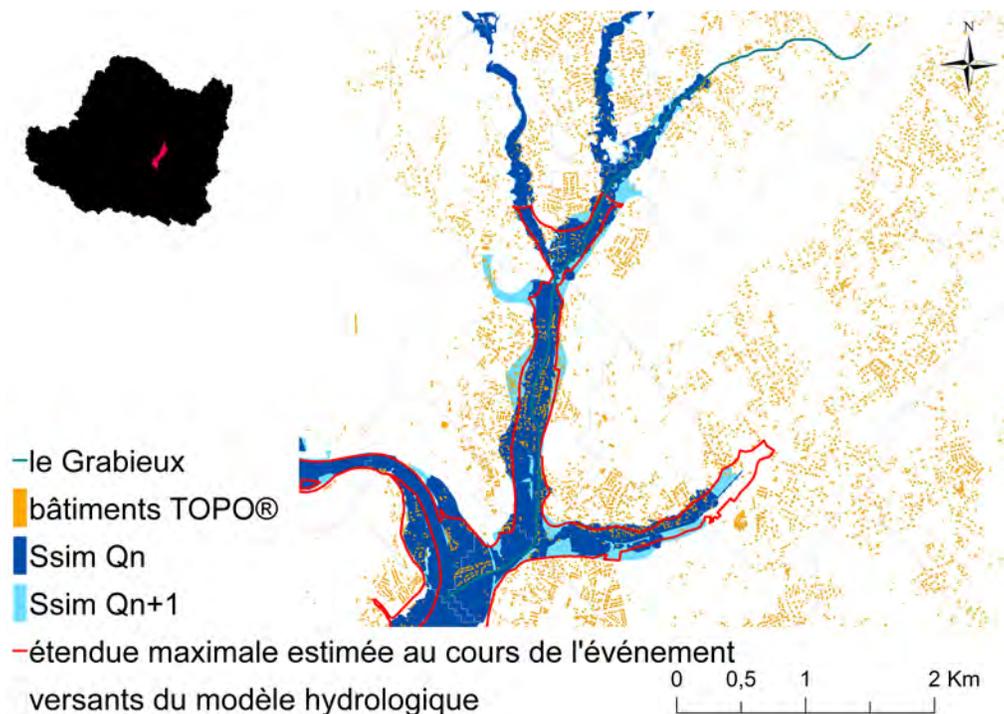


FIGURE 5.17 – Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur le Grabieux au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon

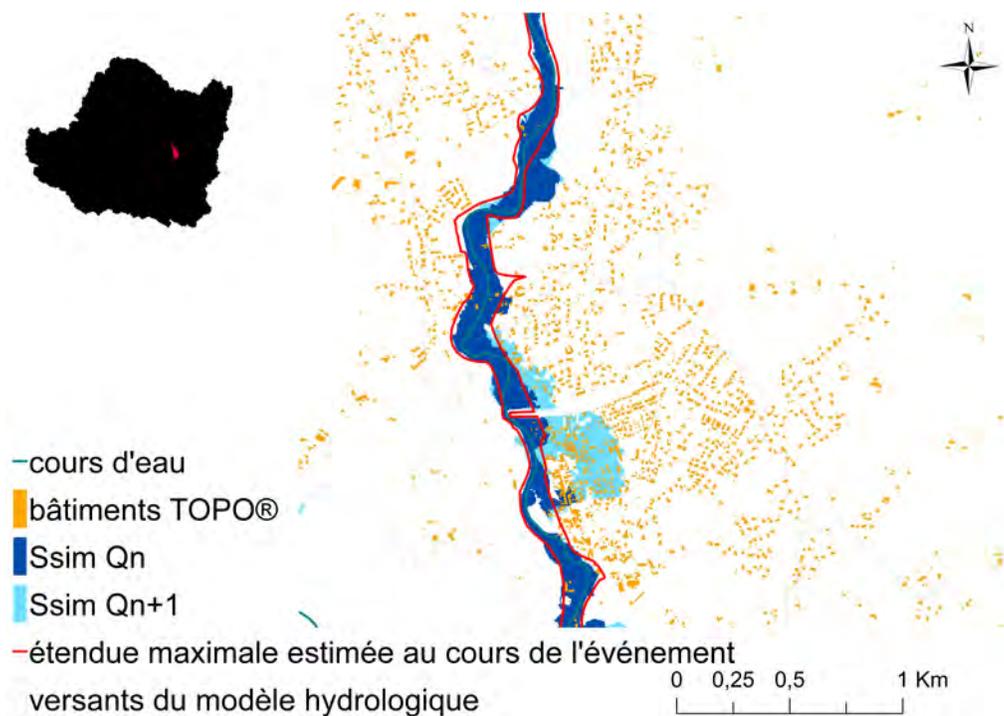


FIGURE 5.18 – Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur l'Avène au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon

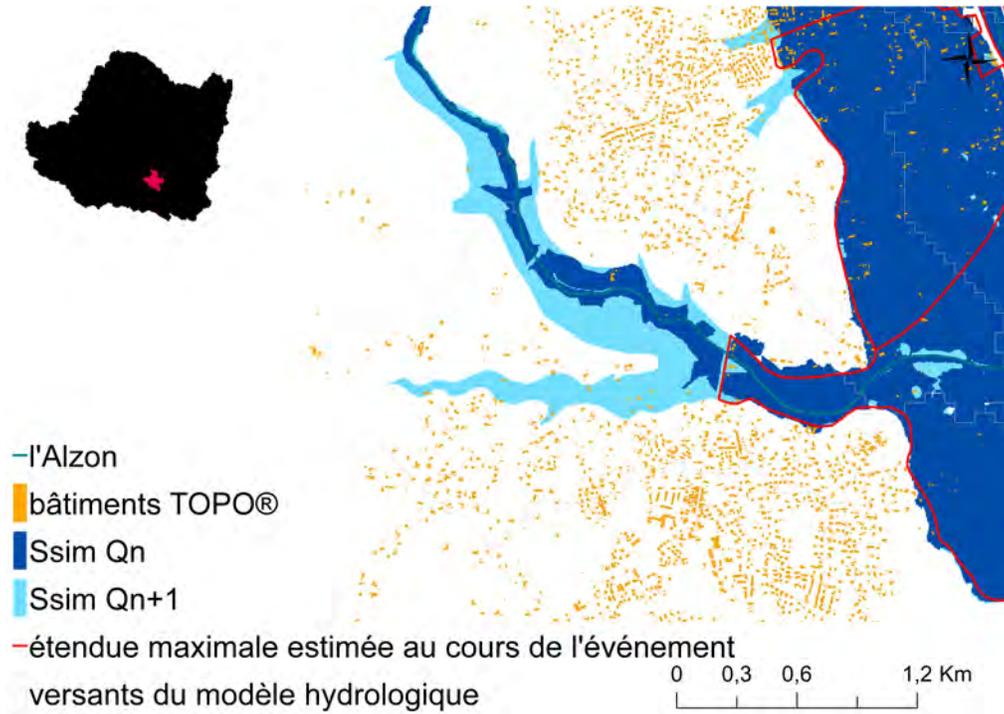


FIGURE 5.19 – Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur l'Alzon aval au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon

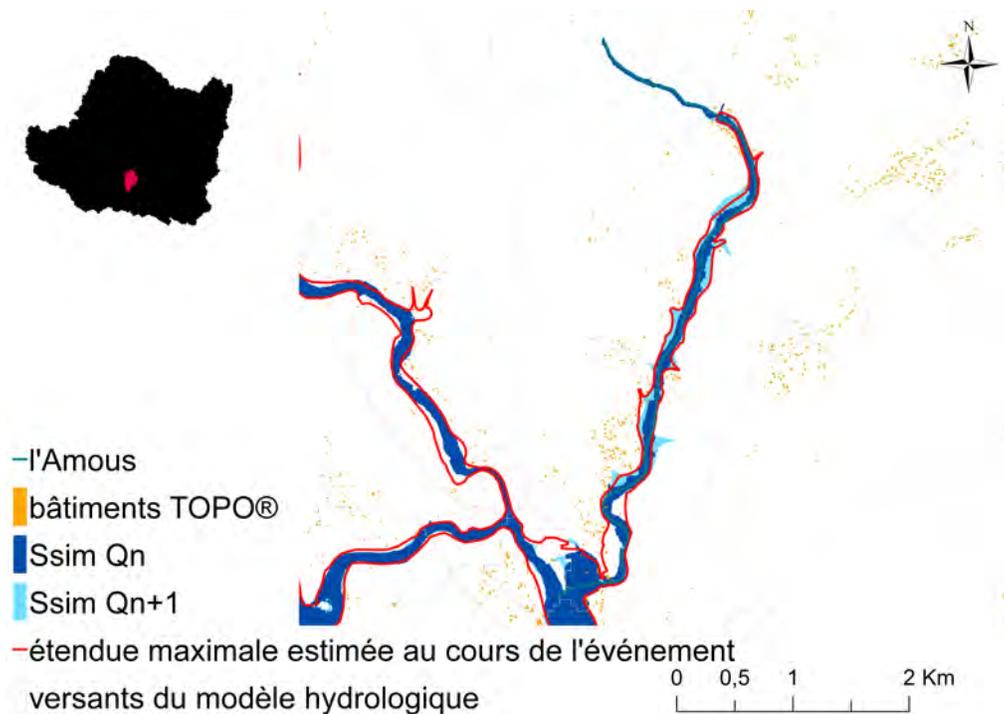


FIGURE 5.20 – Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur l'Amous au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon

L'ensemble de ces cartes révèle des différences un peu plus importantes que celles mises en évidence dans le chapitre 4 entre les emprises estimées et l'emprise relevée. Ces écarts restent cependant modérés dans l'ensemble. Par ailleurs, les secteurs où des écarts importants sont observés ne sont généralement pas bâtis à l'exception du cas de l'Avène. L'impact des incertitudes des calculs d'emprises sur les calculs d'impacts reste donc dans l'ensemble limité, même si quelques écarts significatifs peuvent localement apparaître. Comme nous le présentions : la chaîne de prévision d'impacts ne peut être parfaite.

Dans l'ensemble l'étendue maximale des zones inondées relevées lors de l'événement concorde généralement avec celle simulée sur les secteurs examinés : des résultats encourageants aux vues des incertitudes existantes à la fois sur les débits simulés et sur le calcul des emprises inondées du modèle d'impacts (Cf. § 4.4.4).

5.1.5 Bilan de l'étude de cas menée sur le TRI d'Alès

Pour l'événement de 2002, les informations disponibles et retenues au sein de la base de données de la CCR présentent un certain nombre de limites : toutes les polices référencées dans la base de données ne sont pas géolocalisées à l'adresse ou à la rue et ne peuvent donc pas être exploitées à des fins de validation (figure 5.3). Le taux de couverture de la base de données était encore limité en 2002. Compte tenu du taux de déclaration de sinistres inférieur à 50% dans les secteurs inondés, le ratio moyen est faible (de l'ordre de 6%) entre le nombre de bâtiments situés en zone inondée et le nombre de sinistres déclarés. Enfin, le taux de couverture de la base de données de la CCR est spatialement variable, ce dont il a fallu tenir compte pour la validation. L'étude de cas menée dans le Gard a cependant permis de montrer l'intérêt potentiel des informations présentes dans cette base de données pour l'évaluation des simulations d'impacts. Cet intérêt croîtra avec le temps et l'augmentation du taux de couverture de la base de données de la CCR.

Pour aller plus loin, il semble nécessaire de multiplier les croisements entre sinistres et impacts simulés pour des événements plus récents sur lesquels les informations provenant de la CCR seront plus complètes (Cf figure 5.3). Ainsi, le travail de comparaison entre les impacts et les sinistres permettra une évaluation plus correcte du modèle pluie-débit-impacts.

L'étendue de la surface simulée atteinte est globalement cohérente avec celle relevée post-catastrophe, malgré des incohérences locales : l'étendue de la surface inondée dans la traversée d'Alès est, par exemple, surestimée sur les deux rives (figure 5.21). En dépit de ces divergences locales, la hiérarchie d'impacts estimés sur la zone d'étude reste similaire à celle fournie par les sinistres, ce qui est un résultat satisfaisant : les deux sources d'informations conduiraient probablement les gestionnaires de crise à effectuer des choix similaires en termes d'actions à entreprendre et de priorités.

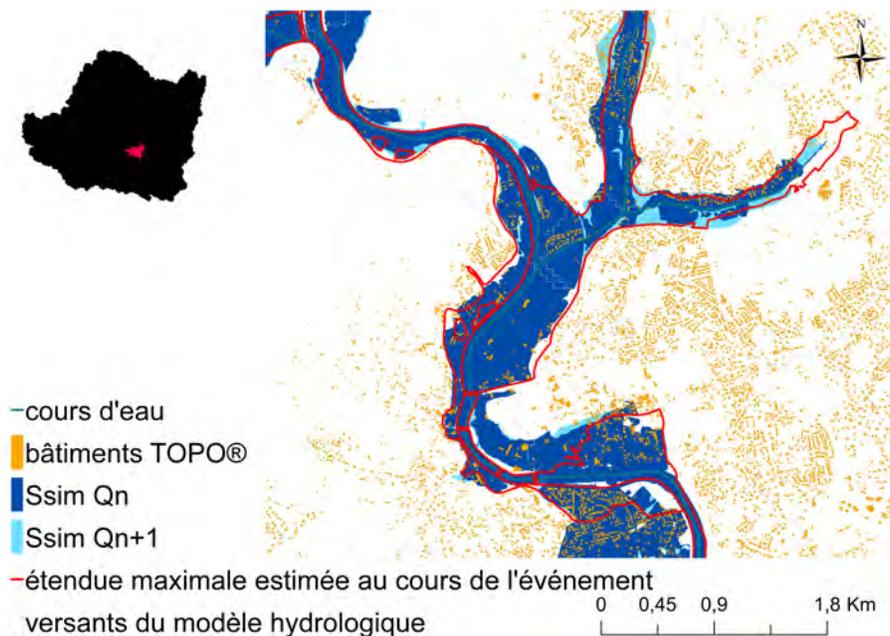


FIGURE 5.21 – Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et étendue inondée relevée sur le Gardon d'Alès à Alès, au cours de l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard - source : DREAL Languedoc Roussillon

Les modélisations hydrologiques et hydrauliques effectuées sur le Gard peuvent encore faire l'objet d'améliorations. Les emprises calculées automatiquement peuvent, par exemple, être remplacées par des emprises expertisées là où celles-ci sont disponibles. Toutefois cette première application met déjà en évidence les avantages de la méthode, qui permet de hiérarchiser correctement les impacts malgré sa simplicité de mise en œuvre. Ces premières conclusions ont fait l'objet d'une présentation orale au cours d'une conférence internationale (Cf. annexe F).

Compte tenu des limites de la base de données de la CCR, il n'a pas été possible d'envisager un second test de validation sur une crue moins intense et moins généralisée dans le Gard. Un test de validation de l'approche a donc été entrepris sur un événement de crue majeur ayant touché un autre secteur de la région méditerranéenne : la crue de l'Argens et de ses affluents de juin 2010. C'est un test particulièrement intéressant dans la mesure où les modèles hydrologiques et hydrauliques ont été transposés à partir de l'expérience de l'étude de cas du Gard sans calage complémentaire. Ce second test nous éclaire donc sur les performances à attendre de la méthode proposée si elle était étendue à une zone géographique plus vaste.

5.2 Application au bassin versant de l'Argens pour la crue de juin 2010

5.2.1 Présentation de la zone d'étude

Le bassin de l'Argens s'étend sur 2 700 km², soit plus de la moitié du département du Var, département bien connu pour être sujet à des crues-éclair fréquentes et intenses. En juin 2010, 25 morts et 1 milliard d'euros de dommages directs ont été enregistrés. Suite à cet épisode désastreux, le département a été impacté par de nouvelles inondations mortelles en novembre 2011, octobre 2012, janvier 2014, septembre 2014 et novembre 2014. En moins de cinq ans, trente-neuf personnes ont trouvé la mort dans des inondations dans ce département. Pour cette raison, une partie du département a été définie comme Territoire à Risque Important d'inondation (TRI Est-Var) dans le cadre de l'application de la Directive Européenne Inondation. De plus, le bassin de l'Argens a été retenu pour la mise en œuvre d'un Programme d'Action de Prévention des Inondation (PAPI).

Le bassin de l'Argens est bordé par les gorges du Verdon au nord et le littoral Méditerranéen au sud (figure 5.22). Il comprend une grande variété de configurations de lits de rivières, allant de vallées étroites en forme de V jusqu'à de larges plaines inondables dans la partie aval du cours de l'Argens. Quelques statistiques sur les caractéristiques des lits des rivières présentes sont fournies dans le tableau 5.4.

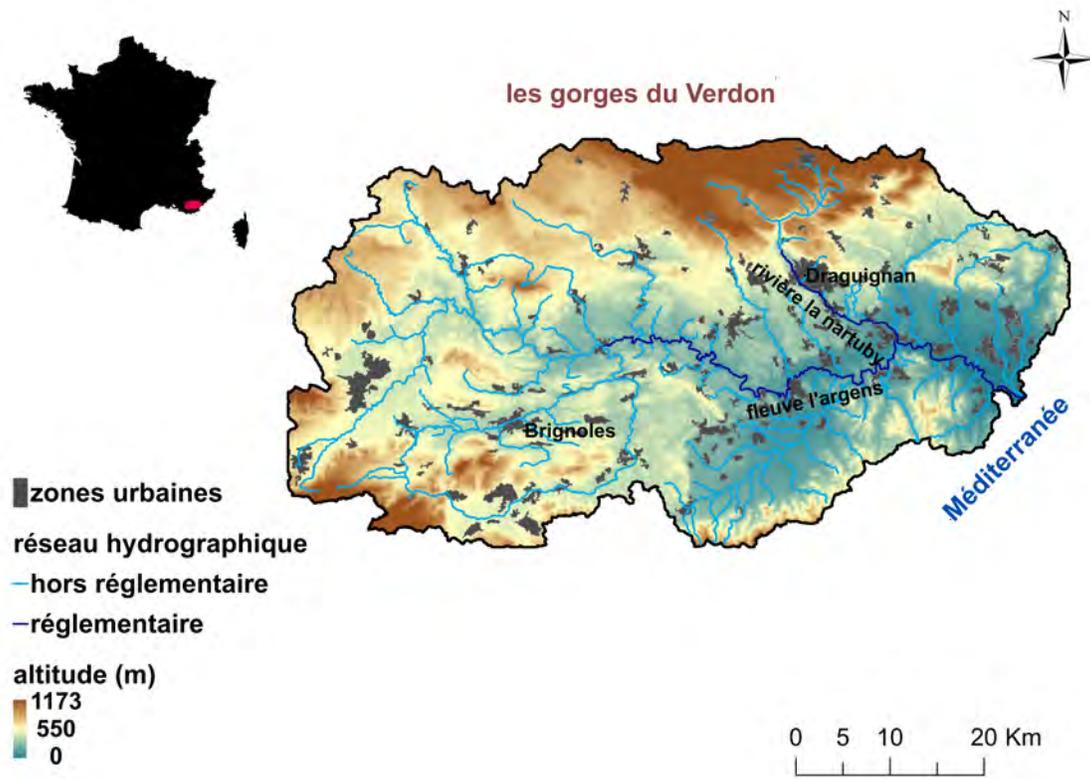


FIGURE 5.22 – Caractéristiques du bassin versant de l'Argens

Tableau 5.4 – Caractéristiques hydrogéomorphologiques des tronçons de rivière (233) du bassin de l'Argens - source : base de données SYRAH (Valette and Cunillera, 2010) -
 R. = réseau; Llm = Largeur lit mineur; LIM = Largeur lit majeur; RdE = Rapport d'Encaissement (Llm/LIM); moy = moyenne; min = minimum; max = maximum

caractéristiques des tronçons	R. réglementaire (9)	hors R. réglementaire (224)
pente (%) [min ;max]	[0,06 ;1,17]	[0,03 ;21,28]
Llm (m) moy/ [min ;max]	25 / [5,5 ;41]	4 / [1 ;11]
LIM (m) moy/ [min ;max]	734 / [132 ;3195]	381 / [3 ;4803]
RdE moy/ [min ;max]	32 / [3 ;77]	174 / [8 ;3345]

La zone touchée par l'événement de juin 2010 correspond à la partie aval du bassin versant, présentée sur la figure 5.23. Une partie du réseau hydrographique étudié est couvert par le système de prévision des crues Vigicrues (SCHAPI). Cependant, certains des dommages liés aux crues-éclair touchent des tronçons de rivières encore non couverts par ce dispositif et notamment les affluents de l'Argens : Nartuby, Florièye et Arc..

Le réseau hydrographique retenu pour l'étude correspond à une surface drainée minimale de 5 km² : il s'étend sur un linéaire de 345 km, répartis sur 173 tronçons (tronçons de 2 km de long en moyenne), parmi lesquels 42 seulement (72 km) sont couverts par le système de prévision des crues (figure 5.23). Cela illustre l'intérêt et la difficulté de développer des systèmes de prévision des crues-éclair au-delà du réseau de surveillance actuel.

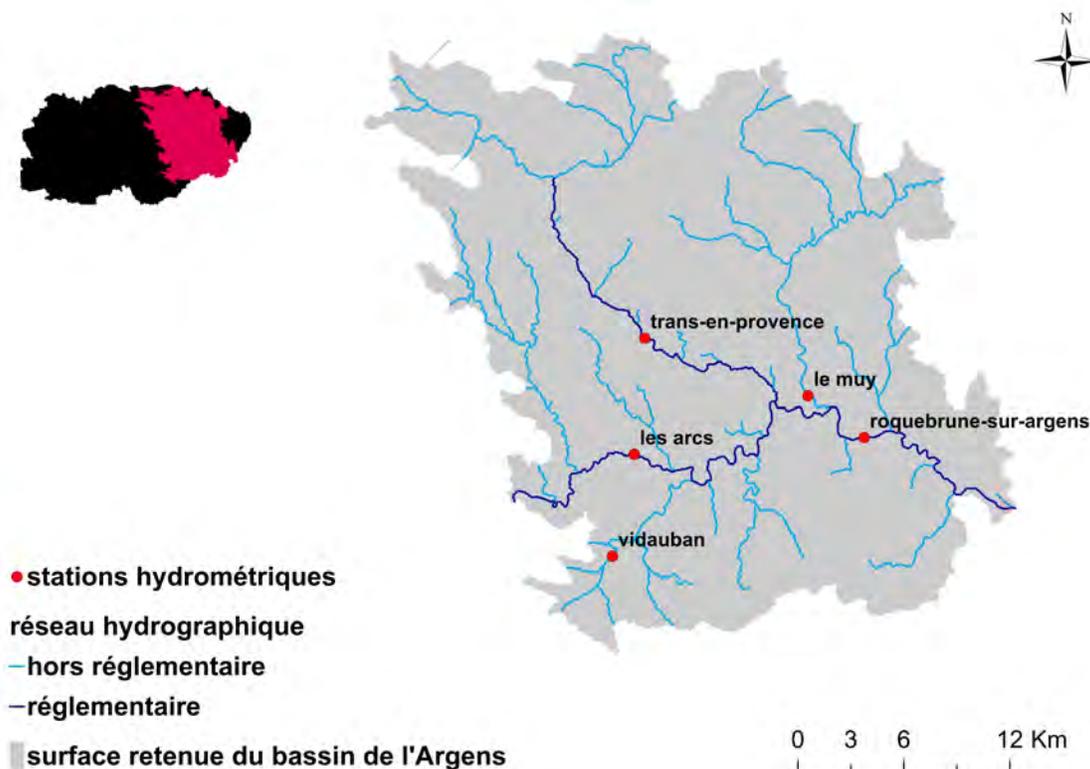


FIGURE 5.23 – Zone d'étude retenue pour l'étude de cas du Var au sein du bassin versant de l'Argens

5.2.2 Mise en œuvre de la chaîne de simulation

Données mobilisées

La mise en œuvre du modèle d'impacts a été basée sur un modèle numérique de terrain du RGE Alti de maille 5 m mise à jour en 2014, dont la précision altimétrique oscille entre 20 cm dans les zones couvertes par des informations LiDAR et 70 cm dans celles provenant de l'exploitation photogrammétrique de photographies aériennes.

La région est équipée d'un réseau de stations hydrométriques relativement dense (figure 5.23), sur lesquelles la relation hauteur-débit est souvent mal déterminée pour les fortes crues (Cf. §3.3.4). Par ailleurs, plusieurs de ces stations ont été endommagées ou détruites lors de la crue de juin 2010. Les informations radars sont fournies par le radar bande S de Collobrières et les radars bande X du Mont Vial et celui de Maurel (Cf. §3.2.2). Les lames d'eau radar utilisées ici sont les lames d'eau Panthère enregistrées par Météo France au cours de l'événement.

L'étendue des surfaces inondées de référence a été transmise par le Service Risque Inondation Littoraux Hydraulique du CEREMA d'Aix-en-Provence.

Contenu de la chaîne de modélisation

Comme dans l'étude de cas du Gard, l'approche développée ici est basée sur une pré-évaluation de l'étendue des surfaces inondées pour une large gamme de débits pour construire le modèle d'impacts.

La constitution du catalogue des surfaces inondées a été réalisée en reprenant la méthode développée dans le département du Gard avec la même valeur du paramètre de rugosité (Cf. §4.3). En revanche, les différentes surfaces inondées obtenues n'ont pas fait l'objet d'une évaluation aussi poussée (Cf. §4.4) : elle s'est limitée à la comparaison à posteriori avec l'emprise de l'inondation de la crue du 15 juin 2010, présentée dans la partie 5.2.5.

La modélisation pluie-débit de cet événement a également été réalisée en suivant les choix effectués au cours des modélisations du Gard : le modèle pluie-débit Cinecar a été transposé (Cf. §3.4), en reprenant à l'identique les modalités de fixation des valeurs de paramètres et notamment de Curve Number (méthode USDA faisant dépendre la valeur du CN de la nature du substratum, de l'occupation des sols et de l'antériorité pluviométrique).

La méthode d'estimation des impacts est également analogue à celle mise en place sur le Gard (Cf. §5.1.1).

La modélisation effectuée correspond donc à une transposition simple de l'approche mise en œuvre dans le Gard. Cette transposition permettra de tester si la méthode de prévision des impacts de crues proposée peut être transposée à **grande échelle** et quel sera l'effort nécessaire de calibration locale.

5.2.3 Données de validation retenues

Les principes retenus dans le cas du Gard seront appliqués de nouveau dans le cas du Var, à savoir que les travaux de validation seront effectués à partir des données de sinistres puis des emprises inondées connues, et que les données de sinistres sélectionnées suivront les mêmes principes (filtre, interpolation et ajustement), détaillés dans le paragraphe 5.1.2.

Relation entre la liste de polices d'assurances sélectionnées au sein de la base CCR en 2010 et le nombre de bâtiments identifiés au sein de la base de données TOPO®

Pour les 83 tronçons de la BNBV retenus dans le Var, disposant de plus de 20 polices (Cf. §5.1.2), la comparaison entre la liste de polices d'assurances disponibles et le nombre de bâtiments TOPO® sélectionnés a été effectuée à différentes échelles : tronçon complet incluant ses versants associés, puis surfaces inondées de fréquence 1000, 50 et 10 ans (figure 5.24). L'exhaustivité de la liste des polices d'assurances est plus haute en 2010 qu'en 2002, atteignant 68% du marché (figure 5.3).

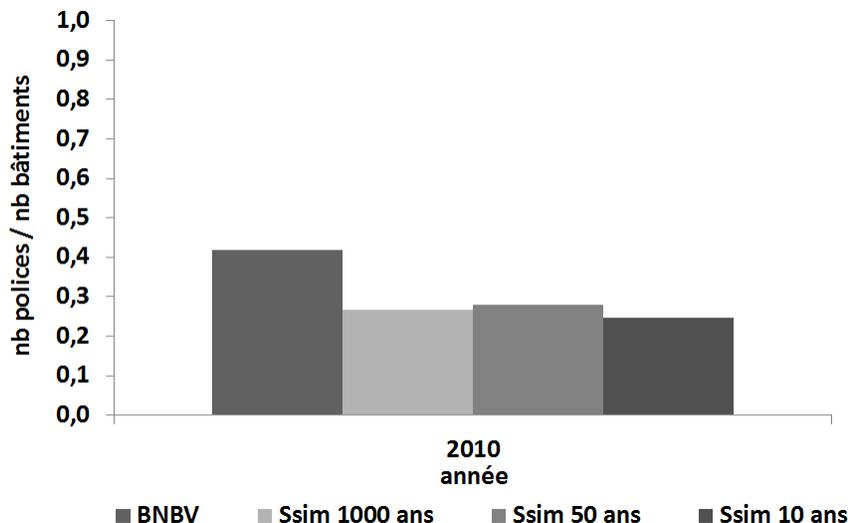


FIGURE 5.24 – Ratio moyen entre le nombre de polices d'assurances de la base CCR et le nombre de bâtiments de la base de données TOPO® à l'échelle des biefs de la BNBV, et des surfaces simulées de périodes de retour 1000, 50 et 10 ans

Le taux de couverture de la base de données de la CCR (ratios polices/bâtiments, P/B) est sensiblement plus élevé dans le cas du Var en 2010 que dans celui du Gard en 2002 (figure 5.5). La base CCR est peut être mieux renseignée dans cette région (figure 5.3), mais l'événement est aussi plus récente et la base de la CCR a tendance à s'enrichir avec le temps.

Le ratio P/B moyen est de 26% au sein de l'étendue inondée maximale estimée (PDR 1000 ans). La répartition des ratios P/B reste néanmoins hétérogène à l'échelle des 62 biefs disposant d'au moins un bâtiment dans leur surface inondable, avec toujours une répartition qui ne présente pas d'organisation spatiale claire (figure 5.6).

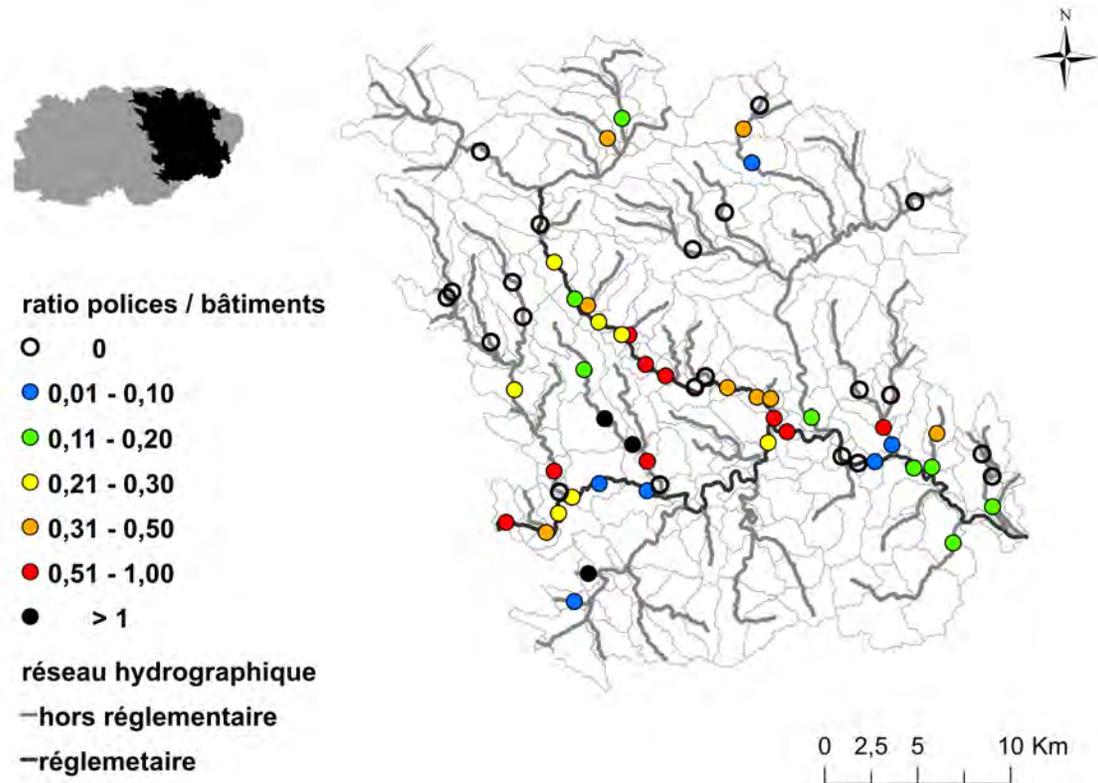


FIGURE 5.25 – Carte des ratios entre le nombre de polices d'assurances et le nombre de bâtiments à l'échelle de la zone inondable (emprises de période de retour 1000 ans)

Relation entre le nombre de sinistres et la liste de polices d'assurances au cours de l'événement

Concernant le taux de sinistralité, défini dans le paragraphe 5.1.2, il oscille dans le Var entre 37 et 40% dans la zone inondable pour l'événement de 2010, selon l'étendue considérée : emprise décennale, entre les emprises décennale et cinquantennale, et entre les emprises cinquantennale et millénale (figure 5.26). Le taux de sinistralité moyen est de 39%. Ces valeurs sont plus élevées que celles obtenues sur la zone d'étude du Gard (figure 5.7), ce qui, là aussi, peut être lié à une meilleure alimentation de la base de données.

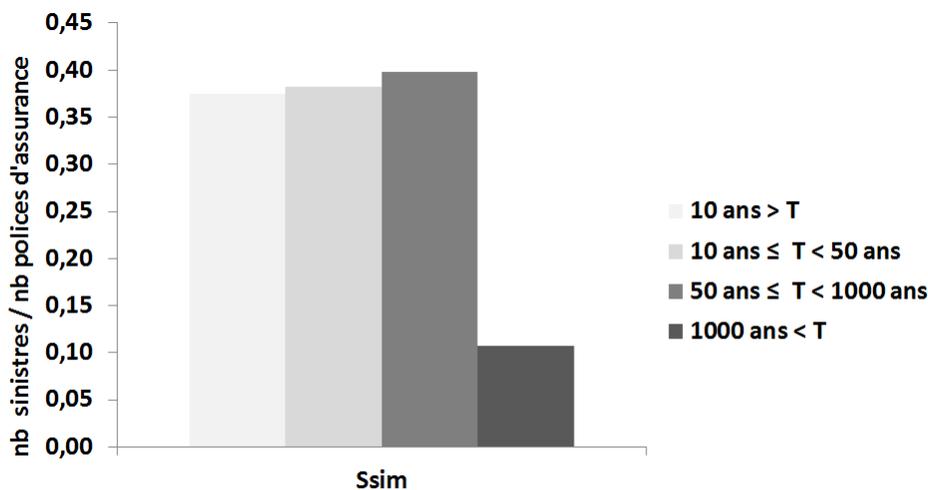


FIGURE 5.26 – Présentation des taux de sinistralité moyens au sein des différentes surfaces inondées simulées ($T=10, 50$ et 1000 ans) et en dehors de la zone inondable simulée

La proportion de sinistres la plus importante, à hauteur de 40%, est obtenue au sein de l'emprise inondable millénale. Elle varie globalement peu lorsque l'on se rapproche des cours d'eau (i.e. lorsqu'on considère les emprises de plus faibles périodes de retour). Compte tenu du caractère très exceptionnel de la crue de 2010, on peut supposer que l'emprise maximale a été atteinte sur de nombreux biefs. Le taux de sinistres n'est pas nul (comme dans le cas du Gard) en dehors des emprises inondables par débordement de cours d'eau, mais nettement plus faible. Enfin le tableau 5.5 illustre le nombre relativement faible de sinistres disponibles au sein de l'emprise inondable pour valider les calculs d'impacts : seuls 41% des tronçons présentent au moins un sinistre répertorié dans la base de données de la CCR (figure 5.27).

Tableau 5.5 – Distribution du nombre de sinistres disponibles dans la zone inondable à l'échelle des biefs, au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var

Zone (PDR ans)	Σ polices	Σ sinistres	% polices	% sinistres
< 10	160	60	1,56	4,73
10 - 50	183	70	1,79	5,52
50 - 1000	266	106	2,60	8,36
> 1000	9633	1032	94,00	81,39

Le nombre de sinistres disponibles pour la validation est globalement plus important que dans le cas du Gard (Cf. tableau 5.5). Cependant, le nombre de tronçons pour lesquels des sinistres sont observés et en nombre suffisant, reste globalement faible pour le cas du Var (figure 5.27).

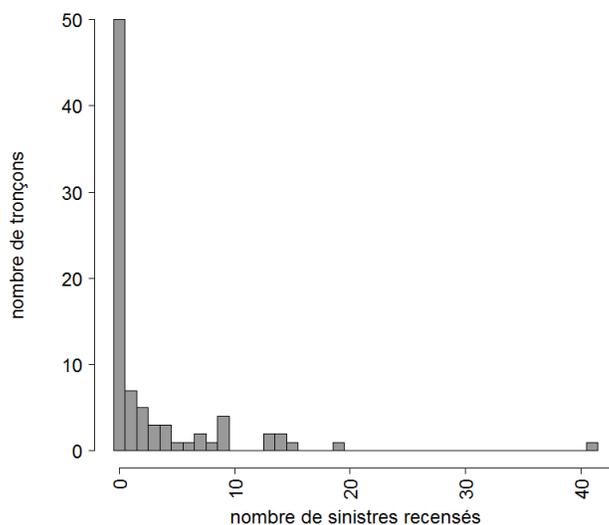


FIGURE 5.27 – Distribution du nombre de sinistres disponibles dans la zone inondable à l'échelle des biefs, au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var

5.2.4 Comparaison des résultats de simulations avec les sinistres répertoriés

Comparaison en valeurs

La figure 5.28 présentant une première comparaison du nombre de sinistres et du nombre de bâtiments recensés dans la zone inondable est comparable à la même figure réalisée dans le cas du Gard (figure 5.10).

De manière identique au cas du Gard, la figure 5.29 reflète le nombre de sinistres interpolés et le nombre maximum d'impacts estimés par la chaîne de simulation au cours de l'événement de 2010. Malgré une amélioration de l'alimentation de la base de données de la CCR, la distribution des points ne révèle pas une forte corrélation entre les deux informations. Il est nécessaire de tenir compte de la variabilité spatiale du taux de couverture de la base de données de la CCR afin de valoriser ces données.

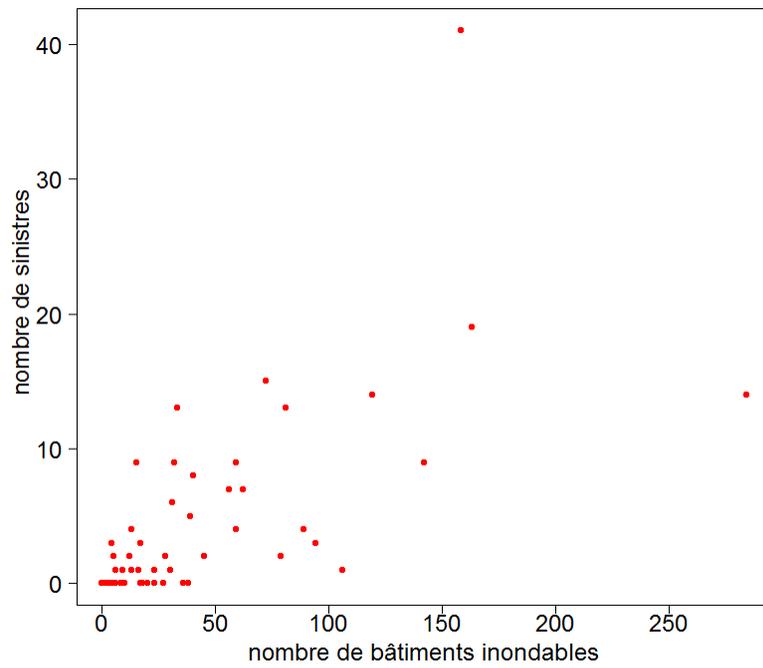


FIGURE 5.28 – Comparaison du nombre de bâtiments et du nombre de sinistres dans la zone inondable (période de retour 1000 ans)

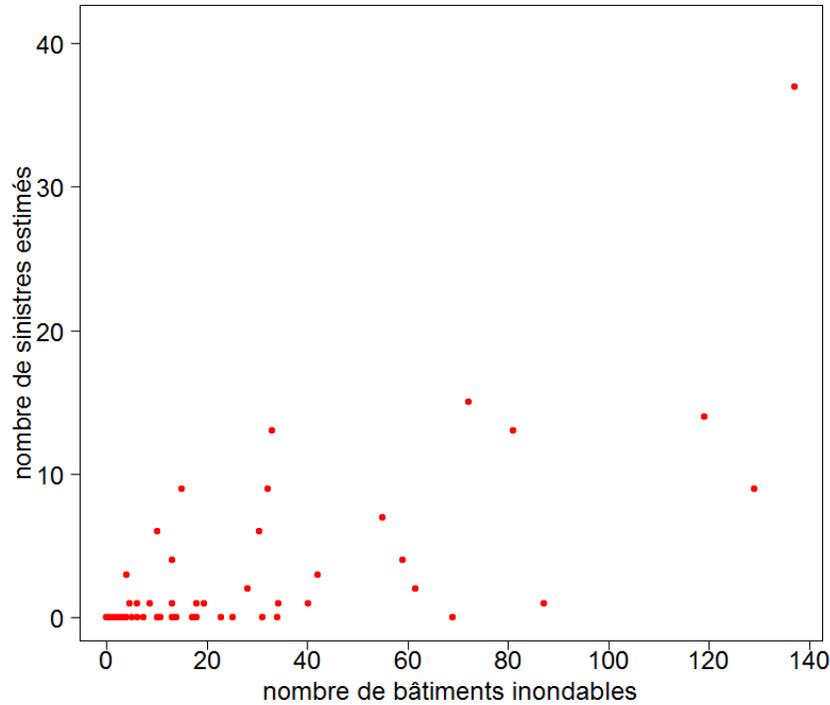


FIGURE 5.29 – Distribution des sinistres interpolés en fonction des bâtiments inondables au cours de l'événement

Les corrections α et δ ont été testées sur les sinistres interpolés du Var. Les résultats de ces corrections, visibles sur les figures 5.30 et 5.31, renforcent également la relation entre les sinistres et les impacts maximums estimés de la chaîne de simulation.

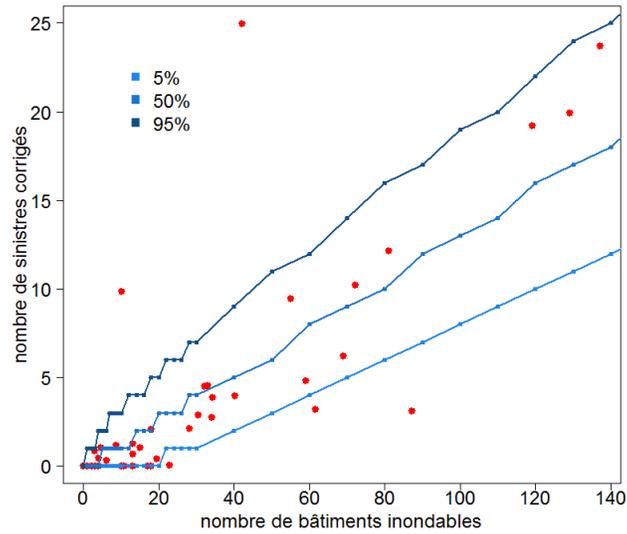


FIGURE 5.30 – Sinistres corrigés (coefficient α) en fonction des bâtiments inondables simulés au cours de l'événement du 15 juin 2010 et quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale

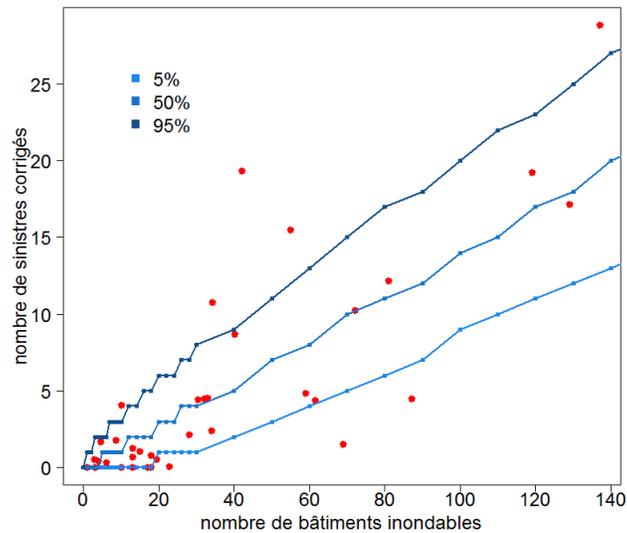


FIGURE 5.31 – Sinistres corrigés (coefficient δ) en fonction des bâtiments inondables simulés au cours de l'événement du 15 juin 2010 - bornée par les probabilités 5%, 50% et 95% de la loi binomiale

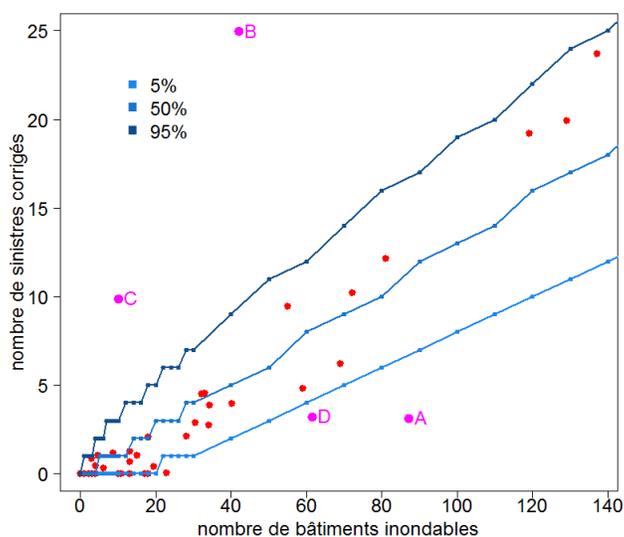
D'une façon analogue, la dispersion résultant des résultats semble dans l'ensemble pouvoir être expliquée par le caractère aléatoire du ratio sinistres/bâtiments, représenté par les quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale avec des taux de succès définis dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6 – Taux sinistres/bâtiments moyens appliqués pour définir les intervalles à 90% présentés sur les figures 5.30 et 5.31 - S/P = sinistres/polices ; P/B = polices/bâtiments

expérience	taux S/P(%)	taux P/B(%)	probabilité de réussite(%)	nombre de tronçons
correction α	42,07	31,27	13,15	42
correction δ	43,73	32,06	14,01	36

On remarque finalement que la dispersion des points de la figure 5.30 et celle des points de la figure 5.31 ne correspondent pas au seuil d'erreurs théorique à 10% avec 5 points dans le premier cas et 8 points dans le deuxième cas en dehors de l'intervalle 5-95%.

Parmi ces points, certains sont fortement éloignés de l'intervalle, comme par exemple les points A, B, C et D de la correction α visible sur la figure 5.32. Une analyse spécifique de ces quatre points sera proposée dans le paragraphe 5.2.5 .

FIGURE 5.32 – Sinistres interpolés et corrigés (coefficient α) en fonction des bâtiments inondables simulés au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var, et quantiles 5%, 50% et 95% de la loi binomiale - points magentas = points éloignés de l'intervalle

Comparaison cartographique

La figure 5.33 présente une comparaison cartographique des impacts simulés et des sinistres présentés sur la figure 5.31. La différence relative de ces deux informations est illustrée figure 5.34. L'échelle unique présentée dans le cas du Gard est réutilisée pour comparer les sinistres aux impacts maximums estimés de la chaîne de simulation (formule (5.6)). Les résultats tendent vers ceux obtenus dans le Gard avec des différences locales significatives. Toutefois, dans l'ensemble il existe une bonne hiérarchisation des cours d'eau pour lesquels les principaux sinistres ou impacts sont recensés et les ordres de grandeurs des impacts prévus sont raisonnables si l'on tient compte du taux de couverture de la base CCR et de la sinistralité.

Finalement, les conclusions sont similaires à celles obtenues sur le cas du Gard, mais sans calage opéré, ce qui montre une robustesse de la chaîne de calculs pluie-débit-impacts.

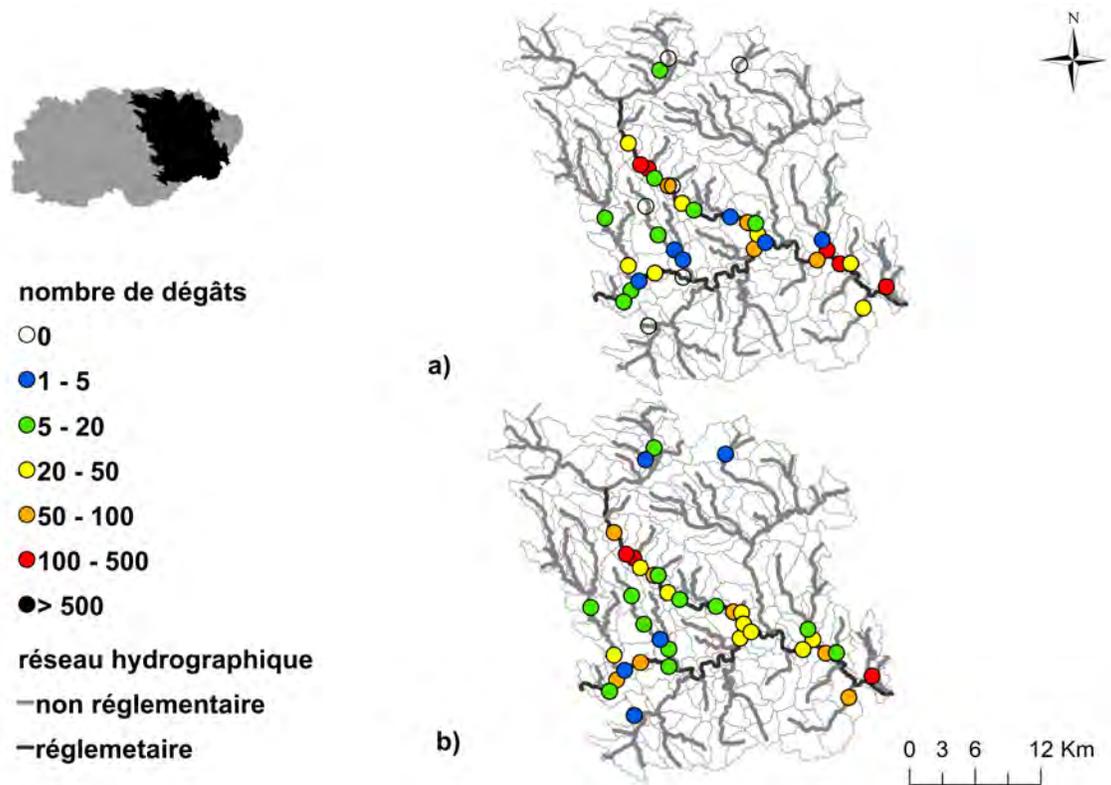


FIGURE 5.33 – Cartes des dégâts au cours de l'événement à l'échelle de 36 tronçons, a) nombre d'impacts maximums estimés, b) nombre de sinistres ajustés

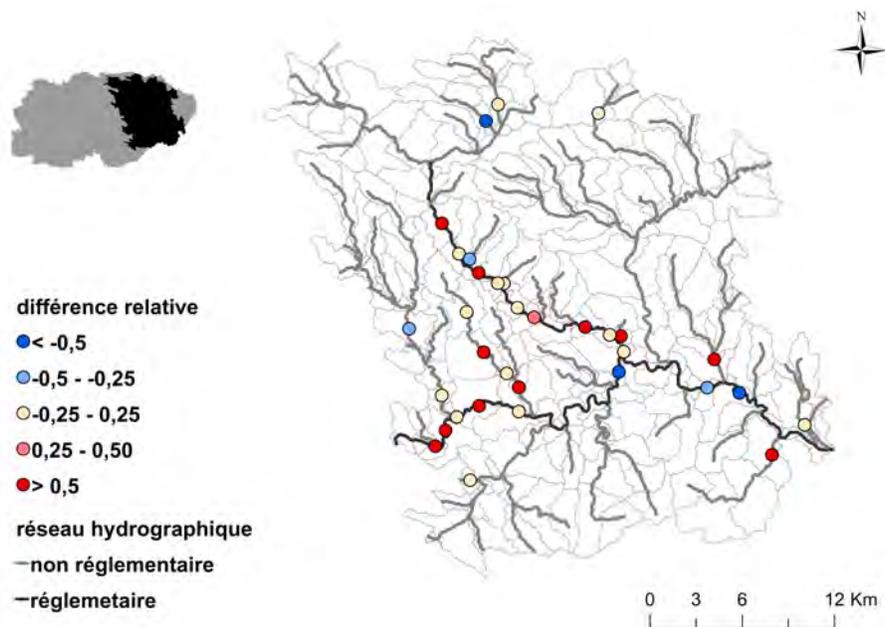


FIGURE 5.34 – Cartes des différences relatives entre les sinistres ajustés et les impacts estimés au cours de l'événement à l'échelle de 36 tronçons

5.2.5 Explications des différences locales les plus significatives

Les raisons pour lesquelles certains points sont fortement éloignés de l'intervalle sur la figure 5.32 sont expliquées dans les paragraphes ci-dessous.

Étude du point A

Ce premier cas se situe sur l'Argens au nord du centre ville de Vidauban (figure 5.35). Les résultats obtenus sur le tronçon au cours de l'événement sont présentés dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7 – Caractéristiques du tronçon sur l'Argens moyen au cours de l'événement du 15 juin 2010 - débit SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Cinecar Q_{sim} , et les sinistres α suivant la formule (5.4)

	Q_n	Q_{sim}	Q_{n+1}	$Q_{millénaire}$
débit ($m^3 s^{-1}$)	508,5	523,6	619,4	2190,9
PDR SHYREG	20	[20-30]	30	1000
polices	6	6	6	9
sinistres	1	1	1	1
impacts	86	87,2	95	106
sinistres α	-	3,1	-	-

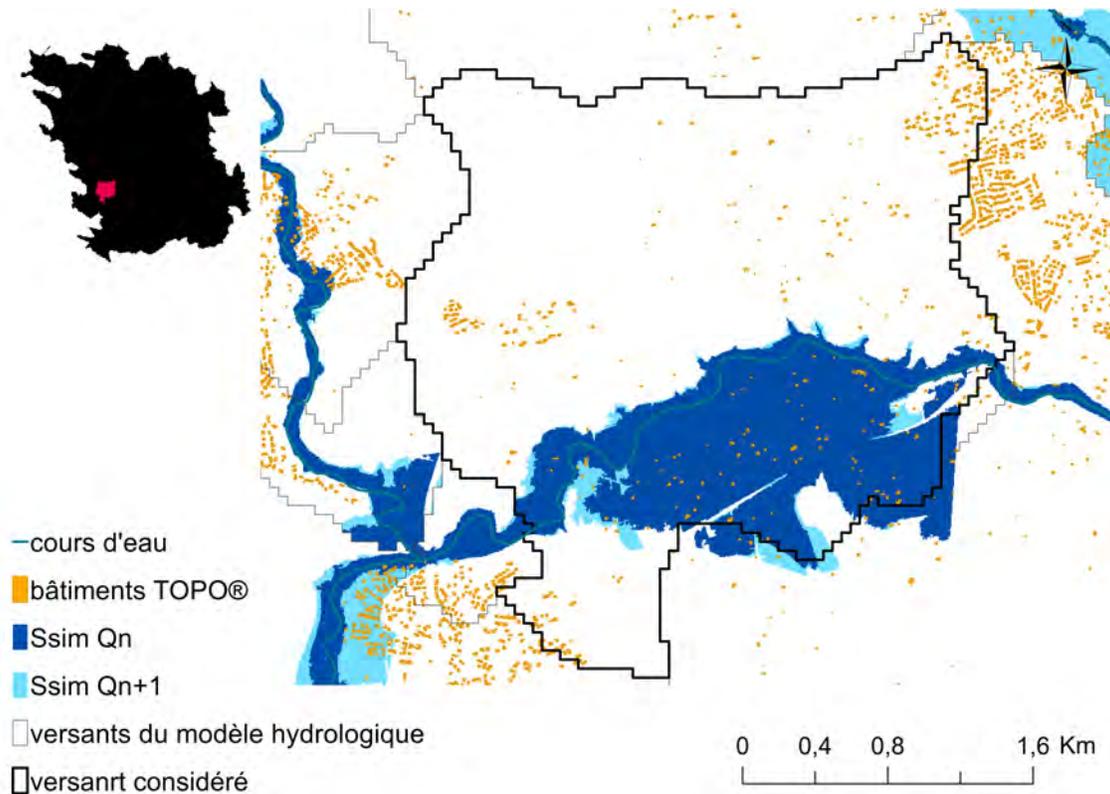


FIGURE 5.35 – Carte des emprises inondées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} , et des bâtiments potentiellement impactés sur la rivière de l'Argens moyen, à Vidauban, au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var

Dans ce secteur le taux de déclaration des sinistres est faible (11% dans la surface de fréquence millénale), inférieur au taux de sinistralité moyen de 42% du tableau 5.6. Ceci contribue à écarter ce tronçon des intervalles présentés sur la figure 5.32.

Ce cas A révèle un nombre d'impacts estimés par la chaîne de simulation au moins 14 fois supérieur au nombre de polices d'assurances disponibles. L'étendue de la surface simulée participe à cette forte différence : elle apparaît largement surestimée lorsqu'on la compare à l'emprise inondée relevée après la crue (figure 5.35).

Sur le plan hydraulique, les profils simulés et les surfaces inondées associées peuvent être comparés aux profils relevés et aux étendues maximales atteintes au cours de l'événement. Le profil relevé post-catastrophe, en aval du tronçon, révèle une bonne identification du lit mineur et de la section d'écoulement par traitement du modèle numérique de terrain employé pour la réalisation des calculs hydrauliques (figure 5.36).

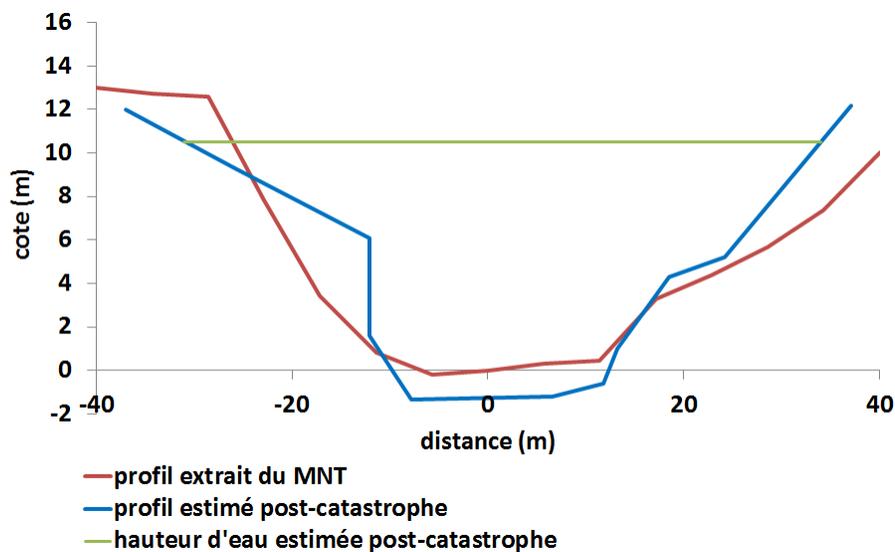


FIGURE 5.36 – Comparaison du profil extrait du MNT et du profil relevé post-catastrophe - Hauteur d'eau calculée pour un débit retenu de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$

Malgré une similitude forte entre les données topographiques et les données relevés, la surface simulée est très étendue par rapport à celle proposée suite aux relevés de laisses de crues post-événement dans le secteur observé (figure 5.37).

Après vérification, les écarts observés ne proviennent pas d'une surestimation des débits de la crue. Il s'avère que le secteur est constitué d'un lit perché, configuration qui pose problème au logiciel CARTINO (Cf. §4.1.4). La partie du lit majeur, située sous la cote de débordement du lit mineur peut être prise en compte dans le modèle hydraulique malgré les précautions prises dans la définition des profils en travers. Dans le cas du secteur aval de Vidauban, une confluence en rive droite connecte le lit majeur modélisé comme inondé au lit mineur et ne permet pas son élimination lors du post-traitement. Ce cas de figure illustre les limites du calcul hydraulique automatisé qui nécessitera dans un nombre limité de secteurs particuliers, une correction manuelle.

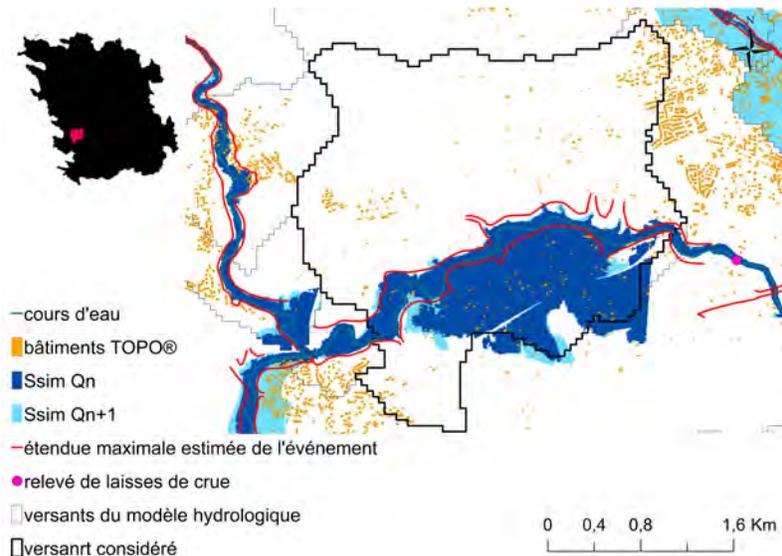


FIGURE 5.37 – Carte des étendues inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et emprise de la zone inondée relevée dans le secteur de Vidauban au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var

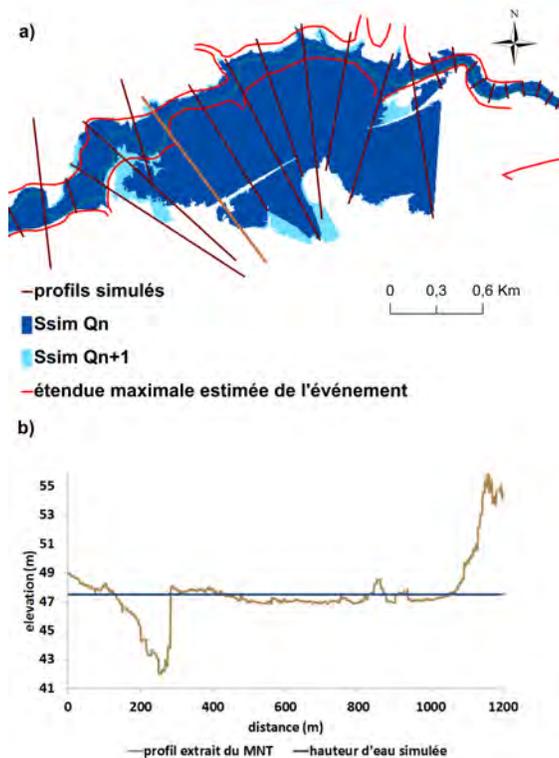


FIGURE 5.38 – Profils extraits du MNT à l'origine des différences constatées entre la surface inondée de référence et les emprises calculées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} , (a) position des profils extraits pour les calculs hydrauliques, (b) observation d'un profil au niveau d'un lit perché

Cette erreur ponctuelle, sur le cas du point A, est le produit d'une méthode régionalisée et non calibrée à l'échelle du secteur observé. Ce secteur fait partie du réseau réglementaire, sur lequel des emprises expertisées existent et pourraient être exploitées pour calibrer le modèle hydraulique ou pourraient être directement exploitées dans le modèle de prévision.

Étude du point B

Ce second cas se localise sur la rivière du Blavet, au niveau de la confluence avec l'Argens à Roquebrune-sur-Argens (figure 5.39). Le détail des informations et des résultats de simulation de ce tronçon est présenté dans le tableau 5.8 ci-dessous.

Tableau 5.8 – Caractéristiques du tronçon sur la rivière du Blavet au cours de l'événement du 15 juin 2010 - débit SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Cinecar Q_{sim} , et sinistres corrigés (coefficient α suivant la formule (5.4))

	Q_n	Q_{sim}	Q_{n+1}	$Q_{millénale}$
débit (m^3s^{-1})	85,9	97,1	103,3	267,7
PDR SHYREG	30	[30-50]	50	1000
polices	3	3	3	3
sinistres	3	3	3	3
impacts	42	42	42	94
sinistres α	-	24,9	-	-

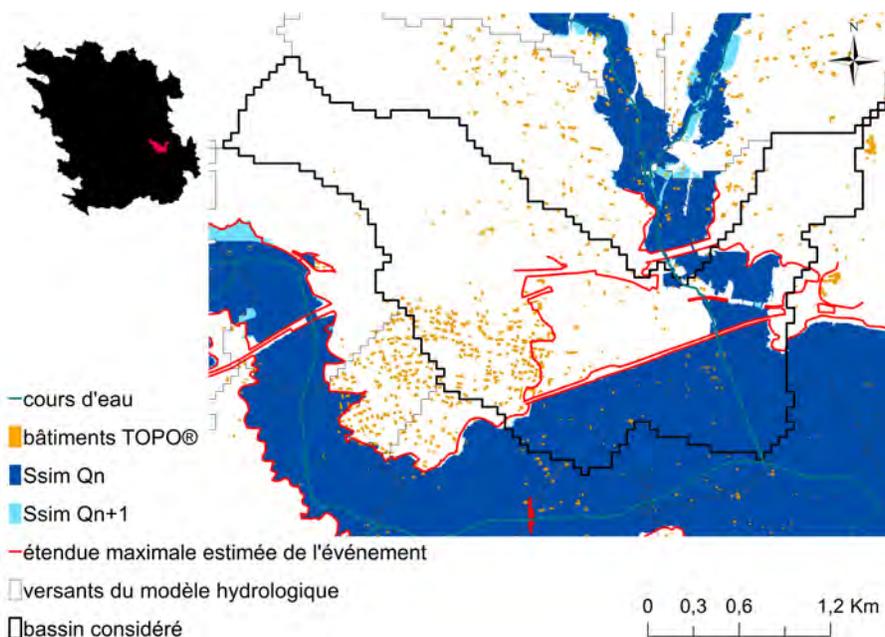


FIGURE 5.39 – Carte des étendues inondées estimées par les débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} , de l'étendue réelle inondée et des bâtiments potentiellement impactés sur la rivière du Blavet, à Roquebrune-sur-Argens, au cours de l'événement du 15 juin 2010 dans le Var

Lorsque la liste de polices d'assurances dans la zone inondable est faible (inférieure à cinq), la sensibilité du ratio de la liste de polices d'assurances en fonction du nombre de bâtiments est importante dans la correction α . Elle est même exagérée dans certain cas, dont celui présenté avec un ratio de 3%, bien inférieure au taux de moyen de 31% (Cf. tableau 5.6). La correction α s'avère peut-être disproportionnée dans ce cas-ci en multipliant par 9 le nombre de sinistres interpolés.

Ces résultats pourraient être amplifiés avec une étendue de surface simulée de meilleure qualité : l'identification de ces bâtiments semble être sous-évaluée par rapport à l'étendue de la surface de référence d'après la figure 5.39. Effectivement le nombre de bâtiments dans la surface de référence, à l'échelle du tronçon B, atteint une centaine de bâtiments ; on se rapproche des estimations du nombre de bâtiments identifiés dans la surface simulée millénaire.

En parallèle, sur le cas du point B, le ratio de sinistralité est de 100%, nettement supérieur au ratio moyen de 42%. Ceci reflète le caractère aléatoire normal au taux de sinistralité et dans ce cas il se peut que ce point s'éloigne normalement de l'intervalle.

Étude du point C

Le troisième point correspond à une zone de l'Argens aval, au niveau de la confluence avec le Canavère, zone très agricole (figure 5.40). Le descriptif des informations de simulations est disponible dans le tableau 5.9.

Tableau 5.9 – Caractéristiques du tronçon l'Argens aval au cours de l'événement du 15 juin 2010 - débit SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Cinecar Q_{sim} , et sinistres corrigés (coefficient α suivant la formule (5.4))

	Q_n	Q_{sim}	Q_{n+1}	$Q_{millénale}$
débit ($m^3 s^{-1}$)	16,8	19,3	20,4	70
PDR SHYREG	20	[20-30]	30	1000
polices	7	7	7	10
sinistres	6	6	6	7
impacts	10	10	10	62
sinistres α	-	9,9	-	-

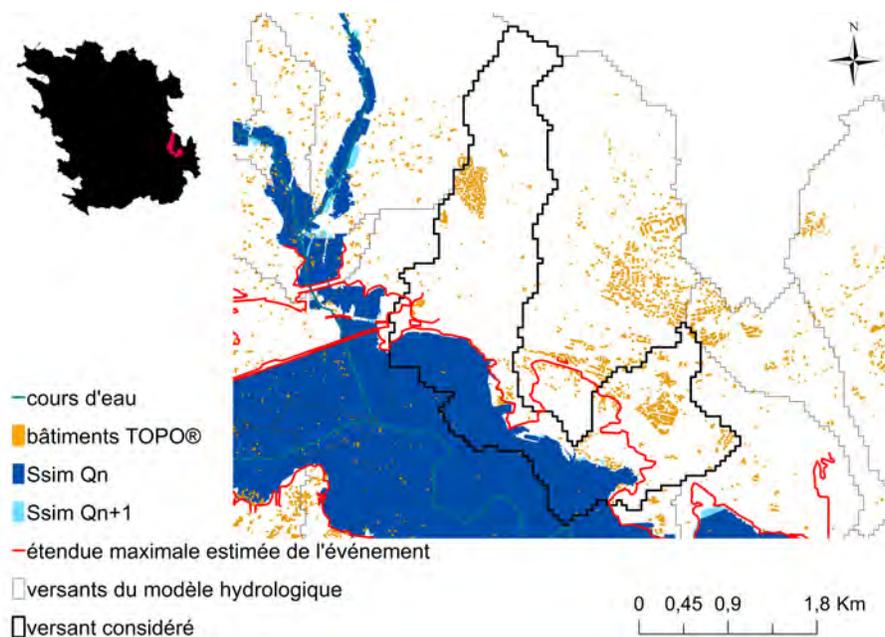


FIGURE 5.40 – Carte des emprises inondées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et emprise inondée relevée sur l'Argens au droit de la confluence avec le Canavère au cours de l'événement du 15 juin 2010

Le point C est très similaire au [point B](#). Le ratio polices sur bâtiments est relativement faible dans ce secteur (11%), bien plus faible que le ratio polices sur bâtiments moyen de 31% (Cf. tableau 5.6). De même, le taux de sinistralité est aussi très élevé : 85%.

Cependant, la surface inondée apparaît sous-estimée pour ce tronçon et ce, dans un secteur à densité urbaine significative : secteur situé en rive gauche à l'aval immédiat de la confluence (figure 5.40). On doit s'attendre, du fait des imprécisions sur les contours des emprises, à une

sous-estimation des impacts dans le modèle, les ordres de grandeur de nombre de bâtiments inondés calculé étant cependant respectées.

Étude du point D

Le dernier cas sélectionné concerne la rivière le Fournel, à proximité de l'Argens aval (figure 5.41). Ce secteur draine une surface de 10 km². L'ensemble des informations nécessaires à la compréhension des divergences entre impacts et sinistres est restitué dans le tableau 5.10.

Tableau 5.10 – Caractéristiques du tronçon sur le Fournel au cours de l'événement du 15 juin 2010 - débit SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Cinecar Q_{sim} , et les sinistres α suivant la formule (5.4)

	Q_n	Q_{sim}	Q_{n+1}	$Q_{millénale}$
débit (m^3s^{-1})	96,5	118,1	139,5	194
PDR SHYREG	100	[100-300]	300	1000
polices	10	10	10	13
sinistres	2	2	2	2
impacts	54	61,5	69	79
sinistres α	-	3	-	-

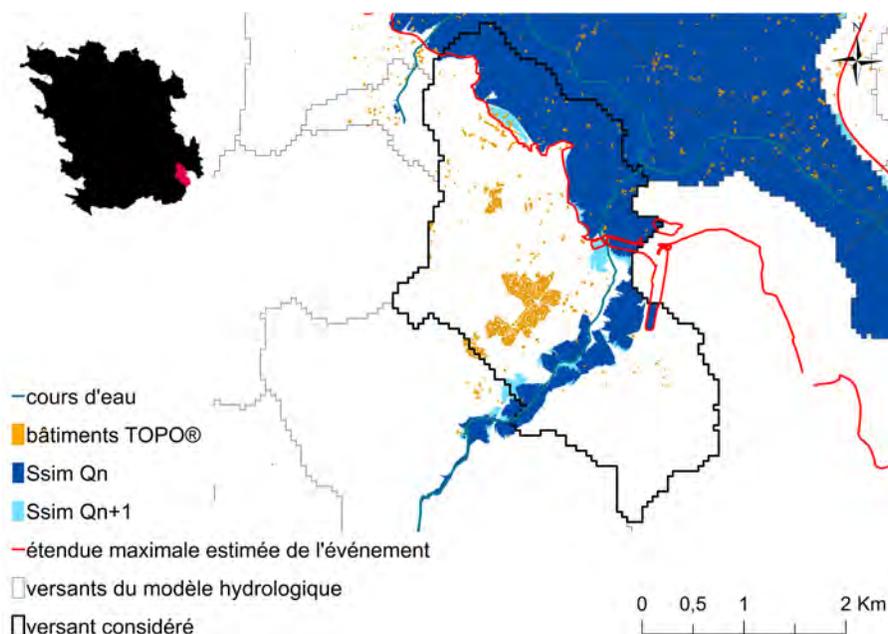


FIGURE 5.41 – Carte des emprises inondées estimées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé par Cinecar Q_{sim} et emprise inondée relevée sur la rivière du Fournel, à la confluence avec l'Argens, au cours de l'événement du 15 juin 2010

Les emprises calculées s'avèrent très proches des emprises relevées à la suite de l'événement pour ce tronçon à l'exception de la zone de confluence avec l'Argens où l'emprise inondée est sous-estimée (figure 5.41). Le nombre d'habitations est cependant limité dans cette zone. L'écart entre le nombre de bâtiments inondés calculé et le nombre de sinistres corrigé semble être essentiellement le fait d'un taux de sinistralité faible pour ce tronçon : 20% à comparer au taux moyen de 42% (Cf. tableau 5.6). Deux polices seulement au niveau de ce tronçon ont fait l'objet d'une déclaration de sinistre répertoriée dans la base de donnée de la CCR.

Dans l'ensemble, la correction appliquée, qui tient compte de la variabilité spatiale du taux de couverture de la base de données filtrée de la CCR, permet une exploitation des sinistres répertoriés pour évaluer les performances du modèle d'impacts proposé. Cette correction n'est cependant pas toujours efficace compte tenu de la variabilité spatiale des caractéristiques des données présentes dans cette base de données.

5.2.6 Bilan de l'étude de cas menée sur le bassin de l'Argens

Les limites de l'exploitation des données de la Caisse Centrale de Réassurance identifiées dans la cas du Gard en 2002 commencent à être levées du fait de l'évolution de la qualité des données disponibles dans cette base entre 2002 et 2010. Malgré cette amélioration, l'étude de cas menée sur le Var confirme qu'une exploitation des informations de la CCR, à des fins de validation du modèle de prévision des impacts, n'est réellement possible que pour des crues de fréquences rares, pour lesquelles on dispose d'un nombre suffisant de sinistres. La volonté de valider les résultats de simulations par tronçon ou bief élève le niveau d'exigence vis-à-vis des données de validation. Une validation par bief plus long ou linéaire de cours d'eau poserait moins de contraintes vis-à-vis du jeu de données, mais apporterait moins d'éclairages sur la pertinence des résultats produits pour les utilisateurs finaux et sur la capacité à localiser précisément les secteurs exposés à des risques importants.

Les différentes modélisations, hydrologiques et hydrauliques, ne sont évidemment pas parfaites, mais néanmoins de bonne qualité pour un réseau hydrographique aussi dense et étendu, drainant des surfaces de 5 km². Les emprises simulées maximales atteintes au cours du 15 juin 2010 dans le Var, sans recalage, sont dans l'ensemble très proches des emprises relevées post-catastrophe comme l'on illustré les exemples présentés ci-dessus. Cela est vrai sur la partie du réseau hydrographique surveillée et/ou sur laquelle des emprises de référence expertisées seront disponibles et pourront remplacer les emprises théoriques calculées dans la chaîne de prévision. Notons que c'est souvent sur ce réseau, correspondant aux parties en aval des cours d'eau, que se trouvent en général les secteurs problématiques pour la modélisation hydraulique simplifiée (notamment les secteurs à lits perchés). Les emprises modélisées sont aussi très pertinentes sur les autres secteurs du réseau hydrographique comme l'illustre la figure 5.42, ce qui est particulièrement satisfaisant.

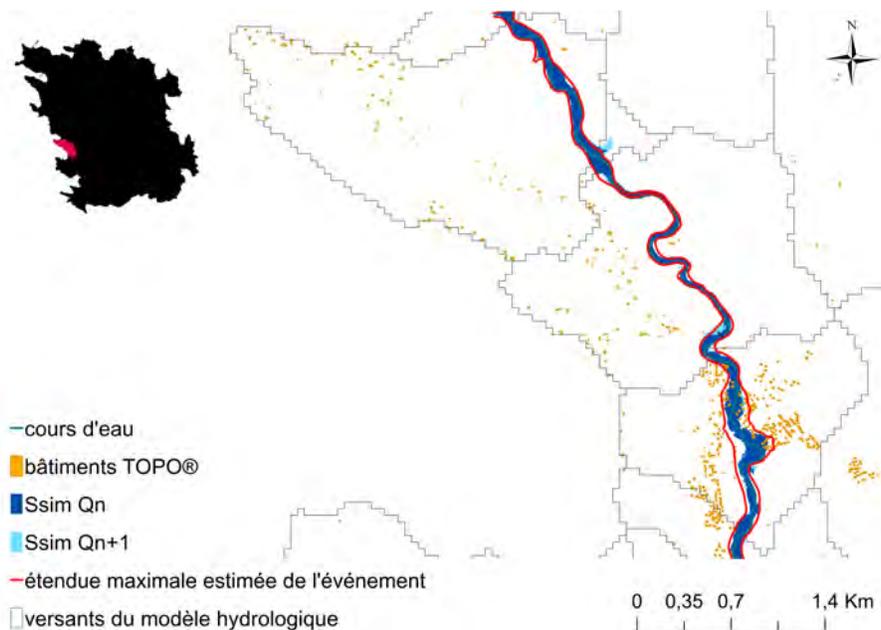


FIGURE 5.42 – Carte des emprises inondées correspondant aux débits SHYREG Q_n et Q_{n+1} encadrant le débit simulé Q_{sim} , et emprise relevée sur la rivière de la Florièye au niveau de la commune de Taradeau et de la confluence avec l'Argens au cours de l'événement du 15 juin 2010

De nombreux sinistres sont observés en dehors des secteurs inondés modélisés. Le niveau de détail du réseau hydrographique modélisé pourrait être augmenté pour intégrer d'éventuels petits affluents. Un canal, traversant Vidauban, n'est par exemple pas recensé dans le réseau CARTHAGE®. Il a été construit dans le but d'évacuer les eaux de pluie. En cas de forte pluie il déborde, comme au cours de la crue du 15 juin 2010. Une vidéo (disponible en ligne ¹) prise au croisement entre l'avenue Marcel Mouries et Maréchal Joffre à Vidauban témoigne de l'ampleur des dégâts liés au débordement de ce canal. Cependant, l'effort supplémentaire de modélisation serait-il réellement utile ?

La proportion importante de sinistres en dehors des zones inondées simulées et des zones inondées relevées après les crues (Moncoulon et al., 2014) n'est pas simplement le fait de débordements de petits thalwegs, mais aussi de phénomènes locaux très variés, liés à des configurations très locales (Poulard et al., 2015, Lagadec et al., 2016), souvent regroupés sous le terme de ruissellement ?. Peu documentés et mal décrits (points bas, débordement des de caniveaux, inondations de caves par infiltrations, débordements de gouttières...), ils semblent difficilement prévisibles. Ces phénomènes de "ruissellement" apparaissent cependant très corrélés spatialement avec les débordements des cours d'eau, notamment les débordements des cours d'eau drainant des surfaces limitées de bassins versants. La prévision des impacts des débordements devrait donc permettre d'orienter les services de secours vers les secteurs les plus exposés indépendamment de l'origine des inondations. Par ailleurs, les articles de presse et les rapports techniques mettent souvent l'accent sur les risques et les conséquences des débordements de cours d'eau bien plus que sur les dommages diffus occasionnés lors des crues-éclair. C'est probablement le signe que, si des sinistres sont enregistrés sur l'ensemble du territoire des bassins versants touché par des pluies intenses, les risques majeurs pour les personnes et les biens et donc les priorités d'intervention se situent bien majoritairement dans les zones inondées par débordements de cours d'eau.

5.3 Autres pistes pour la validation du modèle d'impacts

A coté des informations mises à disposition par la CCR, deux autres sources de données ont été envisagées pour évaluer les sorties du modèle d'impacts : les tweets et les interventions des SDIS au cours d'un événement d'inondation .

5.3.1 Les Tweets au cours d'un événement d'inondation

Les réseaux sociaux sont utilisés au cours des inondations, et apportent une information qui peut s'avérer très utile, notamment dans l'évaluation des modèles d'impacts, si et seulement si elle est correctement vérifiée (Saint-Martin et al., 2016). Parmi les tweets enregistrés pendant les événements d'inondation dans le Gard en octobre et novembre 2014, une série de 456 Tweets a été sélectionnée par le LTHE dans le cadre de travaux de recherche sur la valorisation de cette information pour la création d'une base de données de dommages (figure 5.43).

1. <https://www.youtube.com/watch?v=juVR1jtLmSE>

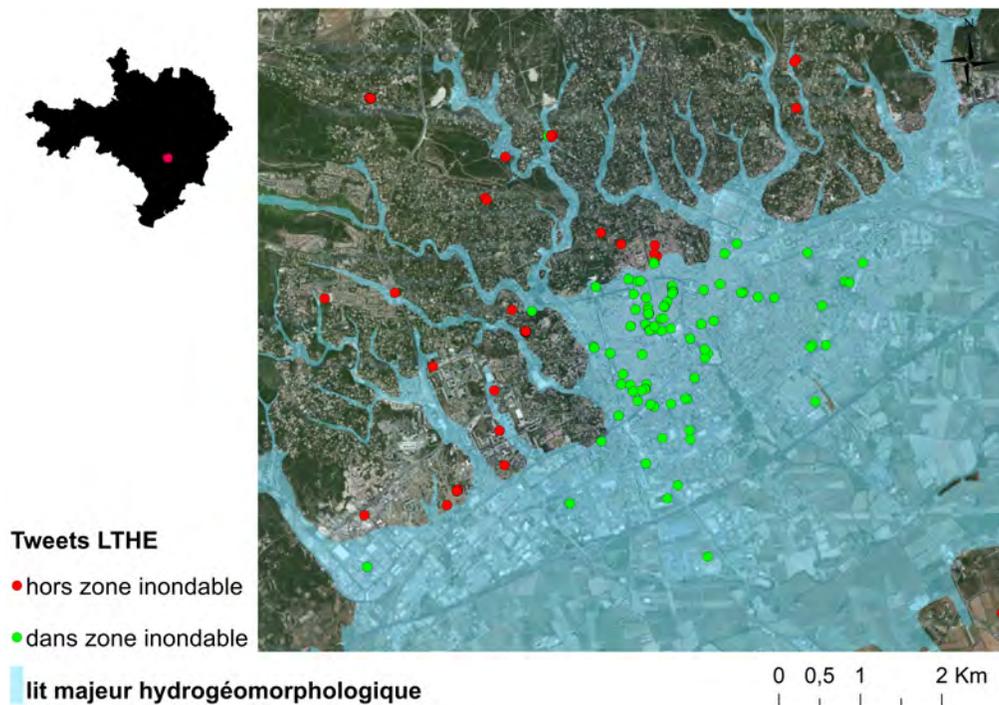


FIGURE 5.43 – Carte centrée sur la ville de Nîmes des Tweets recensés par le LTHE au cours des inondations d'octobre et de novembre 2014. Ils sont classés en fonction de leur géolocalisation par rapport au lit majeur hydrogéomorphologique - source : LTHE et DREAL Languedoc-Roussillon

Les Tweets se localisent à hauteur de 40% dans les lits majeurs hydrogéomorphologiques, révélant une faible correspondance géographique avec les zones potentiellement inondées. De plus, le contenu des messages sélectionnés rendent difficiles leur exploitation pour estimer la sévérité de l'inondation : un tri approfondi semble inévitable sur la sélection des Tweets décrivant l'évolution du risque d'inondation pour prétendre constituer une base de données de référence en matière de recensement d'impacts au cours d'une inondation ou en guise de prévision des secteurs impactés (Jongman et al., 2015).

5.3.2 Les interventions des SDIS au cours d'un événement d'inondation

Des extraits des mains courantes numérisées du SDIS du Gard ont été récupérés pour trois événements mineurs survenus en 2009, 2010 et 2011. Seules les informations disponibles à l'échelle du TRI d'Alès ont été analysées.

Ces informations ont fait l'objet de deux évaluations : une sur la qualité des informations attributaires de la base de données attachées à chaque intervention du SDIS, et une sur la pertinence de ces informations pour la localisation des débordements de cours d'eau.

Les données attachées à chaque intervention du SDIS concernent la commune et l'adresse où l'intervention a été réalisée, l'heure de départ de l'intervention et le libellé de l'intervention. À partir de 2010, le contenu des informations s'est densifié, en y ajoutant le temps et l'heure de retour de l'intervention. La rigueur sur l'incorporation des informations à la base de données augmente entre 2009 et 2011 : de nombreuses cellules sont dépourvues d'information en 2009,

contrairement à 2011 où l'ensemble des informations sont bien renseignées. À titre d'exemple, en 2009, aucun libellé n'est renseigné pour l'ensemble des interventions disponibles à l'échelle du TRI d'Alès.

À partir de 97 interventions enregistrées, jugées exploitables à l'échelle du TRI d'Alès en lien avec les débordements des cours d'eau, la comparaison des interventions du SDIS a été effectuée avec l'étendue du lit majeur hydrogéomorphologique (figure 5.44).

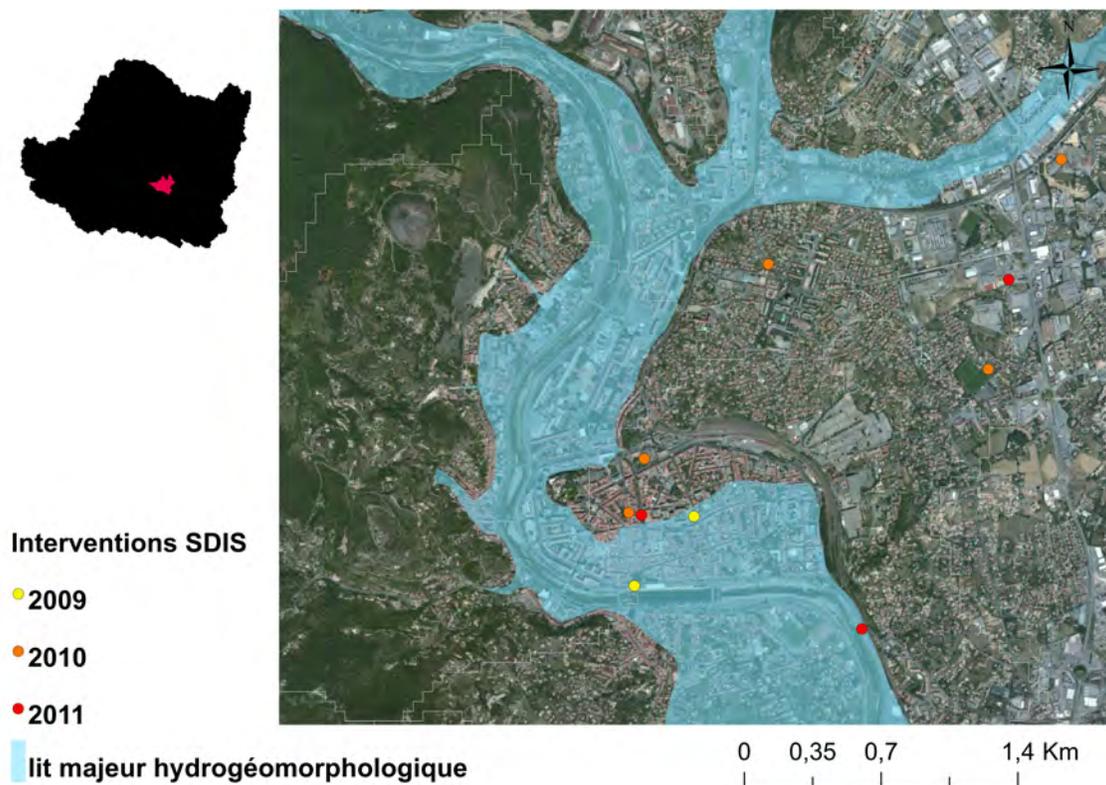


FIGURE 5.44 – Carte des interventions du SDIS au cours des inondations mineures du 2009, 2010 et 2011 dans le Gard, centrée sur la ville d'Alès - source : SDIS30 et DREAL Languedoc-Roussillon

Finalement, 78% des interventions sont localisées en dehors du lit majeur et la quasi totalité des interventions sont situées en dehors des secteurs inondés par débordement de cours d'eau pour ces trois crues. Les causes de ces interventions en dehors de la zone inondable sont multiples (inondations de caves, désordres locaux) et les coordonnées géographiques parfois erronées.

L'exploitation envisagée des interventions du SDIS semble donc relativement complexe pour l'évaluation des sorties du modèle d'impacts, ce qui rejoint les conclusions de [Naulin \(2012\)](#). Il faut garder à l'esprit une évolution positive du contenu de l'information disponible dans la base de données du SDIS entre 2009 et 2011. Il serait intéressant de regarder le contenu de la base de données du SDIS sur des événements plus récents, comme ceux de 2014 dans le Gard, avec éventuellement un accroissement de la qualité de l'information spatiale et de tester cette base de données sur des événements d'inondation plus intenses. Il n'a pas été possible de récupérer ces données dans le cadre de la thèse.

5.3.3 Conclusions sur les autres sources d'information

L'exploitation des informations générées par des témoins professionnels (SDIS) ou amateurs (réseaux sociaux) des inondations nécessite des traitements et des tris approfondis. Ces sources d'information contiennent en effet des données de nature, de qualité et de contenu informatif variés. Cette exploitation ne peut donc pas être directe et nécessite des ajustements, notamment de critères et de procédures de tri.

On fait l'hypothèse que, moyennant des ajustements, la densité de l'information sera corrélée avec l'intensité locale de l'événement et des dommages qu'il cause. Si des premiers tests semblent indiquer que cela pourrait être le cas pour les crues lentes, il pourrait en être autrement pour les crues à cinétique rapide. Il n'est pas certain que le renseignement de la base d'interventions des SDIS ou l'envoi de messages sur Tweeter restent une priorité pour les acteurs au paroxysme des événements. Les communications peuvent aussi être coupées dans certains secteurs. Ces sources d'information sont probablement intéressantes, mais possèdent donc aussi des biais et ne pourront probablement pas être utilisées seules, mais en complément d'outils de prévision tels que celui qui a été proposé dans cette thèse.

Pour autant, les Tweets ou les rapports d'interventions ont un avantage important par rapport à l'inventaire des sinistres. Ces données sont générées et peuvent être exploitées en temps réel. L'intégration des données de sinistres relatives à un événement dans la base de données de la CCR prend généralement plus d'un an. Les outils et technologies d'information et de communication en temps réel se développent très rapidement. L'exploitation combinée des informations de terrain et des prévisions hydro-météorologiques est un champ de recherche qui devrait être très actif dans les années à venir. Les modèles de prévision d'impacts, qui aident à mettre en rapport ces prévisions météorologiques avec les conséquences observées sur le terrain joueront certainement un rôle important dans les développements à venir.

5.4 Conclusion

Les enseignements à retenir de la simulation des impacts et de leur validation sont multiples.

Tout d'abord, les données de sinistres se sont révélées intéressantes pour la validation de l'information issue de la chaîne de modélisation des impacts. Cependant la mise en œuvre de cette comparaison a été difficile, du fait de la nature différente des informations qu'il faut essayer de rapprocher, et de la disponibilité partielle des données d'assurance, en particulier concernant des événements anciens. Tout ceci conduit à travailler sur un nombre de sinistres limité, même pour des crues majeures et à forte extension spatiale comme celles de 2002 dans le Gard ou 2010 dans le Var.

Sur les deux événements test, les sinistres observés et le nombre prévu de bâtiments inondés sur chaque bief suivent les mêmes tendances générales, avec une bonne corrélation et cohérence géographique et des ordres de grandeur comparables si l'on corrige le nombre de sinistres pour tenir compte du taux de couverture de la base de la CCR et de la sinistralité. Quelques biefs font exception, soit du fait des imperfections de la procédure mise en œuvre pour comparer les sorties du modèle aux données de sinistres (i.e. correction du nombre de sinistre), soit, et c'est plus rare, du fait d'une mauvaise estimation de l'emprise inondée par le modèle. Ces résultats, quoique surprenants, sont en accord avec les résultats de nombreuses études récentes visant à développer des modèles de prévision des inondations (cf. chapitre 2). L'originalité de ce travail de thèse réside dans le fait d'avoir franchi une étape supplémentaire en proposant directement la prévision des impacts des inondations (nombre

de bâtiments inondés) et d'avoir exploité une riche base de données de sinistres pour valider l'approche.

Les résultats très encourageants obtenus dans le cas de la crue de l'Argens, comparables à ceux obtenus dans l'étude de cas du Gard sur laquelle la méthode a été calibrée, laissent penser que l'approche proposée est prête à être déployée à une échelle spatiale bien plus importante, même si elle comporte évidemment encore quelques faiblesses.

A l'avenir, il sera intéressant de confirmer ces premiers résultats sur des événements récents, bénéficiant de données encore plus complètes. Une mise en œuvre pré-opérationnelle permettrait aussi de recueillir l'avis d'utilisateurs potentiels. Au-delà de la pertinence des prévisions au regard des observations qui peuvent être effectuées après la crue (emprises inondées, sinistres), il sera aussi important de vérifier que ces prévisions d'un nouveau type peuvent réellement aider à la prise de décision en période de crise.

Synthèse

L'élaboration d'un modèle d'impacts a été effectuée à l'échelle du TRI d'Alès pour chaque tronçon de la base nationale des bassins versants du SCHAPI. Chaque modèle d'impacts dispose des informations sur le nombre de bâtiments situés en zone inondée. Il est construit à partir de dix emprises calculées à l'aide du modèle CARTINO (Cf. §4.3) pour les débits de dix périodes de retour de référence. Le nombre de bâtiments de la base de données TOPO® compris dans les différentes emprises simulées est évalué. Chaque courbe d'impacts est ensuite interpolée lorsqu'elle est utilisée en combinaison avec le modèle pluie-débit.

Le nombre maximum de bâtiments inondés a été calculé pour chaque bief à l'aide de la chaîne de simulation pour deux événements d'inondation passés dans le but de les comparer avec les sinistres recensés à la suite de ces événements.

L'évaluation s'est appuyée sur une sélection des données de sinistres de la base de données de la Caisse Centrale de Réassurance : sinistres de maisons individuelles avec un géocodage à l'adresse ou à la rue (Cf. §3.3.6). De même, seuls les bâtiments de la base de données TOPO® d'une hauteur inférieure à 7 mètres ont été comptabilisés et considérés comme des habitations individuelles. La comparaison a été limitée aux habitations individuelles pour limiter les problèmes particuliers posés par l'habitat collectif et notamment la possibilité de sinistres multiples pour le même bâtiment dans la base de données de la CCR. Le nombre de sinistres recensés a dû être enfin corrigé pour tenir compte de la grande variabilité, entre les tronçons, du taux de couverture (nombre de polices / nombre de bâtiments) de la base de données de la CCR ainsi triée.

Les sinistres corrigés et les impacts simulés identifient les mêmes tronçons fortement touchés par l'inondation de 2002.

La qualité de l'étendue des surfaces simulées apparaît globalement correcte sur les secteurs du réseau réglementaire et sur ceux hors réseau réglementaire, ceci laisse présager une information juste sur les impacts maximums estimés.

Le modèle d'impacts a été étendu au bassin de l'Argens dans le Var, zone fortement impactée par les inondations depuis 2010.

Cette extension n'a pas fait l'objet d'un recalage de la méthode développée dans le Gard sur les différentes composantes de modélisation : hydrologique et hydraulique.

La base de données de la CCR s'est avérée plus riche dans le cas de l'inondation du 15 juin 2010 dans le Var que celui de la crue de 2002 dans le Gard, le rapport moyen entre le nombre de sinistres répertoriés dans la base de données de la CCR triée et le nombre de bâtiments exposés aux inondations passant de 6% dans le Gard à 14% dans le Var.

Les mêmes ajustements et corrections que dans l'étude du cas du Gard ont tout de même été nécessaires pour comparer correctement les sinistres de la CCR aux impacts estimés.

Les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus dans le cas du Gard avec une forte corrélation entre le nombre de sinistres observés et le nombre de bâtiments exposés à l'inondation d'après le modèle, à quelques exceptions près. De même, les emprises calculées des zones inondées correspondent, dans l'ensemble, bien aux emprises relevées après la crue. Ces résultats sont très satisfaisants au vu des simplifications de la méthode proposée et du fait qu'elle n'a pas été recalibrée dans le cas du Var.

Les premiers résultats de ces travaux de comparaison entre des sinistres recensés et un nombre prévu de bâtiments inondés sont très encourageants, malgré des difficultés de mise en œuvre de cette comparaison.

Les impacts maximums prévus par la chaîne de simulation proposée sont globalement cohérents avec les sinistres recensés, tant sur leur localisation que sur leur ordre de grandeur. Ceci est le signe que, malgré leurs imperfections, les niveaux de précision des différents éléments de la chaîne de simulation (mesure radar de pluie, modèle pluie-débit, modèle hydraulique de calcul d'emprises) sont suffisants pour conduire à des estimations raisonnables des conséquences potentielles des crues.

Un élargissement de la zone d'application de la chaîne de simulation proposée permettra de multiplier les cas tests et de confirmer ces premiers résultats très encourageants.

Un test rapide d'utilisation des Tweets et des relevés d'interventions du SDIS comme source de validation du modèle d'impacts a été conduit. Ce premier test a mis en évidence la complexité et les difficultés de valorisation de ces informations très hétérogènes, rejoignant les conclusions des travaux menés par (Jongman et al., 2015) et (Naulin, 2012). Toutefois, l'évolution rapide de ces outils et notamment de l'informatisation des mains courantes des services de secours, ainsi que leur disponibilité en temps réel, laissent présager que leur utilisation en parallèle des modèles de prévision devrait être un thème de recherche important des années à venir. Les modèles d'impacts, mettant en relation des prévisions hydro-météorologiques et des observations des conséquences des inondations sur le terrain seront un élément incontournable de ce type de recherches.



Chapitre 6

Conclusion générale

EN France, la mise en place de systèmes de surveillance et de prévision des crues soudaines est au cœur des préoccupations des gestionnaires de crise. Un premier service d'avertissement doit être mis en œuvre dès 2016, mais la restitution des prévisions se limitera aux débits et à leurs périodes de retour, sans prendre en compte les impacts éventuels.

Le développement d'une chaîne de prévision et de simulation pluie-débit-impacts aiderait ces gestionnaires du risque à identifier les secteurs vulnérables aux inondations et à anticiper et organiser leurs interventions de mise en sécurité, particulièrement sur les bassins de petite taille non jaugés. Ces bassins ne disposent pas actuellement de prévision des impacts éventuels par le dispositif Vigicrues mise en place par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Aide à la Prévision des Inondations .

Cette thèse a permis de développer et de tester une première chaîne de ce type en retenant une approche simple pour être applicable à grande échelle, de manière à compléter la couverture de prévision des impacts actuels.

La chaîne de simulation consiste en une connexion d'un modèle pluie-débit distribué et d'un modèle hydraulique adapté (modèles pré-existants) avec un modèle d'impacts spécialement développé pour obtenir une chaîne de simulation complète pluie-débit-impacts. La méthode a été développée sur un territoire de 2 000 km² situé dans le Gard (TRI d'Alès), comportant des bassins versants jaugés et non jaugés. Elle a ensuite été étendue et testée sur un autre territoire (bassin versant de l'Argens dans le Var) afin d'évaluer ses capacités de généralisation.

La méthode repose sur un catalogue de dix emprises inondées pour chaque bief de cours d'eau, calculées pour une large gamme de débits, de la fréquence biennale à celle du millénaire. Ces emprises sont issues d'une modélisation hydraulique simplifiée : modèle filaire, régime permanent. Ceci a nécessité une simplification de l'approche hydraulique qui a été appliquée de façon quasi automatique à partir d'un Modèle Numérique de Terrain haute résolution.

La méthode CARTINO a été retenue pour la construction du catalogue. Elle a déjà été utilisée dans le cadre de la phase cartographique des Territoires à Risque Important d'inondation (TRI), dont celui d'Alès couvrant la zone d'étude. Cette méthode, simple dans sa mise en œuvre (données et paramétrages), peut couvrir un réseau hydrographique dense et long et a été élaborée pour fonctionner de manière semi-automatique. Elle fournit des étendues inondées et des hauteurs de submersion au droit de chaque pixel de la zone inondée. Son emploi a tout de même demandé quelques adaptations pour fournir des résultats adaptés à la gamme des débits de faibles périodes de retour.

Chaque emprise inondée, calculée sur l'ensemble du réseau hydrographique pour une période

de retour unique, a été découpée selon les biefs du modèle hydrologique Cinecar, modèle retenu pour les simulations pluie-débit. À l'échelle de ces biefs, le nombre de bâtiments de la base de données TOPO® de l'IGN présents dans chacune des dix emprises a pu être calculé. Une relation débit-impacts (i.e. débit - nombre de bâtiments inondés) a ainsi pu être établie pour chaque bief à partir des périodes de retour considérées. Le choix d'interpoler linéairement entre ces dix points a été fait en raison de l'ignorance complète de la progression du débordement entre deux débits simulés par le modèle hydrologique.

Les résultats de cette méthode ont pu être évalués à travers deux de ses composantes : la modélisation des emprises inondées via le modèle hydraulique simplifié, puis la modélisation complète des impacts (nombre de bâtiments inondés) à l'échelle d'un événement. Les deux études de cas retenues pour l'évaluation à l'échelle de l'événement sont ceux du 8 et 9 septembre 2002 au sein du TRI d'Alès dans le Gard et du 15 juin 2010 sur le bassin versant de l'Argens dans le Var.

6.1 Résultats de l'évaluation de la méthode proposée

Qualité de la modélisation des emprises inondées

Les incertitudes identifiées dans le cadre de ces travaux proviennent avant tout du niveau de précision des données topographiques utilisées et des simplifications effectuées dans la mise en œuvre des modèles hydrauliques (Werner et al., 2005, NRC, 2009, Rodríguez-Rincón et al., 2015).

Dans le cas du TRI d'Alès, les résultats ont été évalués en deux temps : les hauteurs d'eau simulées ont été comparées aux courbes de tarage des stations hydrométriques disponibles, puis le catalogue d'emprises a été évalué par comparaison avec les emprises de référence établies dans le cadre du TRI d'Alès. La surface inondée maximale atteinte au cours de l'événement du 8 septembre 2002 a également été utilisée comme référence pour cet événement. Pour 90% des biefs, les emprises estimées à partir de la modélisation hydraulique simplifiée apparaissent très proches des emprises de référence (écarts de surface inférieurs à 20%). Ponctuellement des erreurs peuvent être générées dans des zones, hydrauliquement complexe (lit mineur perché) ou des zones de faible débordement, avec des erreurs sur les emprises inondées supérieures à 30%. Il est important de noter que les erreurs relatives ont tendance à diminuer lorsque la période de retour de l'événement augmente.

Dans le cas du Var, seule l'emprise maximale atteinte a été utilisée comme référence au cours de l'inondation du 15 juin 2010. Les résultats sont de meilleure qualité que ceux obtenus dans le Gard bien que le modèle n'ait pas été calé sur le secteur : ceci peut être lié aux niveaux de précision altimétrique et planimétrique des données topographiques utilisées. Ces résultats rappellent l'importance de ce jeu de données qui semble jouer un rôle au moins aussi significatif que les coefficients de rugosité dans la qualité des sorties de modélisations hydrauliques. Les résultats très satisfaisants des modèles hydrauliques, lorsqu'ils sont appliqués avec peu de calage et à grande échelle, sont en accord avec les résultats d'autres études du même type cités dans le chapitre 2. Ils sont notamment liés aux plages de variation limitées des valeurs de coefficients de rugosité pour les cours d'eau naturels qui réduisent les incertitudes et à la faible sensibilité des emprises aux erreurs de débits et de cotes d'eau en dehors des plages limitées de début de débordement. Ces résultats, surprenants mais encourageants, devraient inciter à généraliser la prévision des inondations.

Qualité des simulations d'impacts à l'échelle de l'événement

L'évaluation a été réalisée à partir d'un jeu d'événements passés. Des travaux antérieurs couplés à l'observation des données de pluie permettent de disposer de simulations hydrologiques de bonne qualité au cours de l'événement. En limitant les incertitudes attachées à la modélisation hydrologique, il est possible d'évaluer et de distinguer spécifiquement les incertitudes liées à la construction du catalogue d'emprises inondées de celles qui concernent la connexion du modèle d'impacts au modèle pluie-débit.

Des données de la Caisse Centrale de Réassurance ont été mobilisées pour évaluer les impacts maximums estimés par la chaîne de simulation pluie-débit-impacts. Les données exploitées se sont limitées à celles correspondant à de l'habitat individuel géolocalisé précisément à l'adresse ou à la rue. Des adaptations ont été apportées aux modèles d'impacts afin de correspondre aux données sélectionnées dans la base de données de la CCR. Des ajustements ont ensuite été mis en place pour atténuer les différences entre les deux jeux de données et ainsi permettre leur comparaison.

Au cours des deux simulations effectuées sur les événements du 8 septembre 2002 dans le Gard et du 15 juin 2010 dans le Var, la prévision des impacts apparaît cohérente avec les données de sinistres déclarés lors de ces deux crues. L'inventaire de la CCR reste partiel et les jeux de données encore limités malgré une très nette amélioration entre 2002 et de 2010. À ce stade, la validation d'un modèle d'impacts à l'échelle du bief de cours d'eau n'est envisageable que pour des événements majeurs ayant engendré de très nombreux sinistres. L'enrichissement progressif de la base de données de la CCR, l'amélioration de son exhaustivité et de son homogénéité permettront certainement à terme des exploitations plus poussées.

La méthode développée dans le cadre de ces travaux de thèse semble en mesure de donner un ordre de grandeur réaliste du nombre d'habitations exposées aux inondations pour chaque bief de cours d'eau : cette information est un élément pour la bonne organisation des gestionnaires du risque.

Bilan

Ces travaux de thèse ont permis d'illustrer qu'il était désormais possible de développer des outils de prévision des impacts de crues-éclair à grande échelle spatiale couvrant des secteurs jaugés et non jaugés. Parmi les résultats très positifs du travail réalisé on peut citer :

- La qualité des prévisions hydrologiques produits par les modèles pluie-débit, ajustés régionalement, au moins dans le cas de crues majeures comme celles de 2002 ou 2010. Le modèle Cinecar génère dans l'ensemble des débits maximums du bon ordre de grandeur sur l'ensemble du réseau hydrographique, ce qui permet de qualifier correctement l'intensité des crues et de mettre en évidence les contrastes spatiaux. Les estimations de débits de pointe réalisées sur des secteurs non jaugés pour ces deux événements ont permis de vérifier la qualité des simulations pluie-débit même sur les bassins versants non jaugés ;
- La pertinence des emprises inondées, calculées automatiquement sur un large territoire, à l'aide de modèles hydrauliques simplifiés. En effet d'autres travaux récents, cités dans le chapitre 2, ont abouti aux mêmes conclusions. L'étude de cas du Var est, de ce point de vue, particulièrement significative. Le modèle hydraulique a en effet été appliqué avec les valeurs de paramétrage déterminées dans l'expérience du Gard, sans aucun calage supplémentaire et montre des performances supérieures à celles du Gard. Ceci peut être attribué à la qualité des données topographiques.

- La valorisation de base de données. Les déclarations de sinistres de la CCR pour évaluer la qualité des prévisions d'impacts et des premières tentatives de valorisation de main courante des services de secours et de tweets ont permis de révéler les limites de ce type de données dans le cas des crues-éclair. Le taux de renseignement de ces bases de données a tendance à diminuer dans les secteurs très fortement affectés.

6.2 Perspectives

Il est important de noter qu'au terme de ces travaux, seules les qualités de l'extension maximale calculée des zones inondées et des estimations d'impacts maximums ont été validées et ceci uniquement sur des événements passés sans aucune tentative de prévision.

En effet, le degré d'anticipation que permettrait la mise en œuvre opérationnelle de l'outil proposé, aspect essentiel pour un modèle de prévision, n'a pas été testé. Les données de déclarations de sinistres, qui ont été les principales données de validation dans cette thèse, ne comportent pas d'indications temporelles. Ce type d'informations aurait permis d'évaluer le degré d'anticipation de la chaîne de simulation proposée. Par ailleurs, cette anticipation repose essentiellement sur la qualité des résultats du modèle pluie-débit et sur la précision des prévisions de pluie, qui n'ont pas été ré-évaluées lors de cette thèse.

Enfin, dans la plupart des travaux de développement de modèles de prévisions, seul le décalage temporel entre la prévision du dépassement de seuils et son observation est évalué. Cette information hydrologique est importante, mais pas suffisante pour évaluer l'utilité des modèles de simulation et de prévision des impacts. Leur plus-value doit être testée avec les utilisateurs finaux, les gestionnaires de crise, sur la base d'exercices. Il faut en effet pouvoir vérifier que les informations délivrées par les modèles proposés, les prévisions mais aussi l'estimation des impacts associés à celles-ci, permettent réellement des prises de décision plus pertinentes et plus rapides. Cette phase de test est délicate à mettre en œuvre, mais essentielle.

Au-delà de ces perspectives à moyen terme, complexes à mettre en œuvre, un certain nombre de perspectives de court terme, dans la continuité de ce travail de thèse, peuvent être proposées.

6.2.1 Appliquer la méthode à des territoires plus vastes avec des données topographiques récentes

Dans le cadre de ces travaux de thèse, la chaîne de simulation pluie-débit-impacts a été testée dans le Gard, puis transposée dans le Var. Les données sur lesquelles la chaîne de simulation repose sont disponibles à l'échelle de la France. Il serait donc intéressant de proposer un modèle d'impacts sur l'ensemble des tronçons de la Base Nationale des Bassins Versants du SCHAPI, à l'échelle des bassins méditerranéens (les plus concernés par les crues-éclair) et à l'échelle de la France. Cela permettra de multiplier rapidement l'application de la méthode sur des études de cas.

La phase de construction du catalogue d'emprises inondées par modélisation hydraulique a été effectuée en prétraitement dans le cadre de ces travaux de thèse (Cf. §4.3). En suivant les recommandations de [Fewtrell et al. \(2008\)](#) et de [Mark et al. \(2004\)](#) sur la résolution des données topographiques, il paraît possible d'atteindre rapidement une couverture nationale avec un niveau de précision qui devrait croître par rapport à celui obtenu dans ces travaux, du fait de l'augmentation de précision des données topographiques. Les données LiDAR semblent

indispensables à une amélioration des résultats obtenus à partir de la modélisation hydraulique 1D adoptée, aussi bien sur les étendues inondées que sur les hauteurs d'eau estimées (Costabile et al., 2015). Les levés LiDAR de l'IGN couvraient 280 000 km², soit environ 50% de la France métropolitaine, en décembre 2014 (Pauthonnier, 2014), avec l'objectif de couvrir la grande majorité du territoire dans les années à venir (figure 6.1). Ces données LiDAR intègrent progressivement la base de données du RGE ALTI®¹ de l'IGN.

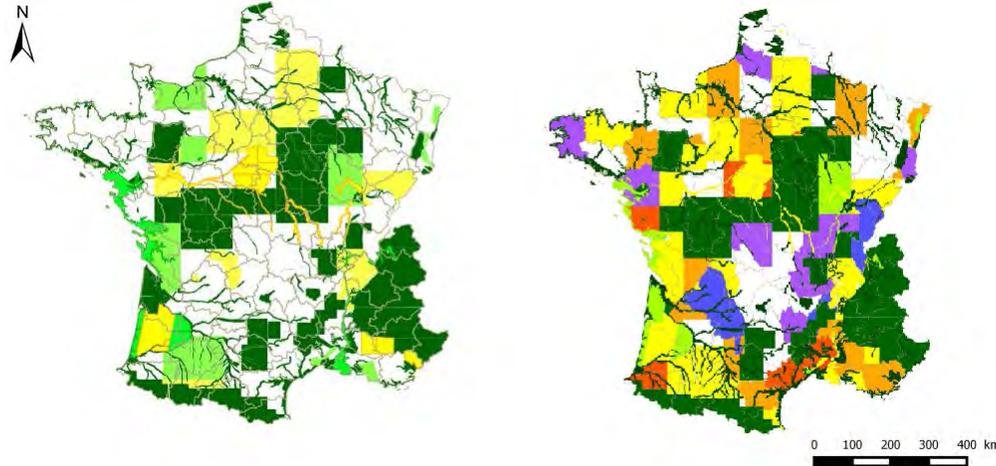


FIGURE 6.1 – Couverture de l'information LiDAR en 2014 (carte à gauche) et projection des informations disponibles courant 2016 (carte à droite) - source Pauthonnier (2014)

En effectuant des modélisations hydrauliques avec des données topographiques actualisées au sein de la base de données RGE ALTI® de l'IGN, couvert en LiDAR, il serait possible d'améliorer les calculs hydrauliques effectués dans le Gard et dans le Var et d'obtenir des résultats en meilleure adéquation avec les surfaces de références disponibles (Cf. §5.1.5 et §5.2.6).

Dans la perspective d'une mise en œuvre opérationnelle d'une telle chaîne de prévision, les emprises calculées automatiquement pourront être remplacées par les emprises de référence, quand elles sont disponibles. La modélisation hydraulique proposée a essentiellement pour but de couvrir les biefs de cours d'eau peu documentés (souvent les biefs amont aux lits encaissés et hydrauliquement peu complexe) et de fournir des informations d'emprises inondées de bonne qualité sur les secteurs non documentés et sujets aux crues-éclair.

6.2.2 Évaluer la modélisation des impacts sur des événements plus récents

Les comparaisons des sorties du modèle d'impacts se sont limitées à deux événements dans deux départements différents, pour lesquels l'ensemble des informations de validation utilisées (base de données de la CCR, Tweets (Douvinet et al., 2016) et les interventions des SDIS) étaient suffisamment riches et nombreuses. La proportion des polices d'assurances géolocalisées à l'adresse ou à la rue croît rapidement dans la base de données de la CCR et devrait permettre à terme de mieux valider les prévisions d'impacts des crues.

1. <http://professionnels.ign.fr/rgealti>

La chaîne de simulation des impacts des crues étant opérationnelle dans le Gard et pour l'Argens dans le Var, il sera intéressant de poursuivre la validation de cette chaîne de prévision lorsque les données de sinistres concernant les crues plus récentes seront disponibles. Par exemple, durant l'année 2014, des événements d'inondation ont été recensés dans les départements du Gard et du Var pour lesquels les informations de validation du modèle d'impacts commencent à être nombreuses. Ces données n'étaient cependant pas encore disponibles dans la base de données de la CCR au moment de cette thèse.

6.2.3 Rendre compte des incertitudes

Ce travail de thèse a été essentiellement consacré au développement de la chaîne de prévision des impacts et le temps limité n'a pas permis d'aborder la question de l'estimation et de la représentation des incertitudes de prévision (niveau de confiance, scénarios haut et bas, scénario médian ou déterministe accompagné d'une hypothèse pessimiste comme par exemple le quantile 90%).

Les prévisions hydro-météorologiques et les prévisions d'impacts des inondations proposées dans cette thèse sont inévitablement entachées d'incertitudes, liées aux données disponibles imparfaites et incomplètes et aux limitations des modèles de prévision utilisés (Aronica et al., 2013).

Ces incertitudes ont longtemps été ignorées et passées sous silence. Elles sont désormais considérées comme partie intégrante des prévisions et leur communication essentielle pour une prise de décision éclairée sur la base des prévisions (Ramos et al., 2010, Shamir et al., 2013, Chastan et al., 2013). Les gestionnaires de crise peuvent par exemple être plus intéressés par le fait qu'un événement dommageable soit du domaine du possible et qu'il faille s'y préparer que par une prévision "déterministe" qui ne prévoit pas que le seuil d'apparition des dommages sera atteint. Les incertitudes doivent aussi faire l'objet d'une modélisation et d'une estimation. De nombreuses méthodes ont été proposées pour cela allant de la décomposition des sources d'incertitudes et de la propagation dans la chaîne de prévision (méthode Monte-Carlo ou méthodes dites d'ensembles de scénarios) au calage de modèles stochastiques sur les erreurs de prévisions observées par le passé (Versini, 2012, Defrance, 2014). Cette dernière est la plus facile et la plus couramment mise en œuvre, mais nécessite un minimum de recul afin de pouvoir caler un modèle stochastique sur des séries d'écarts de prévisions passées (Berthet, 2010).

L'affichage des incertitudes sera essentiel à l'estimation de la plus-value de la chaîne de prévision des impacts avec les utilisateurs finaux en particulier pour évaluer l'intérêt d'utiliser des prévisions de pluies à courte échéance pour augmenter les horizons de prévisions. En effet, l'intégration de ces prévisions risque d'accroître fortement les incertitudes de l'ensemble de la chaîne de prévision (Atencia et al., 2011, Peleg et al., 2013). Seuls les utilisateurs finaux seront en mesure de juger si les niveaux d'incertitudes associés aux prévisions sont raisonnables ou au contraire empêchent toute prise de décision et limitent donc fortement l'intérêt des prévisions. Le développement de modèles d'incertitudes sera donc une étape essentielle aux développements futurs de la chaîne de prévision proposée et permettra son évaluation. Il nécessitera la mise en œuvre de la chaîne de prévision sur un ensemble bien plus important d'événements évoqués dans le paragraphe précédent afin d'être élaboré et testé.

6.2.4 Faire évoluer le modèle d'impacts

Les sorties du modèle CARTINO restituent l'étendue de la surface simulée mais également les hauteurs d'eau associées à chaque pixel (Cf. §4.1). Des travaux antérieurs prennent en compte le niveau d'eau atteint pour quantifier les impacts sur chaque bâtiment (Tanguy, 2012). Il serait donc tout à fait possible d'affiner le modèle d'impacts pour tenir compte des hauteurs de submersion des bâtiments et de leur distance par rapport au lit mineur et des vitesses d'écoulement ; des paramètres qui peuvent être corrélés aux dommages matériels et aux risques pour les personnes.

Ainsi l'évolution du modèle d'impacts prenant en compte le niveau de submersion des bâtiments pourrait être inclus dans la construction des cartes présentant l'évolution temporelle des impacts (Cf. §5.1.1). Les points associés à chaque bief pourraient par exemple varier en taille en fonction du nombre de bâtiments impactés. On pourrait également imaginer un changement de couleur en fonction du risque pour les personnes et les biens liés à la période de retour de la crue, ou de la hauteur maximale de submersion prévue ou encore de la distance minimale par rapport au lit mineur.

En parallèle, des discussions avec les gestionnaires du risque doivent être entreprises pour connaître leur besoin sur le format de restitution des cartes d'impacts. Ces discussions n'ont pas pu être menées au cours de ces travaux de thèse. Ainsi, les choix de la représentation des résultats du modèle d'impacts ont donc été faits par anticipation de ces besoins : choix de la résolution géographique (tronçons de la BNBV du SCHAPI) et de l'échelle temporelle (toutes les quinze minutes).

Le modèle d'impacts a pris en compte les bâtiments, de type habitation, sans prendre en considération les flux migratoires des populations à l'échelle d'une journée, d'une semaine et d'une année. L'estimation du nombre de personnes exposées pourrait être intégré dans le modèle d'impacts en cours en prenant appui sur les travaux récents à ce sujet (Creutin et al., 2013, Shabou, 2017, Saint-Martin et al., 2016).

Enfin, des établissements particulièrement vulnérables (écoles, campings, hôpitaux, maisons de retraites) pourraient faire l'objet d'une attention particulière dans le calcul d'impacts.

Cette thèse a permis de démontrer que l'on pouvait désormais proposer des prévisions des impacts possibles des crues-éclair afin de faciliter l'organisation des opérations de secours et d'informer en temps réel les populations. Elle devrait ouvrir la voie à de nombreux autres travaux de recherche et de développement afin de proposer des prévisions correspondant au plus près aux attentes des utilisateurs.

Bibliographie

- Akıncı, H. and Erdoğan, S. (2014). Designing a flood forecasting and inundation-mapping system integrated with spatial data infrastructures for turkey. *Natural Hazards*, 71(1) :895–911.
- Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., and Pappenberger, F. (2013). Glofas - global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3) :1161–1175.
- Alfieri, L., Thielen, J., and Pappenberger, F. (2012). Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern switzerland. *Journal of Hydrology*, 424–425 :143 – 153.
- Alquier, M., Pons, F., Esposito, C., and Le Bihan, G. (2013). Notice de cartino. Technical report, CETE Méditerranée.
- André, C. (2013). *Analysis of coastal flooding damage and assessment of induced costs on residential buildings, based on insurance data : insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale - Brest.
- André, C., Monfort, D., Bouzit, M., and Vinchon, C. (2013). Contribution of insurance data to cost assessment of coastal flood damage to residential buildings : insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13 :2003–2012.
- Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., and Thielen, A. H. (2009). Flood risk analyses - how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1) :79–98.
- Arnaud, P., Aubert, Y., Organde, D., Cantet, P., Fouchier, C., and Folton, N. (2014). Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG : présentation – performances – bases de données. *La Houille Blanche*, 2 :20–26.
- Arnaud, P., Eglin, Y., Janet, B., and Payrastre, O. (2013). Bases de données SHYREG-débit : méthode, performances et limites. Technical report, IRSTEA.
- Aronica, G. T., Apel, H., Baldassarre, G. D., and Schumann, G. J.-P. (2013). Hp - special issue on flood risk and uncertainty. *Hydrological Processes*, 27(9) :1291.
- Atencia, A., Mediero, L., Llasat, M. C., and Garrote, L. (2011). Effect of radar rainfall time resolution on the predictive capability of a distributed hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(12) :3809–3827.

- Aubert, Y., Arnaud, P., Ribstein, P., and Fine, J.-A. (2014). La méthode SHYREG - application sur 1605 bassins versants en France métropolitaine. *Hydrological Sciences Journal*, 59(5) :993–1005.
- Ayral, P.-A. (2005). *Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair ALTHAIR : approches spatiale et expérimentale, application au bassin versant du Gardon d’Anduze*. PhD thesis, université de Provence.
- Ballais, J.-L., Chave, S., Dupont, N., Masson, E., and Penven, M.-J. (2011). *La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*, volume 5. Physio-Géo.
- Ballais, J.-L., Garry, G., and Masson, M. (2005). Contribution de l’hydrogéomorphologie à l’évaluation du risque d’inondation : le cas du Midi méditerranéen français. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(13) :1120 – 1130.
- Bartholmes, J. C., Thielen, J., Ramos, M. H., and Gentilini, S. (2009). The european flood alert system efas – part 2 : Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2) :141–153.
- Bates, P. and Roo, A. D. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1–2) :54 – 77.
- Begnudelli, L. and Sanders, B. F. (2006). Unstructured grid finite-volume algorithm for shallow-water flow and scalar transport with wetting and drying. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4) :371–384.
- Berthet, L. (2010). *Prévision des crues au pas de temps horaire pour une meilleure assimilation de l’information de débit dans un modèle hydrologique*. PhD thesis, AgroParisTech.
- Bidan, P. and Quantin, A. (2013). La connaissance des risques naturels par la sinistralité assurances.
- Blanchet, J., Molinié, G., and Touati, J. (2016). Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern france. *Climate Dynamics*, 540 :82 – 95.
- Borrell, V. E. (2004). *Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du sud de la France*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Bourgin, F. (2014). *Comment quantifier l’incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants*. PhD thesis, École Doctorale Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement (AgroParisTech).
- Bourguignon, D. (2014). *Événements et territoires - Le coût des inondations en France - Analyses spatio-temporelles des dommages assurés*. PhD thesis, l’Université Paul Valéry -Montpellier 3.
- Bousquet, J.-C. and Vignard, G. (2006). *Géologie du Languedoc-Roussillon*. les Presses du Languedoc ; BRGM édition.
- Bozzi, S., Passoni, G., Bernardara, P., Goutal, N., and Arnaud, A. (2014). Roughness and discharge uncertainty in 1D water level calculations. *Environmental Modeling & Assessment*, 20(4) :343–353.

- Bradbrook, K., Waller, S., and Morris, D. (2005). National floodplain mapping : Datasets and methods – 160,000 km in 12 months. *Natural Hazards*, 36(1) :103–123.
- Braud, I., Roux, H., Anquetin, S., Maubourguet, M.-M., Manus, C., Viallet, P., and Dartus, D. (2010). The use of distributed hydrological models for the gard 2002 flash flood event : Analysis of associated hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 394(1–2) :162 – 181. Flash Floods : Observations and Analysis of Hydrometeorological Controls.
- Burek, P. A., Roo, A. D., and van der Knijff, J. (2013). Lisflood. distributed water balance and flood simulation model. Technical report, European Commission.
- Burnash, R. J. C., Ferral, R. L., and McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system - conceptual modeling for digital computers. In *technical report, 204 pp.*, Joint Fed. and State River Forecast Cent.
- Calianno, M., Ruin, I., and Gourley, J. J. (2013). Supplementing flash flood reports with impact classifications. *Journal of Hydrology*, 477 :1–16.
- Carpenter, T. M. and Georgakakos, K. P. (2004). Continuous streamflow simulation with the HRCDHM distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 298(1–4) :61 – 79. The Distributed Model Intercomparison Project (DMIP).
- Carpenter, T. M. and Georgakakos, K. P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of Hydrology*, 329(1–2) :174 – 185.
- Carrière, J.-M., Brovelli, P., and Tzanos, R. (2011). Apic : service d’avertissement de pluie intense. *Météo Le Magazine*, 14 :18–19.
- Ceresetti, D., Ursu, E., Carreau, J., Anquetin, S., Creutin, J. D., Gardes, L., Girard, S., and Molinié, G. (2012). Evaluation of classical spatial-analysis schemes of extreme rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(11) :3229–3240.
- Chang, L.-C., Shen, H.-Y., and Chang, F.-J. (2014). Regional flood inundation nowcast using hybrid som and dynamic neural networks. *Journal of Hydrology*, 519, Part A :476–489.
- Charaud, S. (2014). Cartographie de la directive inondation - mise en application du standard covadis et méthodes de calcul des populations à la parcelle à partir des données carroyées INSEE. Technical report, CEREMA. p7-9.
- Chastan, B., Dartus, D., Delrieu, G., Fourmigué, P., Gaume, E., Garçon, R., Grésillon, J.-M., Jouve, D., Lafaye, M., Lutoff, C., Martin, E., Obled, C., Thielen, J., Berthet, L., and Janet, B. (2013). Les incertitudes associées aux prévisions des crues et des inondations, leur estimation et leur prise en compte dans la communication. Technical report, Conseil scientifique et technique du SCHAPI.
- Colas, B. and Baillet, L. (2007). Inventaire départemental des mouvements de terrain du gard - complément. Technical report, BRGM.
- Cole, S. J. and Moore, R. J. (2009). Distributed hydrological modelling using weather radar in gauged and ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 32(7) :1107–1120. Weather Radar and Hydrology.

- Cole, S. J., Moore, R. J., Robson, A. J., and Mattingley, P. S. (2014). Probabilistic flood forecasting for Rapid Response Catchments using a countrywide distributed hydrological model : experience from the UK. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 16 of *EGU General Assembly Conference Abstracts*, page 15476.
- Costabile, P., Macchione, F., Natale, L., and Petaccia, G. (2015). Flood mapping using lidar dem. limitations of the 1D modeling highlighted by the 2D approach. *Natural Hazards*, 77(1) :181–204.
- Coustau, M. (2011). *Contribution à la prévision des crues sur le bassin du Lez - modélisation de la relation pluie-débit en zone karstique*. PhD thesis, Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosiences et Environnement (SIBAGHE).
- Creutin, J.-D. and Borga, M. (2003). Radar hydrology modifies the monitoring of flash-flood hazard. *Hydrological Processes*, 17(7) :1453–1456.
- Creutin, J. D., Borga, M., Grunfest, E., Lutloff, C., Zocatelli, D., and Ruin, I. (2013). A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. *Journal of Hydrology*, 482 :14–24.
- Defrance, D. (2014). *Adaptation and evaluation of an early flash floods system on ungauged mountainous basins*. Theses, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Degoutte, G. (2012). *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*, volume 524 pages. Tec & Doc Lavoisier, deuxième édition. chapitre 1 - Hydraulique à surface libre 2-60.
- Delestrac, D. (2011). Le sable : enquête sur une disparition. ARTE France, Rappi Productions, La Compagnie des Taxi-Brousse. FICMA 2013 - Golden Sun, Prix de l’impact FIGRA-AMNESTY INTERNATIONAL.
- Delrieu, G., Boudevillain, B., Nicol, J., Chapon, B., Kirstetter, P.-E., Andrieu, H., and Faure, D. (2009). Bollène - 2002 Experiment : Radar Quantitative Precipitation Estimation in the Cévennes-Vivarais Region, France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(7) :1422–1447.
- Delrieu, G., Boudevillain, B., Wijbrans, A., Faure, D., Bonnifait, L., Kirstetter, P.-E., and Confoland, A. (2013). Prototype de ré-analyses pluviométriques pour la région Cévennes-Vivarais. *La Météorologie*, 8(83) :35.
- Delrieu, G., Nicol, J., Yates, E., Kirstetter, P.-E., Creutin, J.-D., Anquetin, S., Obled, C., Saulnier, G.-M., Ducrocq, V., Gaume, E., Payrastre, O., Andrieu, H., Ayrat, P.-A., Bouvier, C., Neppel, L., Livet, M., Lang, M., du Châtelet, J. P., Walpersdorf, A., and Wobrock, W. (2005). The catastrophic flash-flood event of 8–9 september 2002 in the Gard region, france : A first case study for the cévennes–vivarais mediterranean hydrometeorological observatory. *Journal of Hydrometeorology*, 6(1) :34–52.
- Delrieu, G., Ruin, I., Gaume, E., Borga, M., Anquetin, S., Boudevillain, B., Creutin, J.-D., Lutloff, C., Marchi, L., Payrastre, O., and Anna, S. (2016). *Climate change in the Mediterranean*, chapter Inter-disciplinary post-event surveys to disentangle hazard from vulnerability in the impacts of Mediterranean flash-flood events. alliance Allenvi.

- Descatoire, I., Weil, B., and Chassé, P. (2008). Guide de prise en main fudaa-mascaret 3.0. Technical report, CETMEF.
- Deschodt, L. and Salvador, P.-G. (2003). Contribution à la connaissance du paléoenvironnement de la vallée de la Deûle (Nord, France) : approche stratigraphique. *Revue du Nord*, 353(5) :23.
- Desprats, J.-F., Cerdan, O., King, C., and Marchandise, A. (2010). Cartographie de la perméabilité des sols pour l'aide à la prévision des crues : cas d'étude sur le gardon d'anduze. *La Houille Blanche*, 3 :32–38.
- Detrembleur, S., Dewals, B. J., Archambeau, P., Erpicum, S., and Piroton, M. (2009). Modélisation numérique et gestion du risque inondation - retour d'expérience sur les modèles topographiques à haute résolution. *TSM*, 7/8 :23–29.
- Dewals, B. (2006). *Une approche unifiée pour la modélisation d'écoulements à surface libre, de leur effet érosif sur une structure et de leur interaction avec divers constituants*. PhD thesis, Université de Liège, Belgique.
- DGPR (2012). Première évaluation nationale des risques d'inondation. Principaux résultats - EPRI 2011. Technical report, MEDDE.
- DIHAL (2013). Le guide du pôle national de lutte contre l'habitat indigne : locaux impropres. Technical report, Ministère de l'égalité des territoires et du logement.
- Douinot, A., Roux, H., Garambois, P.-A., Larnier, K., Labat, D., and Dartus, D. (2015). Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood forecasting. *Journal of Hydrology*, In press :- in press.
- Douvinet, J., Gisclard, B., Kouadio, J., and Richaud, A. (2016). Les Smartphones et les Réseaux Sociaux Numériques, des outils d'aide face aux crues rapides? -, - :- soumis.
- DREAL, L.-R. (2013a). Atlas des surfaces inondables du Gardon d'Alès pour le scénario à forte fréquence. Technical report, DREAL Languedoc-Roussillon.
- DREAL, L.-R. (2013b). Cartes de synthèse des surfaces inondables pour les scénarios du TRI d'Alès. Technical report, DREAL Languedoc-Roussillon.
- DREAL, L.-R. (2013c). Cartes des risques d'inondation du TRI d'Alès. Technical report, DREAL Languedoc-Roussillon.
- DREAL, L.-R. (2013d). Territoire à risque important d'inondation (tri) d'alès - cartographie des surfaces inondables et des risques - annexe méthodologique. Technical report, DREAL Languedoc-Roussillon.
- DREAL, L.-R. (2013e). Territoire à risque important d'inondation (tri) d'alès - cartographie des surfaces inondables et des risques - rapport explicatif. Technical report, DREAL Languedoc-Roussillon.
- DREAL, L.-R. (2015). De l'évaluation à l'action de la directive inondation en languedoc-roussillon. Technical report, DREAL Languedoc-Roussillon.

- DREAL, R.-A. (2014). Stratégies locales de gestion des risques d'inondation. Technical report, DREAL Rhône-Alpes.
- Edijatno, Nascimento, N. D. O., Yang, X., Makhlof, Z., and Michel, C. (1999). Gr3j : a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 44(2) :263–277.
- Esposito, C. (2015). Crue de juin 2010 dans le var : comparaison de la zone inondée et des zones inondables connues. *La houille Blanche*, 1 :34–40.
- Falter, D., Dung, N., Vorogushyn, S., Schrobfter, K., Hundecha, Y., Kreibich, H., Apel, H., Theisselmann, F., and Merz, B. (2016). Continuous, large-scale simulation model for flood risk assessments : proof-of-concept. *Journal of Flood Risk Management*, 9(1) :3–21.
- Falter, D., Schröter, K., Dung, N. V., Vorogushyn, S., Kreibich, H., Hundecha, Y., Apel, H., and Merz, B. (2015). Spatially coherent flood risk assessment based on long-term continuous simulation with a coupled model chain. *Journal of Hydrology*, 524 :182 – 193.
- Falter, D., Vorogushyn, S., Lhomme, J., Apel, H., Gouldby, B., and Merz, B. (2013). Hydraulic model evaluation for large-scale flood risk assessments. *Hydrological Processes*, 27(9) :13331–1340.
- Fewtrell, T. J., Bates, P. D., Horritt, M., and Hunter, N. (2008). Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments. *Hydrological Processes*, 22 :5107–5118.
- Fouchier, C. (2010). *Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues*. Thèse de doctorat, météorologie, océanographie physique et physique de l'environnement, Université de Montpellier 2.
- Garambois, P., Roux, H., Larnier, K., Labat, D., and Dartus, D. (2015). Parameter regionalization for a process-oriented distributed model dedicated to flash floods. *Journal of Hydrology*, 525 :383 – 399.
- Garambois, P. A., Roux, H., Larnier, K., Castaings, W., and Dartus, D. (2013). Characterization of process-oriented hydrologic model behavior with temporal sensitivity analysis for flash floods in mediterranean catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6) :2305–2322.
- Garcia-Pintado, J., Mason, D. C., Dance, S. L., Cloke, H. L., Neal, J. C., Freer, J., and Bates, P. D. (2015). Satellite-supported flood forecasting in river networks : A real case study. *Journal of Hydrology*, 523 :706–724.
- Gaume, E. (2002). *Élément d'analyse sur les crues éclair*. PhD thesis, ENGREF (AgroParisTech).
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., and Viglione, A. (2009). A compilation of data on european flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1–2) :70 – 78.

- Gaume, E., Borga, M., Llasat, M. C., Maouche, S., Algiers, B., Lang, M., and Diakakis, M. (2016). *Climate change in the Mediterranean*, chapter Mediterranean extreme floods and flash floods. alliance Allenvi.
- Gaume, E. and Bouvier, C. (2004). Analyse hydro-pluviométrique des crues du Gard et du Vidourle des 8 et 9 septembre 2002. *La Houille Blanche*, 6 :99–106.
- Georgakakos, K. P. (2006). Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 317(1–2) :81 – 103.
- Gouldby, B., Sayers, P., Mulet-Marti, J., Hassan, M., and Benwell, D. (2008). A methodology for regional-scale flood risk assessment. *Proceedings of the institution of civil engineers-water management*, 161(3) :169–182.
- Gourley, J. J., Flamig, Z. L., Hong, Y., and Howard, K. W. (2014). Evaluation of past, present and future tools for radar-based flash-flood prediction in the USA. *Hydrological Sciences Journal*, 59(7) :1377–1389.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., and Jourde, H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138 :61–88.
- Hapuarachchi, H. A. P., Wang, Q. J., and Pagano, T. C. (2011). A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological Processes*, 25(18) :2771–2784.
- Harader, E. (2015). *L’impact du changement climatique sur les événements hydrologiques extrêmes des petits bassins versants méditerranéens : le cas du bassin versant du Lez*. PhD thesis, École doctorale sciences de l’univers, de l’environnement et de l’espace (Toulouse).
- Herold, C. and Mouton, F. (2011). Global flood hazard mapping using statistical peak flow estimates. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8 :305–363.
- Hirpa, F. A., Salamon, P., Alfieri, L., del Pozo, J. T., Zsoter, E., and Pappenberger, F. (2016). The effect of reference climatology on global flood forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 17(4) :1131–1145.
- IGN (2011). Descriptif de contenu de la base base de données TOPO. Technical report, Institut national de l’information géographique et forestière.
- Javelle, P., Demargne, J., Defrance, D., Pansu, J., and Arnaud, P. (2014). Evaluating flash-flood warnings at ungauged locations using post-event surveys : a case study with the aiga warning system. *Hydrological Sciences Journal*, 59(7) :1390–1402.
- Javelle, P., Fouchier, C., Arnaud, P., and Lavabre, J. (2010). Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations. *Journal of Hydrology*, 394(1–2) :267 – 274. Flash Floods : Observations and Analysis of Hydrometeorological Controls.
- Jongman, B., Wagemaker, J., Romero, B., and de Perez, E. (2015). Early Flood Detection for Rapid Humanitarian Response : Harnessing Near Real-Time Satellite and Twitter Signals. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4) :2246–2266.

- Kobayashi, K. and Takara, K. (2013). Development of a distributed rainfall-run-off/flood-inundation simulation and economic risk assessment model : Development of a rainfall-runoff/flood inundation model. *Journal of Flood Risk Management*, 6(2) :85–98.
- Kosztra, B. and Arnold, S. (2014). Proposal for enhancement of clc nomenclature guidelines. Technical report, European Environment Agency.
- Koutroulis, A. G. and Tsanis, I. K. (2010). A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin : Case study for the 13–14 january 1994 flood, giofiros basin, crete, greece. *Journal of Hydrology*, 385(1–4) :150–164.
- Kvočka, D., Falconer, R. A., and Bray, M. (2015). Appropriate model use for predicting elevations and inundation extent for extreme flood events. *Natural Hazards*, 79(3) :1791–1808.
- Lagadec, L.-R., Patrice, P., Braud, I., Chazelle, B., Moulin, L., Dehotin, J., Hauchard, E., and Breil, P. (2016). Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. *Journal of Hydrology*, - :- in press.
- Laganier, O., Ayral, P. A., Salze, D., and Sauvagnargues, S. (2014). A coupling of hydrologic and hydraulic models appropriate for the fast floods of the gardon river basin (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11) :2899–2920.
- Lavabre, J. and Gregoris, Y. (2005). Aiga : un dispositif d’alerte des crues sur l’ensemble du réseau hydrograph. *Ingénieries EAT*, 44 :3–12.
- Le, X. K. (2008). *Variabilité des processus hydrologiques entrant dans le mécanisme de la genèse des crues sur les bassins à cinétique rapide*. PhD thesis, Université de Toulouse - Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT.
- Lerat, J. (2009). *Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques ? Vers un modèle intégré de simulation des crues*. Theses, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Lerat, J., Perrin, C., Andréassian, V., Loumagne, C. L., and Ribstein, P. (2012). Towards robust methods to couple lumped rainfall-runoff models and hydraulic models : A sensitivity analysis on the illinois river. *Journal of Hydrology*, 418-419 :123–135. The Distributed Model Intercomparison Project (DMIP) - Phase 2 Experiments in the Oklahoma Region, USA.
- Lin, G.-F., Lin, H.-Y., and Chou, Y.-C. (2013). Development of a real-time regional-inundation forecasting model for the inundation warning system. *Journal of Hydroinformatics*, 15(4) :1391–1407.
- Linhart, S. M. and Eash, D. A. (2010). Floods of may 30 to june 15, 2008, in the iowa river and cedar river basins, eastern iowa. Technical report, U.S. Geological Survey.
- Liu, S. B. (2014). Crisis crowdsourcing framework : Designing strategic configurations of crowdsourcing for the emergency management domain. *Computer Supported Cooperative Work*, 23(4) :389–443.
- Lumbroso, D. and Gaume, E. (2012). Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *Journal of Hydrology*, 414-415 :16–30.

- Malavoi, J.-R. and Bravard, J.-P. (2010). *Éléments d'hydromorphologie fluviale*, chapter 1, 3, 8 et 9, pages 7–18 ; 35–44 ; 143–212. ONEMA.
- Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B., and Djordjević, S. (2004). Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, 299(3-4) :284–299. Urban Hydrology.
- Martin, C. (2010). Les inondations du 15 juin 2010 dans le centre Var : réflexion sur un épisode exceptionnel. *Physio-Géo*, 4(XXXVII) :41–76.
- Martin, E. (2011). La modélisation hydrologique. *Météo Le Magazine*, 14 :20 –21.
- Merkuryeva, G., Merkuryev, Y., Sokolov, B. V., Potryasaev, S., Zelentsov, V. A., and Lektouers, A. (2015). Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. *Journal of Computational Science*, 10 :77 – 85.
- Michel, C., Andréssian, V., and Perrin, C. (2005). Soil conservation service curve number method : How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? *Water Resources Research*, 41(2) :n/a–n/a.
- Mijatovic, B. F. (1988). Catastrophic flood in the polje of cetinje in february 1986, a typical example of the environmental impact of karst. *Environmental Geology and Water Sciences*, 12(2) :117–121.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable, d. T. e. d. L. (2011). Plan submersions rapides : submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues. Technical report, Ministère. 78 p.
- Molinié, G., Déqué, M., Coppola, E., Blanchet, J., and Neppel, L. (2016). *Climate change in the Mediterranean*, chapter Heavy precipitation in the mediterranean basin - observed trends, future projections. alliance Allenvi.
- Moncoulon, D., Labat, D., Ardon, J., Leblois, E., Onfroy, T., Poulard, C., Aji, S., Rémy, A., and Quantin, A. (2014). 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.
- Moncoulon, D. and Quantin, A. (2013). Modélisation des événements extrêmes d'inondation en france métropolitaine. *La Houille Blanche*, 1 :22–26. february.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., and Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of ASABE*, 50 :885–900.
- Moulin, C. and Charaud, S. (2013). Directive inondation - phase cartographie - dénombrement des populations et des emplois. Technical report, CEREMA.
- Mubareka, S., Maes, J., Lavalle, C., and de Roo, A. (2013). Estimation of water requirements by livestock in europe. *Ecosystem Services*, 4 :139 – 145. Special Issue on Mapping and Modelling Ecosystem Services.

- Naulin, J.-P. (2012). *Modélisation hydrologique distribuée pour la prévision des coupures de routes par inondation : application au département du Gard*. PhD thesis, Ecole doctorale Sciences pour l'ingénieur, Géosciences, Architecture (Nantes). 278p 1-84.
- Naulin, J.-P., Payrastre, O., and Gaume, E. (2013). Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas : Application to road network supervision in southern france. *Journal of Hydrology*, 486 :88 – 99.
- Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Hsu, K., and AghaKouchak, A. (2015a). Flood forecasting and inundation mapping using hiresflood-uci and near-real-time satellite precipitation data : The 2008 iowa flood. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3) :1171–1183.
- Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Sanders, B., Koren, V., Cui, Z., and Smith, M. (2015b). A high resolution coupled hydrologic–hydraulic model (hiresflood-uci) for flash flood modeling. *Journal of Hydrology*, (-) :-. in press.
- Nicolle, P., Pushpalatha, R., Perrin, C., François, D., Thiéry, D., Mathevet, T., Le Lay, M., Besson, F., Soubeyroux, J.-M., Viel, C., Regimbeau, F., Andréassian, V., Maugis, P., Augeard, B., and Morice, E. (2014). Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on french catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8) :2829–2857.
- Norbiato, D., Borga, M., Esposti, S. D., Gaume, E., and Anquetin, S. (2008). Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions : An assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 362(3–4) :274 – 290.
- NRC (2009). *Mapping the Zone : Improving Flood Map Accuracy*. The National Academies Press, Washington, DC.
- OFS (2016). Statistique de la construction et des logements suisse en 2014. Technical report, Office Fédéral de la Statistique.
- Organde, D., Arnaud, P., Fine, J.-A., Fouchier, C., Folton, N., and Lavabre, J. (2013a). Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG. *Revue des sciences de l'eau*, 26(1) :65–78.
- Organde, D., Javelle, P., Ardilouze, C., and al. (2013b). Base nationale des bassins versants du schapi (bnbv). Direction Générale de la Prévention des Risques. note interne DPGR.
- Pan, T.-Y., Chang, L.-Y., Lai, J.-S., Chang, H.-K., Lee, C.-S., and Tan, Y.-C. (2014). Coupling typhoon rainfall forecasting with overland-flow modeling for early warning of inundation. *Natural Hazards*, 70(3) :1763–1793.
- Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., Kotroni, V., and Bezes, A. (2015). Flash flood occurrence and relation to the rainfall hazard in a highly urbanized area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8) :1859–1871.
- Pappenberger, F., Dutra, E., Wetterhall, F., and Cloke, H. L. (2012). Deriving global flood hazard maps of fluvial floods through a physical model cascade. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11) :4143–4156.

- Pappenberger, F., Stephens, E., Thielen, J., Salamon, P., Demeritt, D., van Andel, S. J., Wetterhall, F., and Alfieri, L. (2013). Visualizing probabilistic flood forecast information : expert preferences and perceptions of best practice in uncertainty communication. *Hydrological Processes*, 27(1) :132–146.
- Pauthonnier, A. (2014). Programme du RGE ALTI. In CEREMA, editor, *Journées techniques LiDAR*.
- Payraastre, O., Gaume, E., and Andrieu, H. (2011). Usefulness of historical information for flood frequency analyses : Developments based on a case study. *Water Resources Research*, 47(8) :n/a–n/a. W08511.
- Payraastre, O., Gaume, E., and Andrieu, H. (2013). Information historique et étude statistique des crues extrêmes : quelles caractéristiques souhaitables pour les inventaires de crues historiques ? *La Houille Blanche*, 3 :5–11.
- Payraastre, O., Lebouc, L., Ayrat, P.-A., Brunet, P., Delrieu, G., Douvinet, J., Dramais, G., Gaume, E., Javelle, P., Johannet, A., Adamovic, M., Adnes, C., Cantet, P., Chapuis, M., Coutouis, A., Creutin, J.-D., Gonzalez-Sosa, E., Ruin, I., Saint-Martin, C., Shabou, S., Wilhelm, B., and the Hymex TTO2d Team (2016). The october 2015 flash floods in south-eastern france - discharge estimations and comparison with other flash-floods documented in the hymex project. In *Geophysical Research Abstracts*, volume 18.
- Peleg, N., Ben-Asher, M., and Morin, E. (2013). Radar subpixel-scale rainfall variability and uncertainty : lessons learned from observations of a dense rain-gauge network. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6) :2195–2208.
- Perrin, C. (2002). Vers une amélioration d’un modèle global pluie-débit au travers d’une approche comparative. *La Houille Blanche*, 6-7 :84–91.
- Pigeon, P. (2002). Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. *Annales de Géographie*, 111(627) :452–470.
- Pinho, J., Ferreira, R., Vieira, L., and Schwanenberg, D. (2015). Comparison between two hydrodynamic models for flooding simulations at river lima basin. *Water Resources Management*, 29(2) :431–444.
- Ponce, V. M. and Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number : Has it reached maturity ? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1) :11–19.
- Pons, F., Delgado, J.-L., Guero, P., Berthier, E., Kerloc’h, B., Piney, S., and Felts, D. (2010). Une contribution à l’évaluation de l’aléa inondation par ruissellement et crues soudaines. In *SimHydro 2010 : Hydraulic modeling and uncertainty*.
- Pons, F., Laroche, C., Fourmigue, P., and Alquier, M. (2014). Cartographie des surfaces inondables extrêmes pour la directive inondation : cas de la nartuby. *La Houille Blanche*, 2 :34 – 41.
- Poulard, C., Breil, P., Hauchard, E., Dehotin, J., Lagadec, L.-R., and Patrice, P. (2015). Le ruissellement, comprendre pour diagnostiquer et agir. *Techni Cités*, 281 :21–28.

- Poulin, J., Chokmani, K., Tanguy, M., and Bernier, M. (2012). Cartographie dynamique du risque d'inondations en milieu urbain. Rapport de recherche (r1428), Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement.
- Raclot, D. (2003). *Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation*. PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.
- Ramos, M., Mathevet, T., Thielen, J., and Pappenberger, F. (2010). Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts : Mission impossible? *Meteorological Applications*, 17(2) :223–235.
- Raynaud, D., Thielen, J., Salamon, P., Burek, P., Anquetin, S., and Alfieri, L. (2015). A dynamic runoff co-efficient to improve flash flood early warning in Europe : evaluation on the 2013 central European floods in Germany : Dynamic runoff co-efficient for flash flood early warning in Europe. *Meteorological Applications*, 22(3) :410–418.
- Reed, S., Schaake, J., and Zhang, Z. (2007). A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. *Journal of Hydrology*, 337(3–4) :402 – 420.
- Renaud, H. (2006). *Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR*. PhD thesis, Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydros-ciences et Environnement (SIBAGHE).
- Roche, P.-A., Miquel, J., and Gaume, E. (2012). *Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Paris.
- Rodríguez-Rincón, J. P., Pedrozo-Acuña, A., and Breña Naranjo, J. A. (2015). Propagation of hydro-meteorological uncertainty in a model cascade framework to inundation prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(7) :2981–2998.
- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., and Dosio, A. (2012). Assessment of future flood hazard in europe using a large ensemble of bias corrected regional climate simulations. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 117 :–.
- Rolley, J.-P. (2007). Géologie du département du Gard - essai de synthèse géologique.
- Roux, H. (2004). *Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Roux, H., Labat, D., Garambois, P.-A., Maubourguet, M.-M., Chorda, J., and Dartus, D. (2011). A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in mediterranean catchments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9) :2567–2582.
- Rozalis, S., Morin, E., Yair, Y., and Price, C. (2010). Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *Journal of Hydrology*, 394(1-2) :245–255. Flash Floods : Observations and Analysis of Hydrometeorological Controls.
- Saint-Martin, C., Fouchier, C., Javelle, P., Douvinet, J., and Vinet, f. (2016). Assessing the exposure to flooding to implement an flood impact model for french mediterranean basins. In *Proceedings of the 3rd European Conference on Flood Risk Management*.

- Sampson, C., Smith, A., Bates, P., Neal, J., Alfieri, L., and Freer, J. (2015). A high-resolution global flood hazard model. *Water Resources Research*, 51(9) :7358.
- Sanders, B. F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources*, 30(8) :1831 – 1843.
- Savage, J. T. S., Bates, P., Freer, J., Neal, J., and Aronica, G. (2016). When does spatial resolution become spurious in probabilistic flood inundation predictions? *Hydrological Processes*, 30(13) :2014–2032. HYP-15-0366.R2.
- SCHAPI (2012). Bilan annuel d'activité 2012 - Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI). Technical report, MEDDE.
- SCHAPI (2013). Bilan annuel d'activité 2013 - Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI). Technical report, MEDDE.
- SCHAPI (2014). Bilan annuel d'activité 2014 - Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI). Technical report, MEDDE.
- Schumann, G. J.-P., Neal, J. C., Voisin, N., Andreadis, K. M., Pappenberger, F., Phanthuwongpakdee, N., Hall, A. C., and Bates, P. D. (2013). A first large-scale flood inundation forecasting model. *Water Resources Research*, 49(10) :6248–6257.
- Schumm, S. A. (1977). *The Fluvial System*. Blackburn Press.
- SDPRM (2004). Les inondations - dossier d'information. Technical report, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Direction de la Prévention de la Pollution et des Risques.
- Sear, D. A. (1994). River restoration and geomorphology. *Aquatic Conservation : Marine and Freshwater Ecosystems*, 4(2) :169–177.
- Sear, D. A., Newson, M. D., and Thorne, C. R. (2003). Guidebook of applied fluvial geomorphology. Technical report, Defra/Environment Agency R&D.
- Shabou, S. (2017). *Observer et comprendre les comportements de mobilité quotidienne lors des événements hydro-météorologiques dans le département du Gard*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble. thèse en cours.
- Shamir, E., Georgakakos, K. P., Spencer, C., Modrick, T. M., Murphy, M. J., and Jubach, R. (2013). Evaluation of real-time flash flood forecasts for haiti during the passage of hurricane tomas, november 4–6, 2010. *Natural Hazards*, 67(2) :459–482.
- Singh, S. K., McMillan, H., and Bárdossy, A. (2013). Use of the data depth function to differentiate between case of interpolation and extrapolation in hydrological model prediction. *Journal of Hydrology*, 477 :213–228.
- Smith, M., Carrivick, J., Hooke, J., and Kirkby, M. (2014). Reconstructing flash flood magnitudes using "structure-from-motion" : A rapid assessment tool. *Journal of Hydrology*, 519, Part B :1914–1927.
- Smith, R., Smettem, K., Broadbridge, P., and Woolhiser, D. (2002). *Infiltration Theory for Hydrologic Applications*. American Geophysical Union.

- Stephens, E., Day, J. J., Pappenberger, F., and Cloke, H. (2015). Precipitation and floodiness. *Geophysical Research Letters*, 42(23) :10,316–10,323. 2015GL066779.
- SwissRe (2015). Natural catastrophes and man-made disasters in 2014 : convective and winter storms generate most losses. Technical report, Sigma annual report.
- Tabary, P., Augros, C., Champeaux, J.-L., Chèze, J.-L., Faure, D., Idziorek, D., Lorandel, R., Urban, B., and Vogt, V. (2013). Le réseau et les produits radars de météo france. *Météo Le Magazine*, 8(83) :15.
- Tanguy, M. (2012). Cartographie du risque d’inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise : Analyse préliminaire. Technical report, Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement. INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec.
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H., and de Roo, A. (2009). The european flood alert system – part 1 : Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2) :125–140.
- Thiemig, V., Bisselink, B., Pappenberger, F., and Thielen, J. (2015). A pan-african medium-range ensemble flood forecast system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(8) :3365–3385.
- Valette, L. and Cunillera, A. (2010). Cahiers techniques SYRAH-CE. Technical report, ONEMA.
- Versini, P.-A. (2007). *Surveillance du risque hydrologique diffus le long des itinéraires routiers*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC).
- Versini, P.-A. (2012). Use of radar rainfall estimates and forecasts to prevent flash flood in real time by using a road inundation warning system. *Journal of Hydrology*, 416-417 :157–170.
- Versini, P.-A., Berenguer, M., Corral, C., and Sempere-Torres, D. (2014). An operational flood warning system for poorly gauged basins : demonstration in the Guadalhorce basin (Spain). *Natural Hazards*, 71(3) :1355–1378.
- Versini, P.-A., Gaume, E., and Andrieu, H. (2010). Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information – test in a flash flood prone area (the Gard region, france). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(4) :793–803.
- Villarini, G., Krajewski, W. F., Ntelekos, A. A., Georgakakos, K. P., and Smith, J. A. (2010). Towards probabilistic forecasting of flash floods : The combined effects of uncertainty in radar-rainfall and flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 394(1–2) :275 – 284. Flash Floods : Observations and Analysis of Hydrometeorological Controls.
- Vinet, F. (2010). *Le risque inondation : diagnostic et gestion*. Tec & Doc Lavoisier.
- Wei, C.-C. (2015). Comparing lazy and eager learning models for water level forecasting in river-reservoir basins of inundation regions. *Environmental Modelling & Software*, 63 :137–155.
- Werner, M., Hunter, N., and Bates, P. (2005). Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. *Journal of Hydrology*, 314(1–4) :139 – 157.

- Wilhelmi, O. V. and Morss, R. E. (2013). Integrated analysis of societal vulnerability in an extreme precipitation event : A fort collins case study. *Environmental Science & Policy*, 26 :49 – 62. Rethinking Integrated Assessments and Management Projects in the Americas.
- Wolfs, V., Meert, P., and Willems, P. (2015). Modular conceptual modelling approach and software for river hydraulic simulations. *Environmental Modelling & Software*, 71 :60 – 77.
- Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H., and Oki, T. (2011). A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. *Water Resources Research*, 47(4) :n/a–n/a. W04501.
- Yu, D. and Lane, S. N. (2006). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1 : mesh resolution effects. *Hydrological Processes*, 20(7) :2541–1565.
- Zwiebel, J., Van Baelen, J., Anquetin, S., Pointin, Y., and Boudevillain, B. (2016). Impacts of orography and rain intensity on rainfall structure. the case of the hymex iop7a event. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142 :310–319.

Annexe A

Les libellés des CATastrophes NATurelles

Le Journal Officiel publie les événements identifiés comme CATastrophes NATurelles en suivant une typologie déterminée depuis 1982. Les différents libellés et numéros utilisés pour les CATNAT dans le JO sont listés dans le tableau [A.1](#).

Depuis sa mise en place, dans les libellés contenant le terme "inondations", le plus fréquent dans la base de données Gaspar est le libellé "inondations et coulées de boue" en France métropole.

Tableau A.1 – Description des libellés et des numéros des CATastrophes NATurelles du Journal Officiel présents dans la base de données Gaspar

numéro	libellé
1	Inondations et coulées de boue
2	Séisme
3	Avalanche
4	Glissement de terrain
5	Effondrements / éboulements
6	Raz-de-marée
7	Poids de la neige - chutes de neige
8	Tempête
10	Lave torrentielle
11	Inondations et action du vent
12	Mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse
13	Tassement de terrain
14	Effondrement de terrain
15	Inondations, coulées de boue et mouvements de terrain
16	Mouvements de terrain
17	Glissements de terrain et éboulements rocheux
18	Inondations et éboulements rocheux
19	Éboulement, glissement et affaissement de terrain
20	Glissement de terrain sous-lacustre
21	Inondations par remontées de nappe phréatique

numéro	libellé
22	Éboulement ou effondrement de carrière
23	Éboulements rocheux
24	Effondrement de falaise
25	Éboulement de falaise
26	Effondrement / éboulement de coteaux
27	Affaissement de falaise
28	Affaissement de terrain
29	Tornade et grêle
30	Phénomènes tropicaux (ouragan, onde) (inondations, coulées de boue, éboulements, ...)
31	Chocs mécaniques liés à l'action des vagues
32	Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues
33	Coulée de boue
34	Glissement de terrain et effondrement de terrain
35	Inondations, coulées de boue et effets exceptionnels dus aux précipitations
36	Inondations, coulées de boue et chocs mécaniques liés à l'action des vagues
37	Éboulement de terrain
38	Chutes de rochers / de blocs rocheux
39	Mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols
40	Phénomènes tropicaux (divers)
41	Crues torrentielles et glissements de terrain
42	Inondations par remontée de la nappe phréatique et mouvements de terrain
43	Inondations, coulées de boue et glissements de terrain
44	Inondations, chocs mécaniques liés à l'action des vagues et glissement de terrain
45	Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues
46	Coulées de boue et lave torrentielle
47	inondations et coulées de boue, inondations par remontées de nappe phréatique
48	Inondations, coulées de boue, mouvements de terrain et chocs mécaniques liés à l'action des vagues
55	Mouvements de terrain différentiels (sécheresses)
60	Inondations, coulées de boue, éboulements, glissements ou affaissements de terrain et chocs mécaniques liés à l'action des vagues consécutifs au passage de l'ouragan Luis
61	Inondations, coulées de boue, éboulements, glissements ou affaissements de terrain consécutifs au passage de l'ouragan Marylin
62	Inondations, coulées de boue, éboulements, glissements ou affaissements de terrain consécutifs au passage de l'onde tropicale
63	Inondations, coulées de boue, éboulements, glissements ou affaissements de terrain et chocs mécaniques liés à l'action des vagues consécutifs au passage de la dépression tropicale Iris
64	Vents cycloniques
65	inondations et coulées de boue, chocs mécaniques liés à l'action des vagues, vents cycloniques

numéro	libellé
66	inondations et coulées de boue, vents cycloniques
67	chocs mécaniques liés à l'action des vagues, vents cycloniques
68	éruption volcanique
69	chocs mécaniques liés à l'action des vagues, mouvements de terrain
90	inondations et coulées de boue et inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues
91	Inondations par remontées de nappe naturelle

Annexe B

Classification des dommages

Les dommages survenant au cours d'une catastrophe sont distinguables en catégories. **André (2013)** a proposé au cours de ces travaux de thèse une classification de ces dommages :

- direct, dommages impliquant un contact entre l'aléa et les enjeux ;
- indirect, dommages recensés à l'extérieur de la zone couverte par l'aléa ou post catastrophe ;
- tangible, dommages portant sur des enjeux à valeurs marchandes ;
- intangible, dommages associés à des enjeux sur lesquels il est difficile de fixer une valeur marchande.

L'auteur recense des exemples de dommages en combinant les classes direct/indirect et tangible/intangible (figure B.1).

	Dommages directs	Dommages indirects
Dommages tangibles Biens « marchands »	<ul style="list-style-type: none"> - destruction ou dégradation de bâtiments, de mobilier, ou de véhicules, - interruption ou perturbation d'activités économiques à l'intérieur de la zone affectée, - dommages aux parcelles agricoles, récoltes et bétail, - dommages aux infrastructures de distribution d'eau et d'électricité, de transport et de communication, - mise en place de mesures d'évacuation, de sauvetage et de nettoyage. 	<ul style="list-style-type: none"> - relogement temporaire des sinistrés, - interruption ou perturbation d'activités économiques à l'extérieur de la zone affectée (dont pertes de production induites à des fournisseurs ou des clients des entreprises directement affectées), - interruption ou perturbation du trafic et des transports passant par la zone affectée, - pertes de revenu des personnes travaillant dans la zone affectée.
Dommages intangibles Biens « non marchands »	<ul style="list-style-type: none"> - pertes humaines, accidents corporels, - destruction ou dégradation de biens privés irremplaçables ou à valeur sentimentale (souvenirs, animaux de compagnie), - destruction ou dégradation du patrimoine culturel, historique et naturel, - interruption de services publics à l'intérieur de la zone affectée. 	<ul style="list-style-type: none"> - deuil, traumatismes psychologiques, - dégradation de la qualité de vie des sinistrés, - déracinement et perte de communauté, - pertes de services écosystémiques, - inquiétude des habitants, perte de confiance dans les autorités.

FIGURE B.1 – Exemple de la répartition des dommages suivant leur caractère tangibles/intangibles et direct/indirect - source : **André (2013)**

À partir de ces résultats, il devient possible de distinguer les dommages anticipables de ceux ne pouvant l'être : une information essentielle lorsque l'on s'intéresse à la prévision des impacts de débordements de cours d'eau.

Annexe C

Qualité spatiale de la base de données TOPO®

Les données provenant de la base de données TOPO de l'IGN ont fait l'objet d'une évaluation pour connaître leur conformité spatiale (IGN, 2011). Ce contrôle de conformité a été effectué de deux manières :

- à partir des documents orthophotographiques de référence (BD ORTHO® et SCAN 25®) ;
- sur le terrain, de façon exhaustive ou par sondage.

Un encodage de la qualité spatiale de chaque entité a été élaboré afin de connaître le taux d'incertitude sur l'emplacement et la hauteur des objets de la base de données (figures C.1 et C.2).

Source des données	Précision	Traduction dans l'attribut « précision planimétrique » PREC_PLANI
Photogrammétrie, plan ou fichier métrique	0,5 à 1,5 m	1,5
Levé GPS dynamique, BD TOPO® version antérieure, BD PARCELLAIRE® recalée	1,5 à 2,5 m	2,5
Orthophotographie, plan ou fichier non métrique, levé terrain, BD PARCELLAIRE®	2,5 à 5 m	5
Carte 1/25000 (SCAN 25®), calculé, image satellite	5 m à 10 m	10
BD CARTO®, GEOROUTE®	> à 10 m	30

FIGURE C.1 – Précision géométrique planimétrique des données de la base de données TOPO de l'IGN

Source des données	Précision	Traduction dans l'attribut « précision altimétrique » PREC_ALTI
Photogrammétrie	< à 1 m	1
Photogrammétrie des PVA longue focale, GPS, BD TOPO® version antérieure, Z corrigé, plan coté, fichier numérique	1 m à 2,5 m	2.5
Interpolation MNT, interpolation bâti BD TOPO®	> 2,5 m	20
Sans Z		9999

FIGURE C.2 – Précision géométrique altimétrique des données de la base de données TOPO de l'IGN

Annexe D

FLOODRISK 2016

Regional models for distributed flash-flood nowcasting: towards an estimation of potential impacts and damages.

Guillaume Le Bihan¹, Olivier Payrastra^{1,a}, Eric Gaume¹, David Moncoulon² and Frédéric Pons³

¹LUNAM Univeristé, Ifsttar, Département GERS, Lab. Eau Environnement, Route de Bouaye, CS4, 44844 Bouguenais cedex, France

²CCR, 157 boulevard Haussmann 75008 Paris, France

³CEREMA DTer Méditerranée, Pole d'Activités Les Milles, Avenue Albert Einstein, CS 70499 Aix en Provence Cedex 3, France

***Abstract.** Flash floods monitoring systems developed up to now generally enable a real-time assessment of the potential flash-floods magnitudes based on highly distributed hydrological models and weather radar records. The approach presented here aims to go one step ahead by offering a direct assessment of the potential impacts of flash floods on inhabited areas. This approach is based on an a priori analysis of the considered area in order (1) to evaluate based on a semi-automatic hydraulic approach (Cartino method) the potentially flooded areas for different discharge levels, and (2) to identify the associated buildings and/or population at risk based on geographic databases. This preliminary analysis enables to build a simplified impact model (discharge-impact curve) for each river reach, which can be used to directly estimate the importance of potentially affected assets based on the outputs of a distributed rainfall-runoff model. This article presents a first case study conducted in the Gard region (south eastern France). The first validation results are presented in terms of (1) accuracy of the delineation of the flooded areas estimated based on the Cartino method and using a high resolution DTM, and (2) relevance and usefulness of the impact model obtained. The impacts estimated at the event scale will now be evaluated in a near future based on insurance claim data provided by CCR (Caisse Centrale de Réassurance).*

1 Introduction

Hydro-meteorological forecasting is an essential component of real-time flood management. It provides crucial information to crisis managers to anticipate, locate and quantify the floods which will hit the areas at risk. In the particular case of flash floods which may affect watersheds of limited extent spread over the territory, suitable forecasting systems are still currently under development over the world. The first proposed methods were focussed at gauged stream sections where rainfall-runoff models could be calibrated [1,2]. The most recent developments aim at providing forecasts also at ungauged locations and often rely on highly distributed hydrological models and on radar based QPEs or rainfall nowcasts as input information [3, 4, 5, 6, 7]. Such models provide indications of possible flood magnitudes, but are still rarely designed to directly account for the possible associated impacts which is the information needed by the crisis managers in real time to take appropriate decisions such as allocation of rescue means. The translation of flood magnitude into local impacts requires, indeed, a detailed knowledge of the flood extent related to the forecasted discharges as well as the exposure and vulnerability of the considered areas. This may be well known at a very local scale (local authorities, inhabitants of flood prone areas,..), but much more difficult to assess

and incorporate at the much larger scale at which hydro-meteorological forecasting systems are generally implemented. Considering that these systems are designed to monitor a very large number of small rivers spread over large territories, a large number of simultaneous alarms may be generated in case of a significant rainfall event. Thus, providing directly information on local vulnerabilities and associated possible impacts would probably be helpful for coordination managers to have a faster evaluation of the situation and to focus their actions on the most problematic situations.

The approach developed in this paper aims at a direct evaluation of flash flood impacts on inhabited areas based on a complete hydro-meteorological, hydraulic and impact assessment simulation chain. The question of flash flood impact prediction has already been addressed in some previous works which were up to now mainly focused on road inundation risks [5]. The methodology developed herein is based on a comprehensive analysis of the study area in order to build an impact model for each river reach incorporated in the hydro-meteorological simulation chain. This analysis is based on simplified 1-D hydraulic simulations to evaluate the extent of the flooded areas for different discharge levels. Land use databases are then used to evaluate the number of

^a Corresponding author: olivier.payrastra@ifsttar.fr

buildings in the estimated flooded area. Based on these precomputed values, a relation between the discharge and the amount of affected buildings is adjusted for each considered river reach to be used for the real-time forecasts.

Even if the approach developed may appear relatively straightforward, its application on a very detailed stream network including small watersheds prone to flash floods, may be too complex to enable an application at a large scale (more than 100.000 km²). Therefore, the challenge has been here to define a simplified and automatic procedure for the elaboration of the impact model, with the objective to limit its implementation time to a reasonable level and to limit also the needs for manual corrections. This objective of simplification has been considered as a priority, placed before the accuracy of the computation of flooded areas and associated possible impacts. In other words, a decrease of the quality of the impact model has been accepted to guaranty its applicability at a large scale including a very detailed stream network.

This article presents the proposed method and its application on a test case study. The accuracy of the impact model, is tested against data of recent floods having recently affected the considered area. The article is organised as follows: the first section presents the application case study and the datasets, the next section presents the methodology developed for the fast computation of flood extents and the associated impact model. This section also describes the procedure used for the evaluation the results. The results are presented in section 4 and discussed in section 5, in which the future perspectives in terms of validation are also presented. Lastly, section 6 presents the conclusions of this work.

2 Presentation of the case study

2.1 The region of Alès in the Cévennes area, south eastern France

The study has been focused on an area of 1990 km² including the town of Alès in south eastern France. This area is located in the core of the Cévennes region, well known to be prone to frequent and intense flash floods. Moreover, this area has been identified during the implementation of the EU flood directive as one of the areas the most at risk over the whole French territory. For

this reason, it was included in the list of Areas with Potential Significant Flood Risk (APSFR) selected for the application of the flood directive. This exposure is mainly related to the presence of the town of Alès, but also to other highly vulnerable smaller towns such as Anduze (see figure1).

This region is shown on figure 1, indicating the exact limits of the APSFR of Alès. This territory is part of two main watersheds: the Gardon d'Alès and the Cèze rivers. These two main rivers have their upstream course in the Cévennes reliefs, and reach in their downstream part a plateau area with limited slopes. The APSFR of Alès is located just in the transition zone between the mountainous and plateau areas. Therefore, this case study includes a large variety of river bed configurations including steep and narrow v-shaped valleys, up to flat and wide floodplains. Some statistics about the river bed characteristics are provided in table 1.

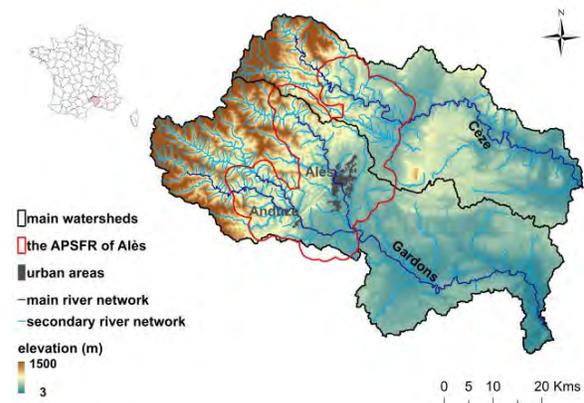


Figure 1. Location of the APSFR of Alès territory in the Gardon and Cèze watersheds.

One part of the river network in this area is already covered by the French national flood forecasting system. However, significant damages associated to flash floods also frequently occur on upstream rivers which are currently not monitored. A detailed analysis of the features of the river network, based on a DTM treatment, shows that the selected area includes 400 km of river streams having at least 5 km² upstream catchment surfaces, divided in 192 river reaches (a river reach being defined as the portion of river located between two confluences), among which only 70 reaches (132 km) are covered by the current flood forecasting system (see main network on figure 2). This illustrates both, the relevance

Location	Bed slope (%)		River bed width (m)		Floodplain width (m)	
	average	min - max	average	min - max	average	min - max
Main network	0.48	0.22 - 1	37	16 - 84	470	120 - 1670
Secondary network	3.41	0.17 - 20	7	2 - 34	430	60 - 3130

Table 1. Characteristics of the river network considered in the case study (extracted from SYRAH database).

and the difficulty associated with the implementation of complementary flash flood forecasting systems on the very dense stream networks prone to flash floods. Even if the extent of the case study considered here is not very large, the number of rivers reaches to be integrated in the models is significant and may cause difficulties associated to the lack of time available to implement and test the models. It is noteworthy that an elementary catchment surface of 5 km² has been selected here, and that decreasing this surface would lead to highly increase the quantity of river courses to be considered. This finally illustrates the importance of defining very simple and efficient approaches for the implementation of flash flood forecasting, as far as the objective is to apply such approaches in areas of relatively large extent (largely exceeding the extent of the case study considered herein). This point is particularly important herein since the main objective is the definition of a flash flood impact model based on hydraulic simulations, which may represented a much time consuming task when implemented over large areas.

2.2 Available data

2.2.1 Digital Terrain Model

The implementation of the impacts model has been based on a 20m resolution DTM produced in 2007, which altimetric accuracy is less than 20 cm in no-vegetated areas, and less than 1 m in vegetated areas. This DTM was interpolated at a 5 m resolution for the purpose of the study. Therefore, the quality of the terrain information used herein remains limited: the use of a real 5 m resolution DTM from Lidar measurements would probably lead to results of better accuracy.

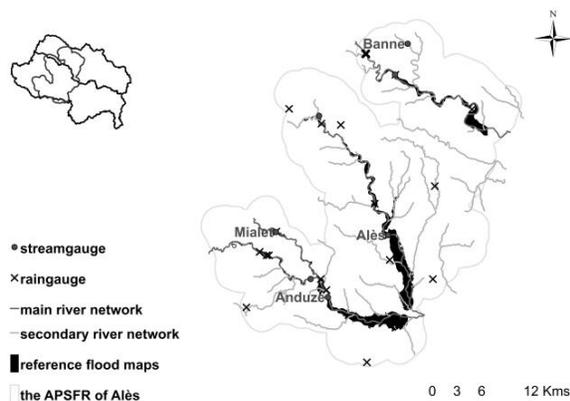


Figure 2. River network considered in the APSFR of Alès (5 km² upstream catchment surface), coverage of reference flood maps and position of available stream gauges.

2.2.2 Rainfall and discharges

The region is equipped with relatively dense stream gauge and rain gauge networks, complemented with three

weather radars. The positions of stream gauges are presented on figure 2. Thanks to the OHMCV observatory, this data is carefully checked and can be considered as exceeding conventional quality standards. However, given the limited possibilities to make direct flow measurements during intense flash floods, the rating curves are often extrapolated, with consequently a large decrease of the quality of estimated discharges for high water levels and large floods.

2.2.3 Flood quantiles

The regional SHYREG database, providing flood quantiles of different return periods (from 2 to 1000 years) on the whole river network, has been used herein to assess the discharge quantiles used to build the impact models for each river reach. This database relies on the combined regionalization of parameters of a rainfall stochastic generator and of a distributed hydrological model [8]. It has to be noticed here that both the work of regionalization and some specificities of watersheds such as karts and urban areas, snowmelt, or hydraulic structures (dams) have not been considered in the SHYREG approach and may locally reduce the reliability of SHYREG data.

However, the accuracy of information on flow frequency is not crucial herein for the implementation of the impact model: it just enables to derive flood maps for discharges values of relatively homogeneous magnitude in all the considered area.

2.2.4 Reference flood maps

Thanks to the recent application of the EU flood directive in the considered area, a great effort was put on flood extent mapping, enabling to produce detailed maps of probable flood extent for three reference events: a common event (30 year return period), a medium event (300 year return period), and a large event (exceeding a 1000 year return period). Therefore, 3 reference flood maps are available for some of the considered river reaches. These maps were obtained based on a 1-D hydraulic modelling conducted by an expert in hydraulics. The results were carefully validated using all the available information (including the extent of the exceptional september 2002 flood). These maps will be used for the validation of the flood areas estimated for the purpose of the flash flood impact model implementation. Unfortunately these maps, presented on figure 2, were produced on one part only of the river network considered herein which limits the validation possibilities: the river network covered represents 192 km (out of 400 km included in the case study) and includes 84 river reaches (out of 192).

3 Methodology

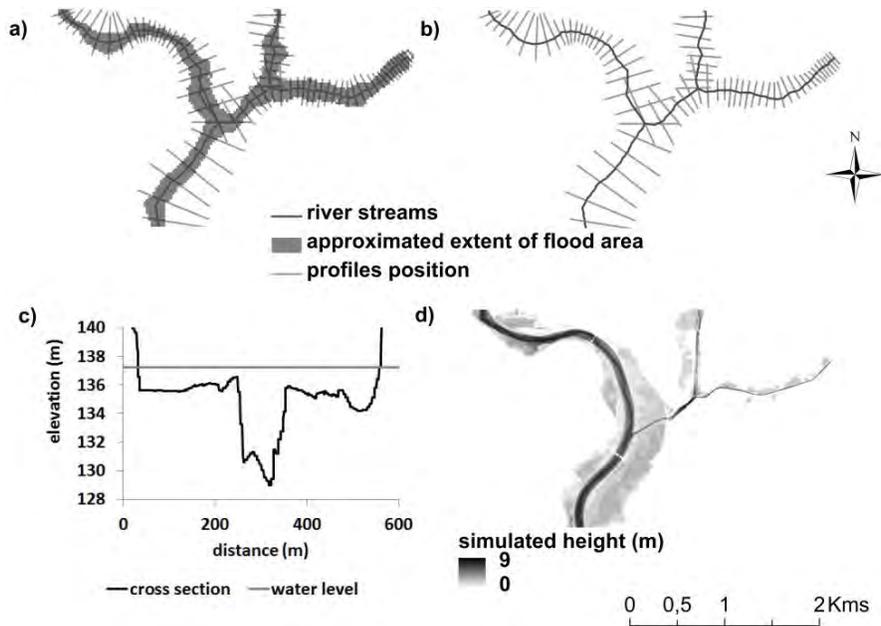


Figure 3. Overall principle of the computation of flood maps based on CartinoPC software: a) input information (position of river streams and approximate extent of flood area), b) position of profiles for the 1-D hydraulic model, c) computation of water levels (1-D hydraulic model), c) map of flooded areas and water depths obtained after post-treatment..

As indicated in the introduction, the approach developed herein is based on a pre-evaluation of the extent of flooded areas for different discharge levels. This evaluation should be obtained in an as simple and automatic as possible way in order to enable its implementation on a large number of river reaches. Therefore, it has been based on a 1D hydraulic model run in steady state mode, and implemented automatically based on a high resolution DTM. This work has been based on an adapted version of the Cartino software [9], enabling to build the structure and run the model in an iterative way until satisfactory results are obtained. The Cartino parameters have been adapted to the objectives of this study, and some additional post treatments have been added to remove the most identifiable inconsistencies in the outputs.

The whole procedure is presented hereafter in the following way: first, the overall principles of the Cartino software are presented; then the implementation details (parameters, etc) are provided; the additional post-treatments introduced are presented; lastly, a short discussion about the main remaining sources of errors is proposed.

3.1 The Cartino software

The Cartino software enables to build and run automatically a 1-D hydraulic model on the considered river network to finally obtain a simplified evaluation of potential flooded areas for selected discharge values (discharges may be varied for each stream reach but all computation are performed in steady state mode). The computation is achieved in 3 main steps presented in figure 3: 1 - a pre-treatment module is used for

positioning the cross sections, 2 - a module prepares the input files (cross sections shapes) and runs a 1-D hydraulic model (Mascaret or Flutor) for the computation of the longitudinal water level profile for the considered discharge values, and 3 - a post treatment intersects the profiles and the DTM to estimate the flood extents and the associated spatial distributions of water depths.

To ensure a high level of automatization, important simplifications are introduced in the structure of the hydraulic model used: cross section shapes are estimated based on a simple interpolation with the high resolution DTM (without additional topographic information); bathymetry is not considered; specific sections (weirs, bridges) are not represented; a unique roughness coefficient is used for all stream reaches, without distinction between main channels and floodplains. Of course all these simplifications have a large impact on the results, even if they are necessary to obtain the required level of automatization of computations: this point will be evaluated and discussed in the next sections.

The first two modules of Cartino are run in an iterative way to optimize commonly the couple width of cross sections distances between cross-sections, with the objective to finally ensure that all cross sections are wide enough for the considered discharge and that no overlapping is present between two successive cross sections. This procedure is initiated based on the position of the river reach and a first possible extent of the flooded area (provided as input) which is used to estimate a default width of each cross section. The associated distances between profiles are then defined as a proportion of each profile widths (proportion to be defined as input parameter). After each run, the width of

each profile is checked according to the computed water elevation, and it is enlarged if necessary in a proportion defined as input parameter. Distances between profiles are adapted in consequence. The roughness to be used coefficient is also defined as an input parameter ($n=0,05$ was used herein).

The choice of the input information (default extent of flooded area, parameters values for distance between cross sections and increase of cross sections widths) has also a great impact on the results and on the computation times. For instance, a too large default flooded area or a too fast increase of cross sections widths may lead to incorporate in the model some depressions located nearby the river bed, but not connected to it for the considered discharge (see figure 4): this leads both to simulate flooded areas of too large extent at the considered profiles, and to decrease the elevation of the simulated water level, with a repercussion on the simulations results at the upstream profiles (possible under estimation of water level). On the other hand, a too narrow initial flooded area and/or too slow increase of profile widths will highly increase the computation times.

To cope with these difficulties, the software offers the opportunity to change the position and/or modify the widths of any profile after a first iterative run.

3.2 Specificity of application of Cartino for the purposes of the study

For the purpose of building a comprehensive impact model on the detailed river network considered in the case study, the objective is here to obtain a catalogue of flooded areas corresponding to different discharge quantiles. A wide range of quantiles has been selected to represent the entire panel of possible flood magnitudes: based on the SHYREG database, discharges corresponding to return periods of 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 years have been selected for each river reach. For a given return period, the flooded areas have been computed for all river reaches in the region.

Depending on the flood quantile, the simulated flooded areas may be limited to the river bed or extend up to the entire floodplain. One crucial aspect is to determine as accurately as possible the discharge level at which the inundation of the floodplain begins. For this purpose, the Cartino software was applied in the following way:

- application first for the smallest discharge values (first run for $T=2$ years), using a narrow flooded area extent as input and a progressive increase in cross sections widths to be able to estimate as accurately as possible the limits of the river bed.
- application to the next discharge quantile based on the results obtained for the immediately lower discharge as initial extent of flooded area.

A careful check of the results after each computation also enables to eliminate some errors related to wrong estimations of the shapes of some cross sections, mainly

associated with the limits of DTM information used as input: bridges still appearing in the DTM, remaining noise due to dense vegetation. This verification was based on the comparison of the wetted area of the successive cross sections, with an automatic removal of cross sections appearing as inconsistent with the immediate downstream and upstream cross-sections.

3.3 Additional post-treatments

Despite the aforementioned precautions, some obvious inconsistencies still remain locally in the computed flooded areas: flooded areas disconnected from the river bed, some areas included in the estimated flood extent for a given discharge and not for the immediately larger one. Thus, a simple post-treatment was applied to the catalogue of flood maps to ensure a better overall consistency of the results. This enabled to:

- systematically remove disconnected flooded areas (see figure 4).
- systematically include each flooded area estimated in the one computed for the immediately larger discharge.

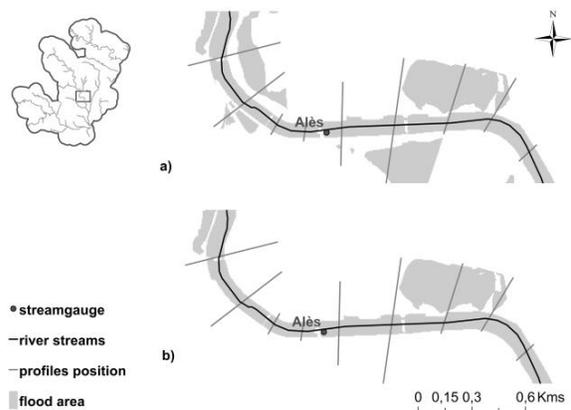


Figure 4. Illustration of additional post treatments applied to the Cartino results: a) initial Cartino results, b) after removal of disconnected areas.

3.4 Remaining sources of uncertainty

Although some precautions were taken to enhance the quality of the results, important limits and sources of errors remain, affecting the quality of the results. These remaining errors are mainly related to the objectives of the procedure applied herein, which was to guarantee a fast application and to accept the associated unavoidable errors. These errors are mainly due to:

- wrong representation of topography and characteristics of river bed due to the automatic definition of position of cross sections, and also to the limits of topographic information used (DTM),
- absence of representation of friction losses due to bridges and other singularities,
- choice of a fixed Manning roughness coefficient, equal to 0.05,
- absence of representation of dynamic effects due to the systematic computation in steady state mode.

For these reasons, it is important to keep in mind that the information produced here cannot correspond exactly to the real extent of flooded areas. It represents a simplified estimation giving an order of magnitude of the level of flooding and enabling some comparisons at a regional scale.

3.4 Evaluation of the results

3.4.1 Comparison with reference flooded areas

The remaining error levels on flooded areas can be evaluated thanks to the availability of inundation maps produced for the application of the EU flood directive, which were used as a reference information (events of 30-year and 300-year return period).

To enable a direct comparison, intermediate layers were added to our flooded areas catalogue, using exactly the same flood discharges values as for the EU directive cartography (discharges of respectively 30 years and 300 years return periods). These results were then compared with the reference EU directive flooded areas on each river reach based on the following procedure: the common surface (Sc) between estimated surface (ES) and reference surface (RS) was first considered (see figure 5), enabling to define the excess (Se) and default (Sd) surfaces as follows:

$$ES = Sc + Se \quad (1)$$

$$RS = Sc + Sd \quad (2)$$

A synthetic incoherent surfaces proportion (ISP) was then computed, representing the relative proportion of Se and Sd if compared to reference surface:

$$ISP = (Se + Sd) / (Sc + Sd) \quad (3)$$

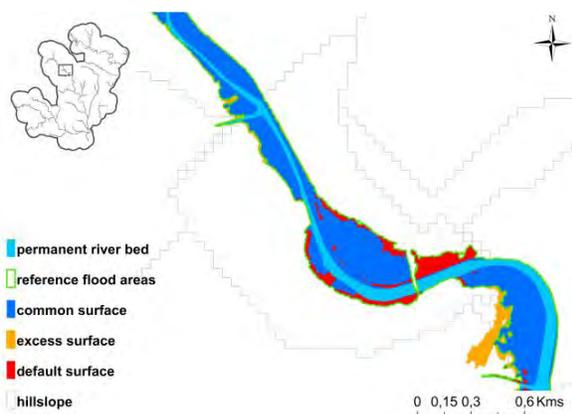


Figure 5. Illustration of comparison between estimated and reference inundated areas: definition of common surface (Sc), excess surface (Se), and default surface (Sd).

It has to be noted that the portion of the river bed being permanently wet (represented on figure 5) may increase the value of Sc despite this area is not crucial for flood risks evaluation (absence of vulnerability). For this reason, this area was systematically removed from

estimated (ES) and reference (RS) surfaces before the computation of Sc, Se, Sd, and ISPs. Therefore the evaluation proposed here is strictly limited to non-permanently inundated areas.

3.4.2 Comparison with rating curves established at stream gauges locations

The presence of stream gauge stations with calibrated rating curves offers the opportunity to evaluate the accuracy of stage-discharge relation estimated by the model in the associated cross sections. This comparison was achieved after a careful selection of cross sections which better correspond to the location of the stream gauges. However, considering that the distances between cross sections are variable and may reach up to 100 m, an additional cross section was added if necessary at the exact location of the gauging station.

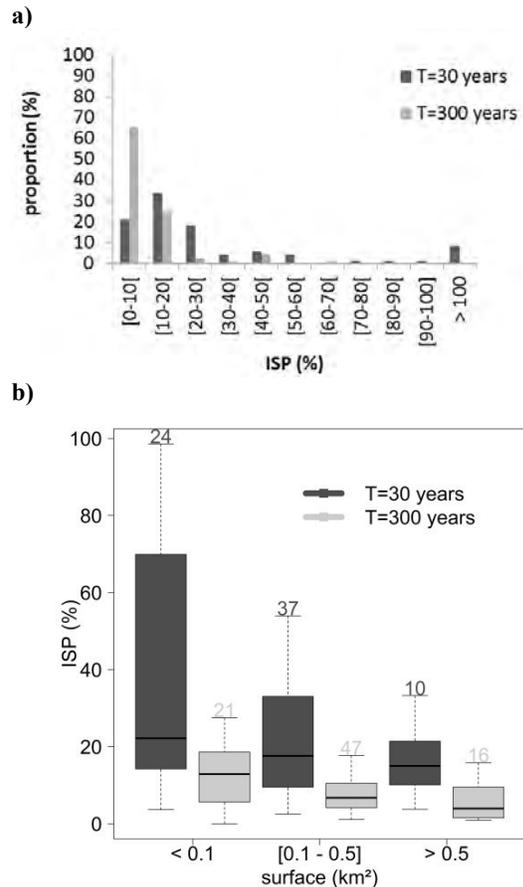


Figure 6. Synthesis of ISPs scores computed for river reaches on which reference inundation areas are available (71 reaches for the 30-year event, 84 reaches for the 300-year event): a) overall distributions, b) repartition in function of surfaces of reference flood areas (values above boxes indicate the associated number of reaches).

3.4.3 Comparison of impact models obtained

The last evaluation step was based on the computation and comparison of impact models for each river reach. The impact models were computed here in a simple way by counting the number of buildings present in each estimated flooded area according to the IGN BDCarto database, to finally derive a continuous discharge-number of building relation. These impact models cannot be directly validated, but they were nevertheless compared to each other in order to verify whether the preliminary objective of the methodology developed herein - i.e. providing a hierarchy of possible impacts on a relatively large area - was achieved by obtaining significantly different impact estimations depending on the locations of the considered river reaches.

4 Results

4.1 Extent of flooded areas

Figure 6 presents the distributions of ISPs computed for the 84 rivers reaches on which the reference inundation maps are available (71 reaches for the 30 year event). This figure illustrates first the limited ISPs values obtained in a large majority of cases: ISPs rarely exceed 30 %. If we notice here that the ISP cumulates both default and excess areas, the real differences of surfaces of the estimated flood areas will be much more limited than the ISPs values: this suggests that the errors in the estimation of impacts will also be limited. These figures also illustrate significant differences depending on the magnitude of the simulated floods: the results obtained for the 300 year flood appear much more accurate, with ISPs rarely exceeding 50 %. This can be mainly attributed to the fact that the flood plains are almost

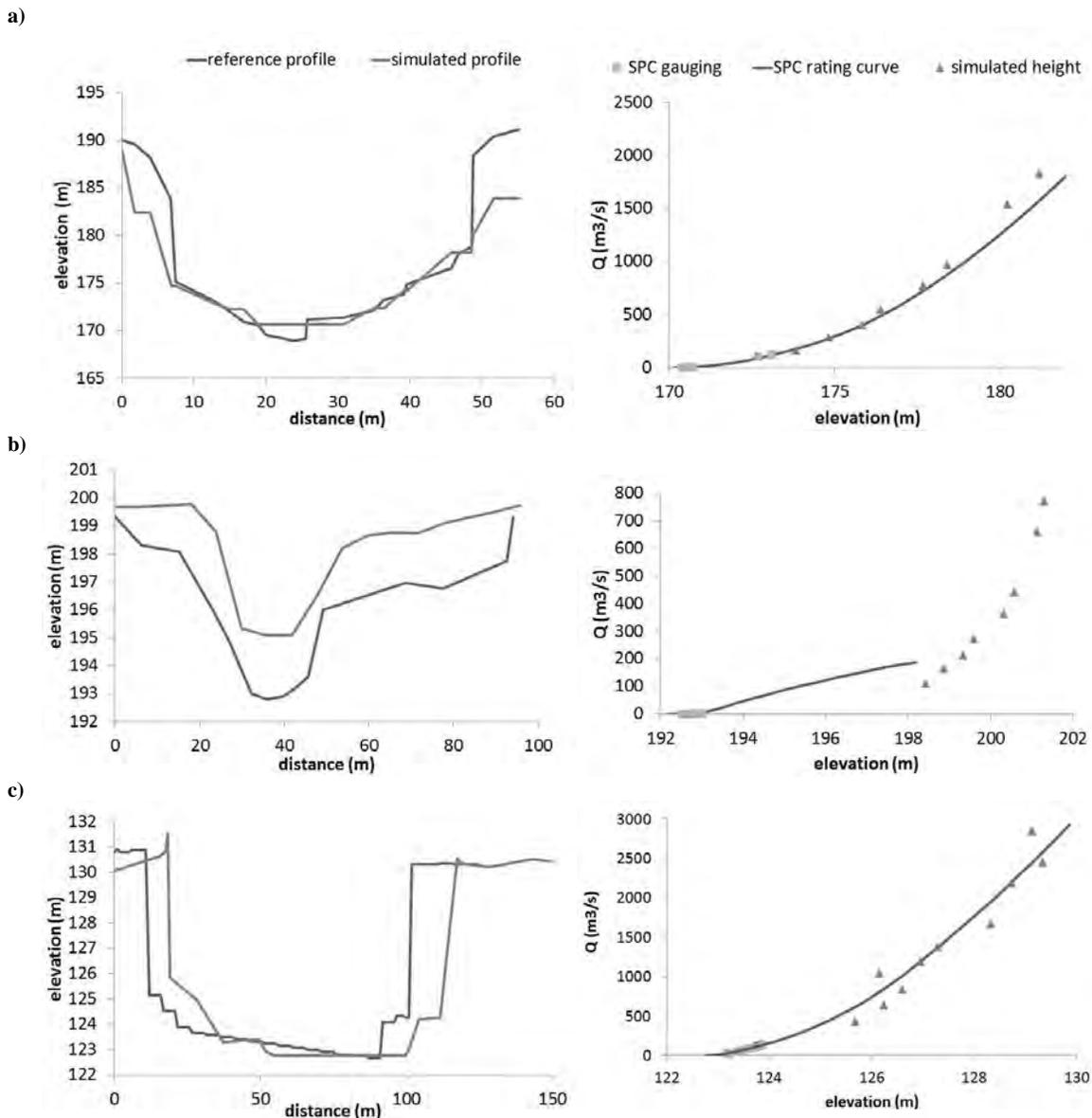


Figure 7. Examples of comparison of cross sections and water levels at three stream gauges: a) Mialet station, b) Banne station, c) Alès station.

entirely flooded for this range of discharges, leading to limit the errors associated with the description of local flow conditions. On the other hand, the 30 year return period flood extent appears much more difficult to appraise, with a significant part of very large errors: ISPs exceeding 100 % in almost 10 % of the considered reaches. These large errors are mainly related to the crucial importance of the description of the characteristics of the river bed and of the flow conditions to correctly simulate the beginning of inundation: errors in cross-section widths or position, on roughness values, absence of description of head losses, will all result in large errors in this range of discharges. Therefore it appears completely logical that the simplified procedure used herein leads to results of significantly lower quality for moderate return period floods.

The analysis of repartition of ISPs depending on the surface of the reference flooded area (RS), provided on figure 6b, confirms the same tendency: ISPs are much more important for low RS values, illustrating the difficulty to appraise correctly the beginning of inundation. This tendency is also present for the 300 year flood but in a much limited extent: in this case, a limited value of the reference surface RS often implies a very deep and narrow river valley, highly limiting the risks of errors.

4.2 Water levels at gauged river sections

The results of comparison of stage discharge relationships are presented on figure 7. This figure illustrates contrasted situations which are detailed hereafter.

The case of the Mialet station appears as an ideal situation, in which the shape of the cross section is very well represented in Cartino, and the water levels computed don't seem to be significantly affected by other sources of errors (choice of roughness coefficient, width of cross section, etc ..). This may be explained by the simple configuration of the valley (deep and relatively narrow), the limited presence of vegetation in the river bed, and the significant slope. A sensitivity test to the value of roughness coefficient can show in this case that the associated errors are of secondary order, provided that the cross section is well described.

The case of the Banne station is much more problematic since the topography of the river cross section is absolutely not well represented in the Cartino model. This may be attributed to local errors in the DTM used, maybe associated with the presence of dense vegetation. However, even if a significant error is made in the estimated elevation of the water level, this error will not necessarily be very problematic for the computation of inundated areas, since the same DTM including the same elevation bias will be used for this purpose.

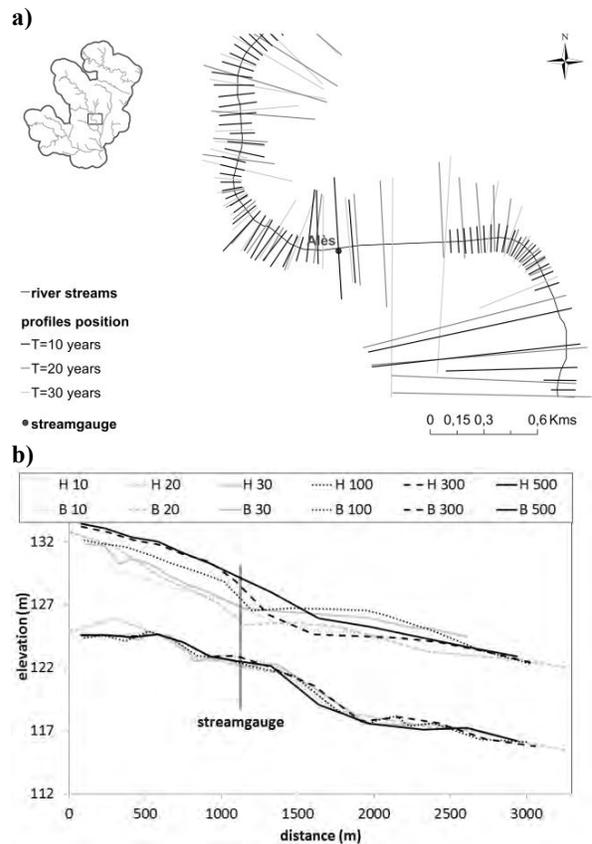


Figure 8. Illustration of the impact of cross sections widths on the simulated water levels nearby the Alès station: a) position of cross sections for different discharge levels, b) longitudinal profiles (B) and computed water levels (H).

The case of the Alès station is a more surprising one. Again in this case, the topography of the river bed appears well represented in Cartino. But the shape of the stage discharge relation appears very chaotic if compared to the rating curve of the station. A sudden decrease of water levels is simulated for discharge levels of 20 to 30 years return periods. The configuration of the river bed is different here from the previous cases. The section is located on the main Gardon d'Alès river, with a wide permanent river bed (about 100 m), and a very flat floodplain including some large depressions. This represent a typical case in which the width of the profiles included in Cartino will have a great impact on the results. Figure 8 illustrates in detail what happens in this case: for limited discharge levels the cross sections defined by Cartino end at the riverbanks, leading to very consistent results; but for the T=20 years discharge, a wide profile is incorporated in the hydraulic model, located just downstream the position of the station (see figure 8a). As a consequence, a wide flooded area (disconnected from the riverbed, see figure 4) is considered by the 1-D model, leading to a significant decrease of simulated water levels in the considered section and also the upstream sections. In such a situation, the use of a 2-D hydraulic model could help in improving the delineation of the flooded areas but at the price of a dramatic increase of computation times.

4.3 Impact models

The characteristics of the impact models obtained are summarized on figures 9 and 10. Figure 9 represents the geographical repartition of the maximum impact estimated at each river reach (number of buildings located in the 1000 year estimated flooded area). This figure confirms that the main urban areas, representing the main potential impacts are correctly identified by the model: a limited number of river reaches with very large estimated impacts. In addition, the impact model also provides an interesting hierarchy of the possible impacts in other locations: figure 10.a shows that the model identifies a large majority of river reaches for which the potential impacts are very limited, and therefore enables to discriminate the more limited number of river reaches for which significant impacts may be observed, even if remaining much more limited than in urban areas. It is likely that this kind of information will be of great help for the interpretation of forecasts provided in real time by distributed hydro-meteorological models.

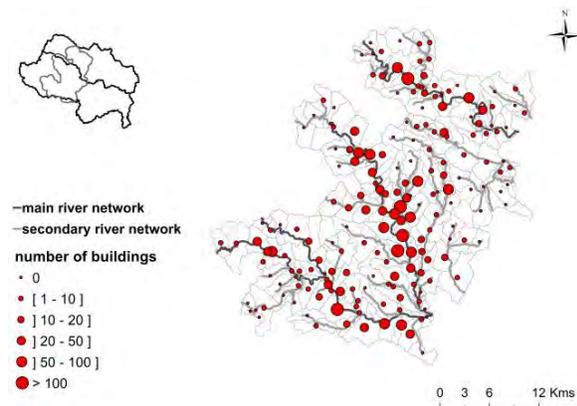


Figure 9. Map of the maximum impacts estimated for each river reach (number of buildings in the 1000-year flooded area).

Moreover, figure 10.b also shows that the impact model identifies an interesting hierarchy in the discharge return periods for which a significant part of the exposed assets begin to be affected. The model seems to be able to distinguish river reaches for which the inundation begins for relatively low discharges, or on the other hand for large discharges, providing interesting information about the flood levels (in terms of frequency) leading to the first potential damages. Of course, considering the relatively high uncertainty of estimated flooded areas in the beginning phase of the inundation, this information will probably be less accurate than the previous one (hierarchy of impacts for large discharges), and will probably include significant errors. But it is nevertheless an interesting information for the management of floods of intermediate magnitude, for which the location of damages do not necessarily follow the geographical repartition presented on figure 9.

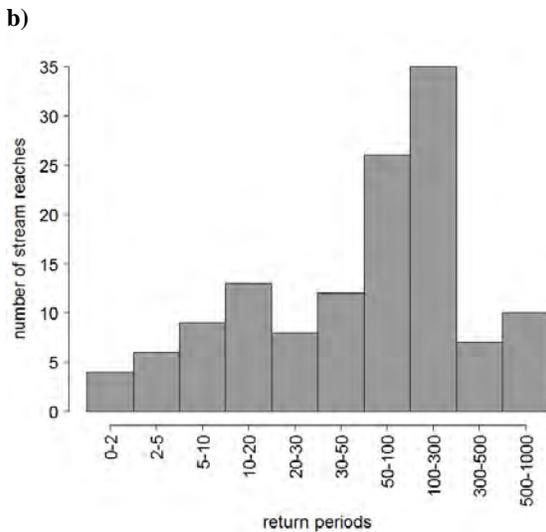
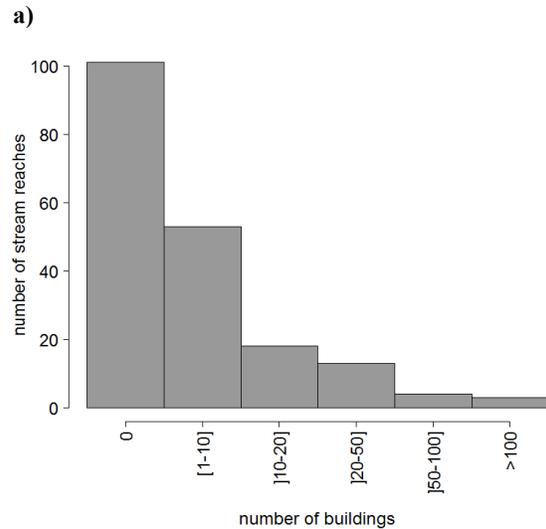


Figure 10. Main characteristics of the impact models obtained on the 192 considered river reaches: a) distribution of maximum impacts (1000 year flooded area), and b) distribution of discharge return periods leading to 50 % of the maximum impacts.

5 Discussion and further validations based on the CCR database

The first validation results presented herein are focused on the accuracy of estimated flooded areas. These results show that if very large errors may be observed in a limited number of cases (typically less than 10% of the river reaches) for which the results should still be improved, in a large majority of cases the errors associated with the important simplifications introduced in the computation procedure remain much more limited (ISPs not exceeding 20 to 30 %). Therefore the procedure applied herein combines the advantage of its computational efficiency, enabling to generate estimated flooded areas on a very detailed river network and for a wide range of discharge levels, and of acceptable error levels considering the objectives of this study: giving a

first estimation of the magnitude and hierarchy of impacts at a large regional scale.

The features of the impact model show that it contains useful information about the location of the vulnerable settlements, and could probably usefully complement the outputs of a rainfall runoff model to support crisis management and rescue operations. However, the combination of this impact model with a rainfall-runoff model will introduce additional sources of errors such as: errors in discharge estimations, interpolation between two estimated flooded areas for the estimation of the associated impacts. The final accuracy and usefulness of information on possible impacts will highly depend on the combination of these sources of errors. Finally, it clearly appears that this kind of approach still needs further validation to estimate its real efficiency in a close to real world situation. For this purpose, one objective is now to value insurance claim data collated by the CCR within the framework of its reinsurance treaties with its clients. This data being confidential, the study will be based on aggregated information provided by CCR. This information, indeed, may provide an interesting synthesis of the location of the main damages to settlements at the event scale [10], to be compared with the impacts estimated by our model.

This kind of validation at the event scale is currently in progress, but we present here some preliminary results showing the overall consistency between the nature and representativeness of information collated by CCR and our impact model. Figure 11 presents for instance the correspondence between number of buildings identified in the impact model and the number of insurance policies of individual houses included in the CCR database in 2014 (limited here to the well geocoded policies, at street number precision or at street center precision). This graph shows a good overall consistency of both information sources with a proportion policies/buildings of 50 to 80% depending the considered area (10-year or 50-year flooded area).

Figure 12 shows the proportion of insurance claims/policies computed on the whole observation period covered by the CCR database (1998-2013), within the flooded areas used for the definition of the impact model. This figure shows again a good consistency of information, with a decreasing proportion of claims/policies ratios as the return period of the considered flooded area increases. It can also be noted that the ratios are significantly higher within the identified floodplains than outside.

Based on these first results, the challenge is now to use the claim data for the validation at the event scale of the entire simulation chain including both hydrological rainfall runoff model and impacts model.

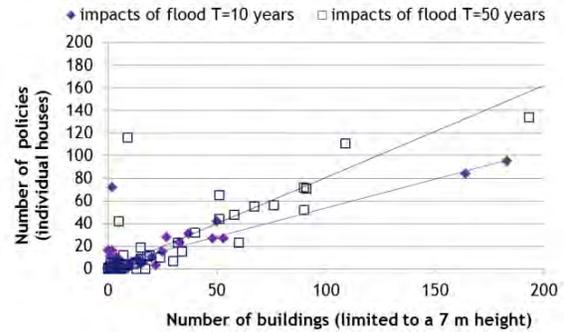


Figure 11. Comparison of the number of insurance policies included in the CCR claim database and of the number of buildings identified in the impact model within estimated flooded areas (1 point = 1 river reach).

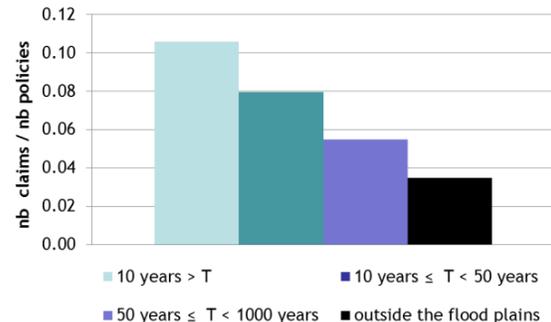


Figure 12. Ratios between number of claims and number of policies included in the CCR database within (and outside) estimated flooded areas.

6 Conclusions

The case study presented herein aimed to illustrate the potential benefits of a simplified impact model to complement the real time information provided by hydrological models for the monitoring and forecasting of flash floods. The impact model proposed is based on 1-D hydraulic computations achieved during a pre-analysis phase: important assumptions are made, enabling to derive in a limited computation time a catalogue of inundation maps for different discharge quantiles.

The evaluation of this catalogue versus reference flooded areas shows that the level of errors, even if significant, remains acceptable for the monitoring and forecasting objectives. Moreover, this catalogue leads to a clear hierarchy of the exposure of the considered territory, including interesting information about the discharge levels above which the assets begin to be significantly affected.

Based on these promising results, the challenge is now to combine this impact model with a hydrological model to assess if the information on impacts obtained at the event scale can be valuable for crisis management operations. The validation of these results should be possible based on the insurance claim data collated by CCR.

5 References

1. Georgakakos K.P. (2006). Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, **317**, 81–103.
2. Norbiato D., Borga M., Degli Esposti S., Gaume E., Anquetin S. (2008). Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins *Journal of Hydrology*, **362**, 274–290.
3. Javelle P., Demargne J., Defrance D., Pansu J. and Arnaud P. (2014). Evaluating flash-flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: a case study with the Aiga warning system. *Hydrological sciences journal*, **59**(7), 1390-1402.
4. Gourley J.J., Flaming Z.L. Hong Y. and Howard K.W. (2014). Evaluating of past, present and future tools for radar-based flash-flood prediction in the USA. *Hydrological sciences journal*, **59**(7), 1377-1389.
5. Naulin J.P., Payrastre O. and Gaume E. (2013). Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas Application to road network supervision in Southern France, *Journal of Hydrology*, **486**, 88-99.
6. Rozalis S., Morin E., Yair Y. and Price C. (2010). Flash flood prediction using uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological condition. *Journal of hydrology*, **394**, 245-255.
7. Versini P-A., Berrenguer M., Corral D. and Sempere-Torres D. (2014). An operational flood warning system for poorly gauged basins : demonstration in the Guadalhorce basin (Spain). *Natural Hazards*, **71**, 1355-1378.
8. Aubert Y. et al., (2014). The SHYREG flow method-application to 1605 basins in metropolitan France, *Hydrological Sciences Journal*, **59**(5), 993-1005.
9. Pons F., Laroche C., Fourmigue P. et Alquier M. (2014). Flood hazard maps for extreme event scenario: the study of Nartuby river. *La Houille Blanche*, **2**, 34-41.
10. Moncoulon D., Labat D., Ardon J., Onfroy T., Leblois E., Poulard C., Aji S., Rémy A., and Quantin A. (2014). Analysis of the French insurance market exposure to floods: a stochastic model combining river overflow and surface runoff, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **14**, 2469-2485.

Annexe E

Simulation au pas de temps de 15 minutes des impacts pour l'événement du 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard

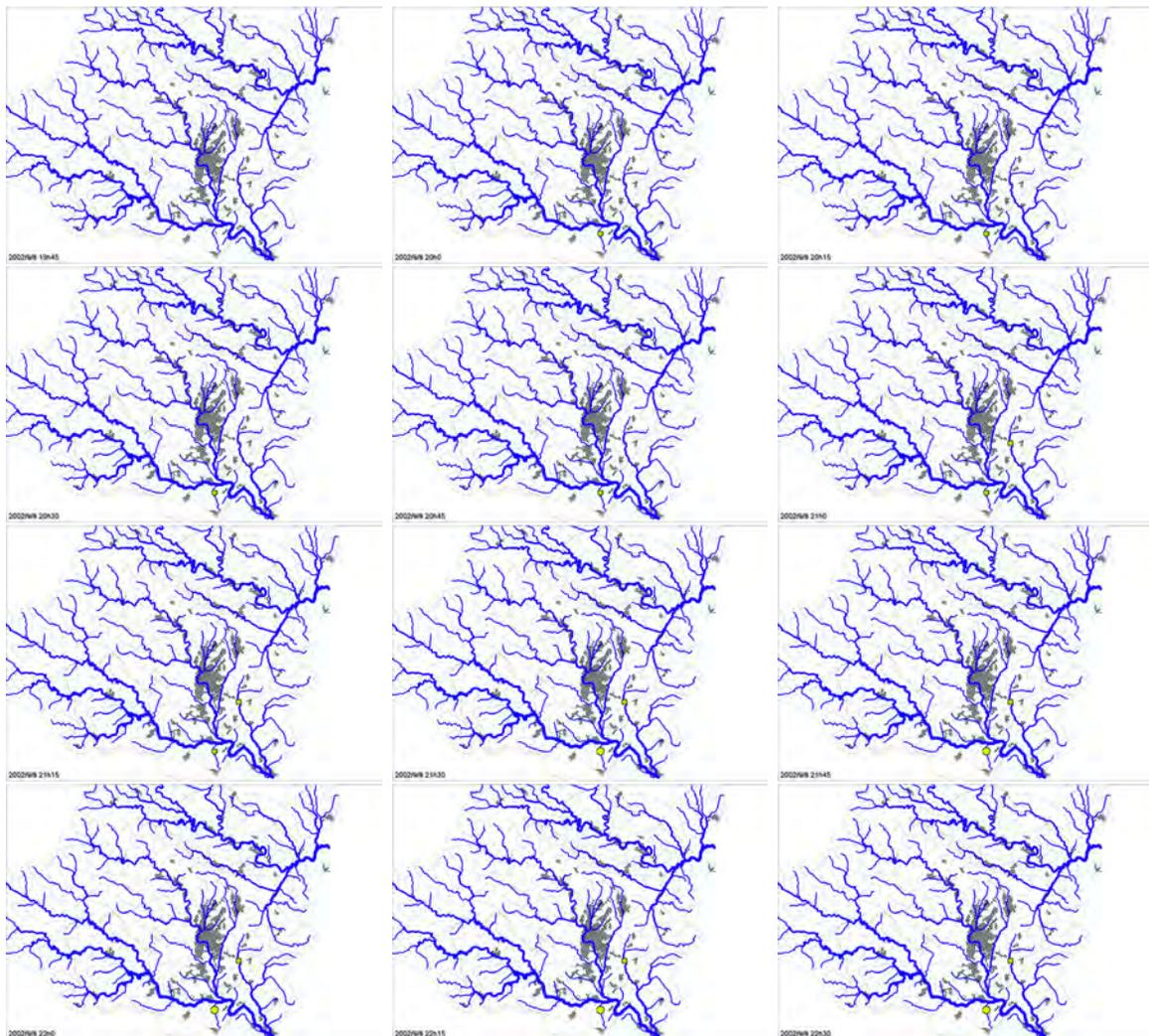


FIGURE E.1 – Évolution des impacts du 8 septembre 2002 entre à 20h30 et 22h30

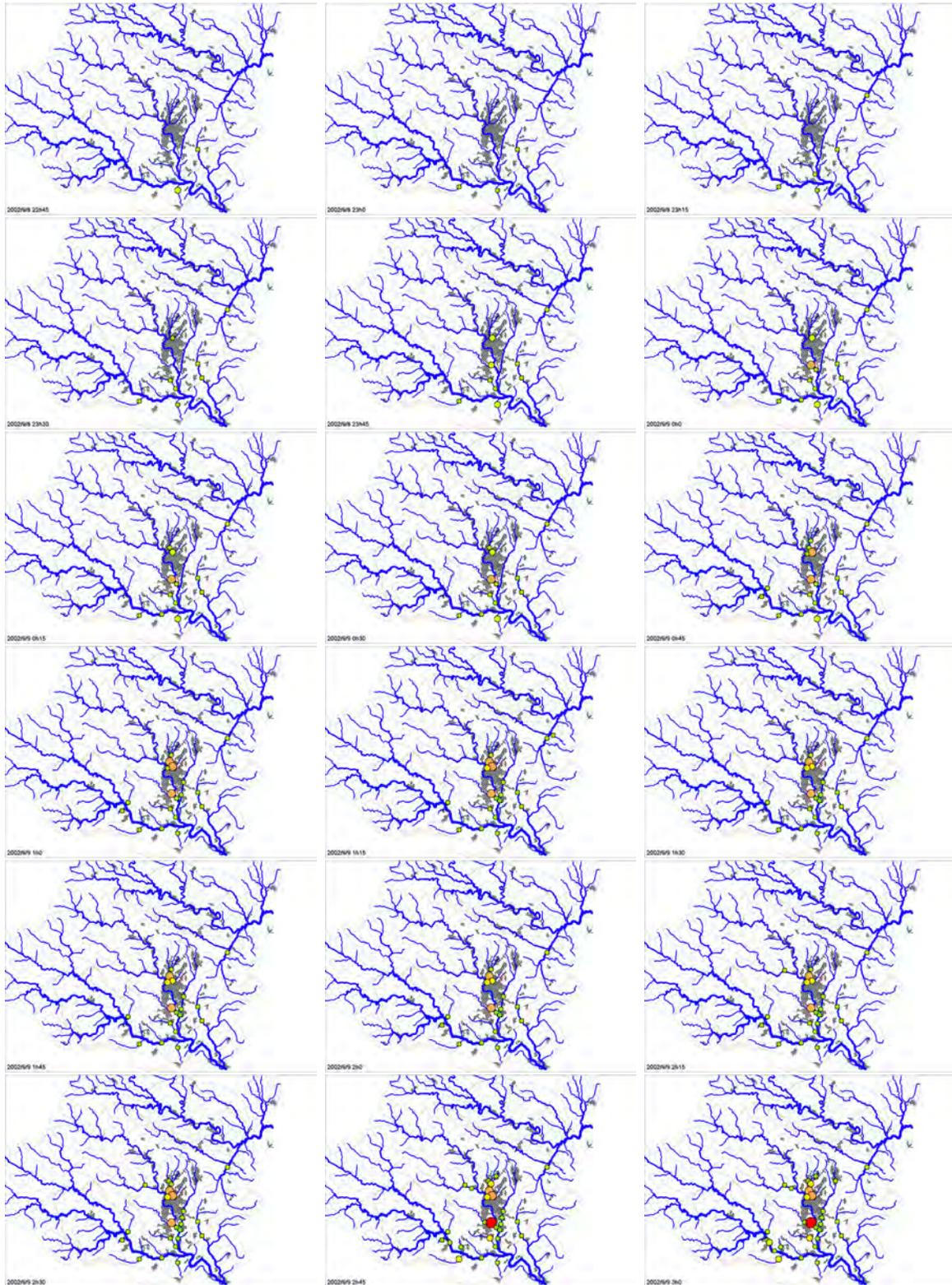


FIGURE E.2 – Évolution des impacts entre le 8 septembre 2002 à 22h45 et le 9 septembre 2002 à 3h00

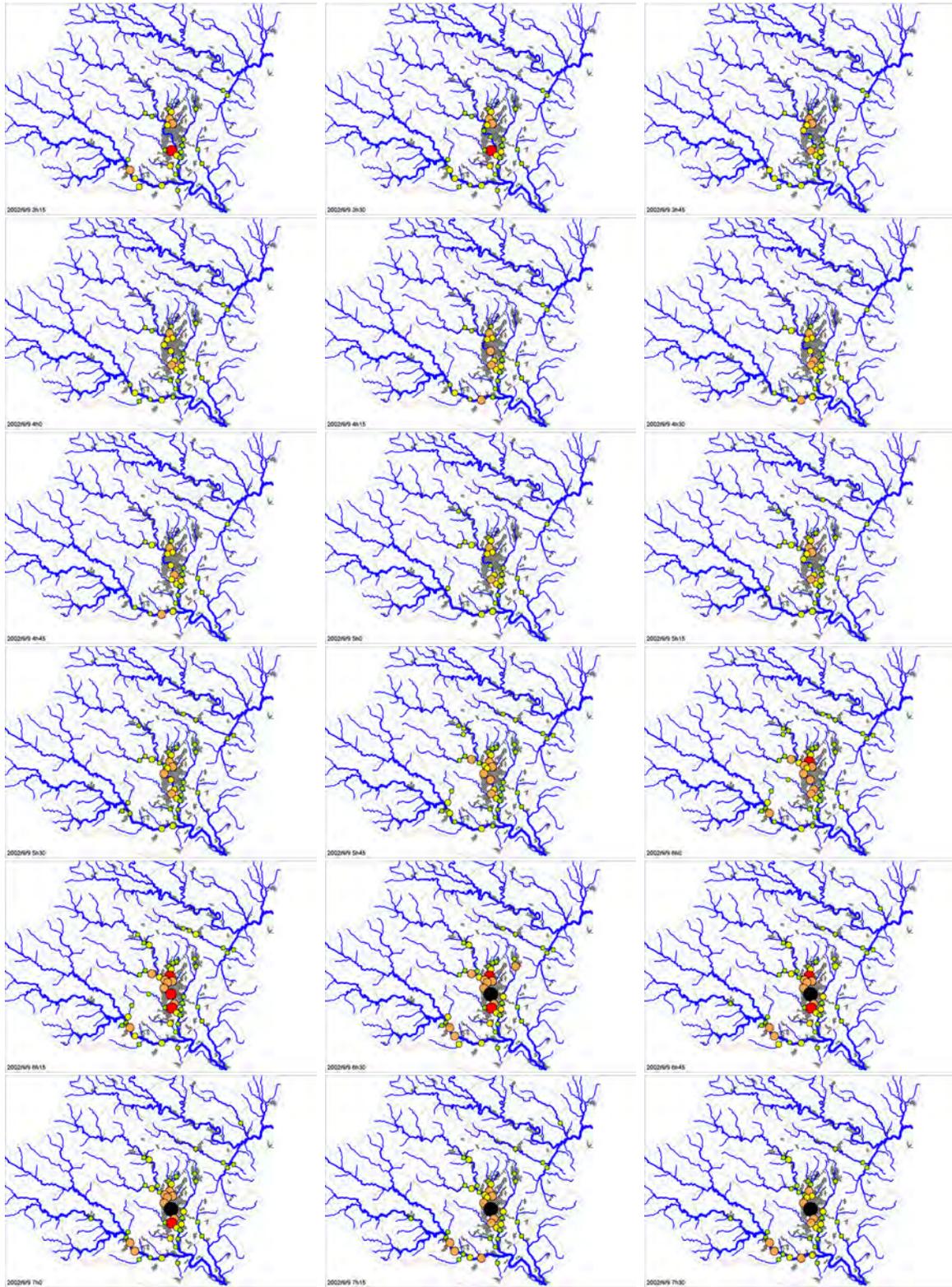


FIGURE E.3 – Évolution des impacts du 9 septembre 2002 entre 3h15 et 9h00

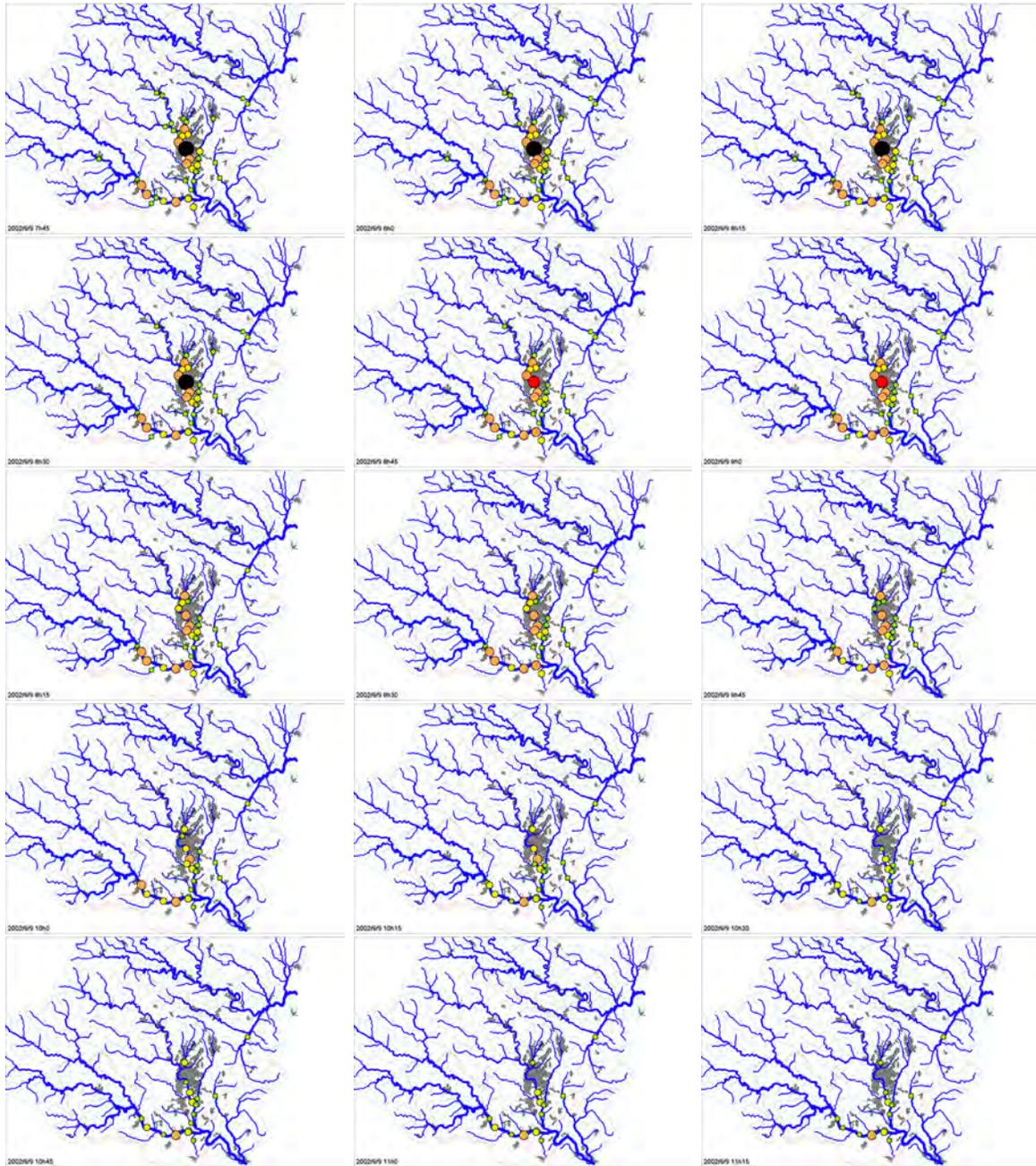


FIGURE E.4 – Évolution des impacts du 9 septembre 2002 entre 9h15 et 12h45

Annexe F

EGU 2016



Geophysical Research Abstracts
Vol. 18, EGU2016-12862, 2016
EGU General Assembly 2016
©Author(s) 2016. CC Attribution 3.0 License.

Regional hydrological models for distributed flash-floods forecasting : towards an estimation of potential impacts and damages

Guillaume Le Bihan (1), Olivier Payrastre (1), Éric Gaume (1), Frédéric Pons (2), and David Moncoulon (3)

(1) Ifsttar, Geotechnical engineering, environment and risks, Bouguenais, France (olivier.payrastre@ifsttar.fr), (2) Cerema, Dter Med, Aix en Provence, France (frederic.pons@cerema.fr), (3) Caisse Centrale de Reassurance (CCR), Paris, France (dmoncoulon@ccr.fr)

Hydrometeorological forecasting is an essential component of real-time flood management. The information it provides is of great help for crisis managers to anticipate the inundations and the associated risks. In the particular case of flash-floods, which may affect a large amount of small watersheds spread over the territory (up to 300 000 km of waterways considering a drained area of 5 km² minimum in France), appropriate flood forecasting systems are still under development. In France, highly distributed hydrological models have been implemented, enabling a real-time assessment of the potential intensity of flash-floods from the records of weather radars : AIGA-hydro system (Lavabre and Gregoris, 2005, Javelle et al., 2014), PreDiFlood project (Naulin et al., 2013).

The approach presented here aims to go one step further by offering a direct assessment of the potential impacts of the simulated floods on inhabited areas. This approach is based on an a priori analysis of the study area in order (1) to evaluate with a simplified hydraulic approach (DTM treatment) the potentially flooded areas for different discharge levels, and (2) to identify the associated buildings and/or population at risk from geographic databases. This preliminary analysis enables to build an impact model (discharge-impact curve) on each

river reach, which is then used to directly estimate the potentially affected assets based on a distributed rainfall runoff model.

The overall principle of this approach was already presented at the 8th Hymex workshop. Therefore, the presentation will be here focused on the first validation results in terms of (1) accuracy of flooded areas simulated from DTM treatments, and (2) relevance of estimated impacts.

The inundated areas simulated were compared to the European Directive cartography results (where available), showing an overall good correspondence in a large majority of cases, but also very significant errors for approximately 10% of the river reaches incorporated in the model. The stage/discharge relations obtained at gauging stations were also compared to the real rating curves, showing a very different behavior of the method depending on the local configuration of the considered site.

Some developments are now in progress in order to evaluate and validate, as far as possible, the results of the entire simulation chain at the event scale. This work relies on the comparison of simulation results (estimated flood impacts) with insurance losses data (provided by CCR) for several significant past flood events. The first results of this work will be presented.

Glossaire

1D	une dimension
2D	deux dimensions
ACS	avertissement crues soudaines
AFFS	African Flood Forecasting System
AIGA	Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte crues
AMEDAS	Automated Meteorological Data Acquisition System
APIC	Avertissement Pluies Intenses à destination des Communes
BAREME	outil pour la gestion des jaugeages et des courbes de tarage
BD	base de données
BNBV	Base Nationale des Bassins Versants
BV	bassin versant
CaMa-Flood	Catchment-Based Macro-scale Floodplain
CARTHAGE	CARTographie Thématique des Agences de l'Eau
CARTINO	CARTographie des INondations
CATNAT	CATastrophes NATurelles
CCR	caisse centrale de réassurance
CEREMA	centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CG	Conseil Général
CN	Curve Number
COG	Centre Opérationnel de la Gendarmerie
CVH	Cellule de Veille Hydrologique
DI	Directive Inondation
DPNC	Distance profil non constante
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
dt	données topographiques
ECMRWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EFAS	European Flood Awareness System
EPRI	évaluation préliminaire du risque inondation
EXZECO	EXtraction des Zones de concentration des ÉCOulements
FFG	Flash Flood Guidance
G2G	Grid to Grid
Gaspar	Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques
GFWS	Guadalhorce Flood Warning System

GRD	Génie Rural Distribué
HQref	hauteur-débit référence
HQsim	hauteur-débit simulé
HYDRATE	hydrometeorological data resources and technologies for effective flash flood forecasting
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
IRSTEA	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
K	coefficient de rugosité
LiDAR	LIght Detection And Ranging
LTHE	Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement
MARINE	Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations de versant des événements Extrêmes
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NGF	nivellement général de la France
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS	National Weather Service
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
PCH	Prévision des Crues et de l'Hydrométrie
PDR	période de retour
RFSM	Rapid Flood Spreading Model
SAMU	service d'aide médicale urgente
Sc	surface commune
SCHAPI	Service Central d'Hydrométéorologie et d'Aide à la Prévision des Inondations
SCS	Soil Conservation Service
Sd	surface en défaut
SDIS	Services Départementaux d'Incendie et de Secours
Se	surface en excès
SHAVE	Severe Hazard Analysis and Verification Experiment
SHYREG	Simulation d'HYdrogrammes REGionale
SIG	Système d'Information Géographique
SPC	Service de prévision des crues
Sref	surface de référence
Ssim	surface simulée
SYRAH-CE	Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau
TRI	Territoire à Risque Important d'inondation
TSI	taux de surface incohérente
UE	Union Européenne
UH	Unités d'Hydrométrie
USDA	U.S. Department of Agriculture



Thèse de Doctorat

Guillaume LE BIHAN

Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée
des crues rapides : vers une estimation des impacts et des
dommages potentiels

Regional hydrological model for distributed flash-flood
forecasting: towards an estimation of potential impacts

Résumé

Avec le développement des mesures de pluie à hautes résolutions spatiales et temporelles, l'utilisation de modèles hydrométéorologiques distribués est désormais envisagée pour anticiper les phénomènes de crue soudaine sur les petits bassins versants non jaugés. Toutefois les approches développées jusqu'ici se sont généralement concentrées sur l'évaluation des phénomènes hydrologiques, laissant de côté la question de leurs impacts, qui dépendent fortement de la configuration du terrain et des enjeux qui y sont présents.

Ce travail de thèse a permis de développer et tester une méthode d'évaluation directe de ces impacts à partir des sorties d'un modèle pluie-débit sur un territoire limité. La démarche mise en œuvre repose sur un travail préalable d'analyse du territoire permettant d'une part d'évaluer les emprises submergées dans une large gamme de débits par une approche hydraulique simplifiée, puis de construire des relations univoques débit-enjeux pour chaque bief de cours d'eau. Ces relations permettent de produire des cartes d'enjeux potentiellement touchés, pouvant être actualisées régulièrement en cours d'événement. Deux études des cas ont permis de réaliser une première évaluation des performances de cette approche, du point de vue de la qualité d'estimation des emprises inondées, et du point de vue des impacts estimés à l'échelle d'un événement grâce à la comparaison avec des données d'assurance.

Finalement, ces travaux ont permis de confirmer le potentiel de la méthode, dont les performances semblent en adéquation avec l'objectif visé: obtenir rapidement une première hiérarchisation des impacts occasionnés par les crues soudaines à l'échelle d'un grand territoire.

Mots-clés

Analyse des risques d'inondation, Bassins versants non jaugés, Modélisation hydraulique, Région méditerranéenne, Système d'information Géographique

Abstract

With the development of rainfall measurements at high spatial and temporal resolutions, the use of distributed hydrometeorological models is now considered to forecast flash floods on small and ungauged catchment areas. Current flashflood monitoring systems generally enable a real-time assessment of the potential flash-flood magnitudes. However they do not assess the potential impacts of flash-flood, which highly depends on the catchment areas configuration and on the importance of potentially affected assets.

The purpose of this PhD research work was to develop and test a method which can be used to directly estimate the impacts of flash-floods, based on the outputs of a distributed rainfall-runoff model. The approach is based on a prior analysis of the study area in order to assess the potential impact of different discharge levels on the flooded areas and to identify from geography database the associated buildings at risk. The aim is to build impact models on specific river reaches, using discharge versus impact graphs. The use of these impact models combined with a rainfall-runoff model, has enabled us to compute maps of potential impacts, based on real time assessment of flood events updated every 15 minutes. This method was evaluated on two case studies looking at the accuracy and relevance of estimated impacts for each event – and comparing the outcomes to insurance losses data.

This research work has helped to confirm the efficiency of this new combined method, which may become a useful tool to forecast large-scale effects of local impacts of flash-floods.

Key Words

Flood risk analysis, Flooded area simulation, Geographic information system, Mediterranean region, ungauged catchment areas