



Prise en compte des vulnérabilités territoriales dans l'avertissement des crues rapides : vers une amélioration de la méthode AIGA.

Clotilde Saint-Martin

► To cite this version:

Clotilde Saint-Martin. Prise en compte des vulnérabilités territoriales dans l'avertissement des crues rapides : vers une amélioration de la méthode AIGA.. Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2018. Français. NNT : 2018MON30061 . tel-02138917

HAL Id: tel-02138917

<https://theses.hal.science/tel-02138917>

Submitted on 24 May 2019

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

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par
UNIVERSITÉ MONTPELLIER – PAUL-VALÉRY
Arts et Lettres, Langues et Sciences Humaines et Sociales

Préparée au sein de l'école doctorale
**ED 60 : TERRITOIRES, TEMPS, SOCIÉTÉS ET
DEVELOPPEMENT**

Et de l'unité de recherche
**UMR – GOUVERNANCE, RISQUE, ENVIRONNEMENT,
DEVELOPPEMENT (GRED)**

Spécialité :
GÉOGRAPHIE ET AMÉNAGEMENT DE L'ESPACE (Catégorie CNU n°23)

Présentée par **Clotilde SAINT-MARTIN**

**Prise en compte des vulnérabilités
territoriales dans l'avertissement des crues
rapides : vers une amélioration de la
méthode AIGA.**

Soutenue le 22 novembre 2018 à Aix-en-Provence devant le jury composé de :

Mme Nancy MESCHINET DE RICHEMOND, Professeur
Mme Sandrine ANQUETIN, Directeur de Recherche
Mme Maria del CARMEN LLASAT BOTIJA, Professeur
M. Michel LANG, Ingénieur divisionnaire des TPE
M. Freddy VINET, Professeur
M. Pierre JAVELLE, Ingénieur divisionnaire AE
M. Johnny DOUVINET, Maître de Conférence
M. Bruno JANET, Ingénieur

Examinateur
Examinateur
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Encadrant de thèse
Invité
Invité



“Chaque fois que la science avance d'un pas, c'est qu'un imbécile la pousse, sans le faire exprès.”

Emile Zola – La joie de vivre

Remerciements

Il paraît que l'amour dure 3 ans. La personne qui a écrit cela, est un ex-thésard.

Après 3 années de proximité physique et intellectuelle, d'exclusivité, de folie, de crises, de voyages, de pleurs, de passion dévorante, de rires, d'angoisses, d'émerveillement... ce n'est pas sans soulagement que je mets un terme à une relation amoureuse qui marquera ma vie à jamais : thèse, je te quitte (mais on reste en bons termes).

Au commencement de mes remerciements, comme de ma thèse, je voudrais nommer 2 personnes. Tout d'abord mon directeur de thèse Freddy Vinet, pour m'avoir donné la chance de travailler à ses côtés pendant ces 3 années qui ont fait suite au Master GCRN. Merci de ton soutien malgré la distance, de tes relectures, de tes conseils, de m'avoir donné l'occasion d'enseigner, de tout le temps passé pour me permettre aujourd'hui d'écrire ces lignes.

Je continue avec mon encadrant, Pierre Javelle, qui est à la genèse de tout ce travail. Merci de m'avoir fait confiance et d'avoir laissé un alien non-hydrologue s'immiscer à Irstea dans les bureaux de l'équipe RHAX. Merci pour ces trois années de travail commun, ces heures de réunions (plus ou moins efficaces après 16h) passées sur ce projet. Merci pour le temps et l'énergie que tu as consacrés à cette thèse, à la croisée des disciplines et des chemins.

Je tiens particulièrement à remercier les membres du Jury, qui ont accepté de donner de leur temps pour me lire et m'évaluer, afin de me permettre d'achever ces trois années de travail. A mes rapporteurs, Carmen Llasat (Université de Barcelone) et Michel Lang (Irstea Lyon) et à mes examinatrices Nancy de Richemond et Sandrine Anquetin (Université Grenoble Alpes).

Je n'oublie pas les membres de mes comités de pilotage, que je remercie pour le temps précieux qu'ils ont consacré à relire et évaluer mon travail, je remercie donc Eric Maillé (Irstea Aix-en-Provence), Bruno Janet (SCHAPI), Isabelle Braud (Irstea Lyon), le Colonel Eric Martin (SDIS du Var) et Isabelle Ruin (LTHE, Pacte). Parmi les membres de mes comités de pilotage, je souhaite remercier particulièrement Olivier Payrastre de l'Ifsttar, pour la confiance, le travail commun, les terrains d'étude et le partage de données.

Une mention toute particulière à Johnny Douvinet, sans qui cette thèse n'aurait jamais vu le jour. Merci de m'avoir fait confiance. Je te remercie également pour ton écoute, ton soutien, tes idées et ton partenariat dans de nombreux projets.

Merci aux communes, à la communauté d'agglomération et aux syndicats mixtes qui ont participé directement à ce travail de thèse. Un grand merci aux communes d'Arles, Hyères, Carry-le-Rouet, Aix-en-Provence, La Seyne-sur-Mer, Beausoleil, Antibes, Fréjus, Cannes, Nice, Signes, Pelissanne, Collobrières, Miramas, Cuges-les-Pins, Digne-les-Bains, sans oublier les Syndicats Mixtes de l'Argens, de la Siagne et ses affluents, ainsi que la Communauté d'Agglomération Var Estérel Méditerranée.

Pour leur soutien financier je remercie le SCHAPI et la fondation Palladio sans qui rien de tout cela n'aurait pu être possible.

Je souhaite aussi remercier l'ensemble de mes co-auteurs de publications et posters pour m'avoir fait confiance et m'avoir associée à leurs travaux. Pour tout cela un grand merci. Merci à mon stagiaire Thibault Valdiserra qui a su répondre à mes (parfois trop nombreuses) exigences et a joué un rôle important dans ce travail.

Un remerciement particulier à mes collègues actuels et passés. Patrick Arnaud, chef d'équipe, pour son calme à toute épreuve et ses conseils. Nathalie Folton, pour le sourire, le miel et la compagnie dans les couloirs déserts du matin avant 9h. Patrice Mériaux, pour sa gentillesse et sa confiance. Mathieu Tolsa pour les chasses aux Pokémons, les tournées de terrain à Collobrières, les arbres de Noël, les blagues nulles et tout le reste. A Anthony Caruso, pour toutes ses blagues encore plus nulles, ses accents imités et son sourire qui manquent beaucoup à Irstea ! Une mention spéciale à Catherine Fouchier, qui m'a fait confiance notamment dans le cadre du projet RHYTMME et que je remercie pour son aide et son soutien. Je pense aussi à tous les autres personnes qui ont croisé ma route à Irstea, d'Aix à Antony : stagiaires, CDD, thésards, permanents : Lucas, Greg, Tatiana, Karna, Pierre C., Sophie, Aurore, Alexandre, Magloire, Mohamed, Ayala, Anthony M., Thibaut F., Catherine T., Guillaume P., Katrin E., Frédéric G., Frédéric P... et tous les autres.

Merci aux membres de la Réserve de Sécurité Civile de Venelles, avec une mention particulière à Jean-Louis, Luc et Gérard. Merci de m'avoir intégrée à votre équipe, je n'imaginais plus passer un été autrement qu'en orange.

Merci aux bénévoles de la Croix-Rouge Française. Particulièrement Valérie, Cédrik, Simon, Viviane, Carine, Marie-Pierre, Bob et Yohann. Merci pour ces beaux levers de soleil en poste de secours à 5h30 du matin le samedi, nos réunions-pizzas, les formations à n'en plus finir, les urgences de dernière minute, le bonheur douçâtre du téléphone d'astreinte, les milliers d'abréviations à faire mal à la tête, les fous rires et les pleurs. Merci aussi à la DTM qui m'a fait confiance pour rejoindre son équipe. Je me suis redécouverte avec vous !

Merci à mon club équestre du Clos de la Sainte Victoire, pour les cours d'éthologie, de dressage, de PTV, de voltige, de longues-rênes et j'en passe ! Merci à Charlotte, Nathalie et Stéphanie pour leur bonne humeur constante. Un grand merci à Manoir, pour tous les moments d'apaisement que tu m'as apportés et dont j'avais tant besoin !

Il me faut aussi remercier toutes les personnes qui ont croisé ou recroisé ma route ici et ailleurs : Jérémy Palomares pour les fous rires, les jeux de société, les milliers d'accessoires Tupperware, les Big Fluffy Yoda Cat et les bons moments passés au BDD. Marc Stéfanon d'une rue de Mykonos au Bon Marché à Paris ; Guillaume Le Bihan du foie gras de l'Ifsttar aux bières de Chora ; Julien Pellet pour avoir cru en moi dès le début ; Marie Schlatter pour son sourire indéfectible, comme un rayon de soleil ; Marie Ouillon, une belle retrouvaille sous le ciel de Paris ; la Maguy et ses félins ; Damien Chauvet, une autre retrouvaille mais sous le ciel aixois ! Florine, malgré les kilomètres qui nous séparent désormais, merci pour ces années de thèse en ta compagnie, pour les soirées apéro, nos débats caféinés, les films en tout genre. Et tous ceux que j'oublie ici mais que je n'oublie pas vraiment. Une mention spéciale à mon kiné Samuel pour ces nombreuses heures à essayer de lutter contre les tensions de la thèse !

Quelques lignes enfin pour ces années passées en la compagnie de personnes exceptionnelles, sans le soutien et l'amitié desquelles tout cela n'aurait pas été possible.

Aux ex-traknardiens Rémy, Pierrot et Stéphane. Deux sur trois ont rejoint les rangs du BDD, Stéphane tu es le prochain ! Rémy, merci pour ta grande gueule, ton humour noir et même ta mauvaise humeur ! Je suis très heureuse que tu sois de retour sur Aix avec nous ! Pierrot le grimpeur parapentiste magnétiseur de chats et de poissons, merci pour ta bonne humeur et ta folie végétale. Stéphane, compagnon de labeur en ces heures de rédaction, merci pour ton rire, tes blagues carambar, et tout le reste !

Simon, colocataire d'une autre vie et pourtant c'était il y a seulement 3 ans. Tu as toujours su être présent et revenir vers moi (malgré l'incident du verre d'eau) ! Merci pour ta gentillesse, ton sourire, ta patience, les nombreuses soirées coloc et non-coloc passées en ta compagnie.

Jean, collègue, covoitureur, colocataire compagnon de voyage et ami. Je n'entendrai jamais plus l'accent du Yorkshire sans penser à nos après-midi avec Carlton. Ce fut un grand honneur que de faire partie de ta vie pendant ces 4 années. L'océan Atlantique m'a déjà pris Angelica... et maintenant toi ! Mais je sais que ce n'est que pour mieux nous retrouver autour d'une Caïpirinha sur les plages de Copacabana, d'un schnitzel végétarien sur les bancs de l'EGU, d'une Guinness dans le parc du Musée d'Art Moderne de Dublin, ou d'une poutine de Yoda devant le Théâtre Granada. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir fait confiance, je n'imaginais pas l'Irstea sans toi !

Angelica, ta peinture de « Noctali aux cerises » a accompagné ma dernière année de thèse pour me rappeler ta joie de vivre, ta gentillesse et le bonheur que tu as su nous apporter à Aix-en-Provence. Merci d'avoir été là pour moi pendant ces 3 années, que tu aies été toute proche à Aix ou plus loin à Antony, Rio, Sao José... Je ne vais pas tout lister car ça ne va pas tenir ! Je suis honorée de te compter parmi mes amis. Merci.

Yann, on en a fait du chemin depuis le self du Cerema ! Ton amitié compte beaucoup pour moi et j'espère côtoyer les allées des ANRN en ta compagnie pendant de nombreuses années encore. Tu as toujours été un soutien et un ami merveilleux, et je t'en remercie.

Mes amis de longue date. Cécile, plus de 20 ans que tu me supportes, c'est à toi qu'on devrait donner un diplôme ! Tu as toujours su être là pour moi, quand personne d'autre ne l'était et je n'imaginais pas ma vie sans toi. Merci pour toutes les années passées et à venir en ta compagnie. Ma Thomate, kiné, guitariste, grimpeur, coureur, ostéopathe en devenir, merci pour nos escapades européennes et tes descentes à Aix ! Laura, merci pour les après-midi trop peu nombreuses dans les rues de Narbonne. Nous avons fait du chemin depuis le collège mais tu es restée une amie fidèle et pour cela merci.

Gauthier, des bancs du Sullivan's aux rives de l'Amazonie. Merci pour ta présence et ton soutien. Mon chat-lapin Noctali, qui m'a fait regretter de ne pas avoir fait une thèse sur les inondations et les animaux de compagnie. A ma famille proche : Antoine, Vicky, Mathilde et Louis. A vous qui malgré les kilomètres avez su être là pour moi et qui m'avez toujours encouragée et soutenue. Merci du fond du cœur. A ma famille moins proche mais que je n'oublie pas. Une pensée aussi à tous ceux qui ne sont plus là et avec qui j'aurais voulu partager cette thèse : à mon frère David.

A mon Papa, qui du haut de ses 88 ans m'a appris l'importance du travail, m'a donné envie d'apprendre et de toujours aller plus loin. Merci d'avoir fait de moi la personne que je suis aujourd'hui. C'est à toi que je dois et dédie ce manuscrit.

Sommaire

Sommaire	i
Table des figures	v
Table des tableaux	viii
Table des sigles	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Compléter la chaîne d'alerte aux inondations	9
1. Caractéristiques des inondations	12
1.1. Définitions : de la crue à l'inondation.....	12
1.2. Typologie des inondations	13
1.3. Les crues rapides	17
1.4. Formation des crues rapides.....	20
2. Les chaînes d'alerte aux inondations à travers le monde.....	24
2.1. Exemples de chaînes d'alerte aux inondations dans le monde	24
2.2. Les chaînes d'alertes dédiées aux crues rapides.....	31
3. La méthode AIGA	37
3.1. Présentation de la méthode	38
3.2. Travaux de thèses antérieurs.....	44
Conclusion du chapitre et positionnement de la thèse	46
Chapitre 2 : Enjeux et vulnérabilité du territoire, comment mesurer l'immensurable ? ..	51
Introduction du chapitre	51
1. Une profusion de termes et de significations.....	53
1.1. Qu'est-ce qu'un enjeu ?	53
1.2. L'exposition à l'aléa	54
1.3. Pas une, mais des vulnérabilités.....	55
1.4. Les mesures de la vulnérabilité territoriale	59
1.5. Typologie des enjeux selon leur nature.....	60
2. Méthode développée pour l'évaluation de la vulnérabilité territoriale.....	62
2.1. Une typologie d'enjeux s'appuyant sur la BDTOPO	62
2.2. Choix d'une méthode d'aide à la décision multicritères	64
2.3. La méthode AHP	70
3. Application de la méthode à la région Provence-Alpes-Côte d'Azur	74
3.1. Sélection d'un panel d'experts représentatif de la vulnérabilité du territoire	74
3.2. Présentation des résultats obtenus	82
3.3. Analyse des résultats obtenus	84
Conclusion du chapitre	91

Chapitre 3 : Mise au point d'un indice pour passer de l'aléa au risque.....	95
Introduction du chapitre	95
1. Qu'est-ce que le risque inondation ?.....	97
1.1. Définir le risque.....	97
1.2. L'évaluation du risque	101
2. Identifier les territoires du risque	107
2.1. Comment définir une zone inondable ?.....	108
2.2. Produits utilisés dans le cadre de la thèse	110
2.3. Comparaison EAIP / CARTINO	114
3. Construction d'un indice de risque	117
3.1. Méthode proposée.....	117
3.2. Application de l'indice de risque à l'échelle communale	121
3.3. Application de l'indice de risque à l'échelle de la méthode AIGA	125
Conclusion du chapitre	130
Chapitre 4 : Données de dommages	135
Introduction du chapitre	135
1. Quelles données de dommages ?.....	137
1.1. Terminologie et définitions	138
1.2. Type de dommages	139
2. Les bases de données existantes sur les dommages liés aux catastrophes	141
2.1. Les bases de données multi-aléa	141
2.2. Les bases de données spécialisées sur les inondations	144
2.3. Les bases de données françaises.....	146
2.4. Limites et besoins en termes de données de dommages.....	150
3. La base de données DamaGIS.....	152
3.1. Présentation de la base de données.....	152
3.2. Sources d'information	153
3.3. Structure de la base de données	157
3.4. Typologie des enjeux endommagés.....	160
3.5. Evaluation de la sévérité des dommages matériels	163
3.6. Limites et avantages présentés par l'utilisation de DamaGIS.....	167
Conclusion du chapitre	169
Chapitre 5 : Mise en application de la méthode et évaluation des performances	173
1. Présentation des zones d'études pour l'évaluation de l'indice de risque	174
1.1. Département du Gard : Les Gardons	175
1.2. Département du Var : L'Argens.....	177
1.3. Département des Alpes-Maritimes : le Riou de l'Argentière, la Grande Frayère et la Brague.....	179

2. Evaluation de la méthode dans les zones d'étude	181
2.1. Tables de contingence.....	182
2.2. Courbe de ROC (Receiver Operating Curve).....	186
3. Evaluation exhaustive à partir de données CATNAT	189
3.1. Données de validation : les arrêtés CATNAT	189
3.2. Méthodologie	192
3.3. Résultats de l'évaluation à partir des CATNAT	197
3.4. Analyse des résultats.....	201
4. Evaluation spatiale événementielle à partir des données de DamaGIS	207
4.1. Méthodologie	207
4.2. Résultats issus des scores	209
4.3. Analyse détaillée de deux évènements.....	211
Evènement du 25 au 27 novembre 2014.....	212
Evènement du 3 octobre 2015.....	215
Conclusion du chapitre	217
Conclusion générale	220
• Comment passer de l'aléa crue au risque de dommages liés aux inondations ? ..220	
• Comment passer d'une caractérisation « statique » à une caractérisation « dynamique » du risque de dommages ?	220
• Comment passer d'une évaluation qualitative à une évaluation exhaustive ?	221
Principaux résultats.....	221
Perspectives de la thèse	222
Une continuation de DamaGIS en fonctionnement participatif ?	222
Une évaluation de l'exposition humaine ?	222
Une application multirisque ?.....	223
Bibliographie	225
Annexes	238
Annexe A : Recueil de définitions pour la notion de vulnérabilité dans la littérature	238
Annexe B : Support de présentation des entretiens AHP	242
Annexe C : Support de présentation des entretiens AHP	246
Annexe D : Evaluation du risque de dommages à l'échelle communale de T50 à T1000.....	247
Annexe E : Data Paper sur la base de données DamaGIS	250
Annexe F : Liste des communes par zone d'étude.....	261
Annexe G : Ratio de la surface CARTINO/EAIP par commune et par zone d'étude.....	262
Annexe H : Comparaison des qualifications AIGA avec l'estimation du risque de dommages potentiels et les dommages observés pour différents évènements de crues	264
Evènement du 5 au 6 novembre 2011.....	265
Evènement du 12 au 13 septembre 2015.....	266

Evènement du 17 au 21 septembre 2014.....	267
Evènement du 10 novembre 2014.....	268
Evènement du 19 janvier 2014.....	269

Table des figures

Figure 0.1: Fréquence moyenne d'observation des cumuls de pluies supérieurs à 200 mm en 24h, (Météo-France 2018)	3
Figure 1.1 : Schéma simplifié illustrant une chaîne de l'alerte aux inondations	11
Figure 1.2 : Comparaison des deux types d'épisodes pluvieux à l'origine des crues rapides en Méditerranée (Météo Languedoc 2018)	20
Figure 1.3 : Schéma simplifié de la formation des épisodes cévenols (Météo-France 2018)	21
Figure 1.4 : Schéma simplifié de la formation des épisodes Méditerranéens (Météo-France 2018)	22
Figure 1.5 : Crue de la Nartuby à Trans-en-Provence suite à un épisode Méditerranéen, le 15 juin 2010. Le débit de pointe lors de cet événement a été estimé entre 360 et 520m ³ /s à Trans-en-Provence selon (Payrastre et al. 2012). © Cantet Philippe / Irstea	23
Figure 1.6 : Le système de prévision des crues aux Etats-Unis, traduit de l'anglais McEnery et al. (2005).....	25
Figure 1.7 : Carte du risque de crue sur le territoire américain publiée par le NWS le 5 septembre 2018.....	25
Figure 1.8: Schéma de fonctionnement du système EFAS à partir du modèle LISFLOOD – Traduit de l'anglais depuis Joint Research Centre (2018)	26
Figure 1.9 : Carte EFAS de dépassement de seuil basée sur la prévision météorologique du 21 août 2005 pour un horizon de prévision de 7 jours (Ramos et al. 2009).....	27
Figure 1.10: Carte des secteurs de Services de Prévision des Crues en France (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2018b).....	28
Figure 1.11: Carte de la vigilance crue publiée le 02/06/2016 à 23h25 (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2018b)	30
Figure 1.12: Schéma explicatif de la méthode Flash Flood Guidance	31
Figure 1.13: Comparaison des linéaires de cours d'eau suivis et non-suivis par le système Vigicrues	34
Figure 1.14: Carte des avertissements APIC du 4 septembre 2015 à 20h15	35
Figure 1.15: Carte communale de la vigilance Vigicrues Flash du 22 novembre 2016 à 19h00 (Garandeau L. 2018)	36
Figure 1.16 : Illustration simplifiée du fonctionnement de la méthode AIGA : de l'observation de pluie radar aux services d'avertissement opérationnels (Fouchier et al. 2017)	38
Figure 1.17: Comparaison du réseau ARAMIS entre 2006 et juillet 2017 (Météo-France 2018).....	39
Figure 1.18: Comparaison des cumuls de pluie 3h (a) et de la qualification AIGA 3h (b) pour l'évènement du 21 novembre 2016 à 21h15 dans le département du Var (Images issues de la plateforme temps réel RHYTMME) .	40
Figure 1.19: Schéma descriptif du modèle hydrologique GRd. Les pluies (P) et l'évapotranspiration (E) sont les entrées du système, et les débits journaliers et horaires (QJ et QH) sont les sorties. (Fouchier et al. 2017)	42
Figure 1.20: Comparaison des qualifications AIGA PLUVIO sur 24h (a) et AIGA HYDRO (b) pour l'évènement du 21 novembre 2016	43
Figure 1.21 : Axes d'amélioration de la méthode AIGA et objectifs de la thèse (en rose).....	46
Figure 2.1 : Evolution de l'utilisation du terme de vulnérabilité dans les articles sur l'environnement, l'aménagement, la géographie et l'urbanisme tirés de Web of Science entre 1980 et 2017 – Source : Barroca, DiNardo and Mboumoua (2013).....	52
Figure 2.2: Les différentes sphères de vulnérabilités, traduit de (Birkmann and Wisner 2006).....	56
Figure 2.3 : Répartition des communes de la région PACA selon trois critères à savoir : Temps écoulé depuis la dernière inondation, PPRI et Nombre d'arrêtés CATNAT inondation	75
Figure 2.4: Répartition des communes, communautés d'agglomération et syndicats sélectionnés pour les entretiens	78
Figure 2.5 : Répartition par domaine de compétence des experts interrogés.....	79
Figure 2.6: Répartition par poste occupé des experts interrogés.....	79
Figure 2.7: Photographie prise lors d'un entretien sur une commune de l'échantillon	80
Figure 2.8: Illustration du fonctionnement de la méthode AHP à partir des données d'un entretien, (Valdiserra 2017)	81
Figure 2.9 : Représentation des scores de vulnérabilité territoriale par nature d'enjeu	83

Figure 2.10: Scores de vulnérabilité obtenus par enjeu selon le profil des communes des gestionnaires interrogés	86
Figure 2.11 : Scores de vulnérabilité obtenus selon le profil des répondants.....	88
Figure 2.12: Scores de vulnérabilité territoriale obtenus par enjeu selon la cohérence des réponses des répondants	89
Figure 2.13: Ratios de cohérence selon le profil des gestionnaires	90
Figure 3.1: Illustration des composantes du risque.....	99
Figure 3.2 : Le modèle HSV/C de diagnostic du risque territorial, (Defosse, Vinet and Leone 2017).....	100
Figure 3.3: Exemple de matrice de risque, en vert : risque faible, en jaune : risque moyen, en orange : risque fort, en rouge : risque très fort (Leone, Asté and Leroi 1996)	102
Figure 3.4 : Exemple du croisement d'indicateurs ONRN pour la région PACA	103
Figure 3.5 : Illustration de la méthode de prévision des submersions de routes (Naulin, Payrastre and Gaume 2013)	105
Figure 3.6 : Comparaison entre le nombre de bâtiments endommagés et le nombre de bâtiments endommagés prévu par le modèle pour les inondations d'Alès en 2002 (a, c, e) et de Draguignan en 2010 (b, d, f). (Le Bihan 2016a)	106
Figure 3.7: Illustration de la méthode EXZECO au niveau du cours d'eau de la Torse à Aix-en-Provence (13), (a) secteur de la Torse et emplacement du profil en travers, (b) résultat d'EXZECO sur le profil en travers, (c) N=1 itération, (d) N= 100 itérations, (e) légende des surfaces drainées (Pons et al. 2010b).....	111
Figure 3.8 : Application de la méthode CARTINO: étendue des surfaces inondées et hauteurs d'eau associées (Le Bihan 2016a)	112
Figure 3.9 : Principe de fonctionnement de la méthode CARTINO, traduit de l'anglais à partir de Le Bihan et al. (2015)	113
Figure 3.10: Comparaison de l'emprise CARTINO pour T1000 et de l'EAIP pour la Brague (06)	114
Figure 3.11 : Comparaison de la zone inondable EAIP avec la zone inondée lors des inondations de Juin 2010 dans le Var, source : Esposito et al. (2014).....	116
Figure 3.12 : Evaluation de l'indice de risque IR en fonction de la période de retour de la crue (T), pour une unité spatiale donnée.....	120
Figure 3.13 : Application de l'indice de risque par commune pour différentes emprises inondables CARTINO dans le Gard.....	122
Figure 3.14: Application de l'indice de risque par commune pour différentes emprises inondables CARTINO dans le VAR	123
Figure 3.15: Application de l'indice de risque par commune pour différentes emprises inondables CARTINO dans les Alpes-Maritimes.....	124
Figure 3.16 : Illustration du choix de positionnement des points de calcul pour la méthode AIGA	126
Figure 3.17 : Illustration du morcellement de la zone inondable de chaque tronçon par commune pour l'estimation du risque de dommages.....	128
Figure 3.18 : Illustration du morcellement de la zone inondable de chaque tronçon par commune pour l'estimation du risque de dommages. Cas d'un morcellement rive gauche/rive droite.	129
Figure 4.1 : Classification des types de dommage dus aux inondations, en rouge le type de dommages traités dans le cadre de la thèse – (Vinet 2007) à partir de (Parker 2000).....	140
Figure 4.2 : Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle concernant une inondation par commune en France métropolitaine.....	147
Figure 4.3 : Vue globale des dommages intégrés dans la base de données DamaGIS par année de survenue ..	152
Figure 4.4: Répartition des dommages de DamaGIS par source d'information	153
Figure 4.5: Exemple d'informations sur les dommages disponibles dans les nouveaux médias (de gauche à droite : copie d'écran de la page Facebook de la Mosquée de Cannes ; extrait d'un article en ligne du journal Nice Matin ; tweet de la radio France Bleu Azur).....	154
Figure 4.6 : Distribution spatiale des dommages liés de la crue du 3 octobre 2015 selon leurs sources d'information	156
Figure 4.7: Modèle conceptuel représentant l'organisation de la base de données DamaGIS	157
Figure 4.8: Nombre de dommages par catégorie d'enjeux au sein de la base de données DamaGIS.....	161
Figure 4.9: Illustration de l'échelle d'endommagement pour l'évaluation de la sévérité des dommages	164

Figure 4.10: Nombre de dommages par évènement selon leur niveau de gravité.....	166
Figure 4.11: Domaines de compétence nécessitant des données de dommages liés aux inondations en France (Nussbaum 2017)	169
Figure 5.1 : Les TRI situés dans le sud de la France Métropolitaine - CETE (2012).....	174
Figure 5.2 : Carte de l'enveloppe inondable maximale disponible pour le bassin des Gardons avec la méthode CARTINO (TR1000)	176
Figure 5.3 : Carte de l'enveloppe inondable maximale disponible pour le bassin de l'Argens avec la méthode CARTINO (TR1000)	178
Figure 5.4 : Carte de l'enveloppe inondable maximale disponible pour les bassins de l'Argentière, de la Frayère et de la Brague avec la méthode CARTINO (TR1000).....	180
Figure 5.5: Comparaison des performances de 3 modèles à partir de la courbe de ROC.....	186
Figure 5.6: Exemple de AUROC.....	187
Figure 5.7 : Calcul de l'AUROC par la méthode d'intégration approchée.....	188
Figure 5.8: Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle de type inondation par commune (1998 – 2016) dans la zone d'étude du Var	190
Figure 5.9: Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle de type inondation par commune (1998 – 2016) dans la zone d'étude du Gard.....	191
Figure 5.10: Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle de type inondation par commune (1998 – 2016) dans la zone d'étude des Alpes-Maritimes	191
Figure 5.11: Calcul de scores à partir d'arrêtés CATNAT pour une chronique journalière de qualifications AIGA	194
Figure 5.12: Calcul de scores à partir d'arrêtés CATNAT pour une chronique journalière d'évaluation du risque de dommages.....	196
Figure 5.13 : Comparaison des scores CSI et AUROC obtenus avec la méthode AIGA et l'indice de risque à partir de données CATNAT pour les Alpes-Maritimes	198
Figure 5.14 : Comparaison des scores CSI et AUROC obtenus avec la méthode AIGA et l'indice de risque à partir de données CATNAT pour le Var.....	199
Figure 5.15 : Comparaison des scores CSI et AUROC obtenus avec la méthode AIGA et l'indice de risque à partir de données CATNAT pour le Gard	200
Figure 5.16 : CSI calculé par commune à partir de données CATNAT en fonction du ratio entre la surface d'emprise inondable CARTINO et EAIP.....	202
Figure 5.17 : Scores de POD et FAR classés par CSI croissant pour la zone d'études des Alpes-Maritimes.....	204
Figure 5.18 : Scores de POD et FAR classés par CSI croissant pour la zone d'études du Var.....	205
Figure 5.19 : Scores de POD et FAR classés par CSI croissant pour la zone d'études du Gard.....	206
Figure 5.20 : Calcul de scores à partir de données de dommage issues de DamaGIS pour un évènement donné	207
Figure 5.21 : Scores obtenus pour le CSI optimum par évènement.....	210
Figure 5.22 : Carte des cumuls de pluie sur 4 jours sur le Var du 24 au 27 novembre 2014	212
Figure 5.23 : Qualifications AIGA maximales obtenues lors de l'évènement du 25 au 27 novembre 2014	214
Figure 5.24 : Evaluation maximale du risque de dommages lors de l'évènement du 25 au 27 novembre 2014	214
Figure 5.25: Carte des cumuls de pluie relevés sur 3 jours du 1er au 3 octobre 2015.....	215
Figure 5.26 : Qualifications AIGA maximales obtenues lors du 3 octobre 2015.....	216
Figure 5.27 : Evaluation du risque de dommages lors du 3 octobre 2015	216

Table des tableaux

Tableau 1.1 : Racine étymologique et définition des différents termes en rapport avec l'anticipation des catastrophes naturelles, (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales 2009).....	10
Tableau 1.2 : Classifications des inondations vues par différents auteurs et bases de données	13
Tableau 1.3 : Typologie génético-descriptive des inondations, (Vinet 2010)	14
Tableau 1.4: Typologie des différents types d'inondations rapides	16
Tableau 1.5 : Terminologies désignant les crues à cinétique rapide dans la littérature et résultats de la recherche dans les titres de documents scientifiques	18
Tableau 1.6: comparaison des méthodes EPIC, ERIC et ERICHA.....	33
Tableau 2.1: Exemple de typologies de vulnérabilités dans la littérature	57
Tableau 2.2 : Typologie d'enjeux majeurs déduite de la BD TOPO.....	63
Tableau 2.3: Comparaison des problématiques d'aide à la décision multicritères, (en bleu la méthode sélectionnée dans le cadre de la thèse) – (Chakhar 2006)	65
Tableau 2.4: Types d'approches existantes pour l'agrégation des critères dans les méthodes d'aide à la décision (en bleu la méthode sélectionnée dans le cadre de la thèse)	66
Tableau 2.5 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de pondération (en bleu est surlignée la méthode sélectionnée dans le cadre de la thèse) – Adapté de Valdiserra (2017).....	69
Tableau 2.6: Exemple de comparaison des enjeux par paire (Renard, 2010).....	70
Tableau 2.7: Degré d'importance numérique de comparaison, (Saaty 1990).....	71
Tableau 2.8: Valeurs de RI pour 3 à 20 critères de comparaison (Alonso and Lamata 2006).....	72
Tableau 2.9 : Echantillon des communes interrogées	77
Tableau 2.10 : Score final de pondération par nature d'enjeu	82
Tableau 3.1 : Comparaison des emprises CARTINO et des EAIP.....	115
Tableau 4.1 : Comparaison des bases de données internationales EM-DAT, NATCAT et SIGMA), (Debarati Guha-Sapir and Regina Below 2002)	143
Tableau 4.2 : Classification des événements naturels selon leur niveau de gravité (Suzanne 1999)	148
Tableau 4.3 : Intégration des événements de crue survenus dans le Sud de la France depuis 2011 dans les bases de données existantes à accès libre	151
Tableau 4.4 : Typologie des enjeux endommagés.....	160
Tableau 5.1: Extrait du recensement des enjeux en zone inondable identifiés dans le TRI d'Alès en 2012	175
Tableau 5.2: Extrait du recensement des enjeux en zone inondable identifiés dans le TRI Est-Var en 2013	177
Tableau 5.3: Extrait du recensement des enjeux en zone inondable identifiés dans le TRI de Nice en 2013	179
Tableau 5.4 : Présentation simplifiée d'un test de diagnostic en épidémiologie	183
Tableau 5.5 : Table de contingence des alertes	184
Tableau 5.6 : Extrait du croisement de la chronique journalière AIGA avec les arrêtés CATNAT pour la commune d'Antibes dans les Alpes-Maritimes	193
Tableau 5.7 : Extrait de la chronique journalière des scores obtenus par la méthode AIGA à partir de données CATNAT pour un seuil d'avertissement fixé à TR=20 ans	194
Tableau 5.8 : Liste des événements de crue survenus dans les départements de nos zones d'étude par date... ..	208

Table des sigles

AHP : Analytic Hierarchy Process

AIGA : Adaptation d'Informations Géographiques à l'Alerte en crue

ANR : Agence Nationale de la Recherche

APIC : Avertissement aux pluies intenses à l'échelle des communes

ARAMIS : Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique

AVI : Aires Vulnérables Italiennes

AZI : Atlas de Zones Inondables

BASE : Bielefeld Academic Search Engine

BDHI : Base de Données Historiques sur les Inondations

BNBV : Base Nationale des Bassins Versants

CARTINO : CARTographie des INondations

CEMAGREF : Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts

CCR : Caisse Centrale de Réassurance

CEREMA : Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CI : Indice de Cohérence

CNRTL : Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales

CRED : Centre de la Recherche sur l'Epidémiologie des Catastrophes

CSI : Critical Success Index

DFO : Dartmouth Flood Observatory

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DRI : Disaster Risk Index

EAIP : Enveloppes Approchées des Inondations Potentielles

EFAS : European Flood Awareness System

EM-DAT : Emergency Events Database

EPIC : European Precipitation Index based on simulated Climatology

EPRI : Evaluation Préliminaire du Risque Inondation

ERIC : Extreme Runoff Index based on simulated Climatology

ERICHA : European Rainfall-InduCed Hazard Assessment system

EXZECO : EXtraction des Zones de concentration des ÉCOulements

FAR : False Alarm Rate

FFG : Flash Flood Guidance

FST : Fuzzy Sets Theory

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du climat

GR : Génie Rural

HDR : Habilité à Diriger des Recherches

HSV/C : Hazard, Susceptibility, Vulnerability/capacity of recovery

HyMeX : Hydrological cycle in Mediterranean experiment

IFSTTAR : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

IGE : Institut des Géosciences de l'Environnement

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

IR : Indice de risque

IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

ISO : organisation internationale de normalisation

MAUT : Multi-Attribute Utility Theory

MCT : Ministère de la Cohésion du Territoire

MTES : Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

NWS : National Weather Service

ONRN : Observatoire National des Risques Naturel

ONU : Organisation des Nations Unies

OPERA : Operational Program for the Exchange of weather Radar information

PACA : Provence Alpes Côte d'Azur

PER : Plan d'Exposition aux Risques

PHEC : plus hautes eaux connues

PICS : Prévision Immédiate intégrée des Impacts des Crues Soudaines

POD : Probability of Detection

POFD : Probability of False Detection

PPR : Plan de Prévention du Risque

PPRI : Plan de Prévention du Risque Inondation

RC : Ratio de Cohérence

RFC : River Forecast Centers

RI : Indice de cohérence aléatoire

RHYTMME : Risques Hydrométéorologiques en Territoires de Montagne et Méditerranéens

ROC: Receiver Operating Curve

SCHAPI : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations

SDIS : Services Départementaux d'Incendie et de Secours

SHELDUS : Spatial Hazard Events and Losses Database for the United States

SHYPRE : Simulation d'HYdrogramme pour la PREdétermination des crues

TRI : Territoires à Risque Important d'Inondation

UH : Unités d'Hydrométrie

UNISDR : United Nations International Strategy for Disaster Reduction

WFO : Weather Forecast Office

Introduction générale

En 2017, le coût économique des catastrophes naturelles à travers le monde a été estimé entre 306 milliards de dollars par la Swiss Re et 330 milliards par la Munich Re. (Swiss Re Institute 2017, Munich RE 2017). Parmi les catastrophes naturelles les plus dommageables, les inondations occupent une place centrale. En effet, entre 1995 et 2015 les inondations représentent à elles seules 43% des événements naturels dommageables enregistrés dans le monde. Ainsi, sur cette même période, elles ont causé plus de 662 milliards de dollars de dommages économiques et affecté 2.3 milliards de personnes à l'échelle mondiale (Wallemacq et al. 2015).

En comparaison, le montant des dommages économiques attribués aux feux de forêt et glissements de terrain sur la même période se monte à 100 milliards de dollars tandis que le nombre de personnes affectées par ces deux phénomènes est estimé à 8 millions d'individus. Quant aux catastrophes causées par des aléas géophysiques, si elles ont causé plus de dommages économiques que les inondations entre 1995 et 2015 à savoir 787 milliards de dommages, les séismes ont par exemple affecté 20 fois moins de personnes que les inondations seules.

Sur le site internet du Ministère Français de la Transition écologique et solidaire, il est possible de lire qu'en France « le risque inondation est le premier risque naturel par l'importance des dommages qu'il provoque, le nombre de communes concernées, l'étendue des zones inondables (27 000 km²) et les populations résidant dans ces zones (5,1 millions de personnes). Ce risque concerne 16 000 communes dont 300 agglomérations » (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2018).

Malgré l'omniprésence de ce risque sur le territoire français, seuls 20 000 des 120 000 km de cours d'eau du réseau hydrographique bénéficient d'une surveillance et d'un suivi. Pourtant, le besoin d'avertir le risque de dommages sur les petits cours d'eau actuellement non surveillés est régulièrement rappelé par la survenue de crues rapides aux conséquences désastreuses. Les services de protection civile, les maires, les services de l'Etat sont en demande de prévisions plus fines sur les petits bassins versants non instrumentés sachant que la moitié des décès liés aux crues sur le pourtour méditerranéen français ont lieu sur les bassins versants de moins de 150 km² (Boissier 2013). Par ailleurs, la descente à des échelles fines de prévision hydrométéorologique pose le problème de la spécificité de chaque bassin versant : spécificité physique mais aussi humaine. Un événement de période de retour 50 ans n'aura évidemment pas les mêmes conséquences dans une vallée du Mercantour et sur la Côte d'Azur.

Ainsi, les inondations catastrophiques de 2014 et 2015 sur l'Arc Méditerranéen ont conduit à la mise en place début 2017 d'un nouveau système d'avertissement des crues appelé Vigicrues Flash. Ce système couvrait début 2018 plus de 10 000 communes soit une grande partie du réseau hydrographique non surveillé. Cependant son fonctionnement ne s'appuie que sur la caractérisation de l'intensité de l'aléa crue et ne prend pas en compte l'occupation du sol. Ainsi les avertissements issus de Vigicrues-Flash ne permettent pas de caractériser le risque de dommages liés aux crues.

➤ Les objectifs de la thèse

Avertir efficacement la survenue des inondations est un maillon essentiel de la chaîne de l'alerte en France. Or, l'estimation de l'intensité de la crue d'un cours d'eau ne suffit pas à générer un avertissement efficace. Pour le générer, il est nécessaire de prendre en compte les conséquences potentielles de cette crue en zone inondable (Pappenberger et al. 2007).

L'objectif principal de la thèse est donc de proposer une méthode d'évaluation du risque de dommages liés aux crues rapides, fondée d'une part sur la qualification de l'intensité de l'aléa crue et d'autre part sur la prise en compte de la vulnérabilité du territoire, sous la forme d'un indice de risque. Cependant, à la différence des méthodes d'évaluation du risque statique, nous explorerons la possibilité d'offrir des avertissements dynamiques afin d'estimer le risque de dommages potentiels en temps réel.

La réalisation de cet objectif soulève notamment les trois problématiques suivantes :

- Comment passer de l'aléa crue au risque de dommages liés aux inondations ?
- Comment passer d'une caractérisation « statique » à une caractérisation « dynamique » du risque de dommages ?
- Comment passer d'une évaluation qualitative à une évaluation exhaustive ?

➤ Zone d'étude

Chaque année en automne, les 15 départements de l'Arc Méditerranéen sont particulièrement touchés par des épisodes de pluies intenses pouvant conduire à des crues rapides aux conséquences dommageables souvent importantes. Lors de l'épisode du 15 juin 2010 dans le Var, il est tombé 461 mm près de Draguignan en moins de 12 heures soit l'équivalent de 6 mois de précipitations. Les pluies intenses ont généré la crue de La Nartuby qui a atteint entre 360 et 520 m³/s à Trans-en-Provence (Payrastré et al. 2012). Cet événement a généré 450 millions d'euros de dommages selon la Caisse Centrale de Réassurance notée CCR (2017). Lors de l'épisode du 3 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes, il est tombé 195 mm à Cannes dont 175mm en 2 heures et 178 mm à Mandelieu dont 156 mm en 2 heures. Cet épisode a généré 520 millions d'euros de dommages selon la CCR.

Ces deux événements illustrent la violence des événements survenant au niveau de l'Arc Méditerranéen. La Figure 0.1 présente par département la fréquence moyenne d'observation d'épisodes de pluie supérieurs à 200mm en 24h. On peut y voir que l'Arc Méditerranéen est particulièrement concerné avec notamment une période de retour quasi annuelle de tels événements pour les départements du Gard et de l'Ardèche.

En s'appuyant sur cette fréquence d'observation des pluies extrêmes et sur la densité de l'occupation du sol qui le rendent particulièrement exposé à la survenue de dommages liés aux inondations, nous avons choisi de faire de l'arc méditerranéen notre zone d'étude.

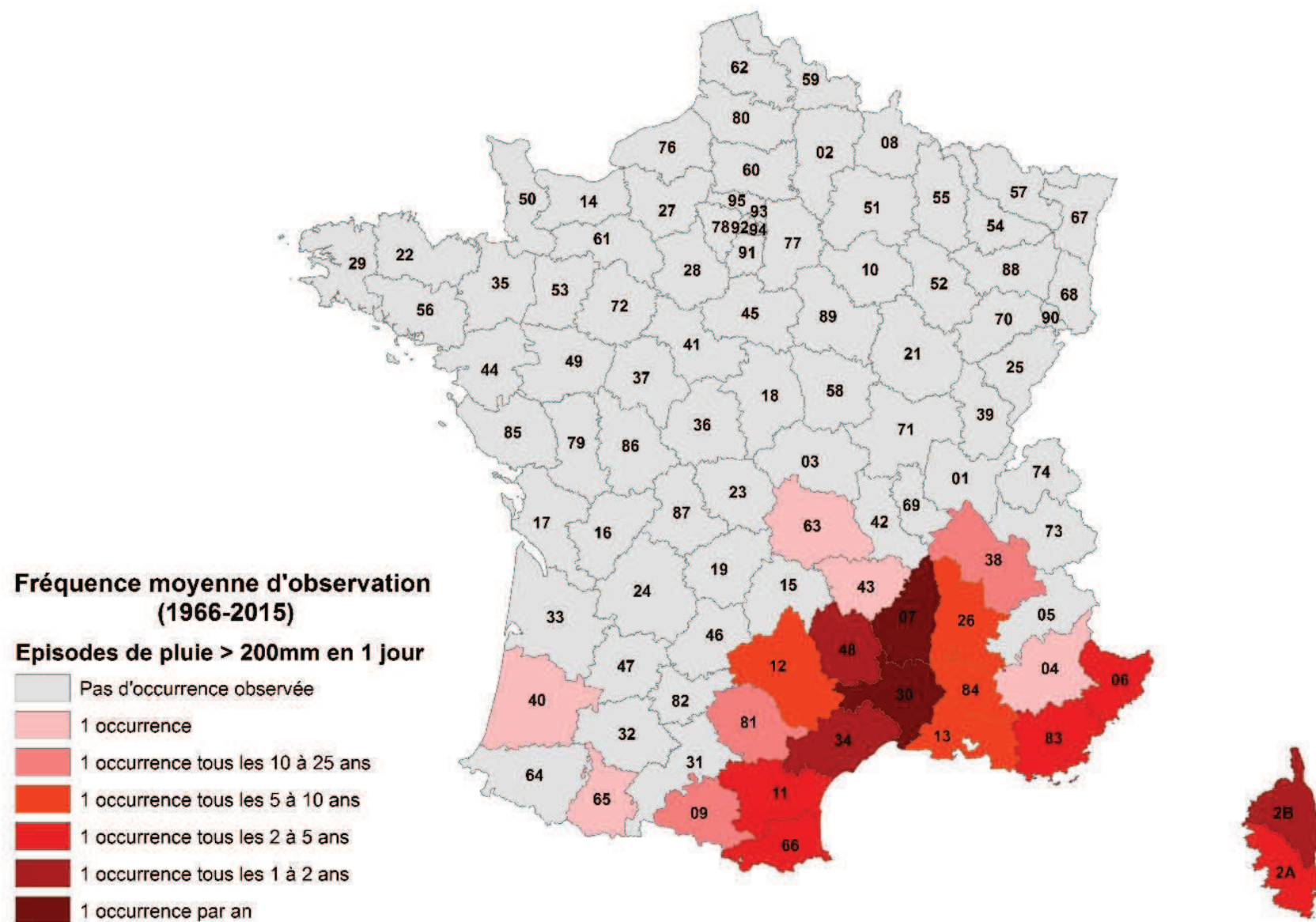


Figure 0.1: Fréquence moyenne d'observation des cumuls de pluies supérieurs à 200 mm en 24h, (Météo-France 2018)

➤ Structure de la thèse

Le manuscrit de thèse s'articule autour de 5 chapitres.

Le Chapitre 1 a pour objectif de présenter différentes méthodes d'évaluation de l'aléa crue et de souligner la nécessité de compléter ces méthodes pour évaluer le risque inondation. Une première partie de ce chapitre s'intéresse à la définition des crues rapides. Elle comporte une présentation de leurs différents mécanismes, de leurs caractéristiques ainsi que des zones où elles sont susceptibles de survenir. Une seconde partie de ce chapitre porte sur la présentation des systèmes d'avertissement existants pour se prémunir des crues rapides en France, en Europe aux Etats-Unis. Enfin, une présentation détaillée d'une méthode d'avertissement particulière appelée méthode AIGA est proposée. La fin de ce chapitre constitue la genèse de cette thèse et introduit la nécessaire prise en compte des enjeux dans l'anticipation du risque de dommages.

Le Chapitre 2 s'intéresse à l'évaluation de la deuxième composante du risque, à savoir les enjeux exposés à l'aléa. Après une première partie portant sur la terminologie propre à la caractérisation des enjeux, une seconde partie cherche à mesurer la vulnérabilité territoriale comme paramètre d'évaluation de ces enjeux. Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité territoriale est proposée à partir d'une méthode bottom-up s'appuyant sur un panel d'experts du risque inondation. Les résultats obtenus sont analysés selon le profil des experts interrogés et leur commune d'origine. La fin de ce chapitre introduit enfin la nécessité d'une évaluation combinée de l'aléa hydrologique et des enjeux afin de caractériser le risque inondation dans son ensemble.

Le Chapitre 3 a pour but de présenter une méthode innovante d'évaluation du risque de dommages liés aux inondations, fondée sur la combinaison de données d'aléa issues de la méthode AIGA et de la méthode d'évaluation de vulnérabilité territoriale présentée dans le chapitre précédent. Une première partie de ce chapitre s'intéresse aux méthodes existantes d'évaluation du risque inondation en France. Dans le but de caractériser le risque propre à chaque territoire en fonction de l'intensité de l'aléa, différentes méthodes de délimitation de la zone inondable sont ensuite évaluées pour choisir la plus adaptée à notre démarche et y appliquer notre méthode. La fin de ce chapitre introduit la nécessité d'acquérir des données de dommages dans le but d'évaluer la méthode présentée.

Le Chapitre 4 introduit les différentes données de dommages mises en œuvre dans le cadre de la thèse. Après une présentation des bases de données existantes pour le sud de la France, nous décrivons une base de données spécifique DAMAGIS spécialement élaborée dans le cadre de la thèse. Les bases de données Gaspar et DAMAGIS présentées dans ce chapitre vont servir à l'évaluation de l'indice de risque respectivement à l'échelle communale et infra-communale, dans le chapitre suivant.

Le Chapitre 5 enfin sera dédié au choix ainsi qu'à l'application d'une méthode d'évaluation de l'indice de risque et des avertissements AIGA comparativement. Nous présenterons les critères de qualité considérés pour tester les différentes approches, ainsi que les scores choisis pour les quantifier. Une approche exhaustive au niveau communal sera proposée ainsi qu'une approche spatiale par évènement de crue.

Chapitre 1 : Compléter la chaîne d'alerte aux inondations

1. Caractéristiques des inondations.....	12
1.1. Définitions : de la crue à l'inondation.....	12
1.2. Typologie des inondations	13
Inondation à cinétique lente	15
Inondation à cinétique rapide	15
1.3. Les crues rapides	17
Terminologie des crues rapides	17
1.4. Formation des crues rapides.....	20
2. Les chaîne d'alerte aux inondations à travers le monde.....	24
2.1. Exemples de chaînes d'alerte aux inondations dans le monde	24
Aux Etats-Unis : le fonctionnement du National Weather Service	24
En Europe : le système européen d'alerte aux inondations EFAS.....	26
En France : le système Vigicrues.....	28
2.2. Les chaînes d'alertes dédiées aux crues rapides.....	31
Le Flash Flood Guidance aux Etats-Unis	31
En Europe : De EPIC à ERICHA.....	32
En France : APIC et Vigicrues flash	34
3. La méthode AIGA	37
3.1. Présentation de la méthode	38
AIGA PLUVIO	39
AIGA HYDRO	41
3.2. Travaux de thèses antérieurs.....	44
Amélioration du modèle hydrologique par l'assimilation de données.....	44
Incertitudes et prévision d'ensembles	44
Adaptation au milieu montagneux et évaluation de la méthode.....	45
Conclusion du chapitre et positionnement de la thèse	46

Chapitre 1 : Compléter la chaîne d'alerte aux inondations

« Luno panlo, l'aigo davallo. »

« Lune qui pâlit, d'eau nous avertit. »

« Cla d'en bas, montagn' escuro, plejho seguro. »

« Si la plaine est sereine et la montagne obscure, la pluie alors est toujours sûre »

Proverbes cévenols

Quelles sont les caractéristiques spécifiques à l'alerte des crues rapides ?
Quelles sont les méthodes existantes pour avertir de la survenue des inondations en France et dans le monde ?
Qu'apporte la méthode AIGA à la chaîne d'alerte des inondations et comment la compléter ?

Introduction du chapitre

L'alerte aux inondations n'est pas la simple annonce d'un événement hydrologique à venir mais elle s'intègre dans une véritable chaîne composée de prévisions, d'observations, de vigilances et d'avertissements en amont, jusqu'aux retours d'expérience en aval (Gruntfest and Handmer 2001). L'ensemble de ces éléments forme la chaîne de l'alerte aux inondations.

En France, cette chaîne de l'alerte aux inondations repose sur un certain nombre d'acteurs et d'outils permettant, en théorie, d'obtenir une information préalable sur la survenue d'un événement de crue et ainsi de préparer cet événement pour en limiter les conséquences négatives potentielles. Mais dans la pratique, cette chaîne d'alerte comporte de nombreuses incertitudes et difficultés de mise en place au niveau opérationnel.

Or, l'alerte revêt un enjeu particulièrement important pour la gestion du risque inondation. De nombreux auteurs se sont attachés à montrer combien la multiplication de fausses alertes et d'alertes manquées peut entraîner une perte de confiance des destinataires de ces alertes, pouvant aller jusqu'à la création de réseaux d'alerte officieux en concurrence avec les réseaux officiels (Affeltranger and de Richemond 2003, Parker and Handmer 1998).

Dans le domaine des risques naturels, un flou sémantique est né de la multiplication de termes autour de l'idée d'anticipation des catastrophes. Plusieurs auteurs se sont intéressés aux relations entre prévision et alerte (Gerard et al. 2013, Daupras 2015, Belin and Moulin 2016) mais une confusion demeure autour de la signification d'avertissement et de vigilance, ainsi que de la manière dont ces différentes notions s'articulent entre elles. Le Tableau 1.1 présente l'étymologie de ces différents termes et en propose une définition.

Tableau 1.1 : Racine étymologique et définition des différents termes en rapport avec l'anticipation des catastrophes naturelles, (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales 2009)

Terme	Racine ETYMOLOGIQUE	DEFINITION
Prévision	Du latin praevisio « <i>action de prévoir, connaissance anticipée</i> ».	Observation d'un ensemble de données qui permet d'envisager une situation future et d'entreprendre des actions pour y parer concrètement.
Vigilance	Du latin vigilantia « <i>habitude de veiller, soin vigilant, attention</i> ».	Attention soutenue à veiller sur quelqu'un ou quelque chose; surveillance attentive, sans défaillance.
Alerte	Du vieux français a l'herte « <i>à la garde, en garde</i> ».	Signal, généralement sonore, ou appel avertissant d'un danger imminent et engageant à prendre les dispositions nécessaires pour l'éviter.
Avertissement	Du latin advertere « <i>tourner son esprit vers, diriger son attention vers quelque chose</i> »	Appel à l'attention de quelqu'un pour le garder d'une chose fâcheuse, d'un danger; mise en garde

On peut voir dans ce tableau que la notion de prévision renvoie à l'anticipation, à partir d'observations et de calculs, de la survenue d'un événement à venir. Elle se distingue notamment de la notion de vigilance qui évoque une attention soutenue portée à un événement en cours ou à venir. La notion d'avertissement peut quant à elle être définie comme l'annonce d'un danger probable, attendu dans un temps proche. Enfin, l'alerte se définit comme l'action de signaler un danger imminent.

Ces différents éléments qui composent la chaîne de l'alerte relèvent de plusieurs temporalités différentes et ne dépendent pas des mêmes acteurs. Pour un événement de crue survenant un jour J nous avons donc une organisation de la chaîne de l'alerte telle que présentée dans la Figure 1.1.

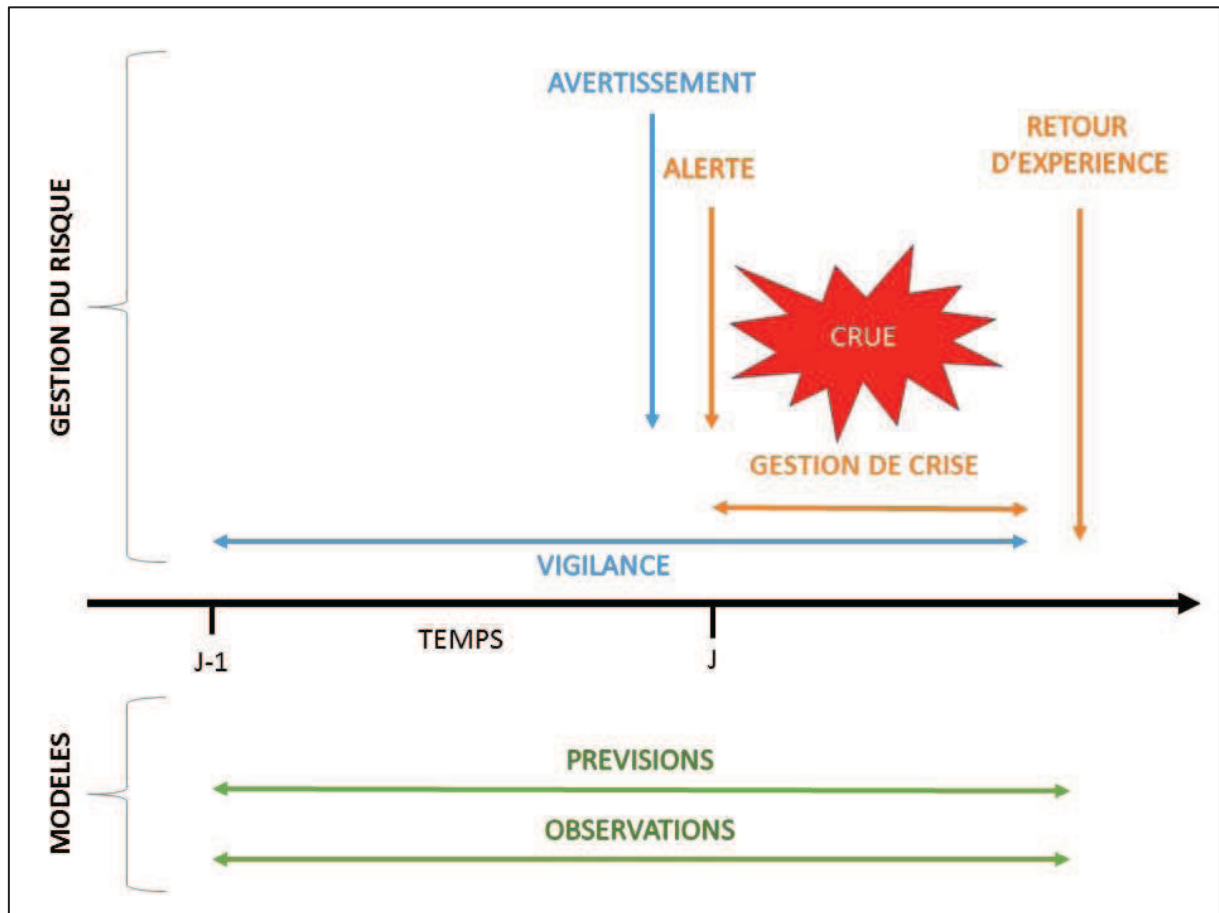


Figure 1.1 : Schéma simplifié illustrant une chaîne de l'alerte aux inondations

L'objectif de ce chapitre est de présenter le contexte de la chaîne de l'alerte aux inondations en France, afin d'identifier quels en sont les besoins actuels et comment la thèse va pouvoir y apporter un élément de réponse. Cet état de l'art va mettre en exergue le besoin de compléter la chaîne actuelle par la mise en place d'une nouvelle méthode d'avertissement du risque de dommages liés aux inondations en appui à une méthode d'avertissement de l'aléa existante appelée méthode AIGA. Pour cela, il est nécessaire de définir ce qu'est une inondation afin d'identifier les spécificités liées à son anticipation selon ses caractéristiques.

1. Caractéristiques des inondations

1.1. Définitions : de la crue à l'inondation

Par définition, la crue d'un cours d'eau correspond à une augmentation de son niveau d'eau due à l'augmentation de son débit. Elle peut être caractérisée par :

- L'intensité de la crue, dite également magnitude : elle se mesure par la hauteur de submersion (en mètre) ou le par le débit de pointe (en mètre cube par seconde),
- La forme de son hydrogramme, qui permet de donner une information sur la temporalité de la crue c'est-à-dire sur la vitesse de montée des eaux, la durée de la crue et la vitesse de la décrue.

La crue d'un cours d'eau dépend de la réponse hydrologique du bassin versant qu'il draine. Les caractéristiques de cette réponse reposent sur un certain nombre de facteurs tels que les précipitations (intensité, durée, répartition spatiale), les conditions climatiques du milieu (température, vent, type de précipitations), la morphologie du bassin versant (forme, pente, taille), la nature et l'humidité des sols, le couvert végétal ou encore l'occupation du sol.

A la différence de la crue qui n'est pas toujours synonyme de débordement, l'inondation peut être définie comme « *la submersion temporaire par l'eau d'un espace normalement non immergé* » (Commission des Communautés Européennes 2006). Ainsi, le terme inondation renvoie plutôt à une notion de géomorphologie. Ce terme désigne aussi bien le débordement d'un cours d'eau de son lit mineur que le remplissage d'une cuvette topographique par l'eau. Ainsi, toutes les crues ne conduisent pas à la survenue d'inondations, et les inondations ne sont pas toutes dues à la crue d'un cours d'eau.

1.2. Typologie des inondations

Il existe de nombreuses classifications des types d'inondations dans la littérature. Plusieurs caractéristiques peuvent être prises en compte afin de les différencier. Parmi elles, on peut notamment retrouver le facteur déclenchant, la durée de submersion, le débit, ou encore la taille de la zone affectée. Dans le Tableau 1.2 sont répertoriés quelques exemples de typologies d'inondations présentes dans la littérature.

Tableau 1.2 : Classifications des inondations vues par différents auteurs et bases de données

Perry (2000)	Submersion marine	Inondation rapide	Débâcle glaciaire	Inondation locale	Rupture d'ouvrage	Coulée de boue
Berz et al. (2001), Barredo (2007)	Submersion marine	Inondation rapide	Inondation de rivière			
Jonkman (2005)	Submersion marine	Inondation rapide	Inondation de rivière	Problème de drainage	Tsunami	Raz-de-marée
Mandych (2009)	Submersion marine	Inondation rapide	Inondation de plaine	Remontée de nappe	Ruissellement	
Creutin et al. (2013)	Instantanée	Inondation rapide	Lente			
Guha-Sapir, Below and Hoyois (2018)	Submersion marine	Inondation rapide	Inondation de rivière	Débâcle glaciaire		
Direction Générale de la Prévention des Risques (2018)	Submersion marine	Torrentielle ou rapide	Inondation de rivière	Remontée de nappe	Lave torrentielle	Ruissellement ou coulée de boue
Dartmouth Flood Observatory (2018)	Submersion marine	Tempête	Rupture d'ouvrage	Débâcle glaciaire	Tsunami	Ruissellement

Le Tableau 1.3 présente quant à lui une typologie génético-descriptive proposée par Vinet (2010). Cette classification distingue les types d'inondations en fonction des causes principales ou secondaires de leur survenue.

Tableau 1.3 : Typologie génético-descriptive des inondations, (Vinet 2010)

	Cause principale	Causes secondaires ou facteur aggravant	Manifestation	Principales zones exposées	Exemple
1 - Inondations d'origine météorologique directes	Pluies intenses	Pente forte	Crue torrentielle	Zone montagneuse	Le Grand Bornand (1987)
	Pluies peu intenses	Fonte nivale Remontée de nappe	Inondation lente (cumulative)	Plaine	Seine (1910)
	Fonte glaciaire	Rupture de bouchon de glace	Débâcle	Sibérie, Canada, Alaska	
	Fonte nivale	Fortes précipitations	Crue brutale	Fond de vallée	
	Tempête	Marée	Marée de tempête	Zone littorale	Xynthia (2010)
2 - Inondations d'origine météorologique indirectes	Rupture lac glaciaire	Fonte ou écoulement de glacier, séisme	Crue brutale	Zone montagneuse	Yungay, Pérou (1970)
	Glissement de terrain	Fortes précipitations	Rupture de barrage naturel	Zone montagneuse	Josefina, Equateur (1993)
3 - Inondations d'origine non météorologique	Eruption volcanique	Fonte glaciaire	Fonte de neige ou de glace, lahar	Pourtour du Pacifique	Eruption du Merapi, Indonésie (2010)
	Séisme, éruption volcanique, glissement de terrain sous-marin		Tsunami	Pourtour du Pacifique	Océan indien (2004)
4 - Inondations d'origine anthropique (risque technologique)	Rupture de digue	Crue fluviale	Submersion des zones basses	Plaines fluviales ou littorales	Nouvelle-Orléans, Etats-Unis (2005)
	Rupture de barrage		Onde de submersion à l'aval		Malpasset (1959)

On retiendra de ces différentes typologies, que deux éléments principaux permettent de classer les inondations à savoir leur échelle temporelle (cinétique) et leur échelle spatiale (zone de survenue, étendue de l'inondation). Ainsi, afin de différencier les chaînes d'alerte qui les caractérisent nous avons choisi de nous rapprocher d'une typologie classique des inondations, basée sur la cinétique des phénomènes étudiés. Une distinction est donc proposée entre d'un côté les inondations à cinétique lente et de l'autre celles à cinétique rapide. Une définition de chaque type d'inondation considéré est proposée ci-après.

Si plusieurs auteurs ont choisi d'intégrer les phénomènes de type lave torrentielle et coulée de boue à leurs typologies des inondations, nous avons préféré les exclure. En effet, nous considérons qu'ils ne correspondent pas à la définition d'inondation adoptée dans ce manuscrit.

Inondation à cinétique lente

- **Inondation de plaine** : il s'agit d'une inondation qui survient en zone de plaine suite à des précipitations peu intenses réparties sur une période de temps importante. En fonction de la topographie, ces inondations peuvent être très étendues dans l'espace et la décrue peut durer plusieurs jours voire plusieurs semaines. Ces inondations touchent principalement les grands bassins versants. Par exemple, on peut citer les inondations de la Loire en 1956 ainsi que celles de la Seine en 1910.
- **Inondation par remontée de nappes** : il s'agit d'une inondation causée par l'apport de précipitations pluvieuses à une nappe phréatique dont le niveau est déjà haut. La nappe ne pouvant évacuer l'eau précipitée, son niveau monte jusqu'à déborder en surface. Exemple : inondations de la Somme en avril 2001.

Inondation à cinétique rapide

Gourley et al. (2012) caractérisent les inondations à cinétique rapide comme présentant « *un débit rapide et extrême de hautes eaux dans une région normalement sèche, ou une augmentation rapide du niveau de l'eau dans un torrent ou un ruisseau supérieur à un niveau de crue prédéterminé commençant dans les 6 heures suivant l'événement déclencheur (pluies intenses, rupture de digue ou de barrage, embâcle de glace)* ».

Selon cette définition, les inondations à cinétique rapide peuvent avoir divers éléments déclencheurs. A partir de la nature de ces éléments, nous avons choisi de différencier six types d'inondations selon une classification génético-descriptive dans le Tableau 1.4.

On peut ainsi distinguer d'un côté les phénomènes dits non-climatiques et de l'autre les phénomènes dits climatiques :

- Les **phénomènes dits non-climatiques** ne peuvent être prévus à l'avance, car ils découlent d'un aléa d'origine géodynamique (séisme) ou de la défaillance technique d'un ou de plusieurs ouvrages. Cependant, dans le deuxième cas, un dimensionnement adapté en amont de la construction de ces ouvrages, leur entretien ainsi que leur suivi permettent de prévenir la survenue de ces inondations.

- Les **phénomènes dits climatiques** reposent sur la survenue de fortes précipitations dont les conséquences peuvent être alourdies par des facteurs aggravants tels que la fonte du manteau neigeux, le type de sol... Ces phénomènes peuvent être prévus à l'avance avec une précision variable.

Dans la prochaine section nous nous focaliserons plus en détail sur les inondations de type crue rapide, dont l'anticipation répond à des logiques particulières selon leurs caractéristiques.

Tableau 1.4: Typologie des différents types d'inondations rapides

Catégorie	Type	Définition	Causes	Exemple
Phénomène climatique	Crue rapide	Inondation caractérisée principalement par la vitesse de montée des eaux brutale dans un cours d'eau.	Fortes précipitations, fonte des neiges	Crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (Vaucluse), 1992
	Ruissellement	Inondation causée par de fortes précipitations sur des sols avec un fort coefficient de ruissellement	Fortes précipitations	Inondations de Nîmes (Gard), 1988
	Submersion marine	Inondation de la zone côtière par la mer	Tempête, vent, marée	Tempête Xynthia (Vendée), 2010
	Débâcle glaciaire	Inondation brutale causée par la rupture d'un lac de barrage sous-glaciaire ou de la vidange d'un lac morainique	Eruption volcanique, fonte des neiges	Jökulhlaups ayant suivi l'éruption de l'Eyjafjallajökull (Islande), 2010, Grímsvötn (Islande), 1996
	Rupture d'embâcle de glace, « ice jam flood »	Rupture d'une accumulation de glace flottante dans un cours d'eau qui empêche son écoulement à l'aval et entraîne une rétention de l'eau à l'amont	Changement de température, défaillance structurelle	Destruction du pont de Honeymoon (Ontario, Etats-Unis), 1983
Phénomène non-climatique	Rupture d'embâcle	Rupture d'un embâcle formé par le charriage de matériaux (végétation, débris) dans un cours d'eau	Défaillance structurelle, montée du niveau d'eau	Rupture d'embâcle à Lamalou-les-Bains (Hérault), 2014
	Tsunami	Déplacement d'une importante masse d'eau sur des territoires habituellement hors d'eau	Séisme, éruption volcanique, mouvement de terrain	Tsunami de l'aéroport de Nice (Alpes-Maritimes) en 1979
	Rupture de barrage	Inondation brutale causée par la rupture d'un ouvrage de type barrage	Important niveau d'eau dans la rivière, défaillance structurelle	Rupture du barrage de Malpasset (Var), 1959
	Rupture de digue	Inondation brutale causée par la rupture d'un ouvrage de type digue	Important niveau d'eau dans la rivière, défaillance structurelle	Rupture de digues suite à la crue du Rhône à Tarascon (Bouches-du-Rhône), 2003

1.3. Les crues rapides

Terminologie des crues rapides

Les crues à cinétique rapide sont désignées par une multitude de termes dans la littérature spécialisée. Ainsi dans sa thèse, Douvinet (2008) souligne lui aussi cette absence de consensus terminologique et recense plus de 12 termes différents afin de nommer ce même phénomène. Afin d'identifier et de définir ce que sont les crues rapides, il est donc nécessaire de voir ce qui distingue ces différentes terminologies. Le Tableau 1.5 recense les plus usitées dans la littérature scientifique en Français, ainsi que leur définition propre.

Dans ce même tableau, nous avons cherché à évaluer de manière innovante la fréquence de l'utilisation de ces différentes dénominations par les chercheurs dans la littérature scientifique. Pour cela, dans le Tableau 1.5 figure également le nombre de résultats obtenus en rentrant chacun de ces termes individuellement dans les moteurs de recherche de publications scientifiques suivants :

- Google Scholar est un moteur de recherche mis en place par Google (Etats-Unis) en 2004, inventoriant les publications pouvant intéresser le monde universitaire. Si Google ne fournit pas directement de chiffres sur son contenu, des chercheurs indépendants l'estimaient en 2014 à plus de 160 millions de documents. (Orduña-Malea et al. 2015) pour une exhaustivité estimée à 80% minimum dans la langue anglaise.
- BASE (Bielefeld Academic Search Engine) est une base de données issue d'un projet visant à promouvoir les archives ouvertes, gérée par la Bibliothèque Universitaire de Bielefeld (Allemagne) depuis 2004 (Summann and Lossau 2004). Elle compte plus de 120 millions de documents issus de plus de 6000 sources différentes.
- Microsoft Academic est un moteur de recherche public mis en place par Microsoft Research en 2016. Il compte plus de 375 millions d'entrées dont 170 millions d'articles scientifiques.

Ainsi pour chaque dénomination, une recherche a été effectuée dans les titres de documents pour l'ensemble de l'expression donnée (exemple : « crue cévenole »), au singulier ainsi qu'au pluriel.

Tableau 1.5 : Terminologies désignant les crues à cinétique rapide dans la littérature et résultats de la recherche dans les titres de documents scientifiques

Terminologie	Définitions	Google Scholar	Base	Microsoft Academic
Crue cévenole	« La crue cévenole correspond à de violentes précipitations qui s'abattent sur les Cévennes (Ardèche, Gard, Cèze) et survient en septembre-octobre » (Antonelli and Provansal 2003)	10	3	6
Crue méditerranéenne	« La crue méditerranéenne extensive est générée par des précipitations qui touchent l'ensemble des affluents avals du Rhône (Ardèche, Gard, Cèze mais surtout Drôme et Durance). Elle survient en octobre-novembre, parfois au début du printemps. » (Antonelli and Provansal 2003)	13	4	34
Crue brutale	« On peut dire qu'une crue est brutale lorsque son apparition est soudaine, son temps de montée rapide et le débit spécifique de sa pointe relativement important. On peut ajouter que très souvent une telle crue est difficilement prévisible » (Roche 1975)	10	3	2
Crue soudaine	« Les crues soudaines se distinguent par quatre traits marquants [...] : leur total atypisme par rapport aux données moyennes des cours d'eau concernés [...], leur difficile prévisibilité [...], la rapidité de leur montée [...], enfin corrélativement à cette rapidité leur puissance et leur violence » (Météo-France)	6	5	7
Crue éclair	« Crues soudaines provoquées par des événements pluvieux orageux » (Gaume 2002)	71	77	22
Crue rapide	« Crues rapides se produisant sur des surfaces de 500 km ² à 5000 km ² pendant 6 à 36 heures avec un temps de concentration de moins de 12 heures pour des bassins de 1 000 km ² , avec des débits de pointe de crue centennale pouvant se situer entre 500 et 5 000 m ³ /s selon les régions » (Dauge 1999)	59	231	40

Crue subite	« Arrivées massives et soudaines d'eau qui dévalent les pentes vers les zones les plus basses » (Gautier 2018)	3	0	1
Crue torrentielle	« Crues accompagnées d'une charge solide élevée, dans les Alpes, au nord de la vallée de l'Ubaye » (Ballandras 1993)	41	31	0
Crue instantanée	« Crues instantanées brèves dues à des pluies d'orage de quelques dizaines à plus de cent mm / heure pendant une à deux heures sur quelques hectares à quelques km ² sans possibilité de les localiser précisément, ni les prévoir, on admet qu'elles ont une possibilité d'occurrence uniforme sur une surface importante avec même loi de probabilité d'intensité » (Dauge 1999)	0	0	0

La multiplication des terminologies est spécifique à la langue française alors qu'en anglais une même dénomination de « Flash Flood » est utilisée pour qualifier l'ensemble des inondations à cinétique rapide. Elle retourne ainsi plus de 3760 résultats sur le moteur de recherche Google Scholar, 4475 sur Microsoft Academic et 2031 sur BASE.

Après analyse de ce tableau, nous pouvons voir que les dénominations de « crue éclair » et « crue rapide » sont les plus usitées dans le monde académique selon les trois moteurs de recherche retenus. Ainsi, nous avons choisi d'utiliser la terminologie de crue rapide car il s'agit de la plus générale et englobante. Si des différences peuvent apparaître dans la définition de chacun des termes, leur point commun reste la cinétique du phénomène. Il est important de souligner que cette pluralité de définitions crée un flou autour de l'objet « crue rapide ». En effet, selon les auteurs le même phénomène n'aura pas la même dénomination.

1.4. Formation des crues rapides

Les crues rapides sont définies par l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques comme des « *crues dont l'apparition est soudaine, souvent difficilement prévisible, de temps de montée rapide et de débit relativement important. Ces crues sont donc généralement liées à des épisodes pluvieux intenses et se manifestent sur des bassins de taille modérée* » (Gaume 2002).

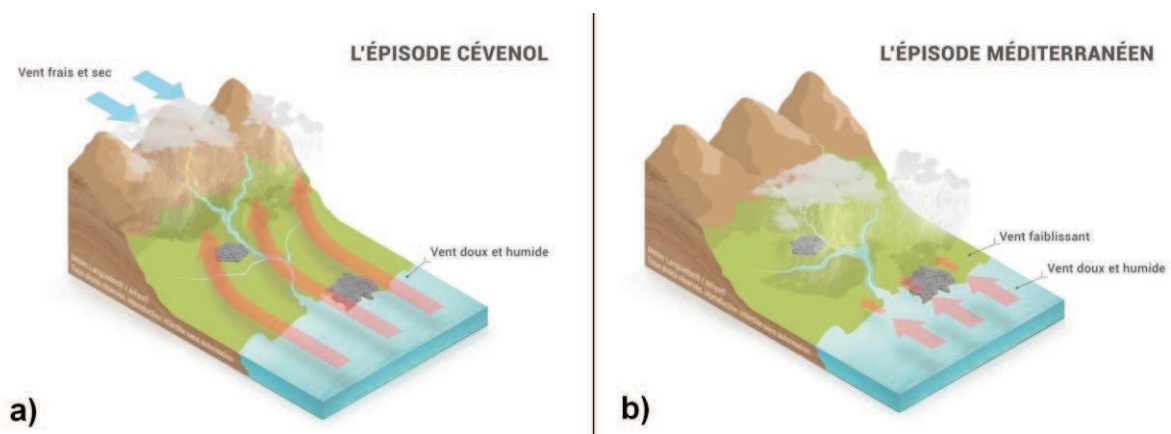
Les crues rapides sont donc des crues de cours d'eau caractérisées par une rapide montée des eaux et une décrue tout aussi rapide (moins de 12h). Elles surviennent à la suite d'intenses précipitations, le plus souvent à l'automne, période particulièrement favorable aux pluies extrêmes (Toreti et al. 2010).

Ce type de crues se manifeste sur des bassins versants à réaction rapide c'est-à-dire présentant des caractéristiques physiques : petite taille, forte pente, type de sol ; ou climatiques : saturation du sol, propices à leur survenue.

Ainsi la survenue de ce type de crues repose sur deux éléments principaux qui sont :

- Des précipitations intenses,
- Des bassins-versants à réaction rapide.

Les précipitations à l'origine des crues rapides peuvent être issues de deux types de phénomènes distincts qui sont pourtant souvent confondus en France sous la dénomination « d'épisode cévenol ». On distinguera ainsi d'un côté les épisodes de forte pluie où le relief joue un rôle majeur, appelés également à juste titre « épisodes cévenols » (Figure 1.2 – a), et de l'autre les « épisodes méditerranéens » dont la survenue ne repose que sur un phénomène météorologique (Figure 1.2 – b).



Episode cévenol

Dans le cas des épisodes cévenols, des masses d'air chaud et chargées en humidité se forment au-dessus de la Méditerranée – notamment à la fin de l'été où la mer est encore chaude (Mariotti et al. 2002) – et, poussées par des vents de basse altitude, viennent se heurter au relief montagneux du Massif Central, des Alpes ou des Pyrénées (Figure 1.3). Au contact du relief, cette masse d'air va s'élever et se refroidir, causant ainsi la précipitation des vapeurs d'eau qu'elle contient (Ducrocq et al. 2016).

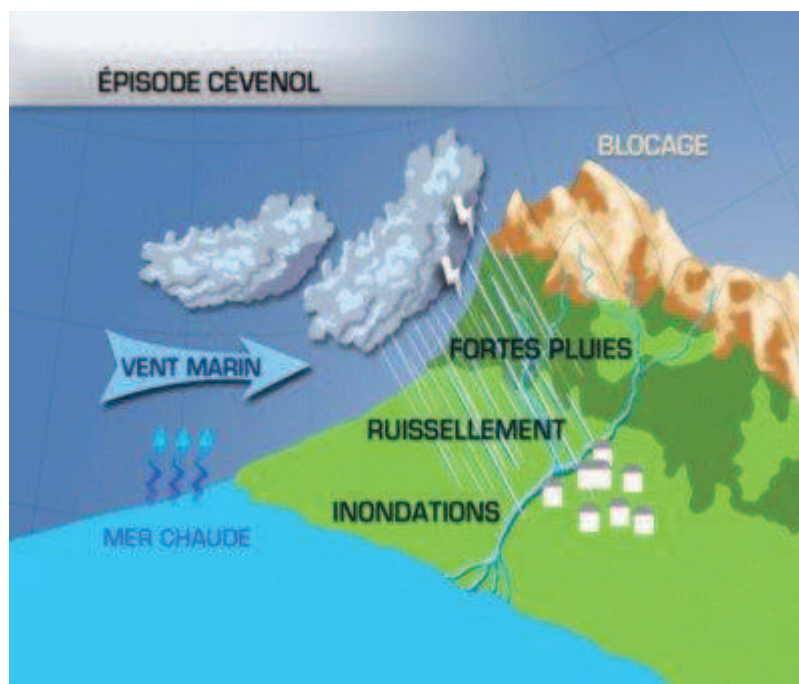


Figure 1.3 : Schéma simplifié de la formation des épisodes cévenols (Météo-France 2018)

Le contexte orographique méditerranéen est particulièrement favorable au déclenchement de phénomènes de ce type (Ducrocq et al. 2014). En France, les départements cévenols (Gard, Hérault et Ardèche) sont particulièrement concernés par ce phénomène, c'est pourquoi ils lui ont donné leur nom (Cosandey and Didon-Lescot 1990).

Episode Méditerranéen

Les épisodes Méditerranéens ont les mêmes conditions de formation que les épisodes cévenols, mais ils s'en distinguent car leur survenue n'est pas liée à l'orographie. Ainsi, à l'origine des épisodes méditerranéens on retrouve, comme pour les épisodes cévenols, des masses d'air chaud et humide en provenance de la Méditerranée, qui vont être poussées vers l'intérieur des terres. Cependant, au lieu de rencontrer le relief, ces masses d'air chaud vont rencontrer des masses d'air froid en altitude (Figure 1.4). Le contraste de température entre ces deux masses d'air chaud et froid va favoriser la convection et la formation d'orages. Ce sont donc les plaines et les littoraux qui sont particulièrement concernés par ce type de phénomène.



Figure 1.4 : Schéma simplifié de la formation des épisodes Méditerranéens (Météo-France 2018)

Ces orages peuvent devenir stationnaires s'ils évoluent en systèmes orageux plus complexes, dits à propagation rétrograde ou « en V ». C'est-à-dire que les cellules orageuses se reforment continuellement au même endroit, provoquant ainsi des précipitations intenses et localisées sur plusieurs heures, à l'origine d'importantes inondations (Figure 1.5).



Figure 1.5 : Crue de la Nartuby à Trans-en-Provence suite à un épisode Méditerranéen, le 15 juin 2010. Le débit de pointe lors de cet évènement a été estimé entre 360 et 520m³/s à Trans-en-Provence selon Payrastre et al. (2012). © Cantet Philippe / Irstea

D'un point de vue morphologique, les crues rapides touchent principalement des bassins de petite et moyenne tailles (jusqu'à 100km²). La topographie joue également un rôle majeur, car des versants pentus favorisent des temps de réaction courts (Garambois 2012). En effet, plus la pente sera forte plus l'écoulement sera rapide. Il faut également noter que le type de sol peut influencer l'écoulement dans le bassin ainsi que son humidité au moment de la survenue des précipitations. Enfin, le rôle de l'occupation du sol ne doit pas être négligé : les zones urbaines présentent une imperméabilisation de leurs sols, favorisant le ruissellement.

Selon ces différentes caractéristiques, l'Arc Méditerranéen est particulièrement propice à la survenue de crues rapides, aussi bien d'un point de vue météorologique qu'orographique, comme l'ont souligné Gaume et al. (2009) et plus récemment le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du climat (GIEC) (Stocker et al. 2013). C'est pourquoi les crues rapides méditerranéennes ont fait l'objet de nombreuses études et sont donc bien présentes dans la littérature scientifique (Antoine, Desailly and Gazelle 2001, Delrieu et al. 2005, Westrelin et al. 2010, Llasat et al. 2014).

Les crues à cinétique rapide sont fréquentes dans le monde et ont des conséquences particulièrement dramatiques en termes de dommages matériels et de victimes. Elles représentent un enjeu majeur pour la chaîne de l'alerte en raison de la difficulté de leur prévision (Gaume 2002). En effet, ce type de phénomènes est particulièrement complexe à prévoir et anticiper. De plus, il ne s'agit pas seulement de prévoir la survenue d'un tel évènement, il s'agit également d'en évaluer la localisation exacte, la durée ainsi que la sévérité (Doswell III, Brooks and Maddox 1996).

2. Les chaînes d'alerte aux inondations à travers le monde

La mise en œuvre de chaînes d'alerte permet de réduire considérablement le nombre de victimes et de dommages liés aux crues, et plus particulièrement aux crues rapides. Cependant, leur mise en œuvre pose un certain nombre de difficultés. Pagano et al. (2014) soulignent parmi elles la pertinence des alertes qui en découlent, l'accessibilité des données ou encore le passage de la modélisation au système opérationnel d'avertissement des crues.

Dans cette section, trois exemples de chaînes d'alerte seront présentés à travers le monde, couvrant trois types d'organisations distinctes. Ainsi, nous présenterons tout d'abord le système de prévision opérationnel aux Etats-Unis (système national à l'échelle d'un continent), puis celui mis en place en Europe (système transnationale à l'échelle continentale), et enfin le système développé en France (système national, à l'échelle sous-continentale).

2.1. Exemples de chaînes d'alerte aux inondations dans le monde

Aux Etats-Unis : le fonctionnement du National Weather Service

Aux Etats-Unis, la chaîne nationale de l'alerte aux inondations repose sur un organisme fédéral américain dit NWS (National Weather Service) qui dépend lui-même de l'administration océanique et atmosphérique nationale appelée NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). En raison de la taille du territoire qu'il gère, le NWS s'appuie sur 13 centres de prévision hydrologique régionaux (RFC) répartis sur le territoire américain par grand bassin hydrographique. Ils gèrent la modélisation et la prévision hydrologique sur leur territoire, et viennent en appui aux 122 centres d'alerte hydrométéorologique (WFO).

Les données collectées à l'échelle locale pour la prévision des crues sont multiples : précipitations, température, épaisseur du manteau neigeux, débit du cours d'eau, influence des ouvrages hydrauliques, humidité du sol...

Une fois ces différentes données collectées, elles sont soigneusement vérifiées avant d'être utilisées par le NWS pour fournir des prévisions et avertissements météorologiques, climatiques et hydrologiques sur l'ensemble du territoire américain en se basant sur le système de prévision présenté de manière simplifiée en Figure 1.6. En parallèle, les RFC fournissent également des prévisions locales au niveau des stations hydrologiques du réseau.

Le processus allant de la collecte des données à l'alerte fournie au public, en passant par la prévision hydrologique, est particulièrement complexe (Restrepo 2017). En raison de la taille du territoire américain, de nombreuses chaînes d'alerte locales se sont développées au sein de collectivités ou de régions. Leurs données peuvent également être utilisées par le NWS

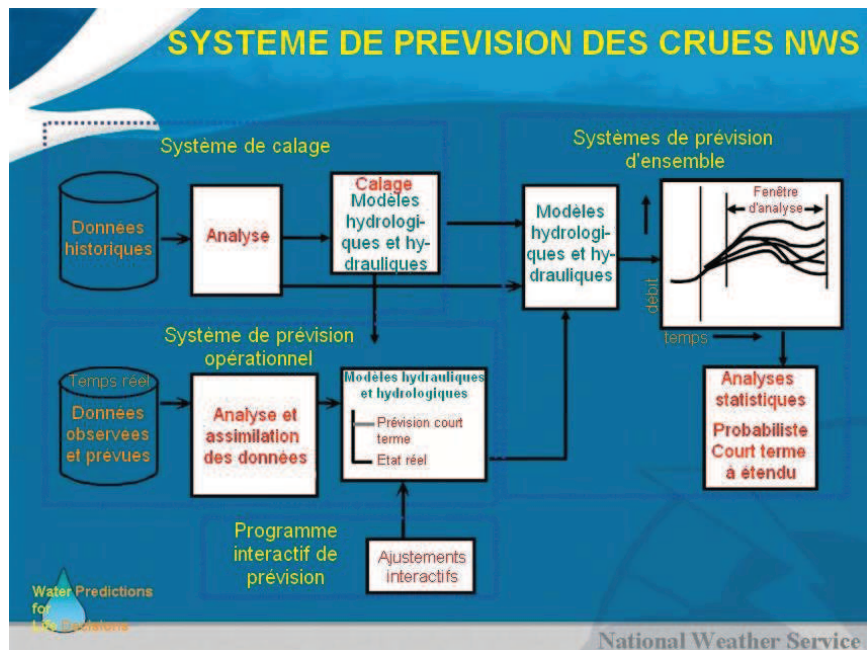


Figure 1.6 : Le système de prévision des crues aux Etats-Unis, traduit de l'anglais McEnery et al. (2005)

Les informations de prévision des crues et les données collectées par les RFC et WFO sont communiquées en temps réel sur une plateforme web accessible librement et gratuitement à la population et aux gestionnaires du territoire (<https://water.weather.gov/ahps/>) dont un exemple est disponible en Figure 1.7 à l'échelle nationale et à une échelle plus réduite autour de la région de Chicago.

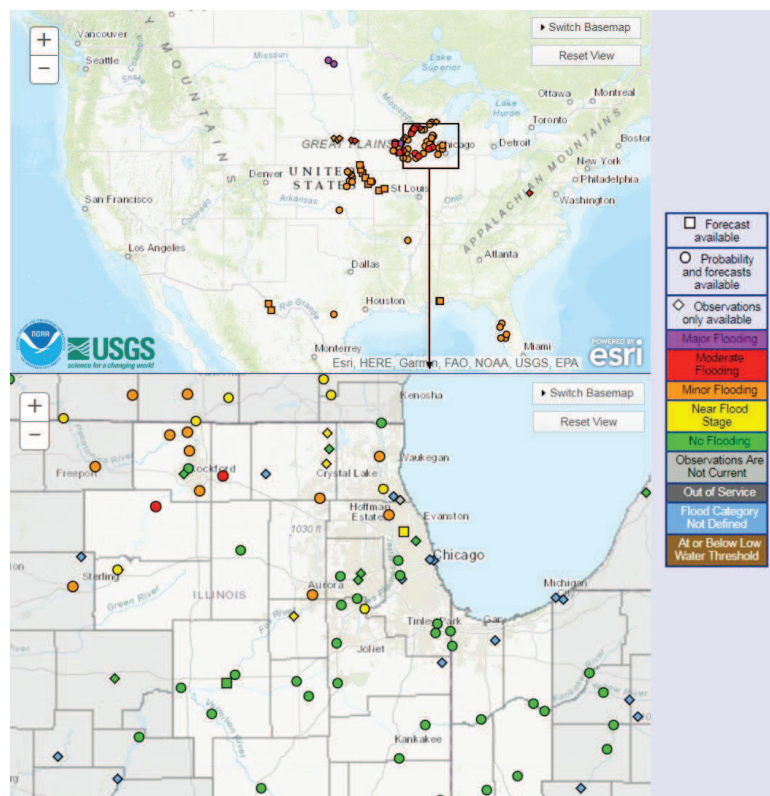


Figure 1.7 : Carte du risque de crue sur le territoire américain publiée par le NWS le 5 septembre 2018

En Europe : le système européen d'alerte aux inondations EFAS

Avant les années 2000 aucune chaîne d'alerte n'existait à l'échelle de l'Europe. Ainsi chaque pays possédait son propre système sans que les données ne soient mises en commun. Or, suite aux inondations catastrophiques liées aux crues transfrontalières de l'Elbe et du Danube en 2002, la Commission Européenne a initié la création d'un nouveau système dédié à la prévision, à l'avertissement et au suivi des inondations en Europe. Acronyme pour European Flood Awareness System, le système EFAS est le premier système de prévision et de suivi des crues développé pour l'ensemble du territoire européen (www.efas.eu).

Ce système est basé sur un fonctionnement de dépassement de seuils. Ainsi, quand le débit modélisé dans une rivière dépasse un certain seuil, un avertissement est émis aux territoires concernés (Thielen et al. 2009). EFAS utilise un modèle hydrologique appelé LISFLOOD. Ce modèle est alimenté par des prévisions d'ensembles de pluie fournies par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme basé à Reading au Royaume-Uni (Ramos, Thielen and de Roo 2009).

Les prévisions d'ensembles des pluies

Les méthodes de prévision d'ensembles permettent de simuler de manière simultanée plusieurs scénarii équiprobables d'évolution de la pluie à venir. Les prévisions obtenues sont probabilistes (par exemple : le pourcentage de chance de dépasser un certain débit), par opposition à des prévisions déterministes (une seule valeur de débit fournie, sans notion d'incertitude).

Ainsi à partir des pluies prévues, le débit des principaux cours d'eau européens est modélisé par le modèle hydrologique. Puis les débits sont comparés à des seuils statistiques de périodes de retour, établis à partir de simulations de débit réalisées sur 14 ans de données observées (Figure 1.8). Cela permet d'obtenir une information sur l'intensité du débit prévu.

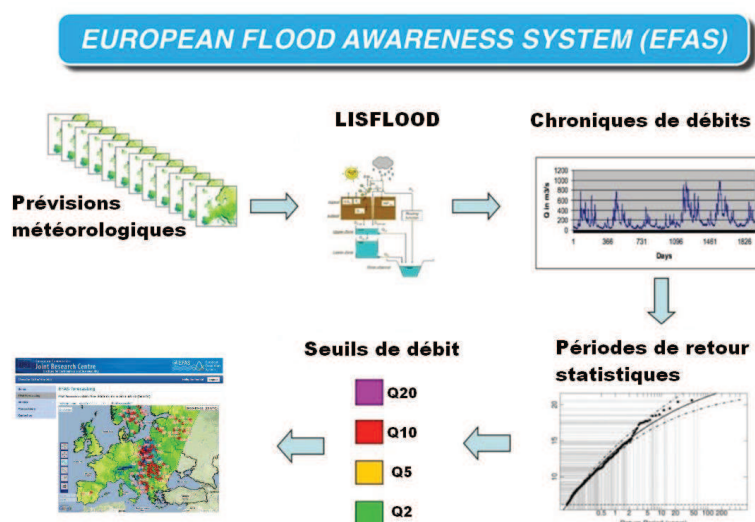


Figure 1.8: Schéma de fonctionnement du système EFAS à partir du modèle LISFLOOD – Traduit de l'anglais depuis Joint Research Centre (2018)

Testé en temps réel entre 2005 et 2010 par les services hydrologiques nationaux puis pas la Protection Civile Européenne, EFAS est devenu pleinement opérationnel en 2012. Depuis lors, ce système fournit des avertissements de dépassement de seuil sur des périodes allant de 3 à 10 jours d'anticipation pour les principaux cours d'eau d'Europe, avec une résolution spatiale allant de 7 à 30km. La Figure 1.9 présente une application du système EFAS pour l'évènement de crue du 22 au 27 août 2005 dans la région du haut Danube. Cet évènement avait été prévu et signalé en temps réel par le système aux services hydrologiques des pays concernés par la crue et partenaires du projet EFAS (Ramos et al. 2009).

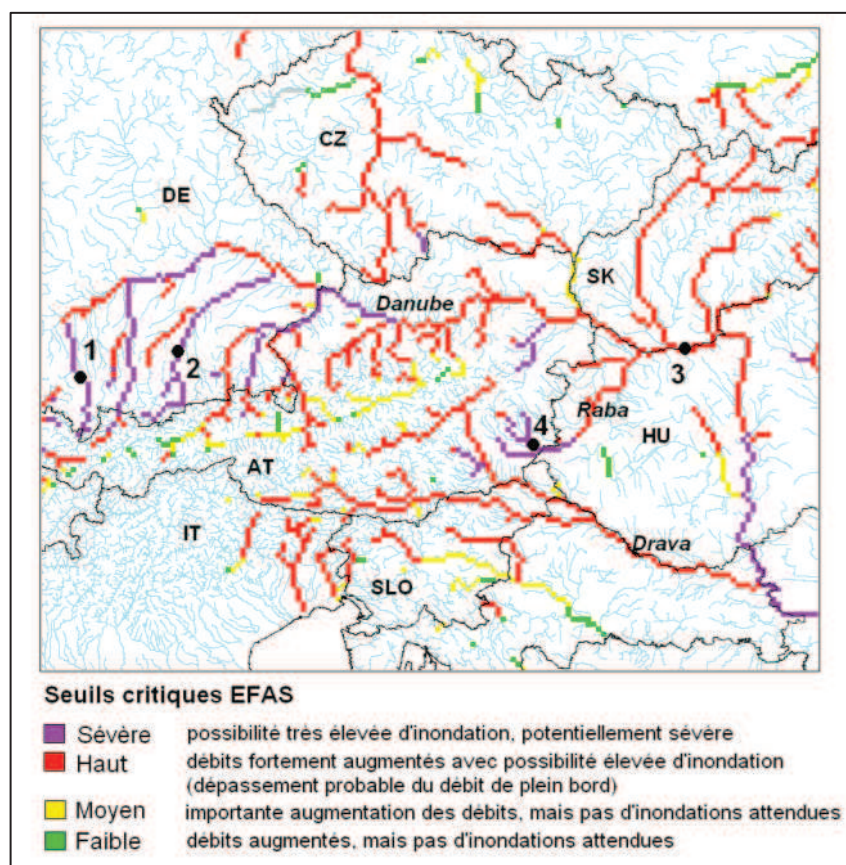


Figure 1.9 : Carte EFAS de dépassement de seuil basée sur la prévision météorologique du 21 août 2005 pour un horizon de prévision de 7 jours (Ramos et al. 2009)

Les prévisions issues du modèle LISFLOOD sont ajoutées au fur et à mesure à une base de données permettant aux prévisionnistes d'évaluer ses performances et de le calibrer sur des événements passés afin de réduire le nombre de fausses détections et de détections manquées.

En France : le système Vigicrues

En France, la prévision des inondations s'appuie sur un service national appelé le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations). La création de ce service remonte à 2003 (arrêté du 2 juin 2003 portant création du service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations), dans le cadre de la réorganisation du système de prévision qui a fait suite à une série d'inondations catastrophiques telles que celles de Nîmes en 1988, Vaison-la-Romaine en 1992, l'Aude en 1999 et enfin le Gard en 2002.

Le SCHAPI est géographiquement situé au sein de la « Météopole » de Toulouse, qu'il partage avec le service officiel de la météorologie et de la climatologie en France à savoir Météo-France. Cependant, il couvre le territoire national grâce à un réseau composé de :

- 25 Unités d'Hydrométrie (UH) dont 20 en Métropole et 5 en Outre-Mer, basées dans les DREAL (Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement) qui sont des services déconcentrés du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES) et du Ministère de la Cohésion du Territoire (MCT),
- 19 Services de Prévision des Crues (SPC) (Figure 1.10) rattachés à des DREAL à l'exception de Méditerranée Est.



Figure 1.10: Carte des secteurs de Services de Prévision des Crues en France (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2018b)

Les UH gèrent l'installation et la maintenance des 3 000 stations hydrométriques de mesure actuellement en service. Leur principale mission est de collecter, critiquer et d'analyser les données issues de ces stations de mesure. Ces données sont notamment stockées dans une base de données gérée par le SCHAPI appelée la Banque Hydro.

Les données collectées par les UH sont ensuite traitées par les SPC, parmi les missions desquels on retrouve également :

- La surveillance des cours d'eau,
- La prévision des crues par modélisation,
- L'information du public sur l'état de vigilance hydrologique.

Ainsi, en s'appuyant sur ces deux types d'acteurs, le SCHAPI va pouvoir assurer sa mission opérationnelle de validation, de production et de diffusion de la vigilance liée aux crues appelée Vigicrues©.

Si la marque Vigicrues© n'a été déposée qu'en 2015, le dispositif du même nom est lui opérationnel depuis 2006. A la manière de la vigilance météorologique issue de Météo-France (<http://vigilance.meteofrance.com/>), il s'agit d'un dispositif destiné à informer le public et l'ensemble des acteurs de la gestion de crise sur la situation hydrologique des cours d'eau suivis en temps réel.

Au niveau local, les SPC surveillent les cours d'eau réglementaires de leur territoire et définissent un niveau de vigilance en fonction de leurs prévisions sur les 24h à venir. Ces prévisions s'appuient sur les données collectées en temps réel par les stations hydrométriques du réseau Vigicrues ainsi que sur les données météorologiques transmises par Météo-France.

Les niveaux de vigilance s'expriment en quatre couleurs allant du vert au rouge. A chaque couleur correspond un niveau de sévérité de la crue et donc une évaluation de ses conséquences probables sur le territoire, ainsi que des conseils de comportement adapté à la situation hydrométéorologique en cours.

Au niveau national, les SPC transmettent le niveau de vigilance défini au niveau de leur territoire au SCHAPI qui synthétise et valide ces informations et assure leur publication au moins deux fois par jour, 24h/24 et 7jours/7, sous la forme de bulletins d'information ainsi que de cartes de vigilance (Figure 1.11) sur le site www.vigicrues.gouv.fr.

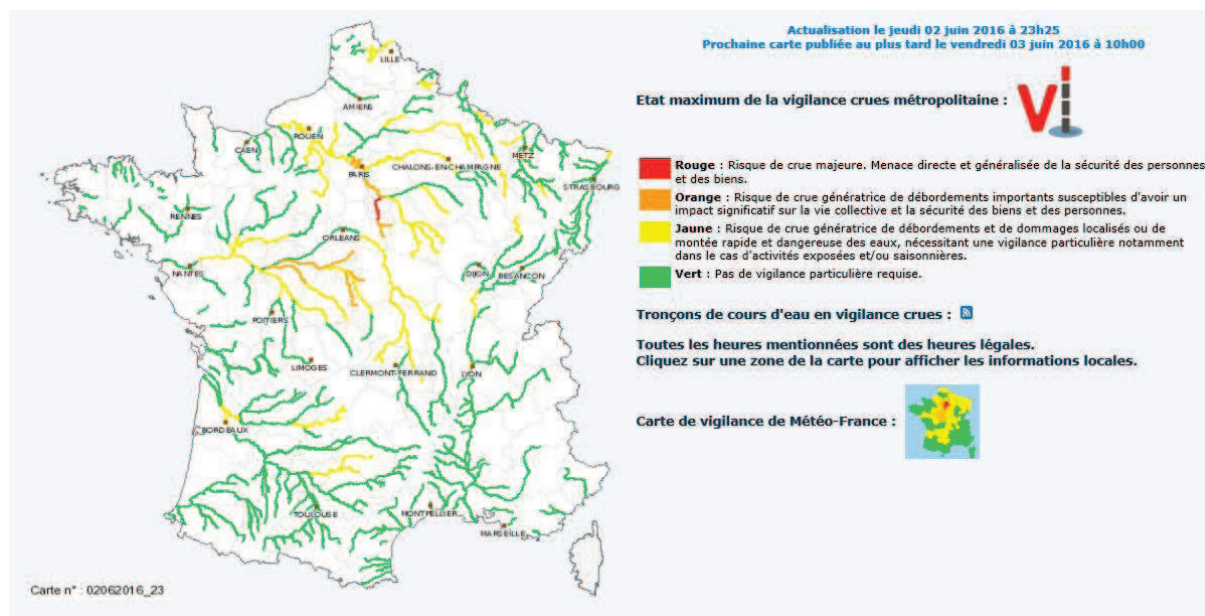


Figure 1.11: Carte de la vigilance crue publiée le 02/06/2016 à 23h25 (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2018b)

La prévision des phénomènes de crue, la vigilance météorologique comme hydrologique, et les avertissements viennent en amont du déclenchement des alertes au niveau local. Ainsi, ces différents éléments de la chaîne de l'alerte doivent fournir des informations pertinentes et avec suffisamment d'anticipation pour permettre une gestion efficace de la crise en temps réel.

C'est pourquoi le cas particulier des crues rapides doit être souligné. Les systèmes présentés dans cette section et mis en place aussi bien aux Etats-Unis, qu'en Europe ou en France ne sont pas adaptés aux crues rapides qui nécessitent des outils adaptés afin d'obtenir des observations en temps réel et de traiter rapidement ces observations au sein de modèles d'avertissement. Les crues rapides nécessitent donc une chaîne d'alerte dédiée présentée dans la prochaine section.

2.2. Les chaînes d'alertes dédiées aux crues rapides

Dans le cas des crues rapides, le délai entre la prévision et l'avertissement d'une crue doit être le plus court possible car il va conditionner l'efficacité de l'alerte qui en découle. Ainsi, la plupart des méthodes d'avertissement employées s'appuient sur un fonctionnement simple, permettant une utilisation opérationnelle par les gestionnaires du territoire. Il s'agit principalement d'un fonctionnement par seuils, où des avertissements sont envoyés si un cumul de pluie dépasse un certain seuil en une certaine durée.

Le Flash Flood Guidance aux Etats-Unis

Pour la prévision des crues rapides, le NWS utilise une méthode spécifique du nom de Flash Flood Guidance (FFG) (Carpenter et al. 1999, Sweeney 1992). Il s'agit d'évaluer la susceptibilité d'un bassin à subir une crue rapide en fonction de la pluie. Pour cela, la méthode FFG détermine le cumul de pluie minimum nécessaire par bassin versant pour causer une crue débordante à l'exutoire du bassin en question (Norbiato, Borga and Dinale 2009).

Ces seuils de cumuls de pluie sont calculés à partir des différentes simulations d'un modèle hydrologique, réactualisées tous les jours pour cinq durées de cumuls de pluie (1, 3, 6, 12 et 24h). Le modèle hydrologique tient quant à lui compte des différents états du bassin-versant dont notamment l'humidité du sol. Les pluies observées ou prévues sont ensuite comparées au fil de la journée à ces cumuls calculés. Quand la pluie tombée dépasse un des seuils de cumul de pluie calculé, un avertissement est alors émis aux gestionnaires des territoires concernés par la crue potentielle des cours d'eau en question. (Figure 1.12).

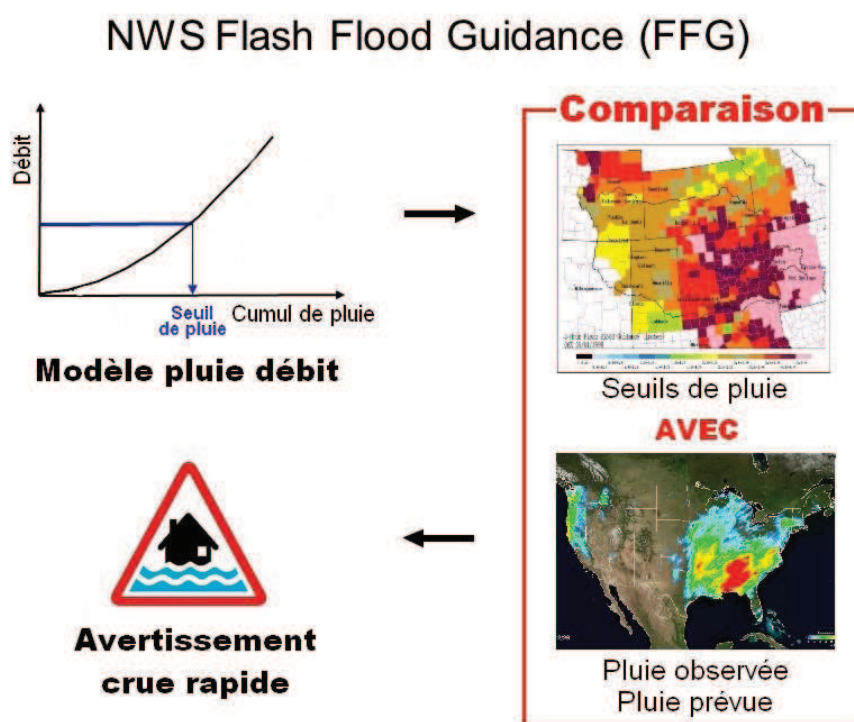


Figure 1.12: Schéma explicatif de la méthode Flash Flood Guidance

En Europe : De EPIC à ERICHA

En Europe, plusieurs pays ont développé leurs propres systèmes d'avertissement des crues rapides. En effet, ces dernières années ont vu se multiplier le nombre d'évènements de ce type, notamment dans la zone Méditerranéenne (Barredo 2007). Les conséquences de ces crues sont le plus souvent catastrophiques, tant du point de vue matériel et économique que du point de vue humain. Ainsi chaque année, les crues rapides sont responsables du décès de plus de 50 personnes en Europe (Hoyois and Guha-Sapir 2003).

Le système EFAS présenté précédemment a été ponctuellement testé pour les crues rapides sur des bassins versants de Suisse (Alfieri, Thielen and Pappenberger 2012) ainsi que des Cévennes (Alfieri et al. 2011a) avec des résultats prometteurs. Cependant à l'échelle de toute l'Europe, sa résolution spatiale ne permet pas son utilisation sur les petits bassins versants propices aux crues rapides.

C'est pourquoi depuis 2009, des avertissements de crue rapide basés sur des indicateurs de sévérité de l'aléa pluie appelés EPIC pour European Precipitation Index based on simulated Climatology (Alfieri and Thielen 2015, Alfieri, Velasco and Thielen 2011b) ont été développés. Le fonctionnement du système EPIC est basé sur le postulat que les précipitations intenses cumulées sur les petits bassins-versants sont à elles-seules un bon indicateur de la survenue potentielle de crues rapides sur ces mêmes bassins, indépendamment d'autres processus hydrologiques.

Cette méthode fournit des prévisions d'ensemble de pluies en chaque pixel du réseau hydrographique. Ces données de pluie prévue sont ensuite moyennées à l'échelle des bassins versants, puis comparées à des seuils de sévérité calculés grâce à 20 ans de données de rejou. Quand les pluies prévues dépassent ces seuils, des alertes ponctuelles sont générées afin d'indiquer là où de potentiels évènements extrêmes sont prévus. Cependant, la méthode EPIC avertit uniquement sur la pluie et ne prend aucun processus hydrologique (humidité du sol) ni aucun paramètre géomorphologique (pente, occupation du sol) en compte. C'est pourquoi, à la suite d'EPIC, les responsables du système EFAS ont développé les indicateurs ERIC.

Basés sur le même fonctionnement que les indicateurs EPIC, les indicateurs ERIC (Extreme Runoff Index based on simulated Climatology) permettent d'avertir sur les crues extrêmes en intégrant quant à eux des processus hydrologiques tels que la fonte des neiges, l'évapotranspiration et l'humidité du sol (Alfieri, Pappenberger and Wetterhall 2014) obtenus avec le modèle LISFLOOD. Ils permettent de fournir des prévisions de crue à 5 jours, avec une mise à jour deux fois par jour, mais à une résolution spatiale de seulement 7km. L'indicateur ERIC est actuellement opérationnel sur la plateforme EFAS.

Dans le cadre du projet européen ERICHA (European Rainfall-Induced Hazard Assessment system) une troisième méthode de prévision des crues rapides a récemment été développée (Park et al. 2017). Cette méthode n'est pas encore opérationnelle sur la plateforme EFAS. Elle ne fait pas intervenir de modèle hydrologique, comme EPIC. En revanche, elle apporte une amélioration significative au niveau de la résolution spatiale et temporelle des pluies qui l'alimentent. ERICHA utilise la lame d'eau fournie par les 189 radars du programme européen OPERA (Operational Program for the Exchange of weather Radar information) (Huuskonen, Saltikoff and Holleman 2014). Les données de pluies en question ont une résolution spatiale

de 2km et temporelle de 15 minutes. Des prévisions immédiates d'ensemble des pluies sont également générées par extrapolation des champs radar observés. Les différentes caractéristiques des méthodes EPIC, ERIC et ERICHA sont comparées dans le Tableau 1.6.

Tableau 1.6: comparaison des méthodes EPIC, ERIC et ERICHA

Nom de la méthode	EPIC	ERIC	ERICHA
Origine des données de pluie	Prévision d'ensembles du système européen		Observations radars et prévision immédiate d'ensemble
Modèle hydrologique	Non	Oui	Non
Résolution spatiale des pluie	7 km	7 km	2km
Echéance de prévision	6h	6h	6h
Anticipation maximale	5 jours	5 jours	6h
Mise à jour	12h	12h	15min
Temps de production	4h	4h	5min

En France : APIC et Vigicrues flash

Si le système Vigicrues© présenté dans la section précédente est actuellement fonctionnel sur 22 100 km de cours d'eau, le réseau hydrographique français en compte plus de 120 000 (Figure 1.13). Ainsi, les cours d'eau actuellement couverts par le système Vigicrues ne concernent que 75% de la population qui vit ou travaille en zone inondable (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2018). Cela signifie que 25% de la population vivant en zone inondable ne bénéficie actuellement pas de ce système.

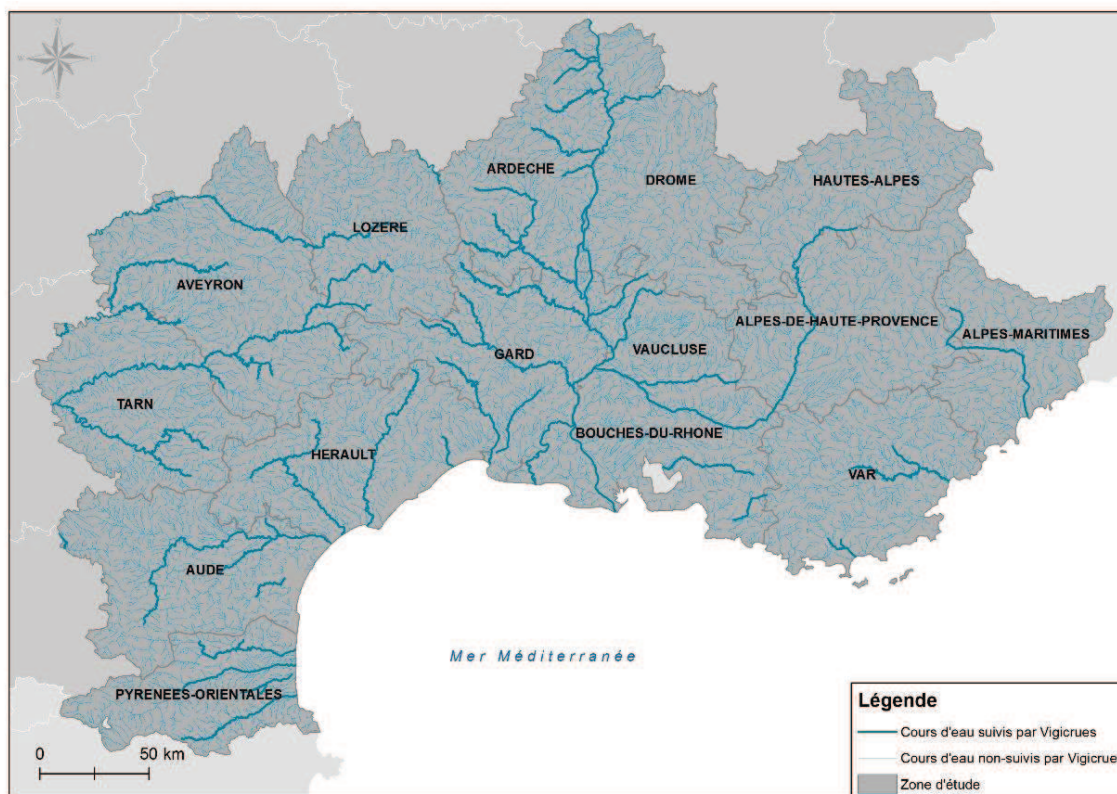


Figure 1.13: Comparaison des linéaires de cours d'eau suivis et non-suivis par le système Vigicrues

Les cours d'eau actuellement non-suivis par le système Vigicrues sont principalement de petits cours d'eau. Or, ce sont également les cours d'eau susceptibles de connaître des crues rapides. Mais pour les intégrer au réseau il serait nécessaire que des prévisions de pluie y soient disponibles et qu'ils soient équipés de stations hydrométriques, ce qui engendrerait des coûts d'installation et de maintenance très élevés.

Suites aux inondations catastrophiques du Var en 2010 et au besoin des gestionnaires du territoire en outils opérationnels, Météo-France a mis place en 2011 le système APIC (Avertissement aux pluies intenses à l'échelle des communes) qui est un service d'avertissement des pluies intenses à l'échelle des communes. A partir de la lame d'eau radar, ce système évalue l'aléa pluie toutes les 15 minutes et envoie un avertissement aux communes concernées lorsque le cumul de pluie observé y dépasse un seuil de sévérité défini au préalable. Ces avertissements correspondent à deux niveaux de sévérité qui sont caractérisés en tant que « précipitations intenses » et « précipitations très intenses » (Figure 1.14).

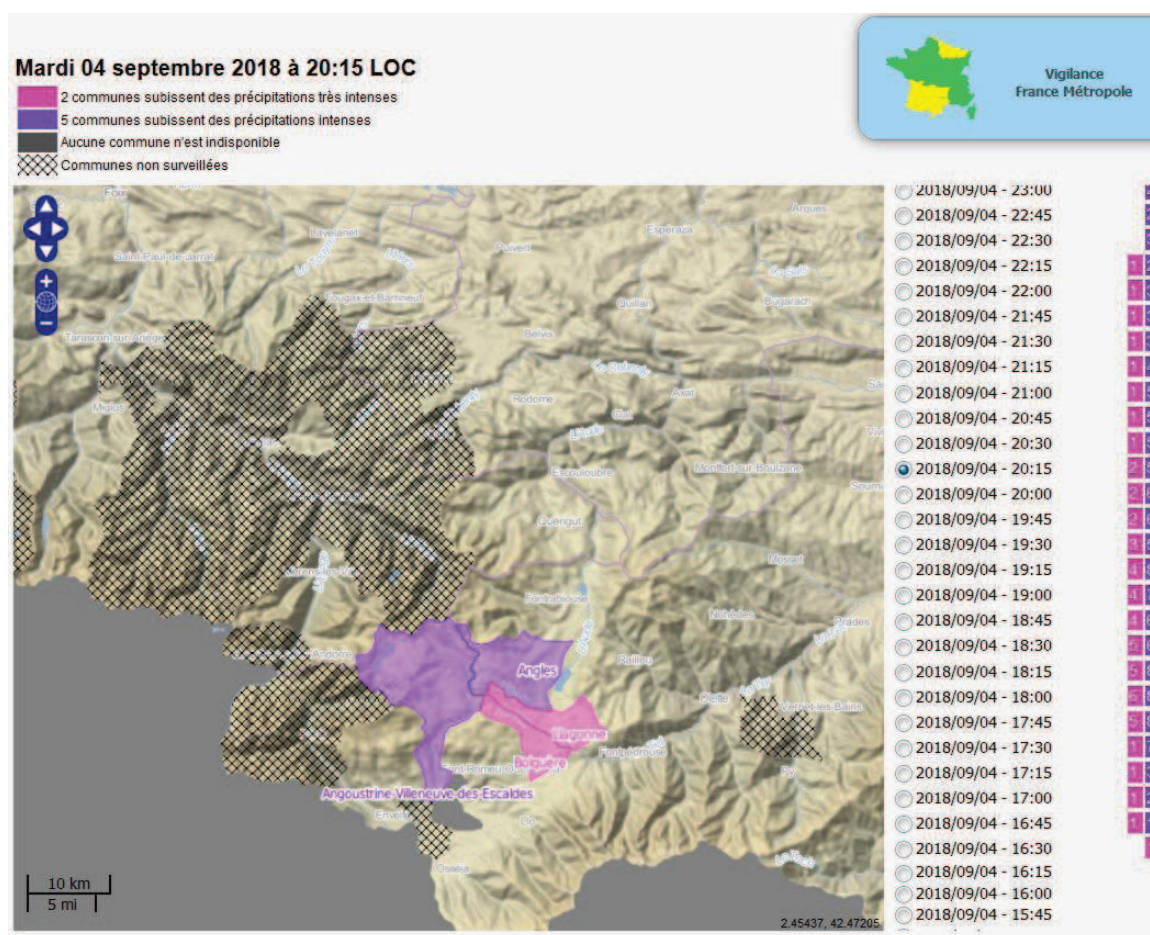


Figure 1.14: Carte des avertissements APIC du 4 septembre 2015 à 20h15

En 2017, plus de 80% des communes françaises métropolitaines étaient couvertes par les avertissements APIC. Cependant, ces avertissements ne se basent que sur l'aléa pluie et ne prennent pas en compte la réaction des bassins versants (humidité du sol, pente...). C'est pourquoi, en complément de ce service, le système Vigicrues-Flash a été lancé en mars 2017 par le SCHAPI.

Vigicrues Flash est un service d'avertissement des crues proposé en complément du système Vigicrues qui permet de fournir des informations sur 30 000km de cours d'eau supplémentaires soit un peu plus de 10 000 communes du territoire français métropolitain (De Saint-Aubin et al. 2016).

Son échelle d'évaluation de la crue n'est pas composée de quatre niveaux comme Vigicrues mais seulement de trois à savoir « pas de crue », « crue forte » et « crue très forte ». Vigicrues Flash génère donc des avertissements toutes les 15 minutes à l'échelle communale sous forme de SMS, appels téléphoniques et de mails, accompagnés par une cartographie dont un exemple est présenté en Figure 1.15.

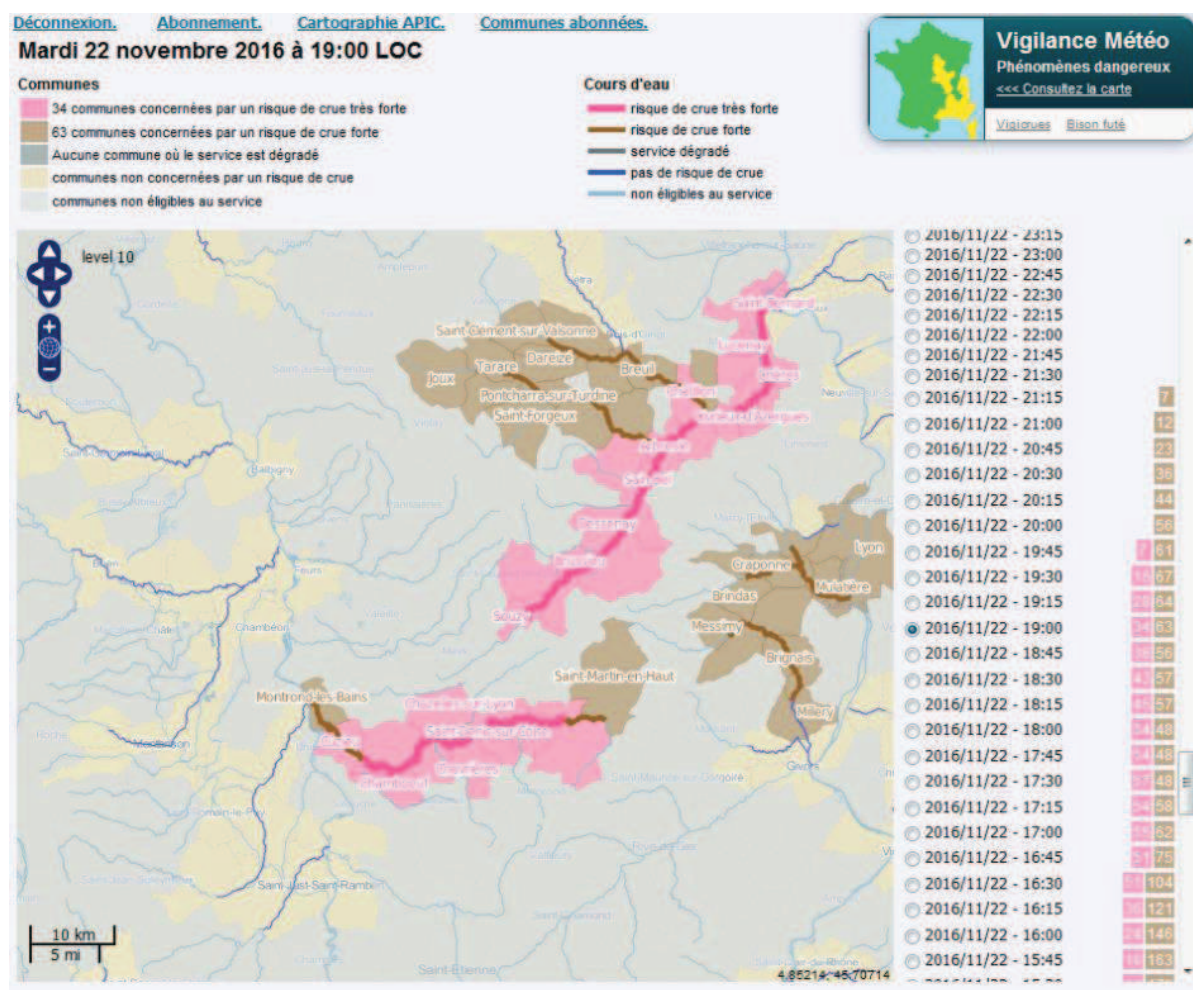


Figure 1.15: Carte communale de la vigilance Vigicrues Flash du 22 novembre 2016 à 19h00 (Garandeau L. 2018)

Afin de pallier l'absence d'outils communaux d'avertissement de la pluie et des crues, les service APIC et Vigicrues Flash se basent tous les deux sur une méthode innovante d'évaluation de l'aléa pluviométrique et hydrologique à partir des pluies radars appelée méthode AIGA.

3. La méthode AIGA

La genèse de la méthode AIGA (Adaptation d'Informations Géographiques à l'Alerte en crue) remonte au tout début des années 2000. Elle coïncide avec l'amélioration de la couverture des radars météorologiques sur le territoire français métropolitain (Lavabre and Grégoris 2005). S'est alors posée la question de la valorisation de ces nouvelles données pour prévenir le risque de crues et plus particulièrement le risque de crues rapides dans le Sud de la France. Les inondations de Vaison-la-Romaine en 1992 ainsi que les inondations de l'Aude en 1999 ont fortement marqué ce territoire et ont contribué à sensibiliser les gestionnaires locaux au besoin d'outils opérationnels dédiés.

En particulier, les inondations de l'Aude en 1999 ont clairement montré les limites du système alors en place. Ainsi, les Bulletins Régionaux d'Alarme Météorologique (BRAM) envoyés aux maires des communes concernées afin de les informer des cumuls de précipitations prévus *« n'ont pas été interprétés comme traduisant le risque d'un événement exceptionnel. Or, les chiffres de précipitation annoncés [...] étaient exceptionnels. Faute d'échelle de référence, ils n'ont pas entraîné la prise de conscience de l'ampleur du phénomène »* (Lefrou et al. 2000). Les premiers travaux sur la méthode AIGA ont démarré en réponse à ce constat. Le but a été avant tout de proposer un outil d'interprétation de données pluviométriques et hydrométriques à destination des gestionnaires de crise à l'échelle locale.

Le projet RHyTMME (Risques Hydrométéorologiques en Territoires de Montagne et Méditerranéens) a permis à la méthode AIGA de se faire connaître par les collectivités et les gestionnaires de crise. Ce projet (2007-2015) avait pour but la surveillance des aléas hydrométéorologiques en zone de montagne ainsi que sur l'Arc Méditerranéen via la mise en place de radars météorologiques de nouvelle génération en zone sensible, c'est-à-dire dans les Alpes-du-Sud (Westrelin et al. 2012). Grâce à la mise en place d'une plateforme internet du même nom - et toujours en service actuellement pour la région PACA - le projet RHyTMME a permis à la méthode AIGA d'être utilisée en temps réel par de nombreux acteurs.

3.1. Présentation de la méthode

La méthode AIGA est une méthode d'évaluation de la sévérité de l'aléa pluie (AIGA PLUVIO) et de l'aléa crue (AIGA HYDRO) en temps réel. Elle se base sur le croisement et la comparaison de données de pluie et de débit obtenues en temps réel grâce aux radars météorologiques, avec des valeurs de seuils statistiques associées à des périodes de retour (Figure 1.16), et ce afin de caractériser le niveau de rareté de l'aléa.

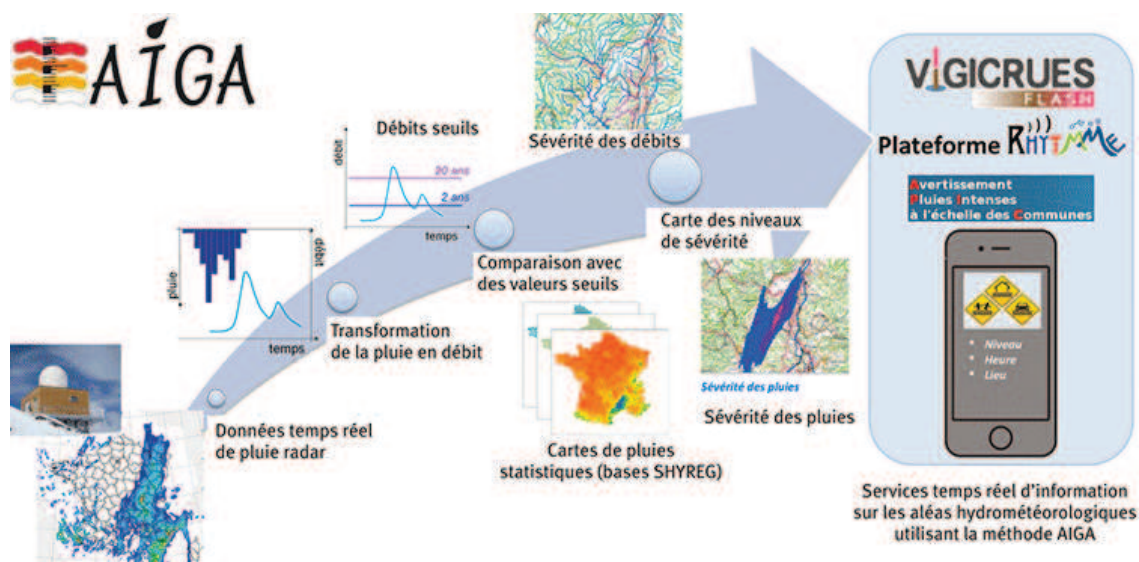


Figure 1.16 : Illustration simplifiée du fonctionnement de la méthode AIGA : de l'observation de pluie radar aux services d'avertissement opérationnels (Fouchier et al. 2017)

Les radars météorologiques de Météo-France sont regroupés au sein d'un réseau nommé réseau ARAMIS (Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique). En juillet 2017, ce réseau était composé de 30 radars au total. L'ensemble des données de pluie fournies par ces radars permet de constituer une mosaïque complète de la pluie qui tombe sur le territoire français métropolitain (Figure 1.17). Cette mosaïque permet de fournir une lame d'eau au pas de temps 5 minutes et à la résolution spatiale de 1km.

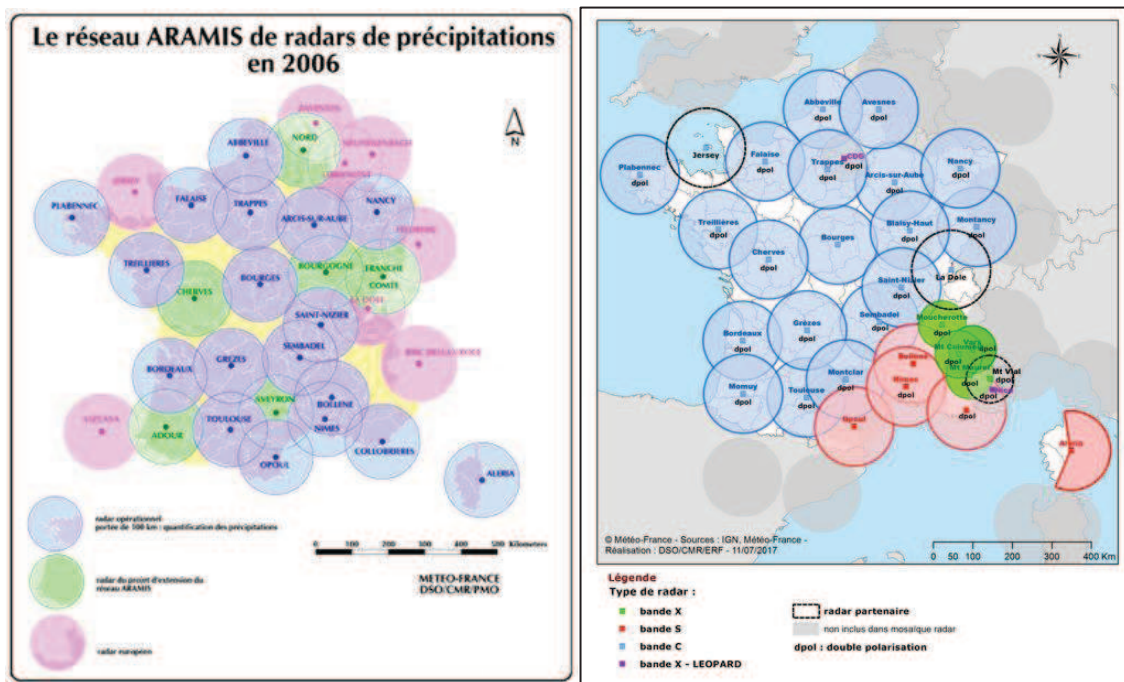


Figure 1.17: Comparaison du réseau ARAMIS entre 2006 et juillet 2017 (Météo-France 2018)

A partir de ces lames d'eau, la méthode AIGA PLUVIO va fournir une caractérisation de l'aléa pluie, tandis que la méthode AIGA HYDRO va caractériser l'aléa débit.

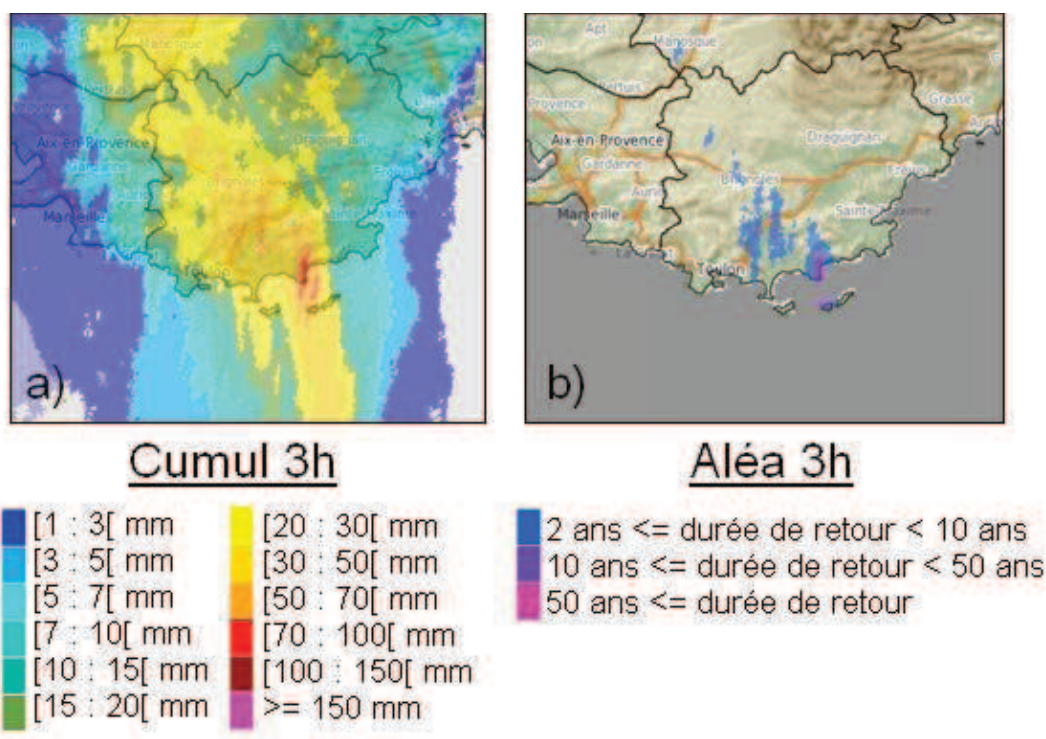
AIGA PLUVIO

La méthode AIGA PLUVIO calcule des cumuls de pluie toutes les 15 minutes sur des durées allant de 1 à 72h. Ces cumuls de pluie sont ensuite comparés à des valeurs seuils, afin de pouvoir évaluer leur niveau de rareté exprimée en termes de période de retour de l'aléa pluie. Ces valeurs seuils sont élaborées à partir de valeurs de pluie statistiques obtenues avec l'appui d'une méthode appelée SHYREG.

La méthode SHYREG est une régionalisation de la méthode SHYPRE (simulation d'hydrogramme pour la prédétermination des crues) développée par Irstea (Arnaud 2009). SHYPRE utilise un générateur aléatoire de pluies afin d'obtenir de très longues chroniques de pluies horaires. Le classement de ces pluies permet d'obtenir une distribution de leur fréquence sur différentes durées et ainsi d'en déduire des quantiles pour différentes périodes de retour (de 5 à 1000 ans). SHYREG permet de fournir une base de données de ces quantiles de pluie en chaque km² du territoire (Arnaud et al. 2014, Aubert et al. 2014).

Pour visualiser par pixel le résultat de la comparaison entre les cumuls de pluie 15 minutes et les valeurs de seuil obtenues avec SHYREG, la rareté de l'aléa pluie a été simplifiée en 3 niveaux. Ces trois niveaux sont associés à trois couleurs (Figure 1.18-b) correspondant à trois périodes de retour qui sont les suivantes :

- En bleu foncé, période de retour de 2 à 10 ans correspondant à des événements de pluie fréquents,
- En violet, période de retour de 10 à 50 ans, correspondant à des événements de pluie moyens,
- En magenta, période de retour supérieure à 50 ans, correspondant à des événements de pluie exceptionnels.



AIGA HYDRO

AIGA HYDRO permet d'obtenir une qualification de l'aléa crue pour les bassins-versant dont la taille est comprise entre de 10 et 1000 km², toutes les 15 minutes. Pour cela, la méthode utilise les données de débits horaires calculés à l'exutoire de chaque bassin grâce à un modèle hydrologique pluie-débit, à partir de la lame d'eau radar. Ces données de débits horaires sont ensuite comparées à des valeurs seuils afin d'évaluer leur rareté, et par là même, leur sévérité. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une méthode de prévision des crues dans la mesure où elle ne permet qu'une anticipation limitée correspondant au temps de réaction du bassin-versant.

Le modèle hydrologique pluie-débit utilisé par la méthode AIGA fait partie de la famille des modèles conceptuels GR, acronyme pour Génie Rural, développés par Irstea depuis plusieurs dizaines d'années. Ainsi la chaîne de modélisation pluie-débit utilisée dans la méthode AIGA HYDRO associe actuellement trois modèles qui sont présentés en Figure 1.19 :

- Le modèle SAJ : un modèle distribué continu journalier au pixel du km² pour calculer les conditions d'humidité du sol,
- Le modèle GR4J : un modèle global continu pour calculer à chaque exutoire le débit de base journalier,
- Le modèle GRD : un modèle semi-distribué événementiel horaire qui s'appuie d'une part sur le modèle SAJ pour initialiser son réservoir de production au début de l'évènement de crue et d'autre part sur le modèle GR4J pour initialiser le taux de remplissage de son réservoir de routage. Un événement est identifié dès que la pluie journalière de bassin dépasse 10 mm.

Dans un premier temps, les paramètres de ces différents modèles ont été calés en utilisant d'une part les mesures obtenues par plus de 700 stations hydrographiques issues de la banque nationale de données hydrométriques appelée Banque Hydro ; d'autre part une chronique de pluie horaire distribuée au km² de 2002 à 2015. Dans un second temps, ces paramètres ont été régionalisés afin que le modèle puisse être utilisé sur les bassins non-jaugés c'est-à-dire ne bénéficiant pas d'un réseau de mesure.

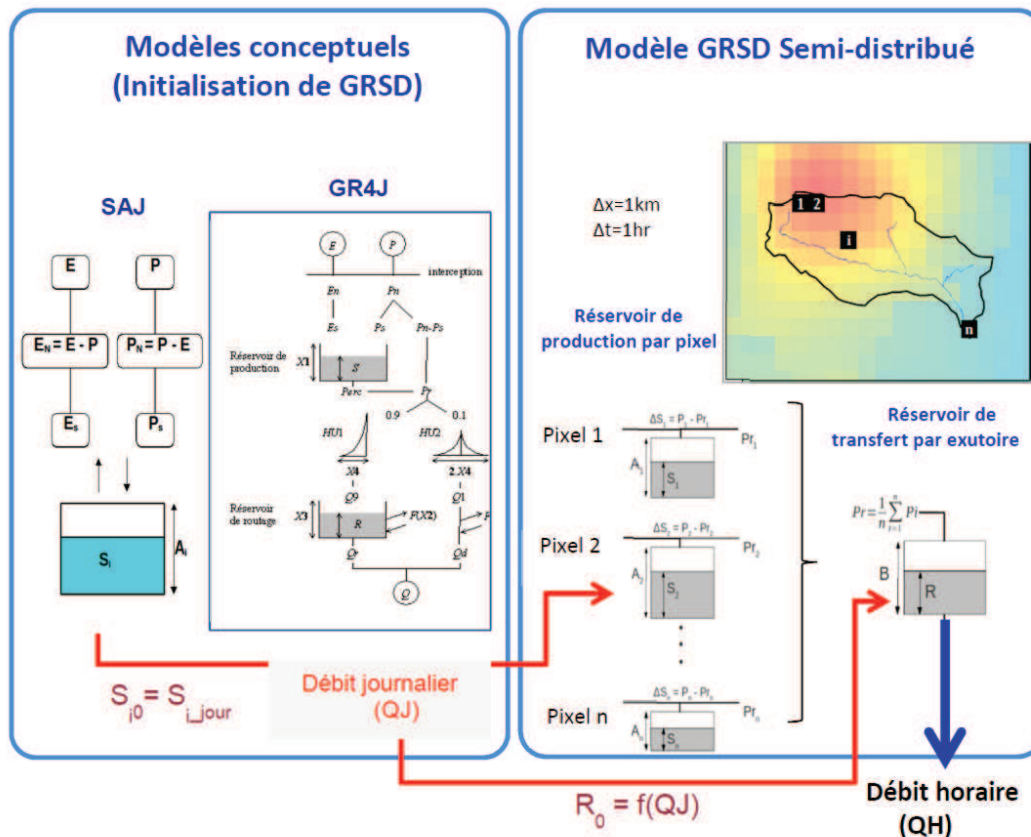


Figure 1.19: Schéma descriptif du modèle hydrologique GRd. Les pluies (P) et l'évapotranspiration (E) sont les entrées du système, et les débits journaliers et horaires (QJ et QH) sont les sorties. (Fouchier et al. 2017)

Les valeurs seuils de débit pour la caractérisation de l'aléa crue étaient auparavant calculées avec la méthode SHYREG (Javelle et al. 2014), de la même manière que pour la méthode AIGA PLUVIO. Ainsi, les quantiles de débits étaient tirés des distributions de fréquence des chroniques de débits modélisés.

Depuis 2016, grâce à des chroniques de pluie suffisamment longues : à savoir 18 ans, les quantiles de débit ne sont plus déterminés à partir de la méthode SHYREG. Ils sont désormais générés à partir de la modélisation par GRD des pluies horaires en continu entre 1998 et 2015. Les quantiles de crue de référence ont été estimés en appliquant une loi de Gumbel aux valeurs annuelles maximum des débits simulés (Javelle et al. 2016).

De ces quantiles de crue ont été extraits 3 niveaux de sévérité, similaires aux niveaux de sévérité de l'aléa pluie pour AIGA PLUVIO c'est-à-dire associés aux périodes de retour de 2 à 10 ans, 10 à 50 ans et supérieures à 50 ans. Ces niveaux de sévérité de l'aléa se distinguent notamment de ceux utilisés dans Vigicrues-Flash.

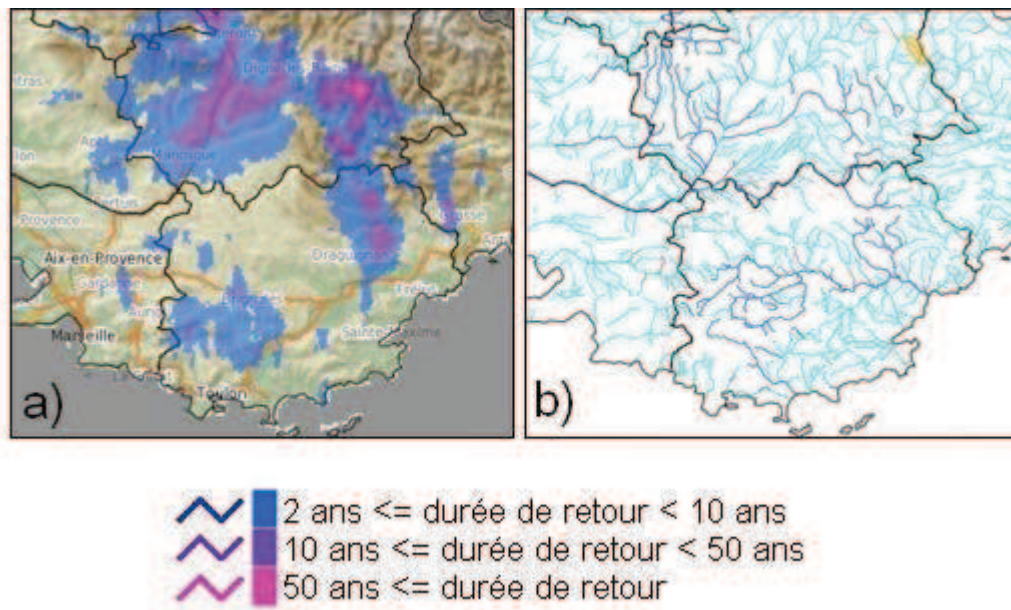


Figure 1.20: Comparaison des qualifications AIGA PLUVIO sur 24h (a) et AIGA HYDRO (b) pour l'évènement du 21 novembre 2016

Ainsi la Figure 1.20 présente en parallèle une cartographie de l'aléa pluviométrique et de l'aléa hydrologique lors de l'évènement du 21 novembre 2016 en région PACA. L'aléa hydrologique est représenté par tronçon de cours d'eau. Nous reviendrons plus précisément dans la suite de la thèse sur cette notion de tronçon.

3.2. Travaux de thèses antérieurs

Comme cela a été dit, au cours des dernières années, la méthode AIGA a pu être testée dans le cadre de la plateforme RHyTMME au niveau de la région PACA, mais également au niveau national dans le cadre des avertissements APIC et Vigicrues-Flash, déployés. Cependant, si la méthode présente de nombreux atouts, certaines limites et pistes d'améliorations se doivent d'être soulignées. Pour cela, la prochaine section s'intéresse à trois thèses terminées ou en cours qui tentent d'y apporter une réponse.

Amélioration du modèle hydrologique par l'assimilation de données

Dans le cadre de sa thèse débutée en 2017, Maxime Jay-Allemand explore deux axes d'amélioration de la méthode AIGA :

- Le premier axe consiste à travailler sur la structure du modèle hydrologique, pour le rendre plus simple, et donc plus facile à caler.
- Le second axe explore la possibilité de prendre en compte les erreurs de modélisation en temps réel, pour améliorer les prévisions en sites non jaugés.

Incertitudes et prévision d'ensembles

Dans sa thèse soutenue en 2017, Angélica Caseri s'est intéressée quant à elle à l'apport des prévisions d'ensembles des pluies dans l'amélioration des avertissements de la méthode AIGA. En effet, la méthode AIGA actuelle s'appuie sur les pluies radars observées et n'utilise donc pas la pluie prévue. Or, AIGA est une méthode d'anticipation des crues rapides, l'augmentation de ses délais d'anticipation constitue donc un enjeu majeur pour son utilisation opérationnelle dans le domaine de la gestion de crise.

C'est pourquoi cette thèse s'est portée sur la prévision d'ensembles des pluies, permettant de réduire le délai d'anticipation du modèle hydrologique pluie-débit actuellement limité au seul transfert des eaux au sein du bassin versant. De plus, la méthode actuelle étant déterministe, elle ne prend pas en compte les incertitudes. L'intégration de ces pluies d'ensemble prévues permettrait de rendre la méthode probabiliste et ainsi de quantifier la probabilité d'occurrence des évènements de crue.

Adaptation au milieu montagneux et évaluation de la méthode

Dans sa thèse soutenue en 2014, Dimitri Defrance a proposé deux axes d'amélioration de la méthode AIGA. Dans le cadre du projet RHyTMME (Westrelin et al. 2012, Kabeche et al. 2012), le premier axe consistait à l'adaptation de la méthode aux zones montagneuses. En effet, le modèle utilisé par AIGA étant *« conçu pour modéliser les crues soudaines générées par les écoulements de surface, il ne modélise pas les phénomènes de fonte de neige et d'écoulements souterrains, ce qui peut expliquer ses moindres performances sur les Alpes et les Pyrénées et dans les régions caractérisées par des écoulements souterrains importants. »* (Fouchier et al. 2017).

Afin d'évaluer la performance de la méthode, le deuxième axe d'amélioration portait sur le développement d'une méthode d'évaluation du modèle utilisé par AIGA sur les petits bassins-versants, par l'intermédiaire de relevés de dégâts post-événements tirés d'une base de données fournie par les services de restauration de montagne (RTM).

Ainsi, chacune des thèses présentées dans cette section propose un axe d'amélioration différent de la méthode AIGA. Si les thèses de Caseri et Jay-Allemand portent plus spécifiquement sur l'amont de la méthode, à savoir le modèle hydrologique et les données de pluies en entrée, la thèse de Defrance s'intéresse quant à elle en partie à son aval, à savoir l'évaluation de la pertinence des avertissements émis à l'aide d'information sur les dégâts.

Conclusion du chapitre et positionnement de la thèse

Il n'est pas possible de prévoir les crues qui se produiront dans un lointain futur. Cependant, leur localisation et l'intensité attendue peuvent être anticipées de quelques heures jusqu'à plusieurs jours avant leur survenue. Cette anticipation rend possible l'émission d'avertissements suffisamment précoces pour permettre de déclencher des alertes et de mettre en place une organisation adaptée de la gestion de crise.

Ainsi, l'efficacité des alertes aux inondations dépend de l'ensemble des maillons de la chaîne de l'alerte introduite dans ce chapitre. Or il existe une multitude de méthodes de prévisions et d'avertissements à travers le monde dont nous nous sommes attachés à ne présenter que trois exemples à savoir les Etats-Unis, l'Europe et la France. Ces trois exemples ont permis d'illustrer la difficile mise en œuvre de l'ensemble des composantes de la chaîne d'alerte face aux besoins croissants des gestionnaires du risque à différentes échelles du territoire.

En France, la chaîne d'alerte aux inondations dépend en grande partie du système Vigicrues qui fournit en temps réel une information précise sur l'état des cours d'eau et les risques potentiels liés à leur débordement. Cependant, les phénomènes de crues rapides posent plusieurs problématiques auxquelles le système Vigicrues ne peut apporter de réponse. En effet, les crues rapides surviennent principalement sur de petits bassins versants ne bénéficiant pas d'instruments de mesure et pour lesquels d'autres méthodes doivent être explorées.

Voilà pourquoi la méthode AIGA a été développée afin de fournir des avertissements en temps réel sur l'intensité des crues rapides, à partir de données de pluies observées par les radars météorologiques. Développée depuis près de 20 ans, la méthode a connu de nombreuses innovations depuis sa première mise en œuvre, notamment au niveau de son modèle hydrologique (Figure 1.21).

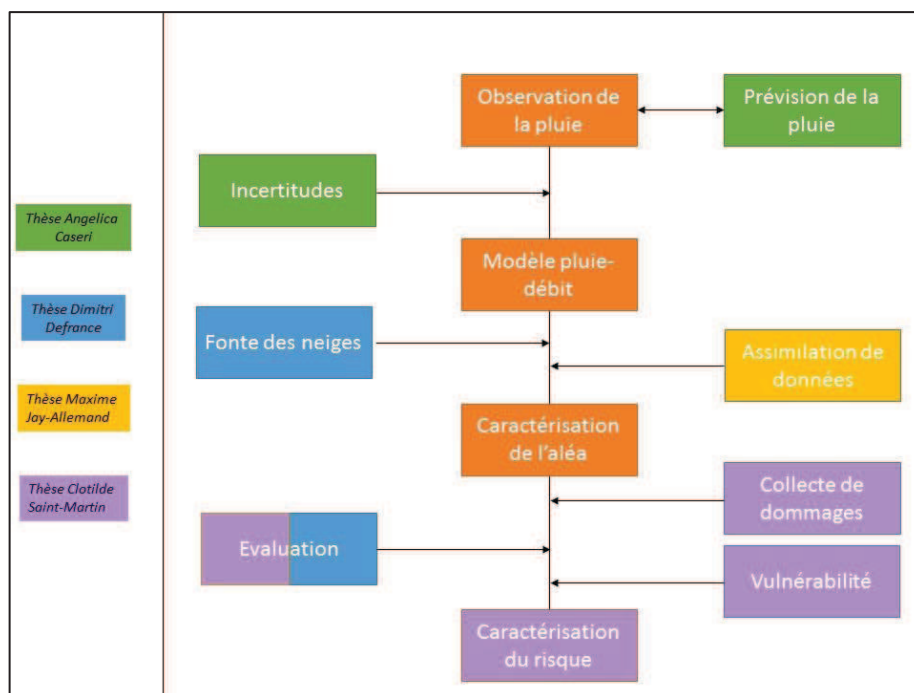


Figure 1.21 : Axes d'amélioration de la méthode AIGA et objectifs de la thèse (en rose)

Cependant, depuis sa mise en œuvre opérationnelle dans le cadre du système Vigicrues-Flash début 2017, la question de l'efficacité des avertissements fournis aux communes de son réseau est devenue une problématique majeure. Une première évaluation de la méthode a été proposée par D. Defrance dans le cadre de sa thèse, qui a notamment fourni une comparaison entre les avertissements hydrologiques issus de la méthode AIGA et des données de dommages.

Or, il ne peut y avoir de contingence entre la survenue de dommages et l'aléa seul. C'est pourquoi, afin d'établir le lien entre la sévérité de l'aléa hydrologique et l'endommagement lié aux crues, il est nécessaire d'associer celle-ci à une évaluation des enjeux du territoire. L'objectif de cette thèse est d'appuyer cette évaluation par la caractérisation de la vulnérabilité de ses principaux enjeux. L'objectif est ainsi de pouvoir moduler les avertissements hydrologiques de la méthode AIGA avec une information sur les enjeux pour caractériser, non plus l'aléa seul, mais bien le risque de dommages lié à la crue d'un cours d'eau (Figure 1.21).

Chapitre 2 : Enjeux et vulnérabilité du territoire, comment mesurer l'immesurable ?

SOMMAIRE

Introduction du chapitre	51
1. Une profusion de termes et de significations	53
1.1. Qu'est-ce qu'un enjeu ?	53
1.2. L'exposition à l'aléa	54
1.3. Pas une, mais des vulnérabilités.....	55
Choix pour la suite de la thèse	58
1.4. Les mesures de la vulnérabilité territoriale	59
1.5. Typologie des enjeux selon leur nature.....	60
2. Méthode développée pour l'évaluation de la vulnérabilité territoriale.....	62
2.1. Une typologie d'enjeux s'appuyant sur la BDTOPPO	62
2.2. Choix d'une méthode d'aide à la décision multicritères	64
Choix d'une problématique	64
Choix d'une méthode d'agrégation.....	66
Choix d'une méthode de pondération	67
2.3. La méthode AHP	70
3. Application de la méthode à la région Provence-Alpes-Côte d'Azur	74
3.1. Sélection d'un panel d'experts représentatif de la vulnérabilité du territoire	74
Echantillonnage	74
Présentation du panel d'experts.....	79
Conduite des entretiens	80
3.2. Présentation des résultats obtenus	82
3.3. Analyse des résultats obtenus	84
Influence du choix des communes interrogées sur les scores de vulnérabilité	84
Influence du profil des gestionnaires interrogés sur les scores de vulnérabilité	87
Conclusion du chapitre	91

Chapitre 2 : Enjeux et vulnérabilité du territoire, comment mesurer l'immesurable ?

« Dieu n'est pas fou. Et malgré quelques fantaisies comme la famine, la peste, la guerre et les inondations, tout me fait croire que Dieu est une personne de bon sens. D'ailleurs, à l'âge qu'il a, le contraire serait bien étonnant. »

Marcel Pagnol, Le Schpountz (1938)

Qu'est-ce qu'un enjeu et les composantes qui le caractérisent ?
Comment mesurer la vulnérabilité d'un territoire ?
Comment prendre en compte différents types d'enjeux au sein d'un même référentiel ?

Introduction du chapitre

Au Moyen-Âge, les catastrophes naturelles étaient majoritairement perçues par les sociétés de l'époque comme un châtiment divin en punition des péchés des Hommes. Ainsi, nombreux sont les témoignages que l'on retrouve dans la littérature médiévale qui appuient cette origine divine de la catastrophe. Parmi ces derniers, on peut notamment citer celui de Giovanni Villani, chroniqueur et homme politique italien du XIII^e siècle, qui déclara suite à l'inondation de la ville de Florence (Italie) en 1333 *« je suis de cette opinion sur ce déluge : à cause de nos outrageux péchés, Dieu nous a envoyé ce jugement en utilisant le cours du ciel »*.

Cependant, certaines causes physiques des catastrophes naturelles étaient déjà évoquées à cette époque mais ce n'est qu'au siècle des Lumières que l'on assiste véritablement en France à la fin du paradigme religieux. Ainsi, suite au séisme de Lisbonne (Portugal) en 1755, Rousseau s'inscrit en contradiction avec la notion de fatalité des phénomènes naturels exposée par Voltaire : *« concevez que si la nature n'avait point logé là 20 000 maisons de 6 à 7 étages, le dégât eût été beaucoup moindre, et peut-être nul »*.

Dans cette citation, la responsabilité de l'Homme dans la survenue des catastrophes naturelles est clairement identifiée. En effet, Rousseau établit ici un lien direct entre la présence d'enjeux, *« 20 000 maisons »* et la survenue de *« dégâts »*. Il s'agit d'une première reconnaissance du rôle de ce que l'on nommera plus tard *« l'exposition »* à l'aléa, dans la survenue des catastrophes naturelles.

Ainsi à partir du XVIII^e siècle, la fin du fatalisme religieux s'inscrit en parallèle de la naissance de l'Etat moderne : *« l'homme est seul, sans le secours de la Providence et face à son histoire. Il s'est arrogé l'immense tâche de contribuer à l'éradication des calamités dont il prétend maîtriser le processus et édulcorer la fatalité »* (Walter 2009).

Agir sur les processus physiques des catastrophes permet donc de réduire leurs conséquences (Cutter 1994). S'en suivent alors de vastes programmes de protection contre les catastrophes afin de tenter d'en « *maîtriser le processus* ». Par exemple, dans le cas des inondations, l'Etat Français réalise l'allongement et le rehaussement de digues le long des principaux cours d'eau du territoire, dans le but d'en maîtriser le débordement. Il s'agit donc d'une approche naturaliste où l'homme est soumis à la nature qui se manifeste avec les aléas.

Il faudra attendre la fin du XXe siècle pour que s'atténue en France la focalisation sur l'aléa et que les scientifiques s'intéressent à la composante sociale du risque (Veyret and Reghezza 2006) notamment à travers les notions d'enjeu, d'exposition et de vulnérabilité: « *il est peut-être temps de prendre au sérieux la vulnérabilité et d'engager à son sujet des recherches tout aussi longues et complexes que celles concernant les aléas* » (Gilbert 2006). La Figure 2.1 illustre notamment l'évolution croissante du recours à la notion de vulnérabilité au sein de la communauté scientifique.

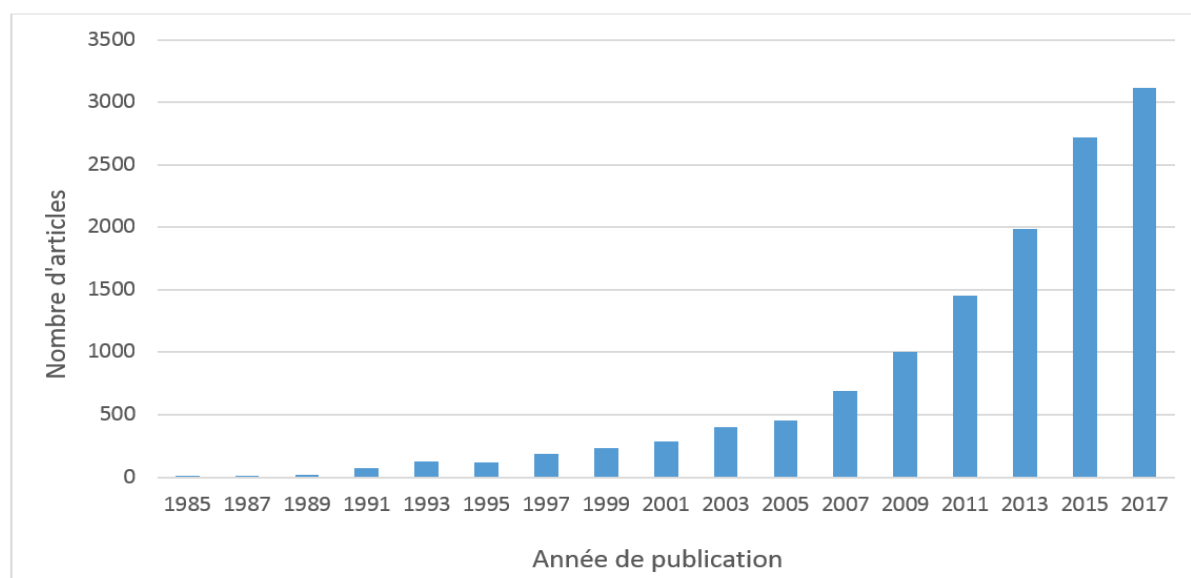


Figure 2.1 : Evolution de l'utilisation du terme de vulnérabilité dans les articles sur l'environnement, l'aménagement, la géographie et l'urbanisme tirés de Web of Science entre 1980 et 2017 – Source : Barroca, DiNardo and Mboumoua (2013)

L'objectif de ce chapitre est de définir ce qu'est la vulnérabilité d'un territoire et de fournir une méthode afin de l'évaluer de manière objective. Comme nous le verrons dans les chapitres ultérieurs, croisée à la qualification de l'aléa par la méthode AIGA, cette évaluation de la vulnérabilité territoriale permettra de caractériser le risque de dommages liés aux inondations, lors de la survenue d'un événement de crue.

Une première partie portera sur la définition de ce que sont les différentes vulnérabilités qui peuvent caractériser les enjeux du territoire, et nous amènera à nous intéresser à la vulnérabilité territoriale. Dans une seconde partie, plusieurs méthodes de mesure de cette vulnérabilité seront exposées avant d'arrêter notre choix sur une méthode d'analyse multicritères. Enfin, dans une dernière partie, nous appliquerons la méthode retenue au cas de la région Sud, Provence, Alpes, Côte d'Azur, en allant interroger directement des gestionnaires du risque inondation de près d'une vingtaine de communes.

1. Une profusion de termes et de significations

Si la prise en compte de la composante sociale du risque a été tardive, elle s'est accompagnée d'une profusion polysémique de définitions autour des termes qui la caractérisent, à savoir ceux d'enjeu, d'exposition et surtout de celui de vulnérabilité qui souffre : « *d'un trop plein sémantique* » (Fabiani and Theys 1987). Face à ce flou sémantique impliquant une certaine confusion de compréhension, il semble donc nécessaire de clarifier la définition de ces termes avant de pouvoir les employer.

1.1. Qu'est-ce qu'un enjeu ?

Qu'il s'agisse des notions de vulnérabilité, d'exposition ou de risque, elles se rapportent toujours à la notion d'enjeu. Dans sa définition classique, le terme d'enjeu est utilisé dans le champ lexical du jeu et de la compétition. Ainsi le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) le définit comme « *ce que l'on risque dans un jeu* » ou encore « *ce que l'on peut gagner ou perdre dans n'importe quelle entreprise* ». La notion d'enjeu est donc particulièrement liée à celle de risque : s'il n'y a pas d'enjeu, il n'y a pas de risque de perdre.

Cette définition souligne la forte polysémie du terme en fonction de la subjectivité des acteurs auxquels il se rapporte : « *l'enjeu, c'est [...] tout ce qu'une société juge important et qu'elle peut perdre* » (Metzger and D'Ercole 2008). Ainsi, dans une situation similaire, deux acteurs pourront percevoir le risque différemment en fonction de leurs enjeux au sein de cette situation.

Dans le domaine des catastrophes naturelles, la notion « d'enjeu » est apparue pour la première fois en France à la fin des années 1980, lors d'études préliminaires à la cartographie des risques naturels. Le but de ces études était d'identifier les « *populations en danger, les établissements recevant du public, les équipements sensibles (centraux téléphoniques, centres de secours) et les voies de circulation susceptibles d'être coupées ou au contraire accessibles pour l'acheminement des secours* » (Dupuy, Garry and Graszak 1997). Ces études ont servi de base à la mise en place des Plans de Prévention des Risques (PPR) par la suite.

D'Ercole and Metzger (2004) font partie des pionniers à avoir considéré les enjeux au cœur du risque, en s'appuyant sur le cas de la ville de Quito en Equateur : « *sans avoir la prétention de redéfinir le concept de risque, on peut considérer que ce qu'il exprime, est la possibilité de perdre ce à quoi on accorde de l'importance* » (Metzger and D'Ercole 2008). Depuis, la prise en compte des enjeux au sein des analyses de risque s'est systématisée, de telle sorte qu'il est aujourd'hui communément admis que l'équation du risque résulte du croisement d'au moins un aléa et un enjeu.

Les enjeux peuvent être de natures très différentes : « *les enjeux sont représentés par les personnes, les biens publics et privés, les activités économiques, l'environnement, exposés aux aléas* » (Veyret and Reghezza 2005) et peuvent être concernés par différents types d'endommagement, en fonction de leur vulnérabilité.

Cette définition d'enjeu peut également varier en fonction de l'échelle spatiale et temporelle à laquelle on s'intéresse. Ainsi, au niveau du territoire, la notion d'enjeu sera plutôt définie

comme celle des « éléments clés qui permettent à l'ensemble d'un territoire de fonctionner, de se développer et de faire face à une situation d'urgence » (D'Ercole and Metzger 2009).

Ainsi, un enjeu se définit en fonction de l'échelle vis-à-vis de laquelle il est considéré, mais aussi de sa nature, de son exposition et enfin de sa vulnérabilité.

1.2. L'exposition à l'aléa

Le mot « exposition » provient du verbe latin *exponere* qui se compose du préfixe « ex », marquant la sortie et la séparation, et du verbe *ponere* signifiant l'action de poser ou placer. Littéralement, *exponere* peut donc se traduire en français comme « placer à l'extérieur ». Si dans le dictionnaire latin-français Gaffiot, le premier sens du mot signifie « mettre en vue, étaler », on retrouve également celui de « livrer à la merci de ». Cette notion de mise en danger se retrouve également en 1690, dans le dictionnaire universel d'Antoine Furetière avec une définition d'exposition telle qu'une « situation de risque, position découverte ou dangereuse ».

Le CNRTL définit le verbe *exposer* comme « soumettre à l'action de » ou encore « laisser l'action de quelque chose s'exercer sur quelque chose ». Dans le contexte des risques naturels, l'exposition correspond donc à la coïncidence spatiale d'un enjeu et d'un aléa. Ainsi, pour reprendre une définition de la sécurité civile québécoise, un élément exposé peut se définir comme un « élément [...] susceptible d'être affecté par un aléa naturel ou anthropique ».

Dans le cas des inondations, l'exposition aux inondations se rapporte donc à la présence d'enjeux en zone inondable ; il s'agit de « la prédisposition d'un système à être interrompu par une crue en raison de sa localisation dans la même zone d'influence » (Balica 2007). Il s'agit d'un facteur de risque important. C'est pourquoi la loi du 13 juillet 1982 prévoyait la mise en place de Plans d'Exposition aux Risques (PER). Ce sont les ancêtres des PPR (Plan de Prévention des Risques), qui les ont remplacés en 1995, soit 10 ans après leur création. Les PER avaient pour but d'identifier les zones exposées à l'aléa afin « d'interdire de nouvelles constructions dans les zones les plus exposées d'une part » ; et de mettre en place « des prescriptions spéciales pour les constructions nouvelles autorisées dans les zones moins exposées » d'autre part (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2018a).

Cette notion d'enjeu plus ou moins exposé soulève le problème de la mesure de l'exposition. En effet, si l'exposition aux inondations se rapporte à la seule présence d'enjeux en zone inondable, elle devrait donc s'exprimer de manière binaire : un enjeu sera exposé ou non exposé.

La notion d'exposition est souvent confondue avec celle de vulnérabilité. Pourtant, un élément peut être exposé à un aléa sans y être vulnérable. Par exemple, un bâtiment situé en zone inondable mais équipé de protections contre les inondations sera exposé à l'aléa inondation mais n'y sera pas vulnérable d'un point de vue matériel. Inversement, un élément peut être vulnérable à une inondation sans y être exposé directement. Ainsi, une entreprise située hors zone inondable sera vulnérable à l'inondation si ses employés ou ses clients habitent en zone inondable et ne peuvent s'y rendre : des pertes sont à attendre d'un point de vue économique, même si physiquement l'entreprise n'est pas inondée et ne déplore aucun dommage matériel.

La distinction entre les notions de vulnérabilité et d'exposition est donc particulièrement délicate, ce qui explique que leur confusion soit récurrente. C'est pourquoi, sans pour autant considérer ces deux notions équivalentes, D'Ercole and Metzger (2005) postulent que l'exposition est un facteur de vulnérabilité.

1.3. Pas une, mais des vulnérabilités

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, les notions de vulnérabilité et d'exposition sont particulièrement imbriquées, voire parfois confondues. On retrouve également parfois un amalgame entre les termes de vulnérabilité et de risque mais aussi de vulnérabilité et d'enjeu. Pourtant « *il convient de bien distinguer les enjeux de leur vulnérabilité alors qu'une tendance à la confusion englob[e] tout ce qui ne rel[ève] pas de l'aléa sous le vocable 'les vulnérabilités'* » (Leone 2007). Cette confusion peut être due au caractère fortement polysémique du terme « vulnérabilité ».

Cette polysémie trouve notamment son origine dans l'emploi pluridisciplinaire de ce terme. En effet, on retrouve la notion de vulnérabilité au sein de multiples domaines allant de la médecine à l'économie. Par exemple, le mot clef vulnérabilité et son homonyme anglais vulnerability renvoient sur le moteur de recherche bibliographique Google Scholar à respectivement 134 000 et 2,8 millions de résultats. C'est pourquoi il n'est pas rare d'entendre parler de « vulnérabilités » au pluriel.

A la fin du XXe siècle, Cutter (1996) identifiait déjà 18 définitions différentes de la vulnérabilité, et ce uniquement dans le domaine environnemental. Dès lors, nombreux sont les auteurs à avoir souligné une « profusion de définitions » autour du terme de vulnérabilité (Pigeon 2005), ce qui contribue à une certaine difficulté de compréhension et d'assimilation de cette notion complexe.

Afin de mieux appréhender ce terme, nous allons nous intéresser à son étymologie. Le terme de vulnérabilité provient du mot latin « vulnus » signifiant blessure. Il renvoie donc à une notion d'atteinte physique et de faiblesse. En effet, encore aujourd'hui, le CNRTL définit un objet « vulnérable » comme étant « exposé aux blessures, aux coups ».

Or comme nous l'avons évoqué en début de section, y compris dans le domaine des risques naturels, le terme de vulnérabilité est multiple puisqu'il « *évoque aussi bien la dépendance ou la fragilité, la centralité, l'absence de régulation efficace, le gigantisme ou la faible résilience* » (Fabiani and Theys 1987).

En Annexe A, un inventaire non-exhaustif de plusieurs définitions de la vulnérabilité prises dans la littérature sur les risques a été dressé. On peut ainsi recenser plus de 40 définitions différentes. Birkmann définit quant à lui la vulnérabilité à plusieurs niveaux, qu'il nomme « sphères », qui sont représentés en Figure 2.2 (Birkmann and Wisner 2006). Cette conception d'une vulnérabilité à plusieurs dimensions illustre la difficile perception de cette notion plurielle. Elle permet également d'expliquer la coexistence de nombreuses définitions différentes dans la littérature, que l'on peut tenter de regrouper en plusieurs familles.

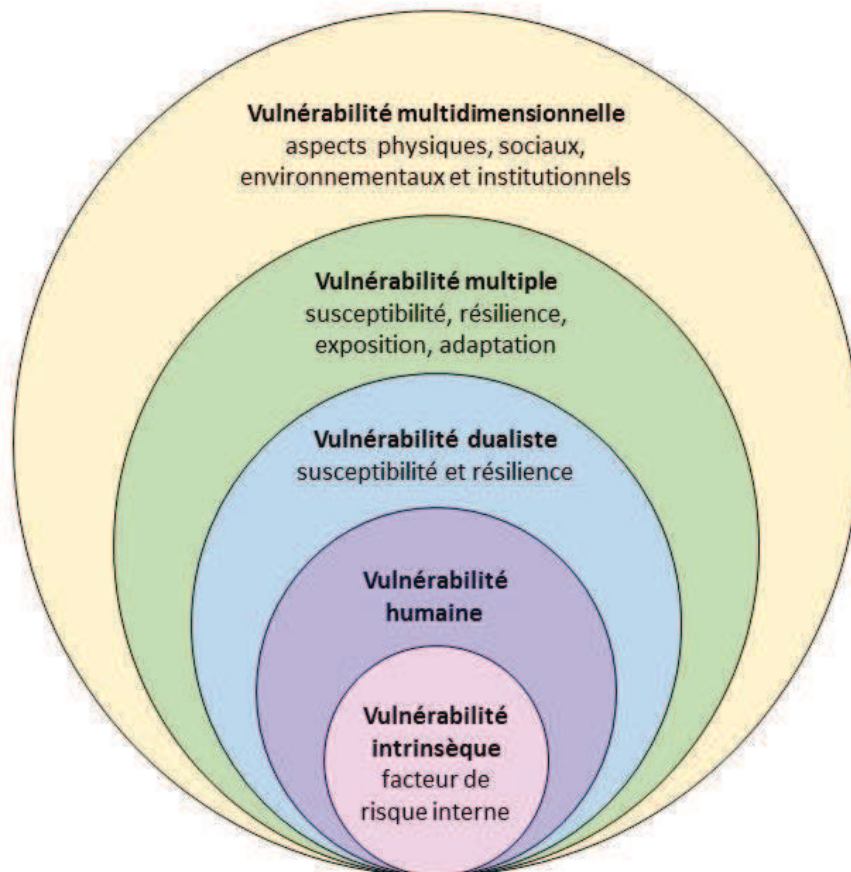


Figure 2.2: Les différentes sphères de vulnérabilités, traduit de (Birkmann and Wisner 2006)

En effet, parmi les définitions de la vulnérabilité présentées en Annexe A on retrouve de manière récurrente deux concepts qui sont :

- Le « *degré d'incapacité à faire face aux conséquences* » d'une catastrophe (Watson, Zinyowera and Moss 1996) ou encore la résilience.
- La propension d'un enjeu à subir une dégradation du fait d'un aléa. Cette définition a été pour la première fois proposée en France par D'Ercole et al. (1994a), qui définissent la vulnérabilité dans le domaine des catastrophes comme « *la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique. Cette propension varie selon le poids de certains facteurs qu'il est nécessaire d'identifier et d'analyser car ils induisent un certain type de réponse de la société* ».

Selon la deuxième définition donnée ci-dessus, il semble donc que la vulnérabilité « *varie selon le poids de certains facteurs* ». Ces facteurs peuvent être multiples : matériels, économiques, sociaux, politiques, institutionnels, culturels, etc. Afin de mieux les appréhender, plusieurs typologies tentent de distinguer les différentes catégories de vulnérabilités. Parmi ces typologies, on peut en relever plusieurs exemples dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1: Exemple de typologies de vulnérabilités dans la littérature

Auteur	Types de vulnérabilité
Belmonte, López-García and Soriano-García (2011)	Interne et externe
D'Ercole et al. (1994a)	Structurelle et conjoncturelle
Cutter, Boruff and Shirley (2003)	Biophysique et sociale
Leone F. (2007)	Structurale, corporelle, humaine, institutionnelle, environnementale et fonctionnelle
Reghezza (2009)	Matérielle, fonctionnelle, structurelle
Barroca, Pottier and Lefort (2005)	Liée à l'aléa, la population, le bâti, liée aux usages et liée à la gestion de crise
Ledoux (2006)	Matérielle, humaine et fonctionnelle
D'Ercole et al. (1994a)	Territoriale, technique, culturelle et historique, psychosociologique, socio-économique

Appréhender la vulnérabilité dans son ensemble semble donc une tâche particulièrement ardue qui nécessiterait donc une étude spécifique de chacun des individus potentiellement exposé à l'aléa. C'est pourquoi dans les différentes approches existantes sur la vulnérabilité, les auteurs n'hésitent pas à se focaliser sur certains aspects de la vulnérabilité « *l'analyse d'une vingtaine d'études de vulnérabilité montre qu'elles ne tiennent souvent pas compte de l'ensemble des éléments vulnérables* » (Griot 2007). S'il eut été intéressant d'explorer l'ensemble des vulnérabilités propres à un territoire et aux éléments qui le composent, ce qui correspond le mieux à notre objectif est exprimé par la vulnérabilité territoriale.

Choix pour la suite de la thèse

Dans cette thèse, nous avons donc fait le choix de nous intéresser à ce que Reghezza (2009) nomme « vulnérabilité fonctionnelle » ou encore ce que D'Ercole and Metzger (2009) nomme la vulnérabilité « territoriale ». Notre objectif est donc *« d'identifier, caractériser et hiérarchiser les espaces à partir desquels se crée et se diffuse la vulnérabilité au sein du territoire »*.

La vulnérabilité territoriale est un concept relativement récent. Peu d'études se sont jusqu'ici intéressées au concept des enjeux majeurs au cœur d'un système territorial. En France on peut notamment citer les travaux de Barrère-Lutoff (2000) sur le risque sismique au sein de la ville de Nice ; ceux de Baussart et al. (2000) sur le risque sismique dans la ville d'Annecy ; et enfin la thèse de Renard (2010) portant sur le risque d'inondation par ruissellement urbain au sein de la métropole Lyonnaise.

La notion de vulnérabilité territoriale découle de l'idée qu'il existe un lien direct entre les enjeux majeurs et le territoire dans lequel ils s'inscrivent : *« la vulnérabilité territoriale renvoie à l'idée qu'il existe, au sein de tout territoire, des lieux susceptibles d'engendrer et de diffuser une vulnérabilité à l'ensemble d'un territoire, provoquant des effets qui peuvent perturber, compromettre, voire interrompre son fonctionnement »* (Metzger and D'Ercole 2008).

Ce lien étroit entre enjeux majeurs et territoire implique la transmission inévitable de la vulnérabilité d'un enjeu majeur identifié et localisé, à l'ensemble du territoire. Autrement dit, la vulnérabilité d'un territoire peut s'appréhender par la vulnérabilité de ses enjeux majeurs. L'objectif est donc de *« considérer en priorité ces espaces dans la mesure où ils peuvent perturber, compromettre, voire interrompre le fonctionnement et le développement du territoire »* (D'Ercole and Metzger 2009).

Cependant, à la différence de D'Ercole qui considère la vulnérabilité territoriale indépendamment de l'aléa, nous nous intéresserons à la vulnérabilité territoriale spécifique, c'est-à-dire celle des territoires exposés à l'aléa crue.

1.4. Les mesures de la vulnérabilité territoriale

Lors de la conférence mondiale sur la réduction des risques de catastrophes ayant eu lieu en 2005 à Kobe (Japon), la mesure de la vulnérabilité est apparue comme le point de départ nécessaire à la mise en place de futures actions de lutte contre les catastrophes à travers le monde: « *Develop systems of indicators of disaster risk and vulnerability at national and sub-national scales that will enable decision-makers to assess the impact of disasters on social, economic and environmental conditions and disseminate the results to decision makers, the public and populations at risk* » (UNISDR 2005).

Pourtant, les multiples définitions du concept de vulnérabilité ainsi que les différents paramètres qui s'y rapportent en font une variable très complexe à appréhender et d'autant plus à mesurer. En effet, il s'agit d'une variable fortement subjective selon le contexte auquel elle se rapporte (Downing et al. 2001). Voilà pourquoi Birkmann and Wisner (2006) vont jusqu'à décrire le concept de vulnérabilité comme étant non-mesurable.

Pourtant la vulnérabilité peut être mesurée, cette mesure ne peut cependant pas être généralisée. En effet, la mesure de la vulnérabilité doit être adaptée au contexte dans lequel elle s'inscrit. La vulnérabilité est variable dans le temps et l'espace. Elle varie également en fonction de l'aléa et des objectifs de l'étude dans laquelle elle s'inscrit. Voilà pourquoi de nombreuses méthodes de mesure existent.

La multiplicité des méthodes utilisées en géographie des risques afin de mesurer la vulnérabilité peut s'inscrire en opposition avec la mesure de l'aléa, qui se doit, quant à elle, d'être générique et codifiée car basée sur des lois physiques. Cependant, adapter les indicateurs aux paramètres doit être appréhendé comme un gage d'efficacité car envisager une vulnérabilité « générique » avec des indicateurs globaux ne peut aboutir à une réelle caractérisation de la vulnérabilité propre à un territoire.

Voilà pourquoi il existe de nombreuses méthodes de mesure de la vulnérabilité dans le domaine des risques naturels qui varient selon la définition de vulnérabilité retenue par les auteurs, les facteurs de vulnérabilité considérés et l'échelle spatiale étudiée.

Le site internet « ProVention Consortium » est né de la coopération de plusieurs pays pour le développement et le partage de méthodes d'analyse des risques naturels. On y trouve plus de vingt méthodes de mesure de la vulnérabilité, chacune avec une définition spécifique du terme.

Ainsi, la vulnérabilité peut être mesurée de manière qualitative ou quantitative à travers :

- La sensibilité à l'aléa : analyse de l'élément vulnérable au moyen d'indicateurs ou de diagnostics (Vinet 2010),
- La caractérisation de l'endommagement prévu : mesure des dommages prévus exprimée sous la forme d'un score, d'une échelle ou d'un taux (Blong 2003b),
- La capacité de réponse face à l'aléa : analyse de l'efficacité des actions et mesures mises en place pour la réduction du risque par comparaison avec l'absence de moyens mis en place (Treich 2005).

La méthode la plus commune de mesure de la vulnérabilité passe par la sélection de différents critères pour la constitution d'indicateurs de vulnérabilité. C'est notamment le cas de l'indice développé par les Nations-Unies dans le cadre du projet GRAVITY appelé « Disaster Risk Index » (DRI), constitué à l'échelle du pays (Peduzzi et al. 2009).

En France, l'Observatoire National des Risques Naturels (ONRN) propose également une série d'indicateurs de vulnérabilité à l'échelle communale basés sur une analyse de l'exposition, de la sinistralité et de la prévention liées aux catastrophes. Pour les inondations, ces indicateurs s'appuient notamment sur un référentiel national de vulnérabilité aux inondations (Vallaud et al. 2016). Dans son mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Leone (2007) identifie également plus de 25 indicateurs de vulnérabilité créés en France par divers auteurs.

Il existe donc autant de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité qu'il n'en existe de définitions. Afin de pouvoir la mesurer il est donc nécessaire d'identifier les enjeux auxquels elle se rapporte. Dans la prochaine section, différentes typologies d'enjeux seront présentées, dans l'objectif de recenser quels sont les enjeux majeurs du territoire sur lesquels reposent la vulnérabilité territoriale de ce même territoire.

1.5. Typologie des enjeux selon leur nature

En considérant qu'un enjeu peut être défini comme ce qui est important et peut être perdu, il peut exister une multitude d'enjeux de natures différentes selon les personnes, les lieux ou encore la période temporelle dont il est question. Il peut s'agir d'enjeux matériels tels qu'une maison ou une voiture, aussi bien que d'enjeux sentimentaux tels que des photos de famille par exemple. Afin de pouvoir évaluer la vulnérabilité d'un territoire, il est donc dans un premier temps nécessaire d'en identifier les enjeux afin de pouvoir les classer et les hiérarchiser pour en extraire les enjeux majeurs.

Les typologies existantes sur les enjeux sont nombreuses dans la littérature sur les risques. En effet, en fonction de l'objectif de l'étude et de l'aléa en question, les enjeux considérés ne sont pas les mêmes. La typologie des enjeux la plus répandue est celle développée par Ledoux (Hubert and Ledoux 1999, Ledoux 2006) et présentée ci-dessous :

- Habitat,
- Activités économiques,
- Enjeux agricoles,
- Infrastructures publiques,
- Enjeux humains.

Aux Etats-Unis, l'Agence fédérale des situations d'urgence dite FEMA s'appuie sur un logiciel de cartographie afin d'estimer les pertes potentielles liées aux catastrophes naturelles appelé HAZUS. Ce logiciel identifie sept catégories d'enjeux (Scawthorn et al. 2006) qui sont :

- Les bâtiments généraux,
- Les infrastructures essentielles,
- Les zones de stockage à risque,
- Les infrastructures à haut potentiel de perte,

- Les réseaux de transport,
- La population,
- Les réseaux d'énergie.

Dans le contexte de l'étude de la vulnérabilité territoriale, D'Ercole distingue quant à lui trois grandes catégories d'enjeux qui sont les enjeux de développement, de fonctionnement et de gestion de crise (Metzger and D'Ercole 2008). A partir de ces trois grandes familles, il identifie six types d'enjeux majeurs qui sont :

- La population,
- Les établissements de santé,
- Le réseau d'électricité,
- Le système d'eau potable,
- La mobilité et les entreprises

Dans sa thèse portant sur la vulnérabilité territoriale de la ville de Lyon face à l'aléa ruissellement urbain, Renard (2010) identifie plus de cinquante natures d'enjeux différentes sur le territoire lyonnais, qu'il différencie en 3 types d'enjeux :

- Matériels,
- Humains,
- Environnementaux.

La présentation de ces quelques exemples de typologies d'enjeux illustre l'importante divergence que l'on retrouve entre les auteurs selon leurs objectifs. Voilà pourquoi le choix d'une typologie d'enjeux adaptée à notre étude est central. L'objectif de la constitution de cette typologie est d'illustrer au mieux le fonctionnement des territoires étudiés.

Pour cela, nous avons dans un premier temps distingué d'une part les enjeux humains que constitue la population et d'autre part les enjeux de type matériel tels que les bâtiments, réseaux et infrastructures. En effet, les populations ne peuvent être considérées comme des enjeux statiques dont la vulnérabilité peut être évaluée à un moment T. De nombreuses études s'attachent à caractériser la vulnérabilité des enjeux humains et soulignent qu'ils ne peuvent être traités comme les enjeux de type matériel (Milanesi, Pilotti and Ranzi 2015, Ruin et al. 2008).

Cependant, la vulnérabilité territoriale s'attache à caractériser la vulnérabilité des enjeux du territoire vis-à-vis de leur rôle au sein de celui-ci. Or, ce rôle est défini par la population même qui utilise ces enjeux (réseau routier, hôpital...). Ainsi, même si nous ne cherchons pas dans cette thèse à caractériser ni à évaluer la vulnérabilité de la population, il existe un lien direct entre celle-ci et la caractérisation de la vulnérabilité territoriale des enjeux matériels du territoire.

2. Méthode développée pour l'évaluation de la vulnérabilité territoriale

Nous présentons dans cette partie la méthode que nous avons développée pour l'évaluation de la vulnérabilité territoriale. Deux étapes peuvent être distinguées : d'abord l'identification des enjeux principaux (selon une certaine typologie) sur la zone d'étude, puis la hiérarchisation de ces enjeux. Ces deux étapes sont décrites dans les deux paragraphes ci-dessous.

2.1. Une typologie d'enjeux s'appuyant sur la BD TOPO

Notre typologie d'enjeux s'appuie sur les données de la BD TOPO développée par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière). La motivation de ce choix est de pouvoir développer une méthode issue de données facilement disponibles, et donc facilement généralisable sur l'ensemble de la France.

La BD TOPO contient une description du territoire national et de ses infrastructures sous forme vectorielle, et ce à une précision métrique. Cette description du territoire est disponible par thèmes et en 3D, ce qui permet notamment de fournir une information sur la hauteur des bâtiments. Les différents thèmes qui constituent les éléments de la BD TOPO peuvent être consultés via le lien suivant <http://professionnels.ign.fr/>.

La BD TOPO présente l'avantage de fournir de manière exhaustive une information précise de l'occupation du sol pour la France entière. En effet, en calculant la différence entre les infrastructures sur le terrain et celles contenues dans la base, on obtient 98% de concordance pour le réseau routier revêtu et 95% pour le bâti. Nous avons donc eu recours à cette base sous sa forme la plus récente c'est-à-dire la version 2.2 distribuée en 2018.

Si la BD TOPO présente l'avantage de la précision et de l'exhaustivité, quelques corrections ont dû y être apportées sur le territoire étudié dans le cadre de notre étude. La première étape de traitement de ces données a été leur actualisation et leur nettoyage afin de supprimer les doublons ainsi que les éléments dont la nature a été jugée comme non-pertinente dans le cadre de notre étude. Ainsi les catégories de Zones d'Activité suivantes ont été supprimées de notre analyse :

- Espace naturel : bois, lieu-dit, parc...
- Hydrographie : baie, canal, cascade, lac...
- Orographie : dune, cirque, grotte...

De plus, parmi les éléments composant les catégories Zones d'Activité et Réseaux, un tri a également été réalisé. Plusieurs types d'infrastructures ont été supprimés :

- Réseau routier : bac de transport auto, bac de transport piéton...
- Réseau ferré : voie inutilisée...
- Zone d'activité de transport : barrage, carrefour, rond-point, téléphérique...
- Zone d'activité administrative et militaire : borne, ouvrage militaire...

A l'aide de ces informations, des thèmes ont été constitués afin de regrouper les éléments du territoire en catégories d'enjeux. Ces catégories sont au nombre de 18 et présentées dans le Tableau 2.2. Elles reprennent dans la mesure du possible les typologies rencontrées dans l'état de l'art (Partie 1), tout en pouvant être caractérisables à l'aide de la BD TOPO. Une fois les enjeux principaux identifiés sur le territoire étudiés, l'étape suivante est de les hiérarchiser

Tableau 2.2 : Typologie d'enjeux majeurs déduite de la BD TOPO

Parking	Prison	Service, administration
<i>Souterrain, de surface</i>	<i>Etablissement pénitentiaire</i>	<i>Centre des impôts, poste</i>
Logement saisonnier	Zone d'activité	Industrie dangereuse
<i>Camping, village vacances</i>	<i>Commerce, industrie</i>	<i>SEVESO</i>
Réseau ferroviaire	Réseau routier	Réseau d'eau
<i>Voie ferrée</i>	<i>Autoroute, chemin, route départementale</i>	<i>Canalisations</i>
Scolaire	Gestion de crise	Zone résidentielle
<i>Ecole primaire, collège, lycée</i>	<i>Mairie, Préfecture, caserne de pompiers</i>	
Bâtiment de transport	Santé	Loisir
<i>Gare, aéroport</i>	<i>Hôpital, maison de retraite</i>	<i>Parc, centre de loisirs</i>
Agricole	Réseau électrique	
<i>Elevage, culture</i>	<i>Ligne électrique, transformateur</i>	

2.2. Choix d'une méthode d'aide à la décision multicritères

Afin de déterminer quels sont les enjeux qui peuvent être considérés comme « majeurs » c'est-à-dire ceux dont dépend la vulnérabilité de l'ensemble du territoire, nous avons pris le parti de suivre la méthode développée par Renard (2010) dans sa thèse. Ainsi nous avons fait le choix d'utiliser une méthode d'aide à la décision multicritères en s'appuyant directement sur les acteurs des territoires étudiés afin de « *comprendre ce qui sous-tend la prise de décision d'une action ou son absence, autrement dit ce qu'il en est de la logique de la gestion du risque. Quelles sont les revendications des communes vis-à-vis de l'inondation ? Quelle est la réaction de l'administration ? Les politiques sont-elles globalisées ou territorialisées, et qu'est-ce qui les sous-tend ? Qu'en est-il du gradient ville-campagne par rapport à l'inondation ?* » (Combe 2007).

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, le concept de vulnérabilité est particulièrement complexe car pluriel. La vulnérabilité est en effet envisageable à la fois d'un point de vue qualitatif mais également quantitatif. Afin de pouvoir évaluer ces deux aspects, nous avons fait le choix de nous appuyer sur une méthode d'aide à la décision multicritères. Il va donc s'agir de s'appuyer sur le jugement de gestionnaires du risque afin d'obtenir une évaluation de la vulnérabilité territoriale propre à chaque enjeu. Afin de choisir la méthode la plus adaptée à notre étude, notre démarche a pu être décomposée en plusieurs étapes qui vont être présentées dans cette section.

Choix d'une problématique

La première étape était de définir l'objectif de notre démarche en fonction des différentes problématiques existantes de l'aide à la décision. Pour cela, nous avons appuyé notre choix sur la typologie de Chakhar (2006) détaillée dans le Tableau 2.3.

Parmi les différentes problématiques proposées, le choix s'est porté sur la problématique γ , à savoir le rangement par classement. En effet, notre objectif est bien d'obtenir une priorisation des enjeux afin d'identifier quels sont les enjeux majeurs du territoire.

Tableau 2.3: Comparaison des problématiques d'aide à la décision multicritères, (en bleu la méthode sélectionnée dans le cadre de la thèse) – (Chakhar 2006)

Problématique d'analyse multicritère	Objectif	Procédure	Exemple	Relation avec la sensibilité des enjeux inondables
A	Choix d'un sous-ensemble	Sélection	Choix d'un site pour localisation industrielle	Faire ressortir un enjeu prioritaire sur lequel se concentrer en cas d'inondation
B	Tri par affectation des actions.	Segmentation	Affecter différentes parcelles à un type d'utilisation précis	Affecter différentes interventions en fonction de la nature de l'enjeu
Γ	Rangement par classes	Rangement	Ranger les différents sites historiques en vue d'une restauration échelonnée par ordre d'urgence	Trier les enjeux par priorité d'intervention en période de crise
Δ	Description des actions et de leurs conséquences	Cognition	Identifier et décrire dans le seul but d'apprendre et de se préparer à d'éventuels accidents contre la pollution	Identifier et décrire les vulnérabilités afin de se préparer aux différentes interventions en période de crise.

Choix d'une méthode d'agrégation

Une fois la problématique de notre démarche identifiée, nous avons sélectionné l'approche d'agrégation des jugements obtenus auprès des acteurs du risque la plus adaptée, afin de pouvoir les comparer entre eux. La problématique du rangement par classes propose trois types d'approches pour l'agrégation des jugements, qui sont présentés dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4: Types d'approches existantes pour l'agrégation des critères dans les méthodes d'aide à la décision (en bleu la méthode sélectionnée dans le cadre de la thèse)

Types d'approche	Objectif	Avantages	Inconvénients
Complète transitive	Mélanger les critères selon les jugements	Mélange de plusieurs critères, addition ou multiplication afin de créer une pondération	Arbitraire et commensurable
Partielle	Comparer les actions deux à deux	Intransitif et respecte l'incomparabilité. Surclassement permettant de faire ressortir un élément plus qu'un autre	Résultat peu clair et représentatif Ne crée pas une agrégation complète
Locale et itérative	Chercher dans le continu	Permet l'étude d'un très grand nombre d'actions Exploration locale permettant de regarder autour de l'action	Investissement de temps important, vision locale

Choix d'une méthode de pondération

Une fois la méthode d'agrégation des jugements sélectionnée, il s'agit de choisir une méthode de pondération appropriée. C'est-à-dire qu'à chaque enjeu va être attribué un score d'une valeur proportionnelle à son importance réelle dans le système territorial. Cela va donc permettre d'identifier les enjeux majeurs du territoire. Il existe un grand nombre de méthodes de pondération parmi lesquelles :

- **Méthode Condorcet**

Chaque répondant attribue un rang numérique à chacun des critères selon son importance relative. Ainsi le critère le plus important se voit attribué le rang 1, le second critère le plus important le rang 2, et ce jusqu'au dernier des n critères qui se voit attribuer le rang n . Le poids de chaque critère se rapporte à son classement (Eckenrode 1965).

- **Attribution d'un score**

Chaque répondant attribue une note à chacun des critères selon l'importance qu'il lui accorde. Les notes sont ensuite moyennées pour obtenir une note finale correspondant au poids de chaque critère (Cherqui 2005).

- **Goal-programming**

Chaque répondant attribue une note à chacun des critères selon son importance. Cette note est ensuite comparée aux notes attribuées préalablement par les destinataires de la pondération en fonction de leurs attentes. L'écart entre les notes obtenues et les notes attendues est ensuite calculé et un score est attribué à chaque critère en fonction de cet écart. Cette méthode permet de minimiser les écarts entre les attentes du destinataire de la pondération et le score obtenu auprès des répondants (Aguezzoul and Ladet 2006). Ces écarts peuvent être positifs, dans le cas de la surévaluation d'un critère jugé au préalable important par le destinataire, ou négatifs, dans le cas contraire.

- **Déclassement comparé**

Chaque répondant attribue une note à chacun des critères selon une échelle d'appréciation qualitative et non pas quantitative comme les méthodes précédentes. Le but est ensuite de grouper les différents critères en classes selon les notes obtenues et de comparer ces classes entre elles (Schärlig 1985).

- **FST (Fuzzy Sets Theory) ou ensembles flous**

Chaque répondant attribue à chacun des critères un degré d'importance allant de 0 à 1, 0 correspondant à une importance nulle et 1 à une importance maximale. Ces degrés d'importance sont ensuite agrégés afin d'obtenir une fonction d'importance pour chaque décision. La méthode des ensembles flous est une méthode mathématique ayant pour but de représenter mathématiquement l'imprécision relative à certaines décisions relevant d'une appréciation qualitative (Dupouey 1989).

- **La comparaison par paire**

Chaque répondant compare 2 à 2 les critères de l'ensemble selon une échelle d'appréciation quantitative donnée. Une fois tous les critères comparés entre eux, les scores de comparaison obtenus sont recoupés afin d'obtenir un poids relatif à chaque critère. Cette méthode permet notamment d'évaluer la cohérence de l'ensemble des réponses du répondant (Wang and Chin 2011, Saaty 1990, Bhushan and Rai 2007).

- **MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) ou analyse de jugement :**

Chaque répondant attribue un degré numérique d'importance ou d'utilité à chaque critère. Dans un second temps, à partir des réponses obtenues de l'ensemble des répondants, un modèle analytique de préférence globale est créé sous la forme d'une fonction d'importance ou d'utilité permettant de comparer l'ensemble des décisions entre elles selon les critères étudiés (Keeney and Raiffa 1993).

- **Les méthodes « politiques » :**

Il existe 2 types de méthodes politiques (Bernard and Besson 1971) :

- La dictature : Chaque répondant attribue une note à un critère selon une échelle quantitative. En amont, le destinataire de la pondération désigne le critère principal qu'il juge le plus important. La décision obtenant la meilleure note dans le critère principal préalablement établi est désignée comme la meilleure action. Les autres critères ne sont pris en compte qu'en cas d'égalité.
- La démocratie parfaite : Chaque répondant attribue une préférence à un critère. Si plus de la moitié des répondants préfèrent un critère à un autre, alors celui-ci sera choisi comme ayant le poids le plus important.

- La méthode du jeu de cartes :

Chaque répondant se voit distribuer un jeu de cartes sur lesquelles sont notés critères ainsi que des cartes blanches. Il doit ensuite classer ces cartes afin d'exprimer une hiérarchie (Lallemant and Gronier 2016). Des cartes peuvent être positionnées au même niveau, et des cartes blanches peuvent être placées entre les critères pour exprimer une préférence plus importante.

Afin de les départager, ces méthodes sont reprises dans le Tableau 2.5. Chaque méthode a ses avantages et inconvénients qu'il est nécessaire d'appréhender avant de faire le choix de l'une d'entre elles. Ainsi, malgré les inconvénients du manque de justification mathématique, nous avons fait le choix de sélectionner une méthode de pondération par comparaison par paires sous la forme de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) notamment du fait de sa simplicité d'application et de représentation. Dans la prochaine section, la méthode AHP est présentée plus en détail et ses différentes étapes détaillées dans le cadre de cette étude.

Tableau 2.5 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de pondération (en bleu est surlignée la méthode sélectionnée dans le cadre de la thèse) – Adapté de Valdiserra (2017)

Méthode de pondération	Avantage(s)	Inconvénient(s)
<i>Méthode Condorcet</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Classement brut des critères en fonction de leur importance. - Réalisation simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Impossibilité de créer un ensemble de poids, seulement un classement d'importance (Eckenrode 1965).
<i>Attribution de scores (notes)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation simple - Le critère principal réduit l'importance des autres. (Cherqui 2005) 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation dans des circonstances restrictives. - Ne peut pas répondre aux problématiques complexes. (Svoray, Bar and Bannet 2005) - Trop sensible au changement d'échelle (Mena 2000)
<i>Goal-programming</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Permet la comparaison entre plusieurs objectifs contradictoires - Recherche de l'optimum (Aguzzoul and Ladet 2006) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne tient compte que partiellement des préférences - Pas adaptée aux taux d'exposition. - Réalisation trop compliquée (Schärlig 1985)
<i>Déclassement comparé</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Traduction globale, non individuelle - Utilisation de variable d'écart 	<ul style="list-style-type: none"> - Trop petit nombre d'échelons - Ne permet pas la comparaison entre critères - Pondération peu explicite (Schärlig 1985)
<i>FST (Fuzzy Sets Theory)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Information détaillée et riche - Permet la modélisation de l'incertitude et l'imprécision (Dupouey 1989) 	<ul style="list-style-type: none"> - Classes de valeurs, pas de classement à proprement parlé
<i>La comparaison par paire (AHP)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Simple d'utilisation et cohérente sur l'ensemble des comparaisons (Renard 2010) - Modélise les incohérences 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne reflète pas la pensée humaine (Wang and Chin 2011) - Choix d'échelle non justifié mathématiquement (Cherqui 2005) - Possibilité d'inversion de classement dû à une uniformité de jugement (Bhushan and Rai 2007)
<i>MAUT (Multi Attribute Utility Theory)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Transitivité - Calcul simple - Recherche d'un Optimum - Juge sur les préférences du décideur (Keeney and Raiffa 1993). 	<ul style="list-style-type: none"> - Trop d'informations, (Cherqui 2005) - Complexité des fonctions d'utilité - Comparaisons parfois non comparables - Juge sur les préférences du décideur
<i>Méthodes politiques</i>	<ul style="list-style-type: none"> - L'avis est entièrement basé sur le panel de décideur - Facile à réaliser 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode trop triviale (dictature) - Intransitivité (démocratie) (Bernard and Besson 1971)
<i>Méthode du jeu de carte</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Simple d'utilisation (Lallemand and Gronier 2016) - Hiérarchisation claire avec différents critères 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre restreint d'individu - Ne peut pas répondre aux problèmes trop complexes - Pas de différences importantes entre critères (Renard 2010)

2.3. La méthode AHP

La méthode de l'AHP (Analytic Hierarchy Process) est une méthode d'analyse hiérarchique multicritères développée par Saaty dans les années 1970 (Saaty 1990). Elle est fondée sur l'identification de priorités relatives à partir de comparaisons par paires d'éléments (critères) partageant un attribut commun (vulnérabilité). Le choix de la méthode AHP dans le cadre de notre étude repose sur son fonctionnement d'ensemble qui permet de respecter le caractère systémique de la notion de vulnérabilité territoriale. Un exemple de l'application de la méthode AHP à notre étude est illustré dans le Tableau 2.6.

Ce tableau illustre le support d'application de la méthode de l'AHP lors de ces entretiens. L'enjeu E_1 est comparé à chacun des autres enjeux de la matrice pris un par un ($E_2, E_3, E_4 \dots$ jusqu'à E_n). Cette procédure est répétée pour l'ensemble des enjeux de la matrice jusqu'à ce que chacun des enjeux ait été comparé avec chacun des autres enjeux. Il est important de préciser que seule la partie supérieure du tableau présenté est complétée car la partie inférieure correspond aux résultats réciproques (Renard, 2010).

Tableau 2.6: Exemple de comparaison des enjeux par paire (Renard, 2010)

Enjeux	E_1	E_2	...	E_n
E_1	1			
E_2		1		
...			1	
E_n				1

Dans le but de calculer le poids relatif de chaque critère - ici les critères sont des enjeux - une matrice de comparaison A est créée. Cette matrice est composée de $m \times m$ entrées où m représente le nombre d'enjeux considérés. Chaque entrée a_{jk} de la matrice A illustre l'importance relative de l'enjeu j par rapport à l'enjeu k :

- Si $a_{jk} > 1$, l'enjeu j a une importance relative supérieure à celle de k ,
- Si $a_{jk} < 1$, l'enjeu k a une importance relative supérieure à celle de j ,
- Si $a_{jk} = 1$, les enjeux k et j ont une importance relative égale.

Cette méthode propose donc la comparaison d'un ensemble de critères, pris deux à deux, afin d'aboutir à une priorisation au sein de cet ensemble. Dans le cadre de notre étude, les enjeux sont comparés par des questionnaires du risque inondation qui caractérisent l'importance de la comparaison de ces éléments à l'aide d'une note. Cette note est obtenue par le biais d'une échelle spécifique qui permet d'obtenir une valeur quantitative à partir d'un jugement subjectif (Tableau 2.7).

Tableau 2.7: Degré d'importance numérique de comparaison, (Saaty 1990)

Degré d'importance numérique	Degré d'importance verbale	Définition
1	Importance	Les deux éléments contribuent autant à l'explication de l'objectif
3	Un élément est un peu plus important (sensible) que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle de l'expert favorisent légèrement un élément par rapport à l'autre
5	Un élément est plus important (sensible) que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle de l'expert favorisent vraiment un élément par rapport à l'autre
7	Un élément est beaucoup plus important (sensible) que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle de l'expert favorisent fortement un élément par rapport à l'autre
9	Un élément est absolument plus important (sensible) que l'autre	La dominance d'un élément par rapport à l'autre est démontrée par l'expérience et l'appréciation personnelle
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Utilisées pour affiner le jugement lorsqu'un compromis est nécessaire entre deux appréciations
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	Valeurs réciproques des appréciations précédentes	

Une fois la matrice **A** complétée, il est possible d'en dériver la matrice de comparaison par paire normalisée **A_{norm}** en rendant égale à 1 la somme des entrées de chaque colonne de la matrice **A**. Ainsi chaque entrée $\overline{a_{jk}}$ de la matrice **A_{norm}** correspond à :

$$\overline{a_{jk}} = \frac{a_{jk}}{\sum_{l=1}^m a_{lk}}$$

Finalement, le vecteur de poids **w** du critère **j** est construit en faisant la moyenne des entrées de chaque ligne de **A_{norm}** :

$$w_j = \frac{\sum_{l=1}^m \overline{a_{jl}}}{m}$$

Quand un grand nombre de comparaisons par paires est réalisé, des incohérences peuvent apparaître dans les résultats obtenus. Par exemple, si la personne interrogée répond successivement que **A** a une importance relative supérieure à **B**, que **B** a une importance relative supérieure à **C**, puis que **C** a une importance relative supérieure à **A**, alors cette comparaison n'est pas cohérente. Voilà pourquoi la méthode AHP prévoit le calcul d'un indice de cohérence (**CI**).

Cet indice est obtenu par le calcul du scalaire x qui est la moyenne des éléments du vecteur dont l'élément j est le rapport de l'élément j du vecteur $A \cdot w$ à l'élément correspondant au sein du vecteur w , ensuite on calcul l'indice de cohérence CI tel que :

$$CI = \frac{x - m}{m - 1}$$

Pour être considérés comme valides, les jugements devraient idéalement présenter un indice de cohérence égal à 0. Cependant, certaines incohérences peuvent être tolérées jusqu'à un ratio de cohérence (RC) inférieur à 10%. Ce ratio de cohérence peut être calculé tel que :

$$RC = \frac{CI}{RI}$$

Où RI correspond à l'indice de cohérence aléatoire qui correspond à la moyenne des indices de cohérence calculée sur 100 000 matrices A dont les n entrées sont aléatoires (Tableau 2.8).

Tableau 2.8: Valeurs de RI pour 3 à 20 critères de comparaison (Alonso and Lamata 2006)

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0,5245	0,8815	1,1086	1,2479	1,3417	1,4056	1,4499	1,4854	1,5141
n	12	13	14	15	16	17	18	19	20
RI	1,5365	1,5551	1,5713	1,5838	1,5978	1,6086	1,6181	1,6265	1,6341

L'ensemble des jugements cohérents ($RC \leq 10\%$) peut ensuite être agrégé à l'aide d'une moyenne géométrique pour « *reconstituer une matrice unique de comparaison* » (Tixier et al. 2006). A la différence d'une moyenne arithmétique, la moyenne géométrique est moins sensible aux valeurs extrêmes dans une série de données. Ainsi, ce type de moyenne exprime mieux la tendance générale des réponses obtenues, notamment dans le cas d'un nombre important d'individus interrogés. Afin d'obtenir un score d'importance relative par enjeu, représentatif de l'ensemble des réponses des gestionnaires interrogés, une moyenne géométrique a donc été calculée telle que :

$$\text{Moyenne géométrique} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i}$$

Où :

n est le nombre de gestionnaires communaux ayant répondu à l'entretien

x est le score d'importance relative obtenu par enjeu et par gestionnaire

Plusieurs auteurs dont Miller (1956) et Saaty (2003) lui-même, se sont interrogés sur le nombre limite de critères à pouvoir comparer entre eux au sein de la méthode de l'AHP tout en

conservant des résultats cohérents. Miller a proposé une limite de 7 critères, plus ou moins 2, tandis que Saaty a fixé cette limite à 7. En effet, en dépassant ce nombre il est difficile de conserver un niveau de cohérence inférieur à 10%.

Cependant, plusieurs auteurs soulignent le fait que ce seuil de cohérence est inadapté. Les scores obtenus le dépassant ne doivent donc pas être éliminés. Au contraire, la suppression de ces scores peut conduire à éliminer des scores dont le profil est cohérent (Kwiesielewicz and Van Uden 2004) (Karapetrovic and Rosenbloom 1999). Il est donc nécessaire d'analyser les scores dont le RC est supérieur à 10% afin d'identifier si des divergences ressortent entre ces scores et ceux dont le RC est inférieur à 10%. Si aucune divergence notoire n'est identifiée, l'ensemble des scores peut être utilisé pour la pondération des critères.

Dans notre cas, le nombre d'enjeux à comparer s'élève à 17. Face à ce nombre élevé de critères, il nous faudra vérifier si des ratios de cohérence supérieurs à 10% apparaissent dans les résultats, et, le cas échéant analyser les scores concernés.

3. Application de la méthode à la région Provence-Alpes-Côte d'Azur

L'évaluation de la vulnérabilité territoriale doit être propre au territoire auquel elle s'applique. Ainsi, la place occupée par ses enjeux doit être évaluée par les acteurs de ce même territoire. Pour l'application de la méthode qui vient d'être présentée, nous avons fait le choix de nous focaliser sur la région Provence-Alpes-Côte-D'azur (PACA). Selon la base de Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques (GASPAR), 85 % des communes de cette région sont exposées au risque inondation. Ainsi l'évaluation de la vulnérabilité territoriale, mais également du risque de dommages sur ce territoire, représentent un enjeu majeur pour les politiques de gestion du risque.

3.1. Sélection d'un panel d'experts représentatif de la vulnérabilité du territoire

Echantillonnage

Afin que les communes d'origine des experts interrogés soient représentatives des 962 communes de la région PACA, nous avons réalisé une classification de ces dernières selon 3 paramètres (Figure 2.3) :

- Le temps écoulé depuis la dernière inondation (en année),
- L'existence d'un Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI),
- Le nombre d'arrêtés de Catastrophe Naturelle de type inondation.

Pour chaque paramètre, plusieurs classes ont été constituées. Ainsi pour le paramètre « Temps écoulé depuis la dernière inondation », on distingue 4 classes différentes qui sont : pas d'inondation répertoriée, 5 ans ou moins depuis la dernière inondation, entre 5 et 10 ans depuis la dernière inondation, 10 ans ou plus depuis la dernière inondation.

Pour le paramètre « PPRI », 3 classes sont également distinguées : présence de PPRI, absence de PPRI, Autre (correspondant à un PPRI prescrit mais non approuvé). Ce paramètre est un indicateur de la sensibilisation de la population et des gestionnaires aux inondations sur une commune.

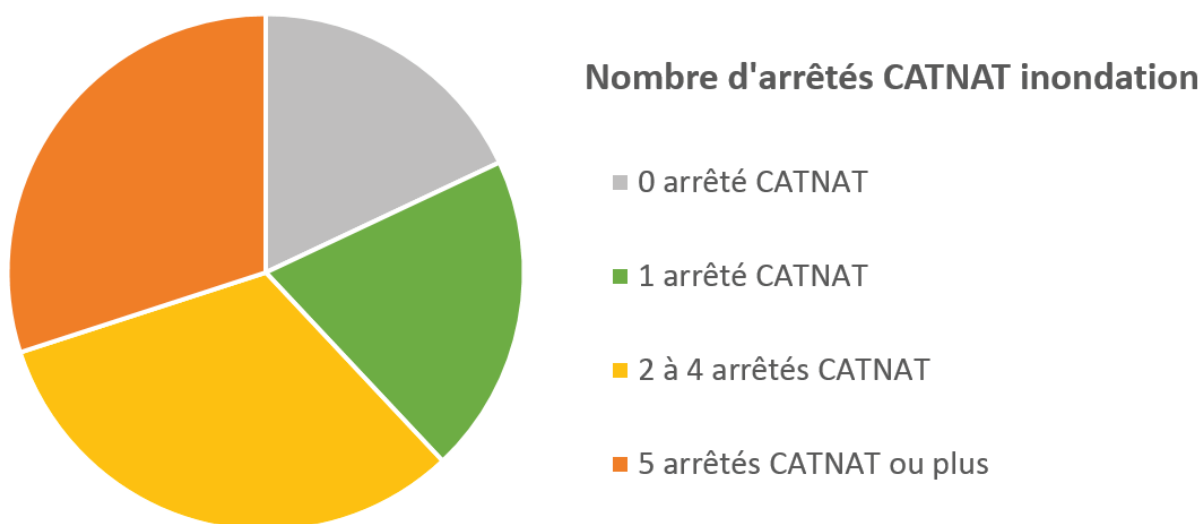
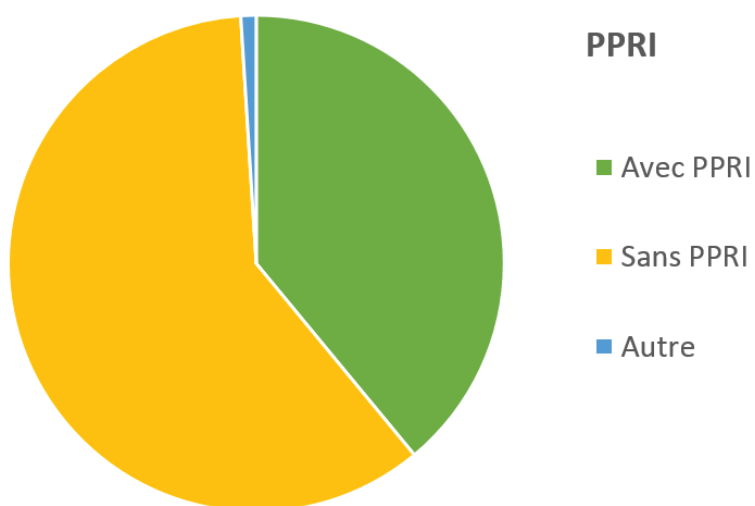
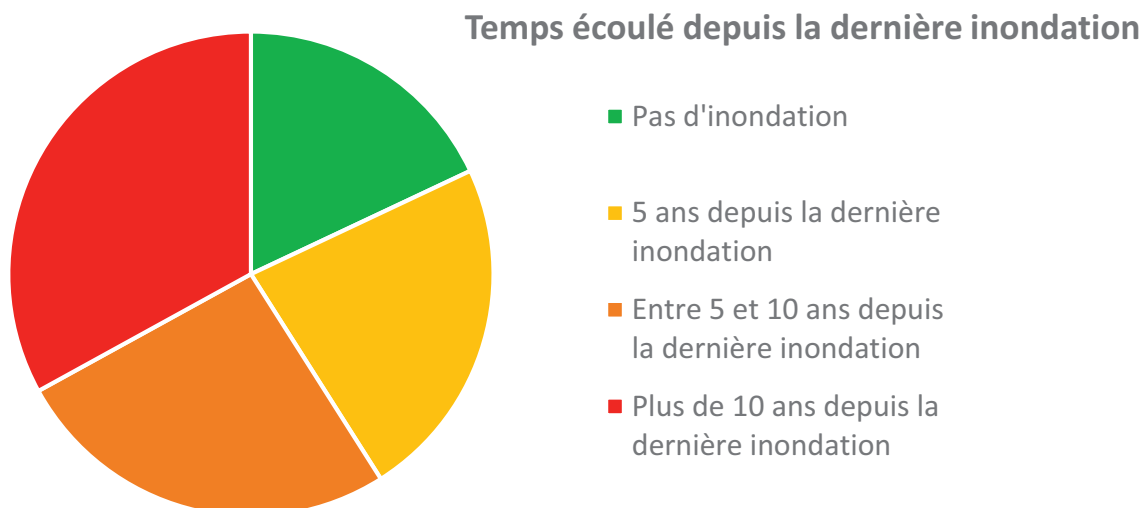


Figure 2.3 : Répartition des communes de la région PACA selon trois critères à savoir : Temps écoulé depuis la dernière inondation, PPRI et Nombre d'arrêtés CATNAT inondation

Enfin, pour le paramètre « Nombre d'arrêtés CATNAT », le nombre d'arrêtés de Catastrophe Naturelle de type « inondation » a été inventorié par commune depuis 1982. Puis, 4 classes ont été constituées à savoir : 0 arrêté, 1 arrêté, 2 à 4 arrêtés et 5 arrêtés ou plus. Ce paramètre est un indicateur de la fréquence des inondations sur une commune.

Pour chaque paramètre, un échantillonnage représentatif a été réalisé par tirage au sort au sein de chaque classe constituée. Les classes de communes correspondant à « 0 arrêté CATNAT » et « Pas d'inondation répertoriée » n'ont pas été considérées dans l'échantillonnage, car nous ne nous intéressons qu'aux communes ayant connu des inondations. Ainsi le nombre total de communes sur lequel porte l'échantillonnage est 784.

Une pré-sélection de 20 communes a pu être faite, auxquelles une demande d'entretien a été envoyée. En cas de refus d'une commune (ou d'absence de réponse), nous avons tiré au sort une commune de 'remplacement' dans la même classe, ceci afin que l'échantillon reste représentatif de la région d'étude. Sur ces 20 communes, 3 nous ont renvoyés vers un autre type d'acteur, considérant qu'elles n'avaient pas la compétence requise pour répondre à l'entretien. Ainsi, en plus des 16 communes citées préalablement, nous avons été amenés à interroger :

- La communauté d'agglomération Var Estérel Méditerranée,
- Le Syndicat Mixte de l'Argens,
- Le Syndicat Mixte intercommunal de la Siagne et de ses affluents.

Suite à plusieurs désistements consécutifs, une dix-septième commune ayant préalablement accepté de participer à cette étude n'a pu finalement être interrogée à savoir le Luc en Provence. Or, par manque de temps, il n'a pas été possible de la remplacer par une commune présentant les mêmes caractéristiques. Le nombre final de répondants s'élève donc à 19. Les communes dont sont issus les répondants sont présentées dans le Tableau 2.9.

Tableau 2.9 : Echantillon des communes interrogées

Commune	Date entretien	Nombre d'habitants	Nombre de CATNAT	Dernière inondation	PPRI
AIX-EN-PROVENCE	24/05/2017	145 763	8	14-déc.-08	Autre
ANTIBES	07/06/2017	76 981	28	3-oct.-15	Oui
ARLES	18/05/2017	53 737	16	4-nov.-11	Oui
BEAUSOLEIL	07/06/2017	13 733	2	5-nov.-00	Non
CANNES	08/06/2017	74 673	19	3-oct.-15	Oui
CARRY-LE-ROUET	23/05/2017	6 041	2	10-sept.-05	Non
COLLOBRIERES	16/06/2017	2 012	3	19-janv.-14	Non
CUGES-LES-PINS	18/07/2017	5 047	1	26-août-86	Non
DIGNE-LES-BAINS	22/07/2017	17 133	4	16-mai-98	Oui
FOX-AMPHOUX (SM ARGENS)	22/06/2017	486	1	21-sept.-92	Non
FREJUS	08/06/2017	54 372	17	3-oct.-15	Oui
HYERES	12/05/2017	57 645	14	10-juin-15	Oui
LA SEYNE-SUR-MER	02/06/2017	65 445	9	19-sept.-14	Non
MIRAMAS	21/06/2017	26 056	2	17-nov.-06	Non
NICE	09/06/2017	347 636	27	3-oct.-15	Oui
PEGOMAS (SM SIAGNE)	14/06/2017	1300	2	5-nov.-11	Non
PELISSANE	13/06/2017	10 156	5	1-déc.-03	Oui
ROQUEBRUNE-SUR- ARGENS (CAVEM)	22/07/2017	12 344	22	13-sept.-15	Oui
SIGNES	12/06/2017	2 796	1	29-sept.-82	Non

Sur la Figure 2.4 est représentée la répartition géographique des communes interrogées en PACA. On peut y voir qu'une grande majorité des communes interrogées en question se situe sur le littoral. Cela peut s'expliquer par le fait que les communes n'ayant pas été concernées par au moins un arrêté CATNAT n'ont pas été prises en compte dans notre échantillonnage. Or les communes en question sont principalement situées à l'intérieur des terres.

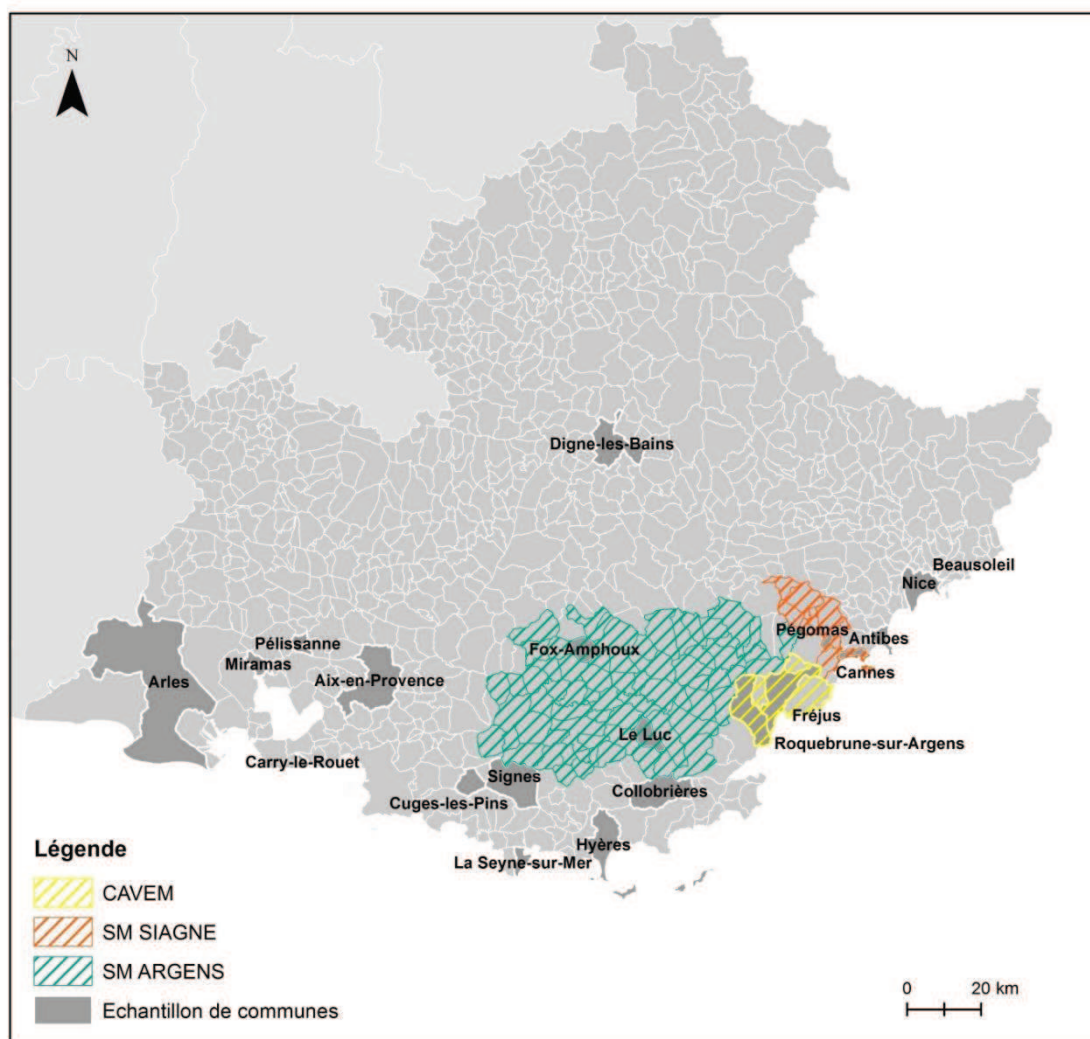


Figure 2.4: Répartition des communes, communautés d'agglomération et syndicats sélectionnés pour les entretiens

Présentation du panel d'experts

Les entretiens conduits l'ont été auprès de différents acteurs du territoire. Lors de la prise de rendez-vous pour la réalisation de ces entretiens, la demande était adressée à un « gestionnaire du risque inondation ».

Le panel d'experts est donc constitué de différents profils qui sont présentés dans les Figure 2.5 et Figure 2.6. On peut y voir que si les domaines de compétence des experts sont assez variés, avec cinq pôles de travail : cabinet du Maire, sécurité, risque, service technique, et une thématique eau et environnement.

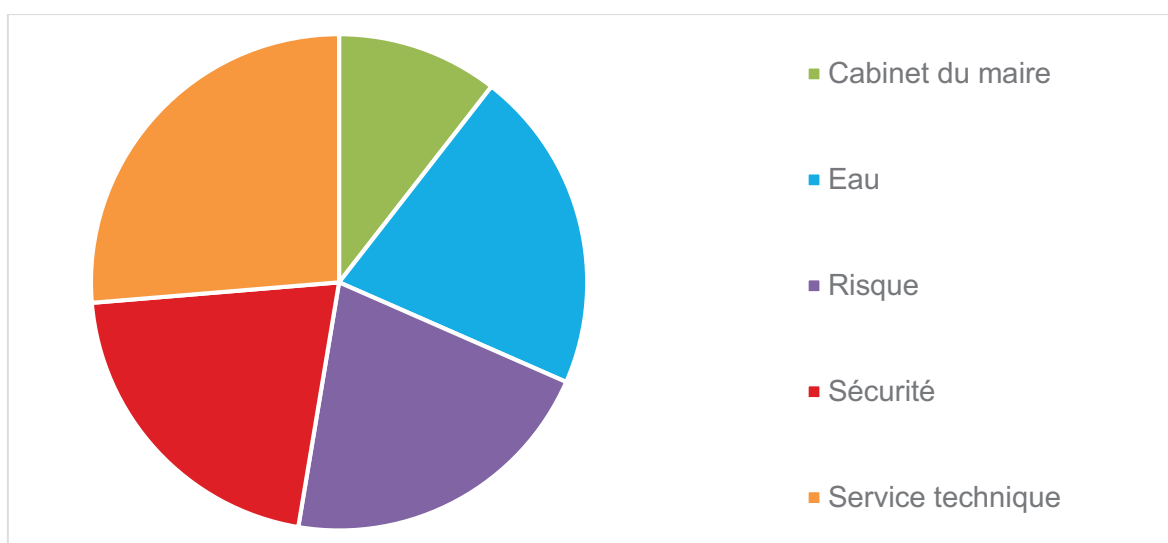


Figure 2.5 : Répartition par domaine de compétence des experts interrogés

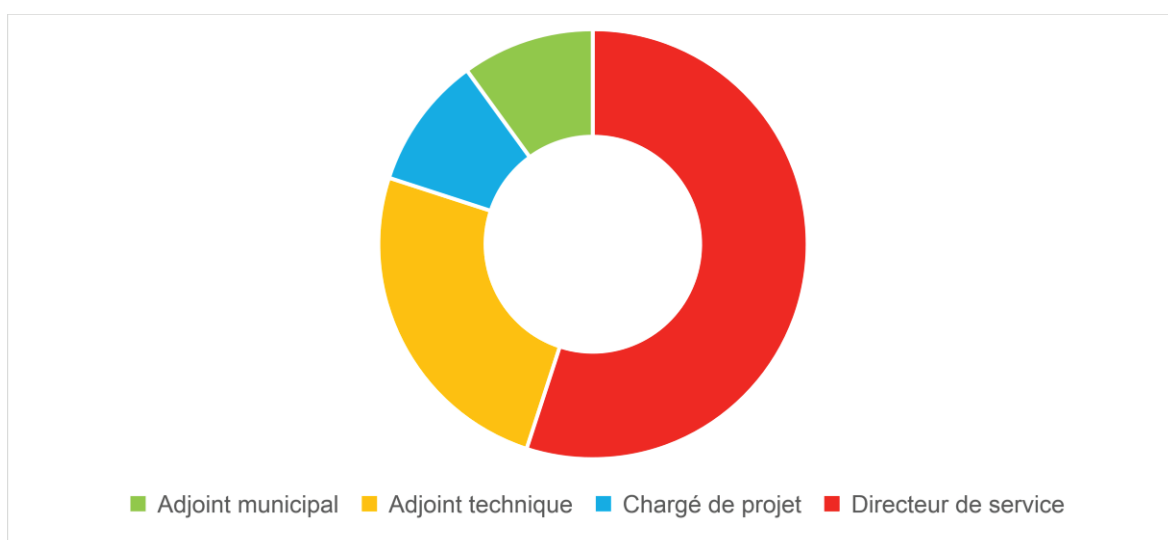


Figure 2.6 : Répartition par poste occupé des experts interrogés

En ce qui concerne les postes occupés par les experts en question, nous avons principalement interrogé des directeurs de service (plus de 50% des répondants) ainsi que des adjoints techniques et techniciens (25%).

Conduite des entretiens

La conduite des entretiens a été principalement menée dans le cadre d'un stage de Master 2 (Valdiserra 2017) après en avoir préalablement fixé les modalités. La durée moyenne des entretiens conduits lors de cette étude a été de 1h15. L'entretien a été organisé en 2 parties :

- Une présentation de la méthode via l'intermédiaire d'un diaporama (Annexe B),
- Une application de la méthode AHP par le biais d'un tableur Figure 2.7.

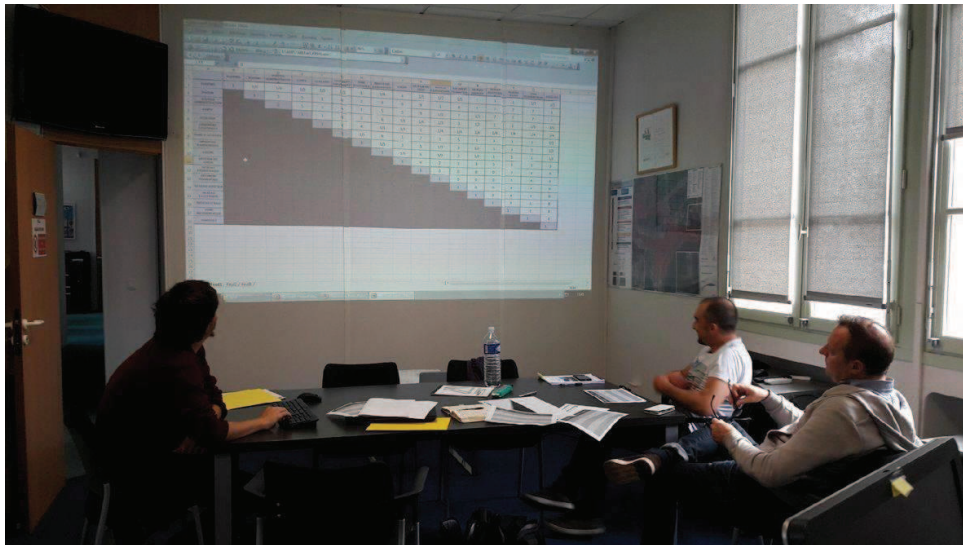


Figure 2.7: Photographie prise lors d'un entretien sur une commune de l'échantillon

La principale difficulté rencontrée pour les experts interrogés était de se projeter dans une commune « fictive » comprenant des enjeux parfois non-présents sur leur propre territoire. Voilà pourquoi la durée globale de l'entretien pouvait être variable allant de 45min pour le plus rapide à 3h pour le plus long.

La Figure 2.8 illustre les données obtenues au terme d'un entretien et le traitement qui en est fait avec la méthode AHP. Les différentes étapes de la méthode y sont détaillées.

Figure 2.8: Illustration du fonctionnement de la méthode AHP à partir des données d'un entretien, (Valdiserra 2017)

	PARKING	PRISON	SERVICE ADMINISTRATIF	SANTÉ	SCOLAIRE	LOGEMENT SAISONNIER	ZONE D'ACTIVITÉ	INDUSTRIE DANGEREUSE	LOISIR	GESTION DE CRISE	RESEAU FERROVIAIRE	BÂTIMENT TRANSPORT	RESEAU ROUTIER	RESEAU ELECTRIQUE	RESEAU D'EAU	ZONE RESIDENTIELLE	AGRICOLE	SOMME
PARKING	1	3	7	3	7	3	9	5	7	9	3	3	7	7	1	6	4	31,00
PRISON	1/3	1	1/3	3	5	5	5	1/7	4	5	1/6	6	1/3	1/2	1/2	5	1/5	41,25
SERVICE ADMINISTRATIF	1/7	3	1	5	7	1/4	5	1/4	5	1/6	1/6	1/6	4	1/4	1/4	5	1/5	36,84
SANTÉ	1/3	1/3	1/5	1	1	1/2	1/6	1/6	1/4	1	1/7	1/7	1/3	1/2	1/2	1/4	1/8	6,34
SCOLAIRE	1/7	1/5	1/7	1	1	1/2	1/5	1/5	1/6	1/3	1/7	1/7	1/4	1/3	1/3	1/3	1/7	5,56
LOGEMENT SAISONNIER	1/3	1/5	4	2	2	1	1/3	1/5	1/6	1/4	1/7	1/5	1/3	1/3	1/4	1/4	1/6	12,16
ZONE D'ACTIVITÉ	1/9	1/5	1/5	6	5	3	1	1/6	1/5	1/3	1/5	1/4	1/3	1/3	1/5	1/3	1/6	16,03
INDUSTRIE DANGEREUSE	1/5	7	4	6	5	5	8	1	7	7	5	6	6	1/4	1/4	6	1/5	71,90
LOISIR	1/7	1/4	1/5	4	6	6	5	1/7	1	4	1/7	1/3	1/3	1/5	1/5	1	1/6	29,11
GESTION DE CRISE	1/9	1/5	6	1	3	4	3	1/7	1/4	1	1/9	1/5	1/3	1/3	1/3	1/5	1/9	20,33
RESEAU FERROVIAIRE	1/3	8	6	7	7	7	5	1/5	7	3	1	3	9	9	7	7	5	103,53
BÂTIMENT TRANSPORT	1/3	1/6	6	7	7	5	4	1/6	3	5	1/9	1	5	1/3	1/4	5	1/7	49,50
RESEAU ROUTIER	1/7	3	1/4	3	4	3	3	1/6	3	3	1/3	1/5	1	1/3	1/7	3	1/5	27,59
RESEAU ELECTRIQUE	1/7	2	4	2	3	3	3	4	5	3	1/3	3	3	1	1/5	5	1/5	41,65
RESEAU D'EAU	1	2	4	2	3	4	5	4	5	3	1/7	4	5	5	1	5	1/5	53,34
ZONE RESIDENTIELLE	1/6	1/5	1/5	4	3	4	3	1/6	1	5	1/7	1/5	1/3	1/5	1/5	1	1/6	22,98
AGRICOLE	1/4	5	5	8	7	6	6	5	6	3	1/5	7	5	5	5	6	1	86,45
SOMME	5,00	41,75	48,53	65,00	76,00	60,25	63,70	21,11	55,03	65,08	16,39	40,84	47,58	30,90	17,61	56,37	12,39	

Somme des lignes non normalisées

Tableau 1 : Note brutes des gestionnaires sur le terrain

Poids moyen des critères

Cohérence des jugements
= Somme des lignes non normalisée * Poids moyen du critère

Somme des cohérences de jugement

λmax	25,82
CI	0,5511
RI	1,61
CR	0,3

Source: J. A. Alonso
M.T. Llamas(2006)

Cohérence aléatoire
1,61 pour 17 critères

Ratio de cohérence de la commune
= indice de cohérence / Cohérence aléatoire

Indice de cohérence
= (Somme des cohérence - n) / (n-1)

	PARKING	PRISON	SERVICE ADMINISTRATIF	SANTÉ	SCOLAIRE	LOGEMENT SAISONNIER	ZONE D'ACTIVITÉ	INDUSTRIE DANGEREUSE	LOISIR	GESTION DE CRISE	RESEAU FERROVIAIRE	BÂTIMENT TRANSPORT	RESEAU ROUTIER	RESEAU ELECTRIQUE	RESEAU D'EAU	ZONE RESIDENTIELLE	AGRICOLE	TOTAL des notes pondérées	MOYENNE	CA
PARKING	0,011	0,003	0,004	0,048	0,026	0,027	0,006	0,003	0,005	0,005	0,003	0,007	0,005	0,003	0,013	0,007	0,004	0,19	0,01	1,00
PRISON	0,033	0,024	0,081	0,048	0,036	0,016	0,011	0,057	0,003	0,010	0,077	0,003	0,105	0,048	0,037	0,003	0,058	0,77	0,05	1,88
SERVICE ADMINISTRATIF	0,077	0,008	0,027	0,023	0,026	0,323	0,011	0,056	0,007	0,235	0,058	0,121	0,003	0,036	0,075	0,003	0,058	1,29	0,08	2,80
SANTÉ	0,033	0,073	0,136	0,144	0,100	0,164	0,333	0,003	0,137	0,043	0,068	0,141	0,103	0,048	0,037	0,174	0,033	2,00	0,12	0,82
SCOLAIRE	0,077	0,121	0,190	0,144	0,100	0,164	0,277	0,070	0,206	0,148	0,068	0,141	0,145	0,072	0,056	0,131	0,081	2,27	0,13	0,74
LOGEMENT SAISONNIER	0,033	0,121	0,007	0,072	0,030	0,992	0,166	0,070	0,206	0,197	0,068	0,101	0,103	0,072	0,075	0,174	0,063	1,71	0,10	1,22
ZONE D'ACTIVITÉ	0,033	0,121	0,136	0,024	0,036	0,027	0,055	0,003	0,172	0,148	0,048	0,001	0,103	0,072	0,094	0,131	0,063	1,51	0,09	1,60
INDUSTRIE DANGEREUSE	0,055	0,003	0,007	0,024	0,036	0,016	0,003	0,014	0,005	0,007	0,002	0,003	0,006	0,036	0,075	0,007	0,058	0,42	0,02	1,79
LOISIR	0,077	0,037	0,136	0,036	0,030	0,014	0,011	0,037	0,034	0,012	0,068	0,061	0,103	0,120	0,034	0,044	0,063	1,11	0,07	1,90
GESTION DE CRISE	0,033	0,121	0,005	0,144	0,060	0,021	0,018	0,037	0,137	0,043	0,087	0,101	0,103	0,072	0,056	0,218	0,104	1,50	0,09	1,79
RESEAU FERROVIAIRE	0,033	0,003	0,005	0,021	0,026	0,012	0,011	0,070	0,005	0,005	0,010	0,002	0,004	0,003	0,006	0,002	0,002	0,22	0,01	1,34
BÂTIMENT TRANSPORT	0,033	0,145	0,005	0,021	0,026	0,016	0,014	0,003	0,011	0,010	0,087	0,020	0,007	0,072	0,075	0,003	0,081	0,72	0,04	2,08
RESEAU ROUTIER	0,077	0,008	0,103	0,048	0,045	0,027	0,018	0,003	0,011	0,016	0,087	0,101	0,036	0,072	0,034	0,015	0,058	0,91	0,05	1,47
RESEAU ELECTRIQUE	0,077	0,012	0,007	0,072	0,060	0,027	0,018	0,003	0,007	0,016	0,087	0,007	0,012	0,024	0,034	0,003	0,058	0,59	0,03	1,45
RESEAU D'EAU	0,011	0,012	0,007	0,072	0,060	0,021	0,011	0,003	0,007	0,016	0,068	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,058	0,39	0,02	1,22
ZONE RESIDENTIELLE	0,066	0,121	0,136	0,036	0,060	0,021	0,018	0,003	0,034	0,010	0,068	0,101	0,103	0,120	0,034	0,044	0,063	1,19	0,07	1,61
AGRICOLE	0,044	0,005	0,005	0,018	0,026	0,014	0,003	0,003	0,006	0,005	0,048	0,003	0,007	0,005	0,004	0,007	0,012	0,22	0,01	1,12
SOMME	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00	1,52	

Tableau 2 : Pondération des enjeux normalisée

3.2. Présentation des résultats obtenus

A partir des comparaisons faites entre les différents enjeux, présentées dans la section 2.3 de ce chapitre, un score final d'importance relative a été obtenu par enjeu pour chacun des répondants. Les scores obtenus par répondant sont visibles en Annexe C. Nous avons choisi d'anonymiser les réponses pour des raisons de confidentialité. Les communes sont donc représentées sous un identifiant numérique allant de 1 à 19.

Ces scores ont ensuite été moyennés entre tous les répondants par catégorie d'enjeu afin d'obtenir un score final d'importance relative présenté par ordre décroissant dans le Tableau 2.10. L'ordre présenté dans ce tableau correspond donc à l'importance relative accordée par les experts interrogés aux différents enjeux du territoire. Nous considérons donc que plus le score final pondéré de vulnérabilité est élevé, plus la vulnérabilité territoriale de l'enjeu est forte.

Tableau 2.10 : Score final de pondération par nature d'enjeu

Ordre	Catégorie d'enjeux	Score final pondéré
1	Industrie dangereuse	12.94
2	Santé	12.26
3	Scolaire	11.71
4	Gestion de crise	10.67
5	Zone résidentielle	9.41
6	Zone d'activité	5.32
7	Prison	4.56
8	Réseau électrique	4.12
9	Loisir	4.10
10	Bâtiment de transport	4.01
11	Logement saisonnier	3.97
12	Réseau routier	3.84
13	Réseau d'eau	3.55
14	Service / administration	3.39
15	Réseau ferroviaire	2.81
16	Installation agricole	1.72
17	Parking	1.62

Ces scores de vulnérabilité par enjeu sont également présentés dans la Figure 2.9 sous la forme d'un graphique radar. On peut y voir ainsi que dans le précédent tableau que 5 natures d'enjeux se détachent plus particulièrement des 17 ce qui signifie que leur vulnérabilité territoriale est particulièrement élevée. Il s'agit des enjeux de type :

- Industrie dangereuse
- Santé
- Scolaire
- Gestion de crise
- Zone résidentielle

De ces 5 natures d'enjeux dépend donc fortement la vulnérabilité du territoire sur lequel ils sont localisés. Lors du calcul du score de vulnérabilité territoriale globale, ces enjeux seront donc surreprésentés vis-à-vis des autres.

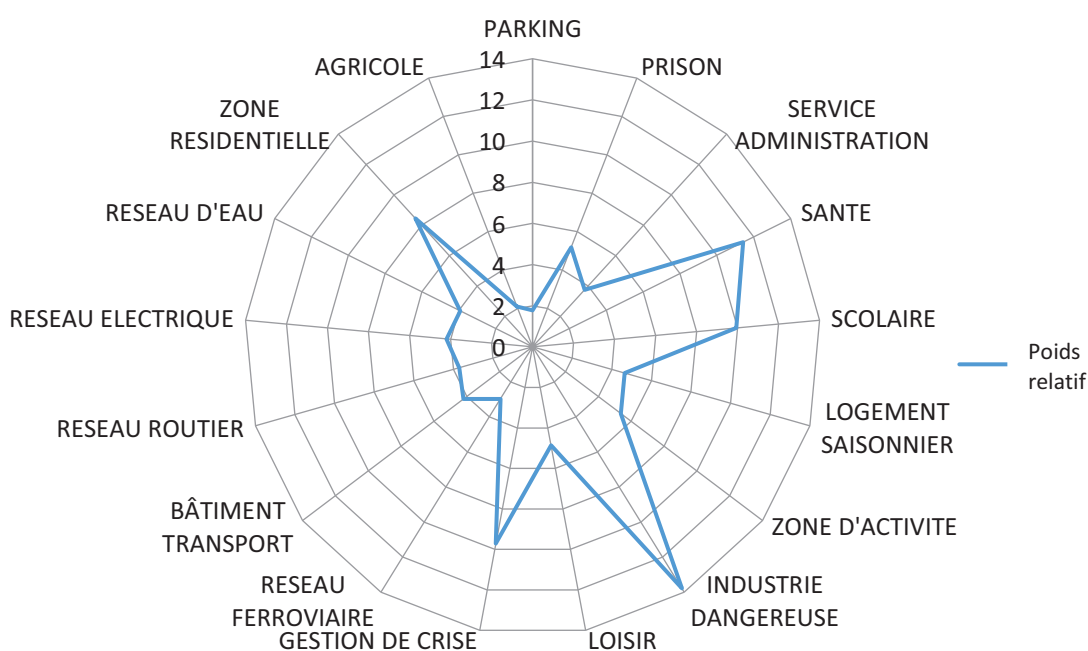


Figure 2.9 : Représentation des scores de vulnérabilité territoriale par nature d'enjeu

3.3. Analyse des résultats obtenus

Il est possible de réaliser une étude qualitative des scores de vulnérabilité territoriale obtenus dans le cadre de notre étude. Dans un premier temps, il s'agira d'analyser et de discuter de l'influence des critères de sélection des communes interrogées. Dans un second temps, une approche similaire sera réalisée quant à l'influence du profil des répondants à l'étude.

Influence du choix des communes interrogées sur les scores de vulnérabilité

La Figure 2.10 présente les scores de vulnérabilité obtenus à la lumière de trois critères : le nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle, la présence ou non d'un PPRI et enfin la survenue ou pas d'une inondation dans les dix dernières années.

Concernant les arrêtés de Catastrophe Naturelle, deux groupes ont été formés : d'une part les communes ayant connu un ou deux arrêtés (groupe A) et d'autre part celles en ayant connu plus de deux (groupe B). Les pondérations obtenues sont assez similaires au niveau des deux groupes à quelques exceptions près. On peut ainsi souligner que les communes du groupe A présentent une sensibilité accrue aux enjeux communément admis comme étant les plus vulnérables (Tableau 2.10) à savoir les enjeux de type santé, scolaire, gestion de crise, industrie dangereuse et zone résidentielle.

Le groupe B accorde quant à lui une plus forte importance aux enjeux de type logement saisonnier, parking et zone d'activité. Ce groupe étant constitué de communes ayant connu plus de deux arrêtés de catastrophe naturelle, on peut conjecturer qu'il s'agit là des enjeux les plus touchés lors d'inondations fréquentes. En effet, une grande partie des parkings sont fortement exposés au risque inondation du fait de leur positionnement en souterrain. De plus, les campings sont souvent situés dans le lit majeur des cours d'eau dans le sud de la France afin de posséder un accès facilité aux rivières. Enfin, les zones d'activité ont été historiquement positionnées en dehors des centres-villes et proches des rivières afin de permettre un accès à l'eau notamment dans le domaine de l'industrie.

Cette analyse succincte nous permet de conjecturer que les gestionnaires des communes ayant connu plus de 2 arrêtés CATNAT bénéficient d'une expérience des inondations plus importante que ceux des communes en ayant connu moins de deux. Ainsi cette expérience influencerait leur jugement en les faisant évaluer plus fortement la vulnérabilité des enjeux fréquemment inondés. Cette théorie se trouve notamment renforcée par le deuxième graphique de la Figure 2.10 qui distingue d'une part les communes ayant connu une inondation lors des 10 dernières années et d'autre part les communes ayant connu une inondation il y a plus de 10 ans. En effet, à l'exception des enjeux de type gestion de crise, on retrouve les mêmes tendances que sur le graphique précédent.

Le troisième graphique de la Figure 2.10 présente des résultats plus contrastés. On y distingue un groupe de communes possédant un PPRI (groupe A) d'un groupe n'en ayant pas (groupe B). Le groupe A surévalue les enjeux de type logement saisonnier, prison, santé, industrie dangereuse et surtout gestion de crise. Or la mise en place d'un PPR sur une commune rend obligatoire l'élaboration d'un Plan Communal de Sauvegarde qui est le pilier de la gestion d'une crise sur une commune. Cela peut expliquer la surévaluation de la vulnérabilité

territoriale liée aux enjeux de type gestion de crise pour le groupe A. L'instauration d'un PPR passe également par le recensement des établissements recevant du public sensible dont les hôpitaux, écoles et prisons. Cela peut expliquer pourquoi les gestionnaires des communes bénéficiant d'un PPR ont particulièrement souligné la vulnérabilité territoriale de deux d'entre eux dans le cadre de notre étude. Inversement, les PPRI ne font pas mention des industries dangereuses. La surévaluation de leur vulnérabilité peut ainsi être due à l'absence de connaissance sur celles-ci face aux inondations.

Le groupe B surestime quant à lui la vulnérabilité de l'ensemble des réseaux (routier, ferroviaire, électrique, eau) ainsi que celle des enjeux de type loisir et zone résidentielle. La surévaluation de l'ensemble des réseaux peut être due au caractère systémique de leur atteinte potentielle. En effet, l'inondation d'une école affectera un périmètre moins important que l'inondation d'un réseau électrique. Ainsi il semble logique que la problématique de l'endommagement des réseaux soit au cœur de l'évaluation de la vulnérabilité du territoire par le groupe B. Les enjeux de type zone résidentielle se rapportent quant à eux aux enjeux humains, ce qui peut expliquer leur surévaluation. Enfin, la surévaluation des enjeux de loisir pourrait s'expliquer par l'importance du tourisme dans les communes interrogées. Cependant, les logements saisonniers ne sont pas particulièrement jugés comme vulnérables. Cette théorie ne se vérifie donc pas.



Figure 2.10: Scores de vulnérabilité obtenus par enjeu selon le profil des communes des gestionnaires interrogés

Influence du profil des gestionnaires interrogés sur les scores de vulnérabilité

La Figure 2.11 présente quant à elle deux types de graphiques, avec d'une part les scores de vulnérabilité obtenus par les répondants en fonction de leur poste et d'autre part en fonction du pôle au sein duquel ils travaillent. Il ne s'agit donc pas de voir l'influence des caractéristiques des communes sur les réponses de leur gestionnaire mais celle du profil des répondants sur leurs propres réponses.

Les directeurs de service ainsi que les chargés de projet ont fourni des scores de vulnérabilité assez similaires. On constate en effet une évaluation plus importante de la vulnérabilité des enjeux correspondant à des établissements recevant du public fragile (scolaire, santé) mais également des enjeux de type industrie dangereuse et gestion de crise. Cela peut notamment s'expliquer par le fait que l'inondation des enjeux de type industrie dangereuse pourrait engendrer une sur-catastrophe, de même que celle des enjeux de type gestion de crise. Or dans ces situations, ce sont les directeurs de service qui sont amenés à gérer l'évènement.

Les réponses des techniciens municipaux sont moins prononcées. On constate en effet uniquement une légère surévaluation des enjeux de type gestion de crise, santé et scolaire. Les adjoints municipaux interrogés ont quant à eux surestimé la vulnérabilité des réseaux ainsi que celle des scolaires et des zones d'activité. Ces réponses peuvent être interprétées dans une perspective de vision de l'après-crise, c'est-à-dire les conséquences sur le long-terme mais également de perception de la gestion au niveau communal. On pourrait être amenés à s'interroger sur l'influence des stratégies électorales dans les réponses des adjoints municipaux.

En ce qui concerne les pôles dont sont issus les répondants, on notera que les répondants du pôle risque ont très fortement surestimé la vulnérabilité des enjeux du pôle de la gestion de crise et moitié moins celle des enjeux de type santé et scolaire. Cela peut être rapproché de leur perspective de gestion de crise.

Le pôle environnement et eau a lui surestimé les enjeux de la santé, de l'industrie dangereuse et de la gestion de crise. Il s'agit également du seul pôle à avoir surestimé les enjeux de type zone résidentielle.

Enfin les pôles de la sécurité et des services techniques ont mis l'accent sur les enjeux de type santé, scolaire, industrie dangereuse et gestion de crise. De la même manière que le pôle risque on peut conjecturer que ce choix se rapproche d'une perspective de gestion de la crise et de protection et mise en sécurité des populations vulnérables.

Les différentes analyses des réponses de gestionnaires interrogés ont amené à proposer de nombreuses hypothèses explicatives. On peut notamment souligner que la surévaluation des enjeux de type gestion de crise et industrie dangereuse est accentuée pour les communes fréquemment touchées par des inondations mais également par les directeurs de service issus des pôles risques et sécurité. Cela pourrait s'expliquer en raison de leur positionnement vis-à-vis de la gestion de l'inondation. Les pôles santé et scolaire sont quant à eux mis en avant par l'ensemble des acteurs interrogés. Cette surévaluation peut être facilement rattachée aux personnes vulnérables qui s'y trouvent. Enfin on notera que les adjoints municipaux sont les seuls à surestimer la vulnérabilité des réseaux, probablement en raison du caractère systémique de leur endommagement potentiel.

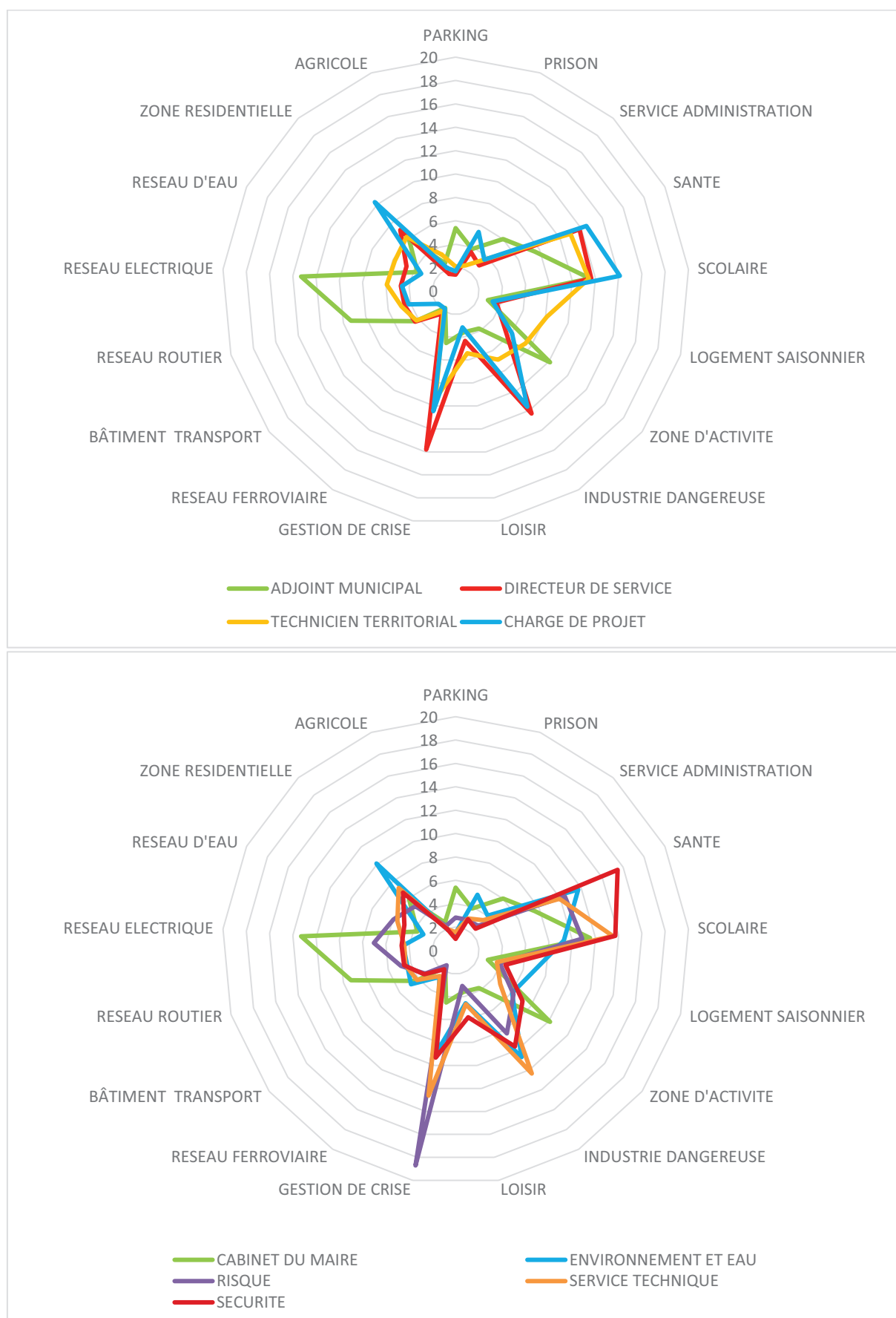


Figure 2.11 : Scores de vulnérabilité obtenus selon le profil des répondants

L'un des critères de choix de la méthode AHP, reposait sur la possibilité d'évaluer la cohérence des résultats obtenus par les participants à l'étude grâce à un ratio de cohérence dont le seuil de significativité a été fixé par Saaty à 10%. La Figure 2.12 présente deux groupes de scores avec en bleu les scores obtenus dont le RC est inférieur à 10% (groupe A) et en orange un RC supérieur 10% (groupe B). Si les répondants du groupe A ont attribué aux industries dangereuses et zones résidentielles un poids relatif plus important par rapport au groupe B, il est nettement visible que les deux groupes présentent des résultats suivant la même logique. Nous avons donc fait le choix de conserver l'ensemble des scores des répondants au sein de notre calcul du score final pondéré de vulnérabilité territoriale présenté dans le Tableau 2.10. En moyennant l'ensemble des scores obtenus cela permet également de moyennner les erreurs et incertitudes liées à la mise en œuvre de la méthode.

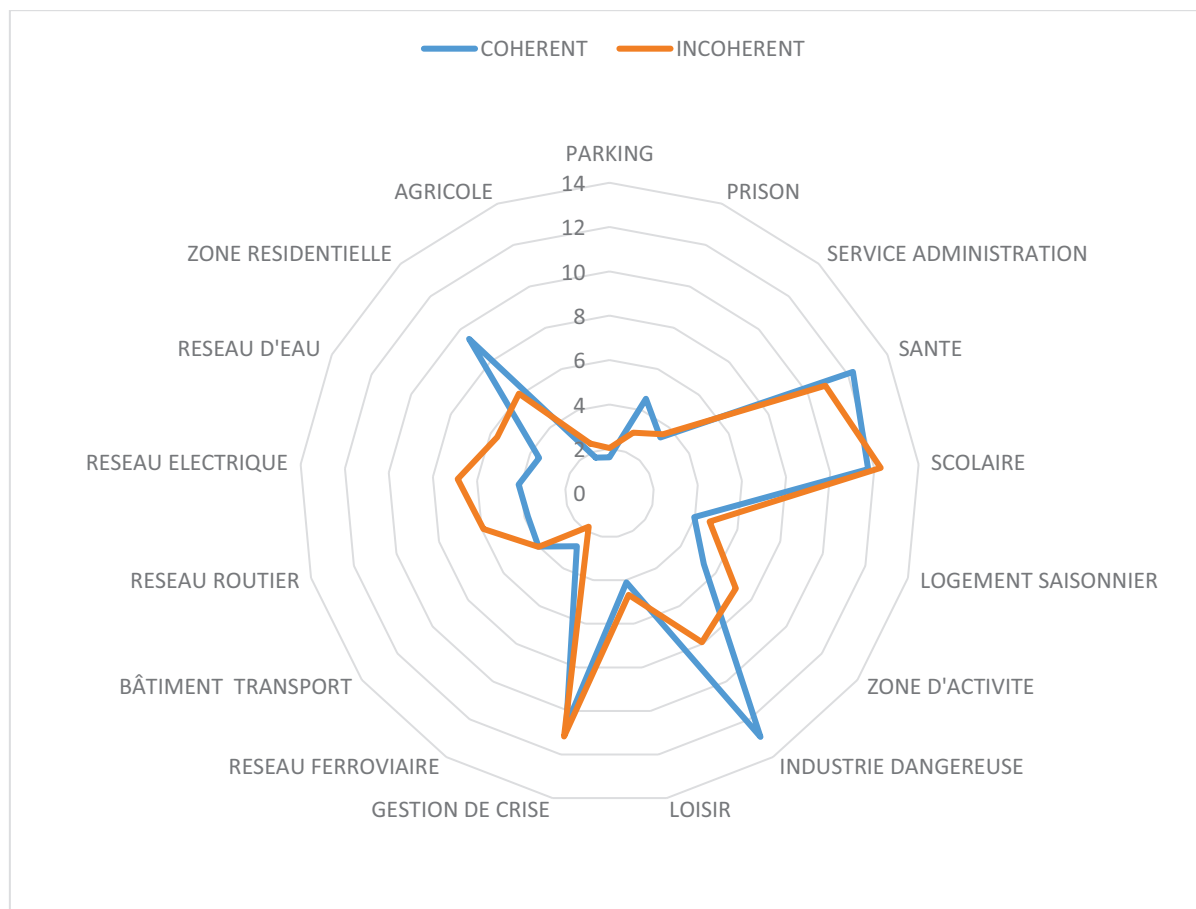


Figure 2.12: Scores de vulnérabilité territoriale obtenus par enjeu selon la cohérence des réponses des répondants

Il demeure cependant intéressant d'analyser la moyenne des ratios de cohérence des répondants. Voilà pourquoi nous les avons regroupés par profil de répondants et représentés en Figure 2.13. On peut souligner que les ratios de cohérence obtenus par les répondants sont en majorité supérieurs ou égaux à 10% qui est le seuil de significativité établi par Saaty (Saaty and Ozdemir 2003). Or ce seuil est fixé pour un nombre optimal de 7 critères à comparer et nous en comptons 17.

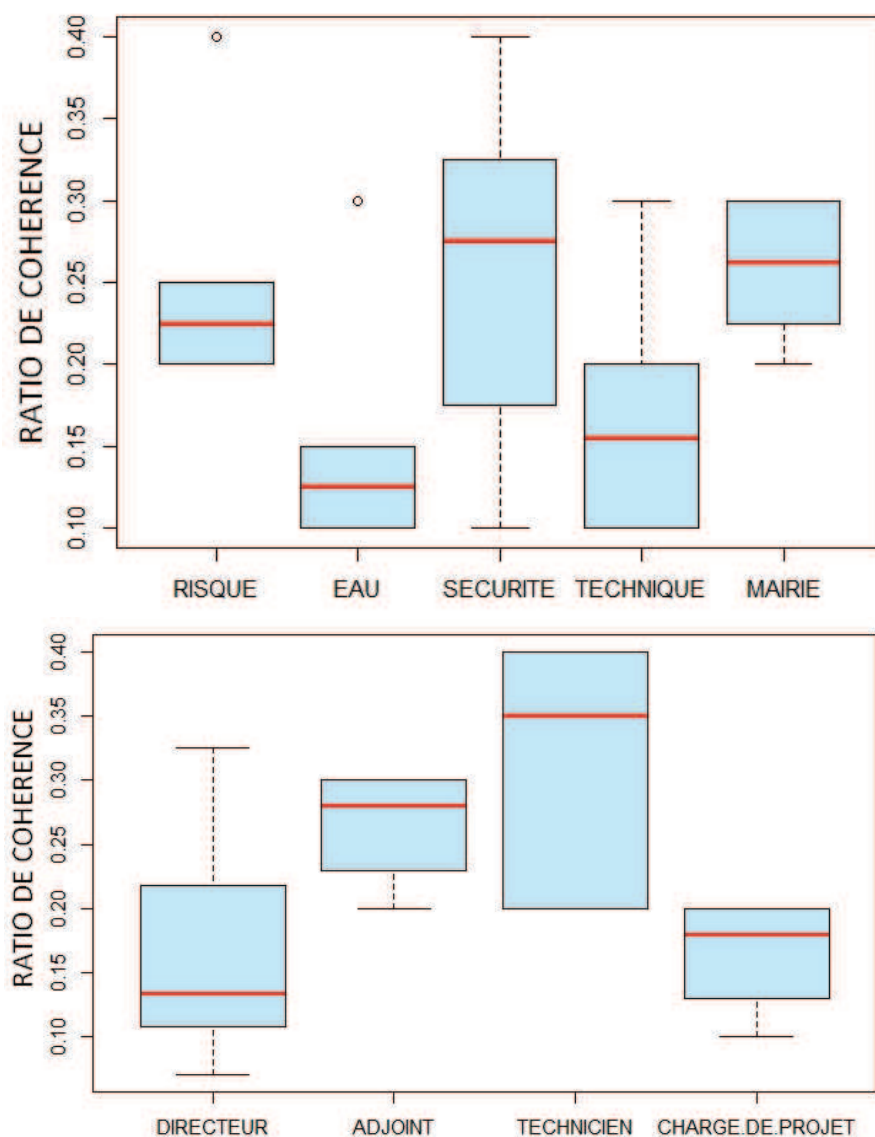


Figure 2.13: Ratios de cohérence selon le profil des gestionnaires

Au niveau des postes occupés par les répondants, les profils de Chargés de Projet et de Directeurs de Service présentent un RC fortement inférieur aux techniciens et adjoints municipaux. Ce résultat semble cohérent avec le fait qu'ils soient, par leur poste, plus souvent amenés à réfléchir aux questions d'évaluation du risque. En effet, les adjoints municipaux ne sont pas spécialisés sur le sujet tandis que les techniciens ont un rôle plus opérationnel dans la gestion des inondations.

Cependant, au niveau des pôles d'origine des répondants, ce sont les services techniques ainsi que le pôle environnement et eau qui présentent les ratios de cohérence les plus faibles tandis que les pôles du risque et de la sécurité, ainsi que le cabinet du maire, présentent tous trois une médiane supérieure à 0.20. Si ces résultats ne sont pas surprenants pour le cabinet du maire, les pôles du risque et de la sécurité présentent cependant un ratio de cohérence assez fort. Cela peut être expliqué par le fait que ce sont les techniciens qui sont le plus représentés dans ce pôle tandis que les directeurs de projet sont fortement représentés au niveau du service technique et les chargés de projet au niveau du pôle environnement et eau.

Conclusion du chapitre

La définition de ce qu'est un enjeu et la manière de l'appréhender peuvent varier de manière importante selon le référentiel par rapport auquel il est perçu. L'objectif de ce chapitre a été de fournir à cette étude un référentiel objectif, afin de pouvoir caractériser et évaluer les enjeux présents sur un territoire vis-à-vis d'un aléa mais également de leur rôle et fonctionnement au sein du système qu'est ce territoire. La méthode présentée dans ce chapitre permet ainsi de jauger le caractère systémique de l'endommagement potentiel des enjeux exposés à l'aléa crue.

Parmi les nombreuses méthodes de mesure de la vulnérabilité existantes, nous avons fait le choix ambitieux de nous intéresser à la vulnérabilité territoriale des enjeux exposés. Même s'il ne s'agit pas d'un concept récent, son croisement avec une méthode d'analyse multicritères bottom-up, constitue une démarche innovante et permet de fournir une approche adaptée aux besoins des gestionnaires du risque au niveau communal.

Ainsi, nous avons fait le choix d'appuyer notre démarche sur les acteurs même du territoire étudié en identifiant et hiérarchisant « *ce qu'ils estiment essentiel pour le fonctionnement et le développement du territoire dont ils ont la charge* » (D'Ercole and Metzger 2004). A partir d'une approche participative, nous proposons donc au terme de ce chapitre une hiérarchisation quantifiée des enjeux du territoire, établie à partir de l'analyse des acteurs de ce territoire.

L'analyse des réponses des participants à cette étude a montré que leur profil, ainsi que les caractéristiques propres à leur commune d'origine, jouent un rôle non négligeable dans l'évaluation de la vulnérabilité territoriale des enjeux. Cela souligne l'importance du choix des communes et acteurs à interroger, à travers un échantillonnage représentatif de la zone d'étude.

La prochaine étape de ce travail va consister à décrire le passage de la caractérisation de la vulnérabilité des enjeux à la caractérisation du risque sur un territoire. Pour cela il va s'agir de croiser les scores de vulnérabilité obtenus dans ce chapitre avec une qualification de l'aléa crue afin de pouvoir fournir une évaluation du risque d'endommagement potentiel lié à la survenue d'inondation

Chapitre 3 : Mise au point d'un indice pour passer de l'aléa au risque

SOMMAIRE

Introduction du chapitre	95
1. Qu'est-ce que le risque inondation ?	97
1.1. Définir le risque.....	97
Une notion multidimensionnelle	98
Risque, danger, menace, péril ?	99
Les composantes du risque	99
1.2. L'évaluation du risque	101
Matrice de risque.....	101
Indicateur de risque	102
Indice de risque	103
Prévoir un risque « dynamique »	104
2. Identifier les territoires du risque.....	107
2.1. Comment définir une zone inondable ?	108
Approche historique	108
Approche hydrogéomorphologique.....	109
Approche hydraulique	109
2.2. Produits utilisés dans le cadre de la thèse.....	110
Enveloppes Approchées des Inondations Potentielles (EAIP).....	110
Les emprises inondables issues de la méthode CARTINO	112
2.3. Comparaison EAIP / CARTINO	114
3. Construction d'un indice de risque.....	117
3.1. Méthode proposée	117
Choix de l'unité spatiale pour le calcul de l'indice	117
Choix de l'emprise inondable en fonction de l'intensité de l'aléa	118
Recensement et identification des enjeux exposés à l'aléa crue par unité spatiale	118
Agrégation de la vulnérabilité des enjeux exposés par unité spatiale	119
3.2. Application de l'indice de risque à l'échelle communale.....	121
3.3. Application de l'indice de risque à l'échelle de la méthode AIGA.....	125
L'échelle des tronçons « AIGA »	125
Définition de l'unité spatiale « tronçon AIGA / commune »	126
Conclusion du chapitre	130

Chapitre 3 : Mise au point d'un indice pour passer de l'aléa au risque

CAESAR: You know, there was a flash flood in El Salvador last night.

LUKE: No, my Salvadoran paper didn't come today.

CAESAR: They didn't see it coming.

LUKE: That's the "flash" part of flash flood.

CAESAR: So what do I do if I see a flash flood coming straight at the diner?

LUKE: Make sure all the customers have settled up.

Gilmore Girls – Season 6, Episode 18

Comment définir le risque ?

Quelle méthode de croisement de l'aléa avec la vulnérabilité territoriale ?

Comment délimiter les zones exposées aux inondations ?

Introduction du chapitre

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, l'aléa crue peut être défini par deux facteurs : son étendue spatiale et sa probabilité d'occurrence. L'étendue spatiale est conditionnée par des facteurs de prédisposition ou de susceptibilité du territoire qui sont les caractéristiques hydrauliques des lits mineurs et majeurs des rivières qui le parcourent (pente, rugosité, hauteur des berges, végétation, ouvrages hydrauliques). La probabilité d'occurrence de l'aléa peut être quant à elle évaluée quantitativement par le biais de périodes de retour. Ces périodes de retour sont obtenues par une analyse fréquentielle des crues sur des séries temporelles longues : près de 20 ans dans le cadre de la méthode AIGA.

Les enjeux sont quant à eux caractérisés par une exposition et une vulnérabilité comme cela a été vu dans le Chapitre 2. Ces deux composantes vont conditionner les dommages potentiels subis par ces enjeux lors de la survenue d'une inondation. Les dommages potentiels vont donc être conditionnés d'une part par leur vulnérabilité, mais également par la présence (ou non) de ces enjeux en zone inondée, correspondant à l'aléa considéré.

Dans ce troisième chapitre nous allons voir comment croiser l'information sur l'aléa fournie en temps réel par la méthode AIGA avec l'indice de vulnérabilité territoriale défini au précédent chapitre. L'objectif est d'aboutir à une méthode dynamique et spatialisée d'estimation du risque de dommages potentiels au cours d'un événement de crue, potentiellement utilisable en opérationnel, par exemple dans le cadre du service Vigicrues Flash présenté dans le Chapitre 1.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons au concept de risque dans le but de le définir mais également de réfléchir aux méthodes de mesure les plus adéquates dans le cadre de notre étude.

Dans un second temps, nous étudierons les différentes méthodes permettant de définir l'étendue spatiale d'une inondation, pour un niveau d'aléa donné : le territoire du risque. En effet, dans la méthode AIGA présentée au Chapitre 1, si le niveau d'aléa est bien défini tout au long de la rivière, la méthode ne donne en revanche aucune information sur l'étendue spatiale de l'inondation correspondant à cet aléa.

Enfin l'indice de risque proposé dans cette thèse sera détaillé au terme de ce chapitre et un premier aperçu de son application sera analysé.

1. Qu'est-ce que le risque inondation ?

La définition du risque inondation est sujette à de nombreux débats au sein de la communauté scientifique. Cela peut notamment s'expliquer du fait de l'omniprésence des risques à la surface de la terre et tout particulièrement du risque inondation. Or le mot même de risque est soumis à controverse quant à son étymologie. Ainsi, avant de nous intéresser à la définition du risque dans le domaine de la cindynique, nous nous sommes penchés sur les origines du mot.

1.1. Définir le risque

De la même manière que les notions d'enjeu, d'aléa et de vulnérabilité, les racines de la notion de risque sont nébuleuses. En effet, selon les auteurs, la paternité de ce terme est attribuée successivement au latin, au roman, à l'arabe ou encore au grec byzantin.

Selon la première hypothèse, les premières traces du mot « risque », tel qu'on l'emploie aujourd'hui, remonteraient à l'époque médiévale. En effet, dès le XII^e siècle on retrouve le terme « resicu » dans le latin médiéval signifiant « *le défi posé à un marin par une barrière de récifs* ». Il s'agirait d'un dérivé du verbe latin « resecare » signifiant « enlever en coupant ». Le premier sens du mot renverrait, dans le domaine maritime, à l'idée de l'écueil menaçant de fendre la coque navire et qui aurait été utilisé plus tard, par association d'idée, pour désigner le risque pour un bateau de perdre sa marchandise en mer (Pradier 2006).

Cette hypothèse est réfutée par plusieurs linguistes parmi lesquels Pierre Guiraud, qui trouve quant à lui l'étymologie du mot risque dans le terme roman « rixicare » tiré du latin « rixare » signifiant « se quereller » et qui renverrait à la notion de danger corporel pour les participants à une querelle ou une rixe.

D'autres hypothèses voudraient également que le mot risque provienne de l'arabe رزق dit « rizq » renvoyant à « *la part de biens que Dieu attribue à chaque homme, [...] d'où événement fortuit, puis risque* » (Pradier 1998), ou encore du grec byzantin ριζικόν dit « rhizikon » signifiant la « *solde gagnée par chance par un soldat de fortune* », plus proche de la signification actuelle des notions de destin ou de hasard (Magne 2010).

Cette diversité étymologique exprime d'une part le caractère multiple de la notion de risque mais également la difficulté de sa perception. Le risque évoque ainsi, à travers ces diverses étymologies, aussi bien l'idée de danger, qui est présente dans plusieurs racines probables du mot, que les idées de hasard et d'incertitude.

Ainsi, si l'idée de danger renvoie aux enjeux auxquels il s'applique, et qui ont été vus dans le chapitre précédent, les notions de hasard et d'incertitude renvoient quant à elles plutôt à la notion d'aléa, vue dans le premier chapitre. Cette dualité se retrouve notamment dans les définitions du risque existantes au sein de la littérature spécialisée, aussi bien que dans les définitions plus courantes.

Une notion multidimensionnelle

Ainsi, l'analyse de l'étymologie du mot « risque » a révélé que cette notion n'est apparue que tardivement dans la langue Française. Cette arrivée tardive peut notamment être rattachée à l'apparition tout aussi tardive des notions d'enjeux et de vulnérabilité (Chapitre 2). La notion de risque peut alors être considérée comme contemporaine de sa perception par la société qui devient alors la « société du risque » (Beck 2008).

En effet, d'un point de vue ontologique, la perception du risque est particulièrement complexe étant donné « *que le risque n'existe pas, qu'il est toujours potentiel et virtuel : lorsqu'un risque se matérialise, il ne s'agit plus d'un risque, mais d'un sinistre* » (Caeymaex 2007, Kermisch 2012).

Aujourd'hui cependant, le terme de risque est fréquemment utilisé dans le vocabulaire courant du droit, de la finance ou encore de la médecine. Ainsi, en droit civil, le risque se définit comme « *l'éventualité d'un événement futur, incertain ou d'un terme indéterminé, ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage* » (Capitant 1936). Dans le domaine financier le risque est plutôt vu comme la « *possibilité hasardeuse d'encourir un mal, avec l'espoir d'obtenir un bien* ». Enfin en médecine, la notion de risque est définie par l'Organisation Mondiale de la Santé comme étant « *la probabilité d'une issue sanitaire défavorable ou un facteur qui augmente cette probabilité* ».

Aussi dissemblables qu'elles puissent être, ces trois définitions ont cependant en commun :

- La notion de hasard et d'incertitude,
- La notion de perte possible ou de dommage potentiel.

En effet, dans la littérature spécialisée ces deux items apparaissent comme les composantes principales du risque. Ainsi les Nations Unies ont choisi de définir le risque dans le domaine des catastrophes naturelles comme « *la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences négatives* » (UNISDR 2009). Cette définition est quasi identique à celle donnée par l'organisation internationale de normalisation (ISO), dont les guides fournissent un standard international de définitions selon les domaines, telle que : « *la combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité* » (ISO/IEC 2002).

Il peut être intéressant de souligner la définition du risque dans le domaine financier car celle-ci est la seule à évoquer « *l'espoir d'obtenir un bien* ». Cette perception est intéressante car elle évoque le fait que le risque n'est pas omniprésent ni inéluctable, mais qu'au contraire il se provoque, ce qui renvoie à l'expression de « prise de risque » ou encore au verbe « risquer ».

Risque, danger, menace, péril ?

Dans le cadre de la thèse, qu'il s'agisse de l'économie réalisée pour l'achat d'une habitation en zone inondable ou d'un gain de temps pour la traversée d'une route submergée, il est important de rappeler que le risque est la conséquence directe ou indirecte d'une prise de décision sur le court ou long terme. C'est notamment ce qui le différencie des notions de danger, péril ou encore de menace.

Le danger et le risque sont tous deux associés à de potentiels dommages, cependant si « *le risque est compris comme la possibilité de dommages futurs qui est attribuée à une décision* » (Luhmann 1990), le danger est quant à lui « *la possibilité de dommages futurs qui est attribuée aux facteurs sur lesquels nous n'avons pas d'influence* » (Holzer and Millo 2005). En ce qui concerne le terme de « péril », il renvoie plutôt aux situations où la vie humaine est menacée tandis que celui de « menace » est un danger qui existe dans l'environnement d'un système, indépendamment de ce système. De plus, les notions de danger, de péril et de menace excluent la dimension temporelle qui caractérise le risque.

Les composantes du risque

La définition courante du risque correspond donc à la combinaison d'une probabilité d'occurrence et de pertes potentielles. Dans le domaine des catastrophes naturelles, le risque apparaît donc comme le produit de deux éléments majeurs (Figure 3.1) qui sont :

- L'aléa, correspondant à la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel d'une intensité et d'une fréquence données (période de retour) ;
- Les enjeux, correspondant aux biens et personnes, dont les pertes potentielles sont conditionnées par leur exposition et leur vulnérabilité.

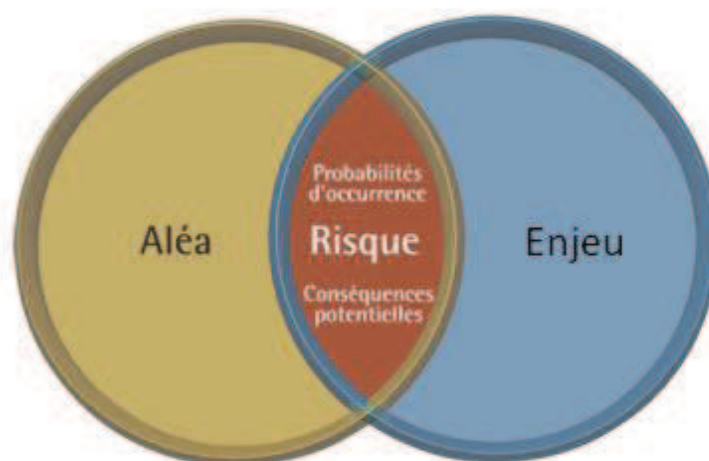


Figure 3.1: Illustration des composantes du risque

Traditionnellement, l'analyse du risque passe donc par la prise en compte du binôme aléa/enjeu tel que : $Risque = aléa \times enjeu$. Cependant, de nombreux auteurs réfutent la simplicité de cette équation, qui ne prend pas explicitement en compte d'autres paramètres qui peuvent influencer le risque comme la vulnérabilité et l'exposition vus dans le chapitre précédent ou encore les capacités de résilience que nous n'avons pas encore évoquées. Ainsi Defossez, Vinet, & Leone, 2017 proposent un modèle d'évaluation du risque sur un territoire (modèle HSV/C) qui fait clairement apparaître les différentes composantes du risque (Figure 2).

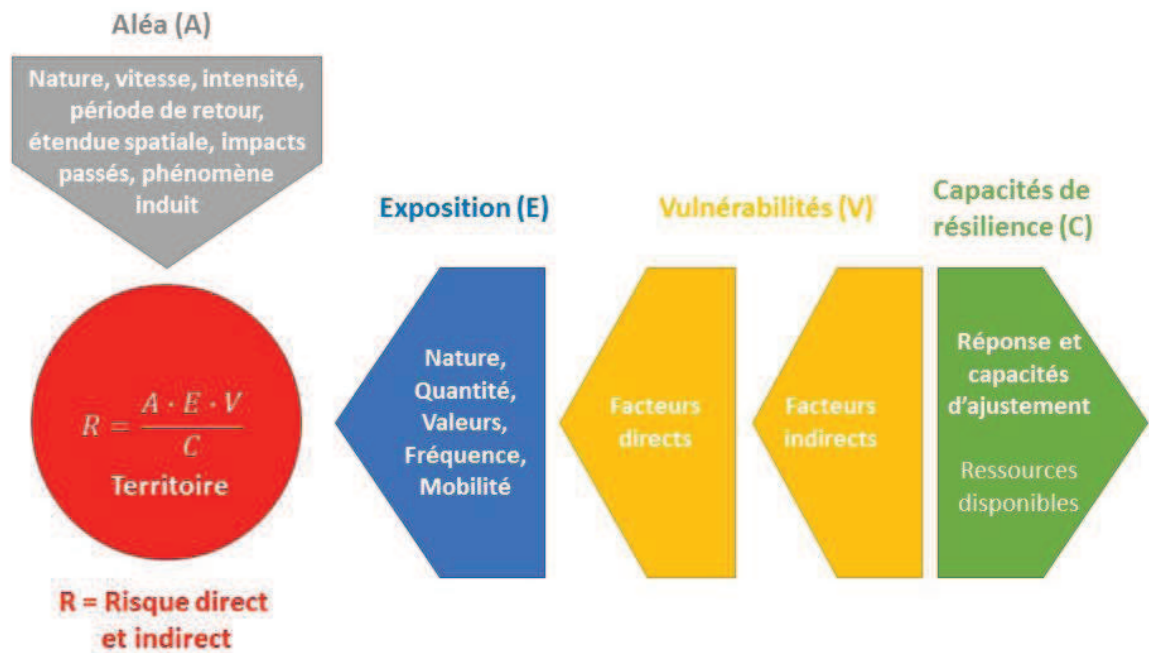


Figure 3.2 : Le modèle HSV/C de diagnostic du risque territorial, (Defossez, Vinet and Leone 2017)

Le risque est donc un système particulièrement complexe dont l'évaluation repose sur de multiples paramètres ainsi que sur des incertitudes. Cette évaluation doit donc à la fois être quantitative et qualitative, caractérisée par :

- L'intensité de l'aléa - qui peut être exprimée en terme de période de retour - ainsi que son emprise géographique,
- Les caractéristiques des enjeux exposés,
- Les conséquences sur les enjeux sur le court et long terme.

Afin d'évaluer le risque de dommages sur un territoire, la méthode utilisée doit donc prendre en compte l'ensemble de ces paramètres.

1.2. L'évaluation du risque

Que l'on parle de risque naturel, technologique ou encore sanitaire, l'évaluation des risques est un enjeu majeur pour leur gestion. En effet, ce n'est qu'en passant par l'évaluation du risque, qu'il va être possible de mettre en place des actions de protection et de prévention adaptées en amont, mais également d'en évaluer l'efficacité en aval au travers d'analyses coût-bénéfices par exemple (Treich 2005).

L'évaluation du risque peut être définie comme « *l'utilisation de faits scientifiques pour définir les effets [...] d'une exposition d'individus ou de populations à [...] des situations dangereuses* » (Council 1983). Si l'on s'en réfère à la section précédente, l'évaluation du risque revient à l'évaluation des dommages potentiels des enjeux exposés. Les protocoles d'évaluation du risque impliquent donc de formuler un jugement de valeur sur l'endommagement potentiel d'enjeux exposés. Or, tout comme celle de vulnérabilité sur laquelle elle est fondée, la notion de risque est particulièrement abstraite. Sa perception varie donc selon les individus : ce qui pose notamment le problème de la subjectivité de son évaluation.

L'objectif principal de l'évaluation du risque est d'obtenir une appréciation objective de la probabilité de dommages potentiels liés à la survenue d'un événement naturel et ce pour une zone, à un moment donné. Ce niveau de risque peut être exprimé en termes de valeur monétaire des dommages estimés, de pourcentage de perte ou encore par le biais d'une classification ou d'un indicateur. Cette évaluation permet de faire le suivi de l'évolution de ce risque dans le temps. Elle permet également de comparer les territoires entre eux dans le but de les hiérarchiser.

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation du risque selon le contexte dans lesquels elles s'inscrivent, l'objectif de l'évaluation, l'échelle mais également selon les données disponibles. La prochaine section va s'intéresser aux différentes méthodes d'évaluation existantes et à leur utilisation potentielle dans le cadre de la thèse.

Matrice de risque

Certains aspects du risque ne sont pas toujours quantifiables ou leur quantification peut soulever de nombreuses incertitudes. C'est pourquoi, l'une des méthodes les plus utilisées pour l'évaluation qualitative du risque est ce que l'on appelle une matrice de risques. Elle consiste à croiser deux types d'informations : d'une part un aléa et d'autre part ses conséquences probables en cas de survenue.

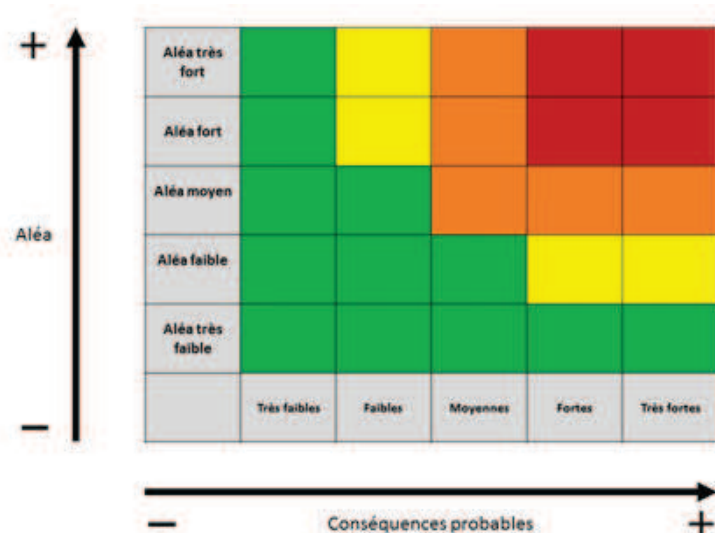


Figure 3.3: Exemple de matrice de risque, en vert : risque faible, en jaune : risque moyen, en orange : risque fort, en rouge : risque très fort (Leone, Asté and Leroi 1996)

Cette méthode permet de classifier les différents niveaux de risque en se fondant sur des données quantitatives limitées. En effet, l'utilisation de classes permet une plus grande flexibilité dans la caractérisation des éléments de la matrice.

Les méthodes d'évaluation qualitatives des enjeux présentent un certain nombre d'avantages et d'inconvénients. Si à la différence des méthodes quantitatives elles permettent de prendre en compte des éléments qui ne peuvent être traduits en termes numériques, ces méthodes posent notamment le problème de leur pertinence mathématique. Dans le contexte des risques naturels, les approches qualitatives de l'évaluation du risque ne doivent pas être écartées. En effet, le risque n'est pas une notion absolue mais relative, c'est-à-dire qu'il varie selon les contextes et les individus qui le perçoivent.

Indicateur de risque

Comme leur nom l'indique, les indicateurs de risque sont des outils d'évaluation simple basés sur une seule variable. En France, il existe 19 Observatoires Régionaux traitant des risques naturels ainsi qu'un Observatoire National des Risques Naturels (ONRN) qui proposent des indicateurs de risque à l'échelle communale ou départementale (Dubert et al. 2016). L'ONRN compte 53 indicateurs de risque dont 23 concernent le risque inondation. Ces indicateurs sont répartis en 4 catégories qui sont :

- Les enjeux inondation,
- La sinistralité inondation,
- La prévention inondation,
- Les acteurs et leurs projets PAPI.

Si l'ONRN propose de croiser plusieurs indicateurs (Figure 3.4), il n'est pas possible d'obtenir une information agrégée des différentes données fournies par les indicateurs notamment afin d'en retirer une information synthétique. Afin de pallier cette limite certains auteurs proposent d'utiliser des indices de risque, permettant de combiner différents indicateurs.

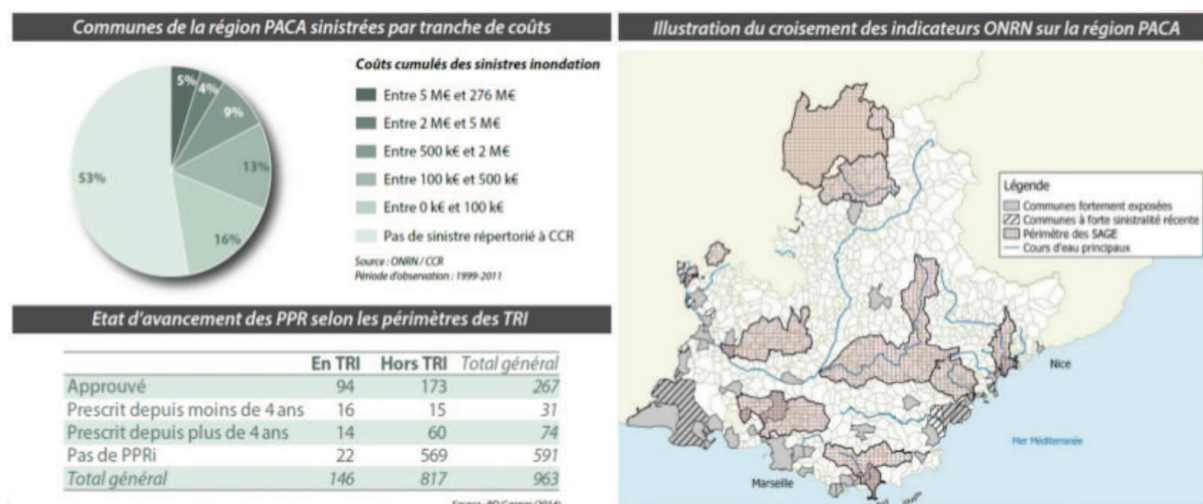


Figure 3.4 : Exemple du croisement d'indicateurs ONRN pour la région PACA

Indice de risque

Ainsi, Leone (2007) définit les indices de risque comme « *le résultat d'un calcul plus ou moins complexe basé sur plusieurs paramètres ou variables* ». Parfois qualifiés de qualitatifs, quantitatifs ou semi-quantitatifs ordinaux, les indices sont fréquemment utilisés pour caractériser le risque d'inondation car ils présentent l'avantage de proposer une démarche multicritères d'évaluation d'une situation complexe aboutissant à un résultat synthétique, à la différence des indicateurs notamment.

Les indices de risque consistent à traduire différents paramètres d'aléa et de vulnérabilité en termes numériques et de les combiner pour obtenir une vision globale et synthétique du risque sur un territoire donné. Les indices présentent également l'avantage de permettre des analyses et des comparaisons entre différents contextes, ainsi que des restitutions cartographiques à différentes échelles. Parmi les différents indices existants à l'échelle de la France, on peut notamment citer les indices issus de la méthode inondabilité.

Développée dans les années 1990 par le CEMAGREF ou Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts (ancien Irstea) de Lyon, il s'agit d'une méthode d'évaluation du risque inondation dont le but est de fixer un seuil de « risque acceptable » pour chaque bassin versant étudié (Lang, Chastan and Grelot 2009). L'originalité de cette méthode est de mesurer l'aléa et la vulnérabilité en tant que variables quantifiables et selon une même échelle de valeur afin de pouvoir les comparer entre elles.

L'utilisation de la méthode inondabilité concerne surtout l'aménagement du territoire et se présente donc sous la forme de cartes de synthèse. L'objectif principal de cette méthode est de distinguer les zones les plus à risque (celles où l'enjeu sera inondé plus souvent que ce qui est « acceptable »), des zones les moins à risque (celles où l'enjeu sera inondé à une fréquence « acceptable »). Comme le notent les auteurs, une limite de la méthode vient de la manière de définir cette fréquence « acceptable ».

Prévoir un risque « dynamique »

Comme nous l'avons expliqué en introduction, notre objectif est d'accoler un indice de risque à la méthode AIGA afin de prévoir, au regard de la situation hydrométéorologique en cours, le risque de survenue de dommages, et pas simplement d'une crue. Or, les méthodes d'évaluation du risque que nous avons passées en revue ne s'appliquent pas au cadre de la prévision, mais plutôt à celui de la prévention ; par exemple, pour la réalisation de Plan de Prévention des Risques. Les cartes ou indices obtenus sont donc statiques dans le temps, éventuellement réévalués au bout de quelques années, afin de tenir compte de changements dans la nature des enjeux ou de leur vulnérabilité. Dans le cadre de l'évaluation en temps réel, il s'agit de réévaluer le risque, en continu.

Des méthodes d'évaluation « dynamique » des risques existent. Concernant les crues rapides, on peut noter en France les travaux initiés dans le cadre de deux projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) : Prediflood et MobiClimex, qui ont permis notamment la réalisation de plusieurs thèses sur le sujet.

Le projet Prediflood (2008-2011) s'est intéressé au développement d'un système de prévision des submersions de routes par les crues rapides, en s'appuyant sur un modèle pluie-débit et une évaluation de l'exposition du réseau routier. Le département du Gard a été notamment utilisé comme territoire de test. Ce système a été développé à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), grâce aux thèses de Versini (2007) puis de Naulin (2012). A partir de données de pluie obtenues en temps réel, un modèle pluie-débit permet d'évaluer la sévérité de la crue dans le réseau hydrographique. Les données obtenues sont alors croisées avec un modèle de sensibilité du réseau routier établi à partir de données empiriques sur une chronique de submersions de route. Cela permet d'obtenir en temps réel une information sur le risque de submersion (Figure 5).

Dans le prolongement de Prediflood, le projet MobiClimex (2013-2017) a permis la mise au point d'une modélisation dynamique de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes, en simulant leurs déplacements durant les crues. Ces travaux ont été réalisés à l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) dans le cadre de la thèse de Shabou (2016).

Plus récemment, une collaboration entre l'IGE et le National Severe Storms Laboratory (NOAA, Oklahoma, Etats-Unis) a permis grâce à la thèse de Terti (2017) sur la prévision des impacts humains, d'introduire la notion de vulnérabilité « dynamique » liée au déplacement de véhicules. Le modèle résultant a plus particulièrement été testé dans les états du Texas et de l'Oklahoma mais pourrait être appliqué à une résolution horaire ou journalière à chaque comté des Etats-Unis.

Enfin, les derniers travaux à mentionner sont ceux de la thèse de Le Bihan réalisés à l'IFSTTAR, en collaboration avec la CCR, et qui a consisté à mettre en place une évaluation des dommages liés aux crues éclaircies. L'originalité de ce travail a été d'utiliser une modélisation hydraulique simplifiée (la méthode CARTINO sur laquelle nous reviendrons) ainsi que des données assurantielles pour évaluer la méthode proposée (Figure 3.6).

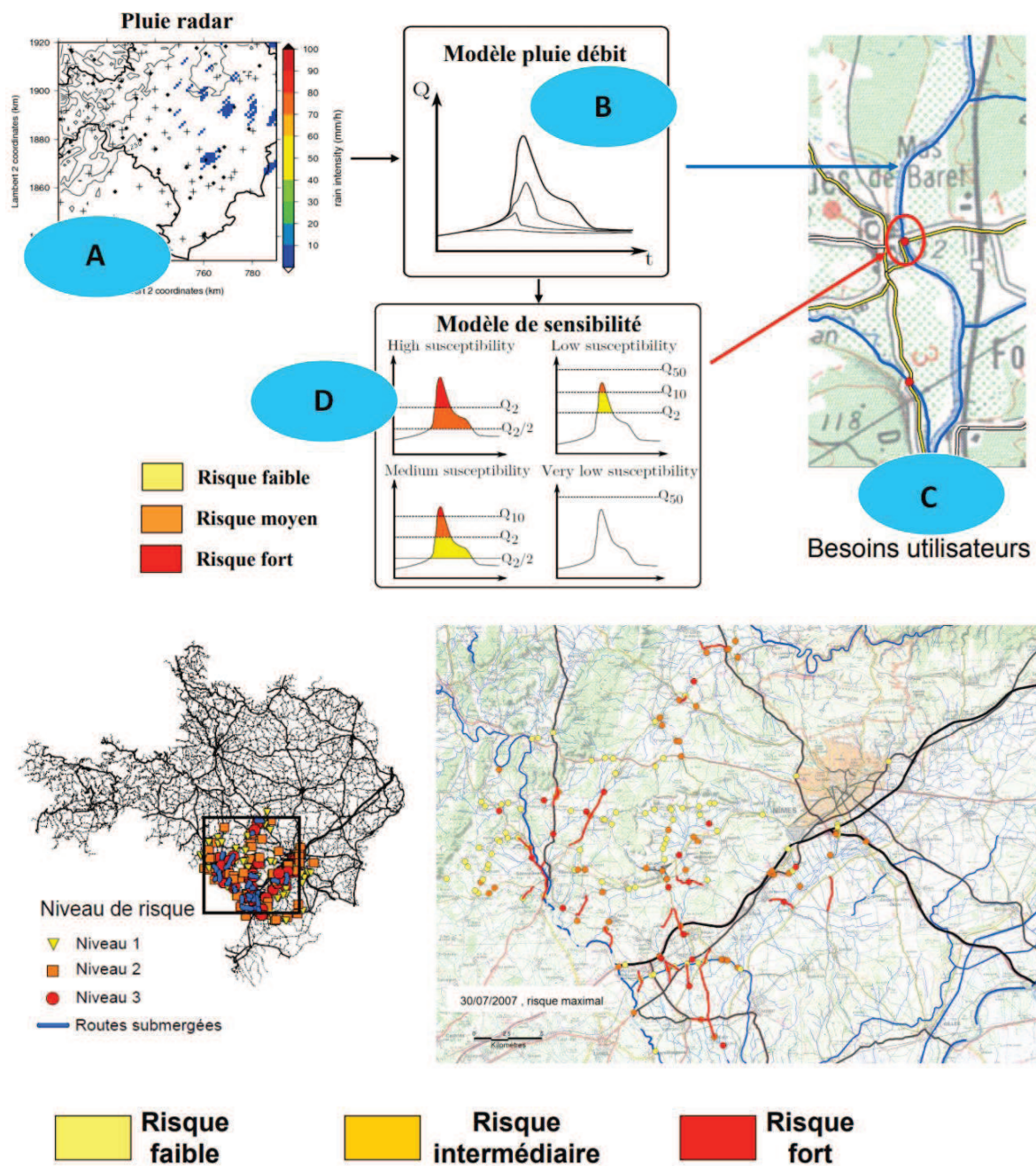


Figure 3.5 : Illustration de la méthode de prévision des submersions de routes (Naulin, Payrastre and Gaume 2013)

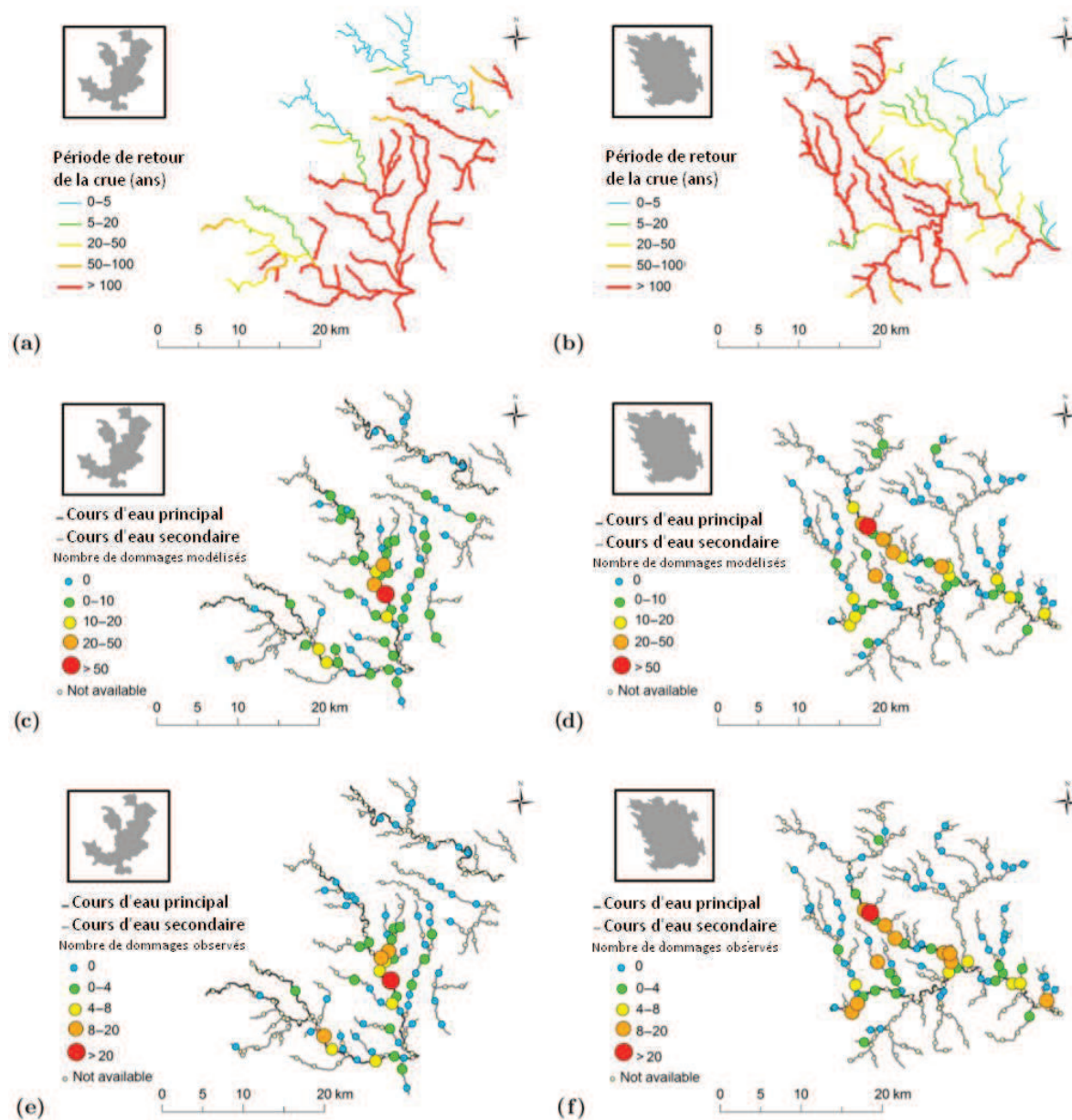


Figure 3.6 : Comparaison entre le nombre de bâtiments endommagés et le nombre de bâtiments endommagés prévu par le modèle pour les inondations d'Alès en 2002 (a, c, e) et de Draguignan en 2010 (b, d, f). (Le Bihan 2016a)

2. Identifier les territoires du risque

Le territoire du risque « désigne [...] l'espace potentiellement affecté par les effets du phénomène dangereux, c'est-à-dire la zone exposée aux effets dommageables » (Moliner-Dubost 2016). Ainsi, afin d'évaluer le risque de dommages dans une zone donnée, il est d'abord nécessaire d'en délimiter le territoire du risque.

Dans le contexte des inondations, ce territoire du risque correspond aux zones inondables dites aussi enveloppes inondables. On peut définir une zone inondable comme une zone géographique potentiellement recouverte par l'eau pour un niveau d'aléa donné. Ce niveau est souvent exprimé en termes de période de retour. Par exemple dans le cas des PPRI, la période de de retour 100 ans est généralement choisie, mais il peut également s'agir des plus hautes eaux connues.

Les enveloppes inondables sont le pilier de l'évaluation des dommages potentiels liés aux crues. En effet, par définition un enjeu est considéré comme exposé s'il est affecté directement par un aléa. Or les cours d'eau non jaugés qui sont soumis aux crues rapides ne bénéficient que rarement d'une cartographie de leur zone inondable en raison d'une absence de suivi et de leur taille réduite. Il s'agit là d'une difficulté majeure qu'il nous faudra résoudre, puisque la méthode que nous souhaitons élaborer devra pouvoir être facilement applicable à tout type de cours d'eau.

L'objectif de cette section est donc d'expliquer comment sont délimitées les zones inondables des cours d'eau et de voir quelles sont les méthodes permettant d'obtenir une donnée suffisamment précise et pertinente afin de caractériser le risque de dommages dans le cadre de notre étude.

2.1. Comment définir une zone inondable ?

Afin de définir la zone soumise à l'aléa, la zone inondable, plusieurs méthodes peuvent être identifiées (CEREMA 2017) en fonction de trois approches distinctes :

- L'approche historique,
- L'approche hydrogéomorphologique,
- L'approche hydraulique.

Approche historique

Afin de déterminer les limites d'une zone inondable, l'approche historique se fonde sur le relevé de repères des crues précédentes observées. Aux Etats-Unis, un guide méthodologique complet a été constitué à cet effet (Koenig et al. 2016). En France, une plateforme internet collaborative répertorie l'ensemble des repères et sites de crues au niveau national (<https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr/>).

Ainsi, grâce à ces hauteurs d'eau relevées sur différents points du territoire, une cartographie de l'enveloppe inondable d'un cours d'eau est possible. En Loire moyenne par exemple, une initiative de ce type a été conduite en 2011, visant à reconstituer les limites des plus hautes eaux connues (PHEC).

Si cette approche est en théorie la plus simple et précise, plusieurs limites sont à signaler. L'absence de données exhaustives sur les crues passées, notamment sur les cours d'eau non-jaugés ne permet pas de la mettre en application partout. De plus, la rareté de l'enveloppe inondable, c'est-à-dire la période de retour de la crue, n'est pas toujours connue. Enfin, cette approche est tributaire des changements morphologiques du cours d'eau entre deux événements de crues.

Cependant, si cette approche ne peut être conduite de manière exhaustive ni systématique, elle constitue une source précieuse d'informations et peut être combinée avec d'autres approches telles que l'approche hydrogéomorphologique ou encore hydraulique, à des fins de validation et de calibration notamment.

Approche hydrogéomorphologique

L'approche hydrogéomorphologique est une approche naturaliste ayant pour but de distinguer les différents lits d'un cours d'eau et de comprendre son fonctionnement hydrologique à partir d'une analyse de sa morphologie c'est-à-dire de son terrain à l'état naturel (Ballais et al. 2011). Cette approche s'appuie sur deux outils principaux qui sont :

- La photo-interprétation,
- L'observation de terrain.

Si l'approche hydrogéomorphologique a été développée en France dès les années 1980, elle a surtout connu un essor important à partir de 1995 (Masson, Garry and Ballais 1996). En effet, à partir de cette date son utilisation a été systématisée pour la cartographie des Plans de Prévention du Risque Inondation, institués par la loi Barnier du 3 février 1995, étant donné son caractère peu onéreux et la rapidité de sa mise en œuvre. Dans le cas des PPRI, l'approche hydrogéomorphologique est cependant combinée avec d'autres méthodes dont des méthodes hydrauliques de détermination de l'enveloppe inondable. Utilisée surtout dans le sud de la France, elle donne une enveloppe inondable maximale parfois intégrée en tant que « risque résiduel » c'est-à-dire au-delà de la crue réglementaire dans les PPR (Montané, 2014).

Approche hydraulique

L'approche hydraulique s'appuie sur des méthodes physico-mathématiques qui vont simuler, pour une crue de période de retour donnée, les conditions d'écoulement dans un cours d'eau. Pour cela, elles s'appuient sur des paramètres à la fois topographiques, physiques et hydrologiques.

L'objectif de l'approche hydraulique est donc de réaliser un modèle mathématique capable de simuler une inondation à partir :

- Du débit de crue d'une période de retour donnée en amont du modèle,
- D'une représentation fine de la topographie du cours d'eau,
- D'une estimation des paramètres conditionnant à l'écoulement (frottements sur le fond et les berges, condition limite à l'aval du modèle),

Les paramètres liés au frottement sont la plupart du temps calés à partir de données observées : niveau de l'eau en différents endroits et débit correspondant. Une fois le modèle calé, il est possible de lui injecter des scénarii de débits associés à des périodes de retour, pour avoir en sortie la cartographie de l'inondation correspondante.

Les trois approches présentées dans cette section ont donné le jour à un grand nombre de méthodes différentes afin de délimiter les zones inondables. Cependant, peu permettent de fournir une information sur les petits cours d'eau non-jaugés, et qui sont les plus concernés par les crues rapides. C'est pourquoi nous nous sommes plus spécifiquement intéressés à deux méthodes en particulier, permettant d'avoir une information sur les zones inondables de manière relativement facile et automatique, sur l'ensemble des petits cours d'eau du réseau hydrographique français.

2.2. Produits utilisés dans le cadre de la thèse

Enveloppes Approchées des Inondations Potentielles (EAIP)

Les Enveloppes Approchées des Inondations Potentielles (EAIP) sont des enveloppes inondables construites à partir des différentes données disponibles au niveau national pour la constitution de zones inondables dans le cadre de la première Évaluation Préliminaire du Risque Inondation (EPRI) réalisée en 2011. Les EAIP sont le fruit de la fusion, par ordre de préférence :

- De zones inondables au sein des services de l'État : AZI (Atlas de Zones Inondables), PPRi, données historiques,
- D'informations sur les alluvions récentes tirées de cartes géologiques,
- De l'évaluation des zones basses hydrographiques par la méthode EXZECO (EXtraction des Zones de concentration des ÉCOulements), là où aucune autre méthode n'est disponible.

L'EXZECO est une méthode purement topographique développée par le Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement - CEREMA (Pons et al. 2010a). Elle consiste à déterminer les zones de concentration des écoulements à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) et le tracé du réseau hydrographique correspondant. Ainsi EXZECO permet de faire ressortir les zones situées à une faible altitude par rapport aux talwegs.

Les zones basses hydrographiques ainsi créées deviennent une approximation des zones potentiellement inondables. Ainsi EXZECO est une sorte d'application automatisée de l'approche hydrogéomorphologique vue dans la section précédente.

Trois types de données sont nécessaires à la mise en œuvre de l'EXZECO, tel que présenté dans la Figure 3.7:

- Une hauteur de bruitage ΔH ,
- Un nombre d'itération N ,
- Un seuil de surfaces drainées pour les pixels inondables.

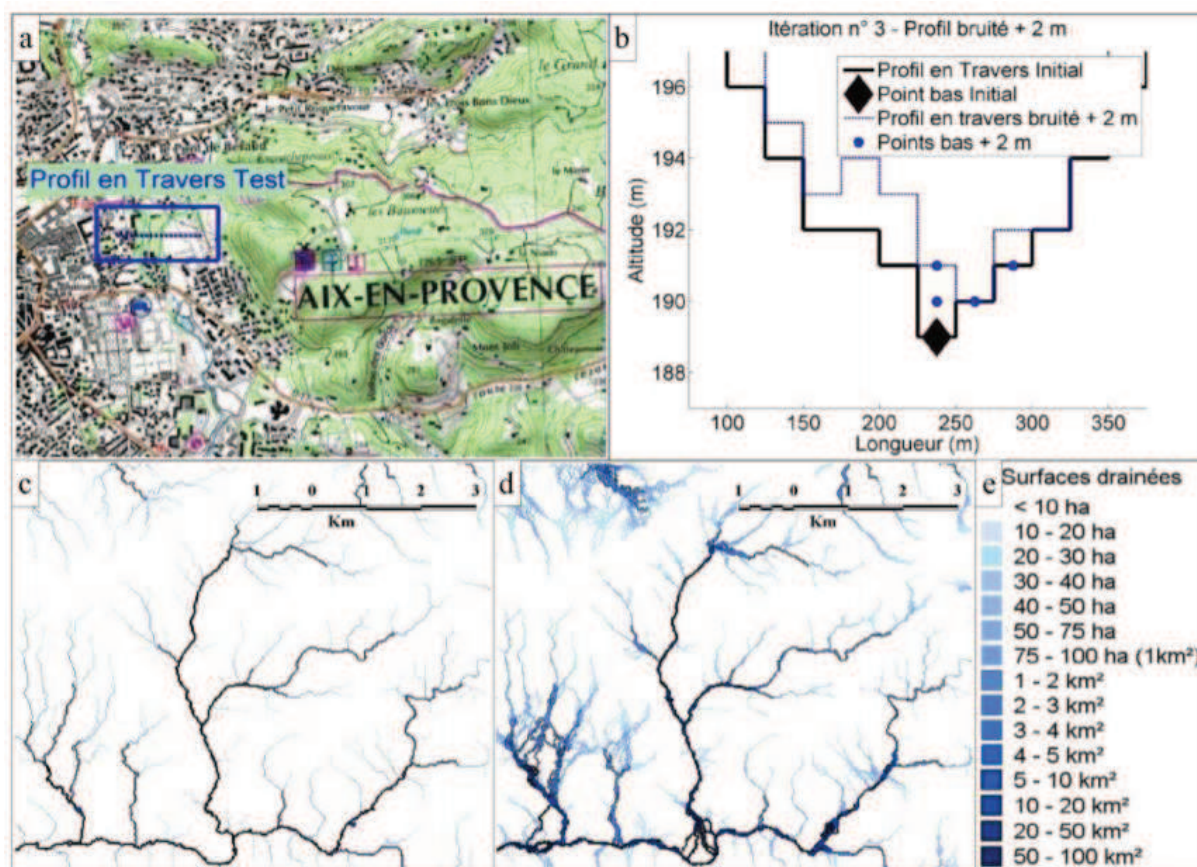


Figure 3.7: Illustration de la méthode EXZECO au niveau du cours d'eau de la Torse à Aix-en-Provence (13), (a) secteur de la Torse et emplacement du profil en travers, (b) résultat d'EXZECO sur le profil en travers, (c) N=1 itération, (d) N= 100 itérations, (e) légende des surfaces drainées (Pons et al. 2010b)

Les emprises inondables issues de la méthode CARTINO

Comme EXZECO, la méthode CARTINO (CARTographie des INondations) a été développée par le Cerema afin de cartographier les hauteurs d'eau correspondant à différentes périodes de retour SHYREG de la crue dans le cadre de la Directive Européenne Inondation 2007/60/CE.

Cette méthode vise à pallier à la limite principale de la méthode EXZECO, à savoir qu'elle est purement topographique. Elle ne fait appel à aucune notion ni d'hydraulique (conditions d'écoulement), ni d'hydrologie (crue de période de retour). En revanche, comme EXZECO, CARTINO a été développée dans l'optique d'une application automatique pour couvrir un large territoire.

Cette méthode met en application de manière semi-automatique un modèle hydraulique simplifié afin de calculer les emprises inondées (Figure 3.8) (Pons et al. 2014).

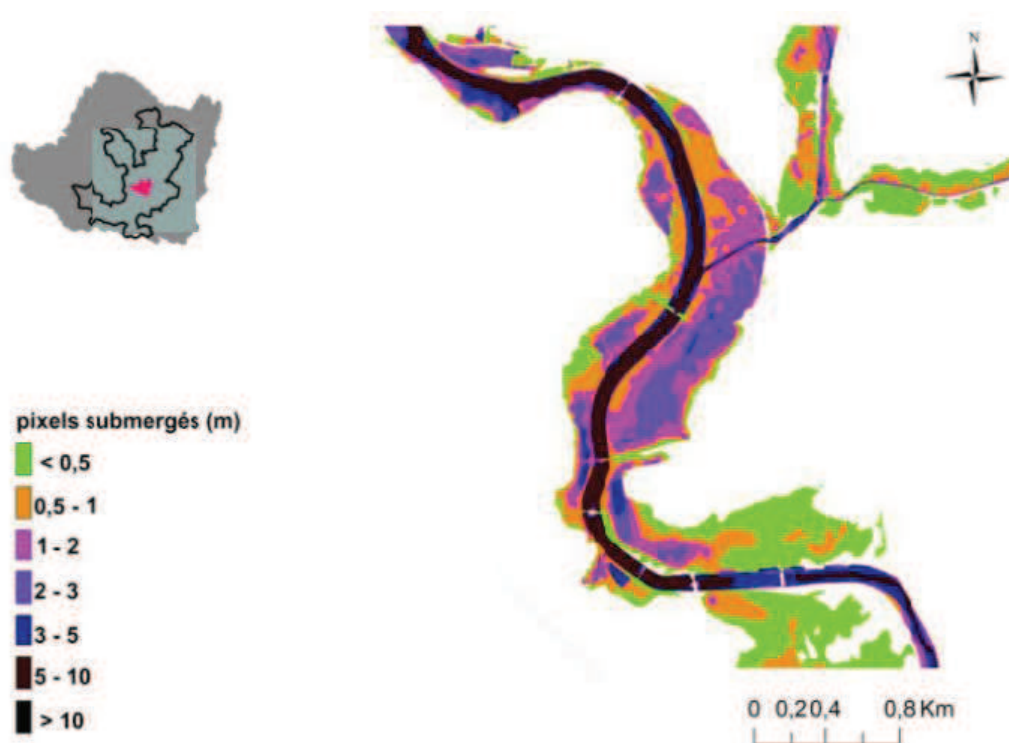


Figure 3.8 : Application de la méthode CARTINO: étendue des surfaces inondées et hauteurs d'eau associées (Le Bihan 2016a)

Trois jeux de données sont nécessaires à la mise en œuvre de la méthode CARTINO :

- Des quantiles de débit calculés par la méthode SHYREG d'IRSTEA (Chapitre 1): ils sont obtenus à partir des distributions de fréquence de longues chroniques de débit simulées avec un générateur de pluie horaire.
- Un Modèle Numérique de Terrain.
- Les zones inondables issues de EXZECO sous forme de vecteurs.

Les différentes étapes de l'obtention des emprises inondées par un cours d'eau sont illustrées en Figure 3.9 :

- Création d'un réseau hydrographique à partir des EAIP,
- Création de profils en travers le long du réseau hydrographique,
- Extraction des caractéristiques topographiques et hydrologiques au droit de chaque profil,
- Interpolation des côtes d'eau entre les différents profils et création d'une couche raster des hauteurs d'eau, en fonction des valeurs d'altitude fournie par le MNT.

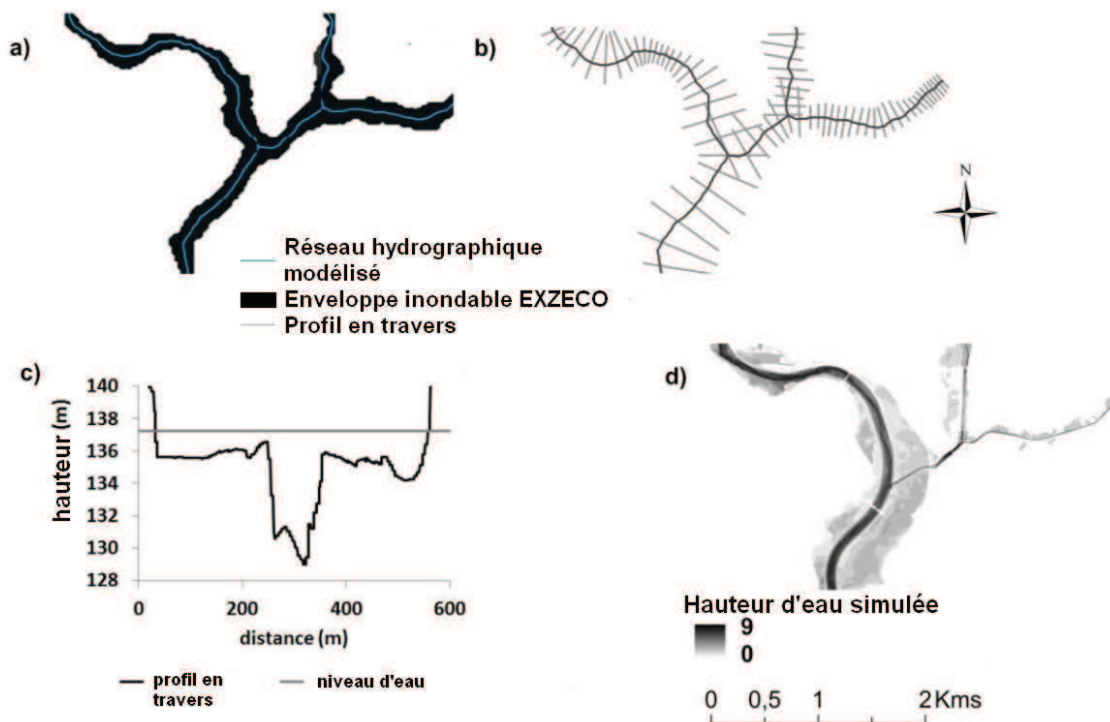


Figure 3.9 : Principe de fonctionnement de la méthode CARTINO, traduit de l'anglais à partir de Le Bihan et al. (2015)

Dans le cadre de cette thèse, nous avons pu bénéficier des enveloppes CARTINO calculées par l'IFSTTAR, notamment grâce à la thèse de Le Bihan (2016b). Ainsi, les zones inondables disponibles qui ont pu nous être fournies sont celles des bassins versants suivants :

- Les Gardons d'Alès dans le Gard (30),
- L'Argens dans le Var (83),
- La Frayère dans les Alpes-Maritimes (06),
- L'Argentièrre dans les Alpes-Maritimes (06),
- La Brague dans les Alpes-Maritimes (06).

Sur chacune de ces zones, des enveloppes sont établies pour 10 périodes de retour différentes (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500 et 1000 ans).

2.3. Comparaison EAIP / CARTINO

Les deux méthodes présentées dans la section précédente ont toutes deux l'avantage d'être applicables aux petits cours d'eau non jaugés. Cependant, les emprises inondables qu'elles fournissent présentent chacune des avantages et des limites qui vont être présentés dans cette section et sont repris dans le Tableau 3.1.

Utilisant EXZECO lorsqu'il n'y avait pas d'autres données, les EAIP présentent l'avantage majeur d'être disponibles pour l'ensemble du réseau hydrographique français. En revanche, leur principal inconvénient est de ne correspondre qu'à un seul niveau d'aléa, que l'on ne connaît pas, et dont la période de retour n'est pas nécessairement uniforme puisque qu'il s'agit d'une compilation d'enveloppes inondables issues de différentes sources.

Nous avons réalisé une comparaison où les deux informations étaient disponibles. On peut noter que la méthode CARTINO ne prend pas toujours en compte les affluents pour les cours d'eau dont elle cartographie l'emprise inondable. Ainsi la Figure 3.10 illustre ce problème au niveau du cours d'eau de la Brague dans les Alpes-Maritimes. On peut voir que si l'EAIP prend en considération la zone inondable de ses petits affluents, l'emprise CARTINO ne cartographie que celle de la Brague. Cette limite vient du niveau de précision du modèle hydraulique mis en œuvre dans Cartino. On voit ici que pour les zones amont, le modèle ne remonte pas assez haut.

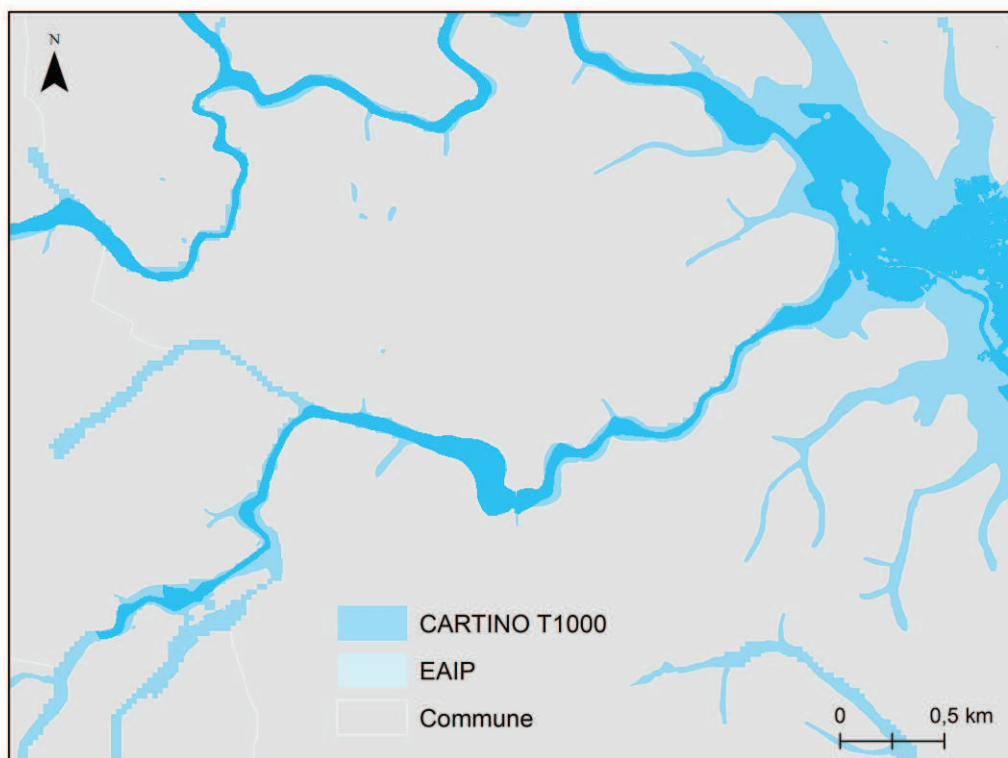


Figure 3.10: Comparaison de l'emprise CARTINO pour T1000 et de l'EAIP pour la Brague (06)

Il est cependant à noter que depuis que ces enveloppes nous ont été fournies, de nombreuses améliorations ont été apportées à la méthode CARTINO par l'IFSTTAR. De plus, une nouvelle application, plus exhaustive, est prévue dans le cadre du projet ANR dénommé PICS pour Prévision Immédiate intégrée des Impacts des Crues Soudaines (2018-2022).

Le principal avantage de la méthode CARTINO est de proposer plusieurs emprises inondables en fonction de la période de retour de la crue, à la différence des EAIP qui ne proposent que l'emprise inondable maximale. Ainsi, les emprises CARTINO sont disponibles pour les emprises des crues de période de retour 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500 et 1000 ans. Dans le cadre de la thèse, cette déclinaison d'emprises permettrait ainsi une évaluation du risque de dommages variable selon la qualification de la crue par AIGA qui quantifie également l'aléa en termes de période de retour.

Un des autres avantages des emprises CARTINO sur l'EAIP réside sur le fait que les ouvrages de protection contre les inondations tels que les digues ou barrages ont été considérés comme transparents lors de l'élaboration des EAIP (MEDDE 2012) alors que cela n'a pas été le cas avec CARTINO.

Le MNT avec lequel les emprises ont été déterminées n'est pas non plus le même entre les emprises CARTINO et les EAIP. En effet, ces dernières ont été en partie réalisées par la méthode EXZECO grâce à un MNT de résolution 25m alors que CARTINO s'appuie sur un MNT d'une résolution de 5m. La précision des emprises CARTINO est donc plus grande que celle des EAIP.

Tableau 3.1 : Comparaison des emprises CARTINO et des EAIP

	Emprises CARTINO	EAIP
MNT	5m	25m
Prise en compte des ouvrages de protection (digue, barrage)	Oui	non
Enveloppes en fonction de la période de retour	Oui	non
Couvrir toute la France	Non	oui

C. Esposito a réalisé une évaluation de la pertinence des EAIP pour plusieurs épisodes de crues majeures dont celle de septembre 2002 sur le bassin-versant du Gardon (Esposito 2003) et celle de Draguignan en juin 2010 (Esposito et al. 2014). Il ressort de ces études que les EAIP tendent à une surestimation de l'aléa dans la détermination de la zone inondable (Figure 3.11). Cette surestimation a été soulignée par ailleurs à plusieurs reprises suite à l'utilisation de la méthode: « *EXZECO cartographierait des zones à risques bien au-delà des plans de prévention du risque inondation approuvés* » (<http://www.senat.fr/questions/base/2012/qSEQ12>).

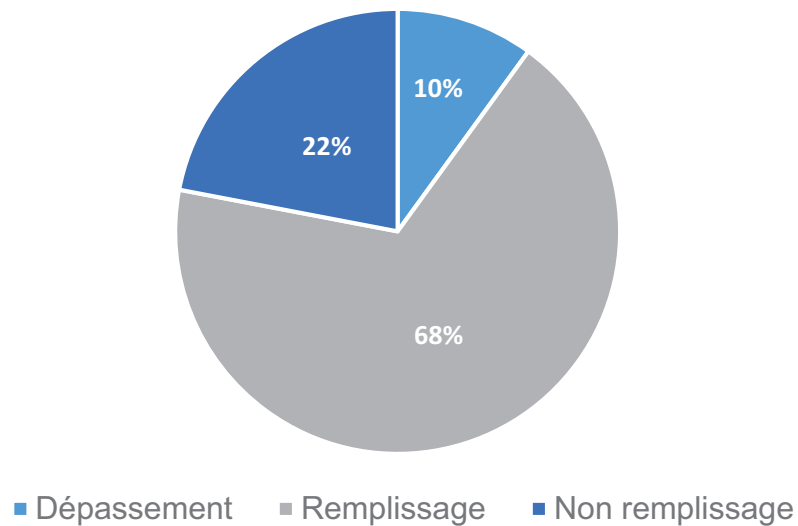


Figure 3.11 : Comparaison de la zone inondable EAIP avec la zone inondée lors des inondations de Juin 2010 dans le Var, source : Esposito et al. (2014)

En raison des différents points de comparaison analysés et illustrés dans cette section, nous avons opté pour l'utilisation des emprises issues de la méthode CARTINO dans le cadre de notre étude. Comme nous venons de le voir, il s'agit en effet de la seule méthode proposant des enveloppes inondables modulables en fonction de la sévérité de l'aléa, et applicable potentiellement à grande échelle.

3. Construction d'un indice de risque

L'objectif de cette section est d'appliquer un croisement des informations d'aléa et de vulnérabilité territoriale des enjeux pour caractériser le risque sous la forme d'un indice. Les informations de sévérité de l'aléa correspondent aux territoires du risque c'est-à-dire aux emprises inondables vues dans la section précédente. Les informations de vulnérabilité territoriale des enjeux exposés correspondent quant à eux aux scores de vulnérabilité territoriale calculés dans le Chapitre 2 et appliqués aux enjeux présents dans les emprises inondables. Ces différentes étapes vont être présentées et détaillées dans la section suivante.

3.1. Méthode proposée

Ainsi, la construction de cet indice de risque passe par une série de quatre étapes que l'on peut résumer par :

1. Le choix de l'unité spatiale pour le calcul de l'indice,
2. Le choix d'une emprise inondable en fonction de l'intensité de l'aléa considérée,
3. L'identification et le recensement des enjeux exposés à l'aléa crue par unité spatiale,
4. L'agrégation de la vulnérabilité des enjeux exposés par unité spatiale.

Choix de l'unité spatiale pour le calcul de l'indice

L'espace géographique est partitionné en différentes unités spatiales qui se distinguent les unes des autres selon leurs propriétés ou caractéristiques. Selon l'utilisation qu'il va en être faite, un indice de risque peut ainsi être développé pour différentes unités spatiales. La détermination de l'unité choisie est donc relative car elle dépend de l'échelle à laquelle le phénomène est observé et de l'objectif du destinataire de l'évaluation du risque de dommages.

L'indice que nous avons mis en place présente deux avantages majeurs à savoir celui de pouvoir être appliqué à plusieurs échelles spatiales, mais également celui de pouvoir être appliqué n'importe où, dans la mesure où les données d'entrée sont disponibles. Cette adaptabilité permet notamment d'adapter le produit fini à la demande du gestionnaire qui en est destinataire.

Dans le cadre de cette étude nous nous sommes intéressés à un territoire précis : l'Arc Méditerranéen, afin de pouvoir y caractériser le risque de dommages liés aux crues rapides qui en sont caractéristiques. Pour cela, nous avons choisi d'appliquer notre indice de risque à une échelle fine c'est-à-dire infra-départementale. Or, étant donné que les scores de vulnérabilité qui vont servir au calcul de cet indice ont été pondérés à partir du jugement de gestionnaires de risque communaux, l'unité spatiale correspondant à la commune semble particulièrement pertinente. Cependant, l'échelle infra communale présente également un intérêt majeur pour le calcul de l'indice dans le cadre de notre étude, notamment pour une application dynamique couplée avec la méthode AIGA, comme nous le verrons en fin de chapitre.

Choix de l'emprise inondable en fonction de l'intensité de l'aléa

La prise en compte de l'aléa dans le calcul de l'indice de risque passe par le choix de la zone soumise à l'aléa c'est-à-dire la zone inondable. Comme nous l'avons précisé précédemment, nous avons choisi d'utiliser les emprises inondables issues de la méthode CARTINO car elles présentent l'avantage majeur de pouvoir être déclinées pour plusieurs périodes de retour. Cependant, notre méthode d'évaluation du risque peut être appliquée pour n'importe quelle zone inondable.

Recensement et identification des enjeux exposés à l'aléa crue par unité spatiale

Dans le but de calculer un indice de risque à l'échelle d'un territoire, nous nous sommes appuyés sur la mesure de la vulnérabilité territoriale réalisée dans le Chapitre 2. Cette mesure s'appuie sur des scores de vulnérabilité obtenus par enjeu à partir d'entretiens auprès d'acteurs communaux de la gestion du risque en région PACA. Ainsi, à chaque type d'enjeu correspond un score de vulnérabilité territoriale. Afin d'appliquer ces scores de vulnérabilité à un territoire donné, il est donc nécessaire de les associer aux enjeux exposés de ce territoire.

Dans un premier temps nous avons donc recensé, dans chaque unité spatiale, les enjeux exposés aux crues c'est-à-dire présents dans la zone inondable considérée. Pour cela nous avons réalisé une jointure spatiale entre les données d'enjeux d'une part et l'enveloppe inondable d'autre part.

Une fois ces enjeux recensés, la question de leur identification se pose. Pour cela, nous avons été confrontés à une importante disparité au niveau de leur emprise territoriale. En effet, on peut différencier d'un côté les enjeux de type linéaire, c'est-à-dire les réseaux ferrés, routiers, électriques et d'eau et de l'autre les enjeux de type ponctuel c'est-à-dire les bâtiments et infrastructures.

Afin de prendre en compte ces deux types d'enjeux tout en respectant leur emprise sur le territoire nous avons donc différencié la comptabilisation des enjeux de type ponctuel par nombre d'unités dans la zone inondable et la mesure des réseaux en mètres linéaires. La quantification de ces enjeux est donc déterminée en fonction de leur emprise sur le terrain.

Une fois les enjeux exposés comptabilisés, ils sont agrégés par unité spatiale. Afin que cette agrégation soit représentative du poids des différents enjeux sur le territoire, il sera nécessaire de pondérer cette agrégation en fonction de la vulnérabilité territoriale des enjeux exposés.

Agrégation de la vulnérabilité des enjeux exposés par unité spatiale

La prochaine étape de la méthode va donc être d'agréger les scores de vulnérabilité des enjeux exposés par unité spatiale afin d'obtenir un score global de vulnérabilité territorial selon l'unité spatiale considérée. Pour cela, deux approches peuvent être distinguées :

- L'approche systémique qui considère que la vulnérabilité d'un territoire ne correspond pas à la somme de la vulnérabilité des enjeux qui la composent et que c'est la vulnérabilité de l'ensemble du système qui doit être considérée (Combe 2007),
- L'approche analytique qui considère que la vulnérabilité globale est la somme de la vulnérabilité de chaque enjeu (Chardon and Thouret 1994, Dauphiné and Provitolo 2007).

Notre démarche s'inscrit à mi-chemin de ces deux approches. C'est pourquoi nous avons adopté ce que Metzger and D'Ercole (2008) qualifient « d'approche par les enjeux ». Afin d'obtenir une évaluation de la vulnérabilité du territoire, nous faisons donc le choix de sommer les scores de vulnérabilité des enjeux exposés au risque inondation c'est-à-dire situés dans la zone inondable.

Ainsi la quantification de la vulnérabilité territoriale des enjeux de type ponctuel se fait en fonction de leur nombre sur le territoire, tel que :

$$V_p = \sum_{i=1}^n P_i \cdot Sc_i$$

où :

V_p est la vulnérabilité des enjeux de type ponctuel,

P_i représente le nombre d'enjeux de type infrastructure,

Sc_i représente le score de vulnérabilité associé aux enjeux de type ponctuel.

Les enjeux ponctuels sont donc sommés après pondération avec le score de vulnérabilité obtenu, tandis que la quantification des enjeux linéaires est considérée en fonction de la longueur de leur réseau tel que :

$$V_l = \sum_{i=1}^n L_i \cdot Sc_i$$

où :

V_l est la vulnérabilité des enjeux de type linéaire,

L_i représente la longueur des enjeux de type linéaire (en mètre),

Sc_i représente le score de vulnérabilité associé aux enjeux de type linéaire.

Ainsi, l'évaluation de l'ensemble de la vulnérabilité territoriale d'une zone donnée passe par l'addition des vulnérabilités de type ponctuel noté V_p et linéaire noté V_l . Une fois ces deux

valeurs sommées, nous obtenons une valeur de vulnérabilité territoriale propre à l'unité spatiale considérée et à l'aléa auquel correspond la zone inondable utilisée. Cela permet notamment une réévaluation régulière de cette vulnérabilité selon l'évolution de l'occupation du sol mais également de réaliser des évaluations de la vulnérabilité passée dans la mesure où les données nécessaires sont disponibles.

Courbes de risque de dommages IR(T)

Comme nous venons de le voir, il est possible pour une unité spatiale donnée d'évaluer le risque de dommages potentiels pour chaque enveloppe inondable disponible. Dans notre cas, la méthode CARTINO nous permet de disposer d'une estimation de la zone inondable pour 10 périodes de retour, comprises entre 2 et 1000 ans.

Ainsi, il devient possible, par interpolation (log-linéaire) de l'indice IR calculé pour les périodes de retour des emprises CARTINO, de connaître l'indice de risque IR pour toute période de retour T comme cela apparaît dans la Figure 3.12.

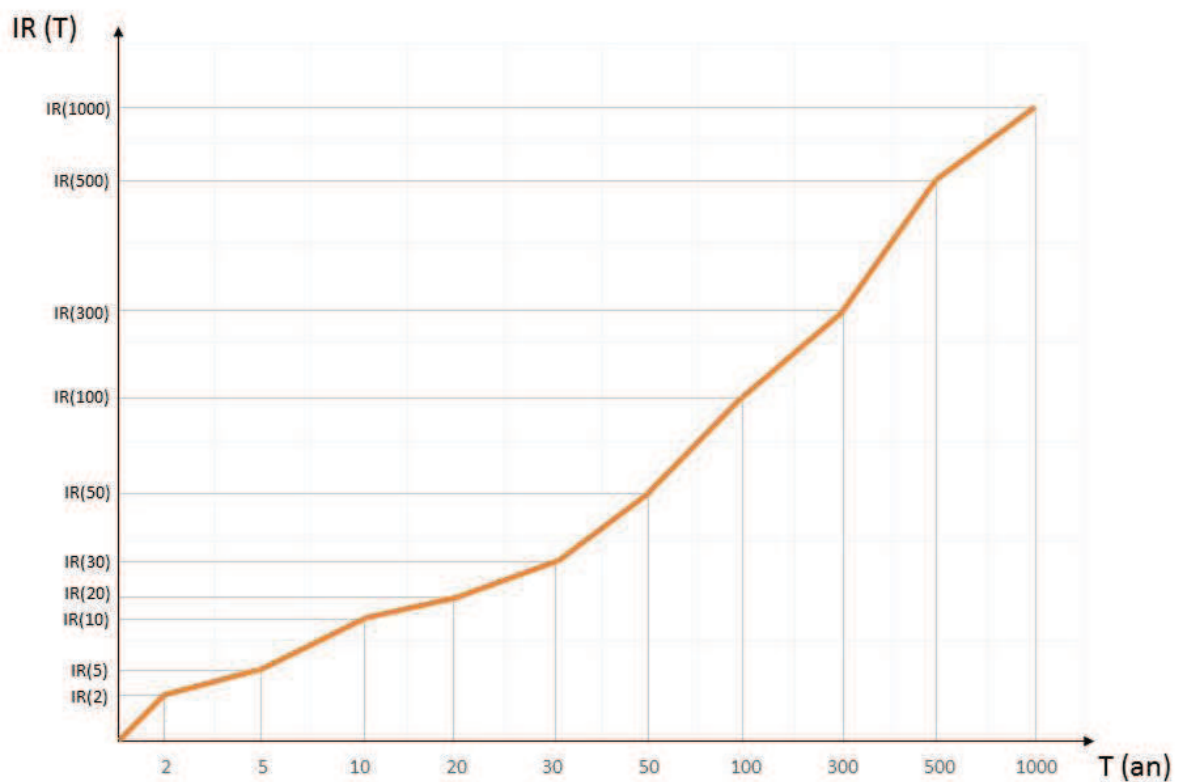


Figure 3.12 : Evaluation de l'indice de risque IR en fonction de la période de retour de la crue (T), pour une unité spatiale donnée

3.2. Application de l'indice de risque à l'échelle communale

Nous montrons ici une première application de notre indice de risque à l'échelle communale. C'est-à-dire que l'unité spatiale choisie pour la réalisation des étapes décrites au 1.2 est la commune. Le choix des communes en question est détaillé dans le Chapitre 5, il s'agit des communes où les emprises inondables issues de la méthode CARTINO nous ont été fournies par l'IFSTTAR, c'est-à-dire :

- Figure 3.13, les 69 communes où sont disponibles les emprises inondables correspondant au bassin des Gardons, dans le département du Gard,
- Figure 3.14, les 28 communes où sont disponibles les emprises inondables correspondant au bassin de l'Argens, dans le département du Var,
- Figure 3.15, les 12 communes où sont disponibles les emprises inondables correspondant aux bassins de l'Argentière, de la Frayère et de la Brague, dans le département des Alpes Maritimes.

Pour toutes ces communes, l'indice de risque a été appliqué pour chacune des emprises inondables fournies par CARTINO allant d'une période de retour 2 ans à une période de retour 30 ans. L'application de l'indice de risque pour les autres périodes de retour de la crue (50 à 1000 ans) est disponible en Annexe D. Chaque carte présente donc le risque de dommages dans une commune, calculé à partir d'une emprise inondable de période de retour notée TR. Cette représentation du risque permet de voir l'évolution du risque au niveau communal pour une intensité croissante de l'aléa.

Il peut être souligné que certaines communes présentent un niveau de risque faible malgré une période de retour de la crue élevée. Cela illustre notamment l'intérêt de notre approche, en montrant que le risque de dommages ne dépend pas uniquement de l'aléa mais bien des enjeux exposés à cet aléa et de leur vulnérabilité.

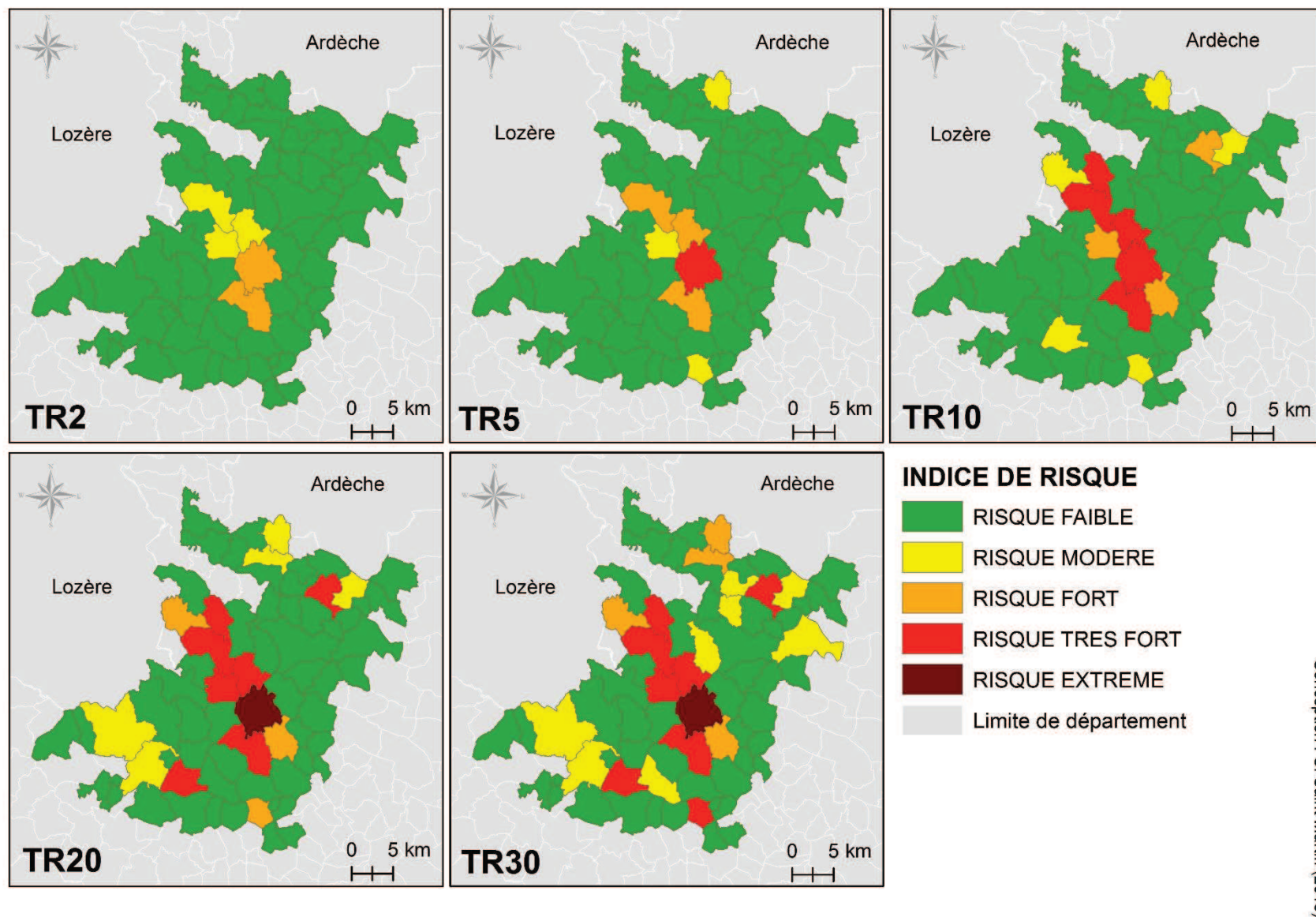
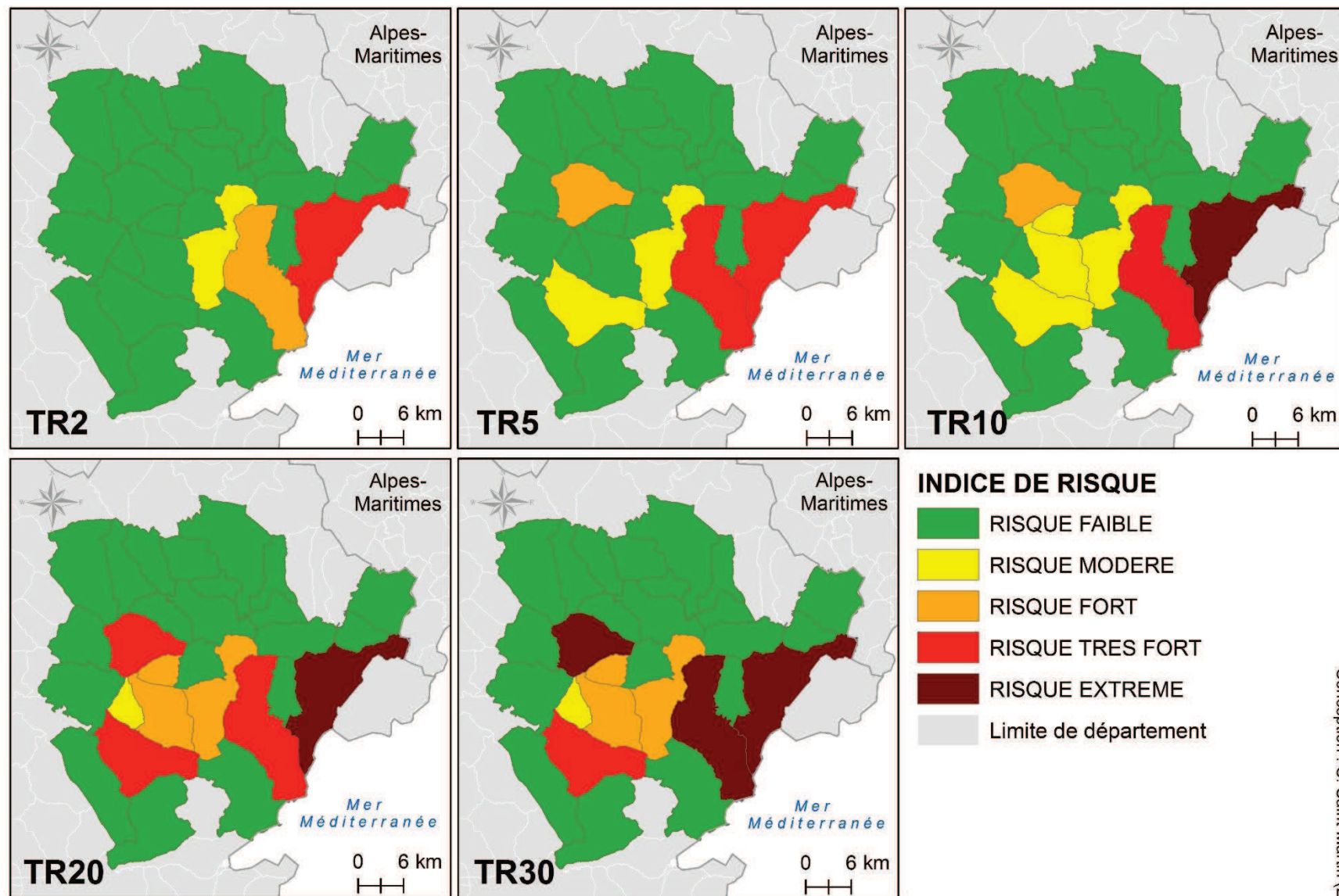
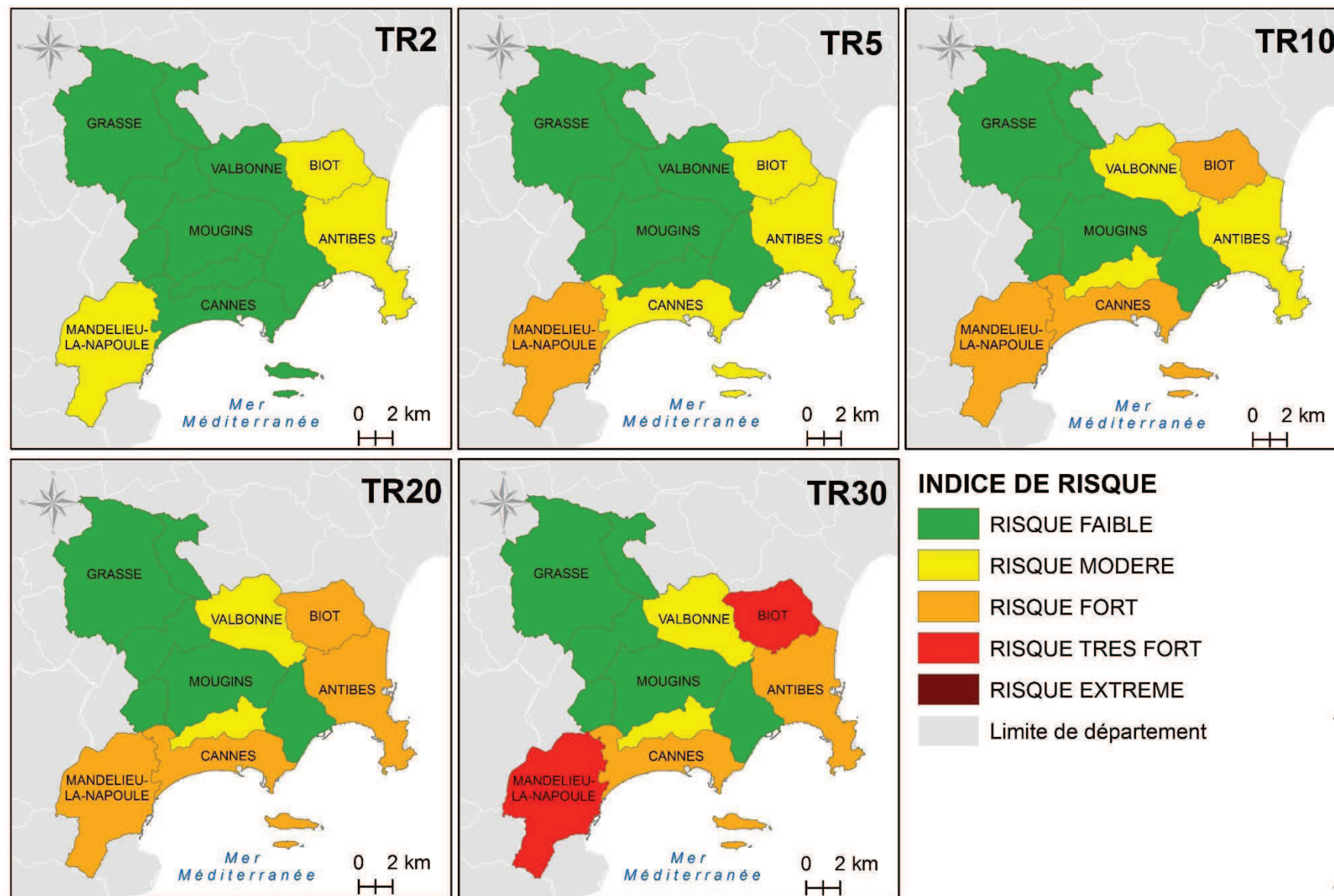


Figure 3.13 : Application de l'indice de risque par commune pour différentes emprises inondables CARTINO dans le Gard



Conception : C. Saint-Martin (2018)

Figure 3.14: Application de l'indice de risque par commune pour différentes emprises inondables CARTINO dans le VAR



Conception : C. Saint-Martin (2018)

Figure 3.15: Application de l'indice de risque par commune pour différentes emprises inondables CARTINO dans les Alpes-Maritimes

3.3. Application de l'indice de risque à l'échelle de la méthode AIGA

Dans la section précédente, notre indice de risque a été appliqué à l'unité spatiale correspondant à la commune. Or, comme nous l'avons vu en introduction, notre objectif est de coupler cet indice à la qualification de l'aléa fournie aux communes en temps réel par le service Vigicrues Flash à partir de la méthode AIGA. Il nous faut donc évaluer le risque de dommages à la même unité spatiale que celle à laquelle AIGA fournit ses qualifications de l'aléa. Comme nous allons le voir, il s'agit d'une application infra-communale qui correspond à la surface drainée de chaque tronçon de cours d'eau.

L'échelle des tronçons « AIGA »

Dans la méthode AIGA, un tronçon de cours d'eau correspond à la section située entre deux points de calculs sur le réseau hydrographique. L'aléa affecté par AIGA à l'ensemble d'un tronçon n'est en réalité calculé qu'en un seul point, à l'aval. En effet, la méthode fait l'hypothèse que dans le temps, l'aléa est supposé uniforme sur tout le tronçon. Cette hypothèse est acceptable dans la mesure où ces différents points de calculs ont été choisis de la façon suivante, illustrée dans la Figure 3.16:

- En entrée et sortie d'agglomération (Figure 3.16-1),
- Au niveau des stations hydrométriques, à des fins de validation (Figure 3.16-2),
- En amont et en aval de confluence (Figure 3.16-3),
- Entre les exutoires espacés de plus de 4km (Figure 3.16-4).

Ainsi, un tronçon AIGA ne peut être d'une longueur supérieure à 4km, et ne contient pas de confluence en son sein. Les qualifications de l'aléa crue fournies par AIGA sont donc disponibles sur des tronçons de taille réduite ce qui permet d'obtenir une information à l'échelle infra-communale.

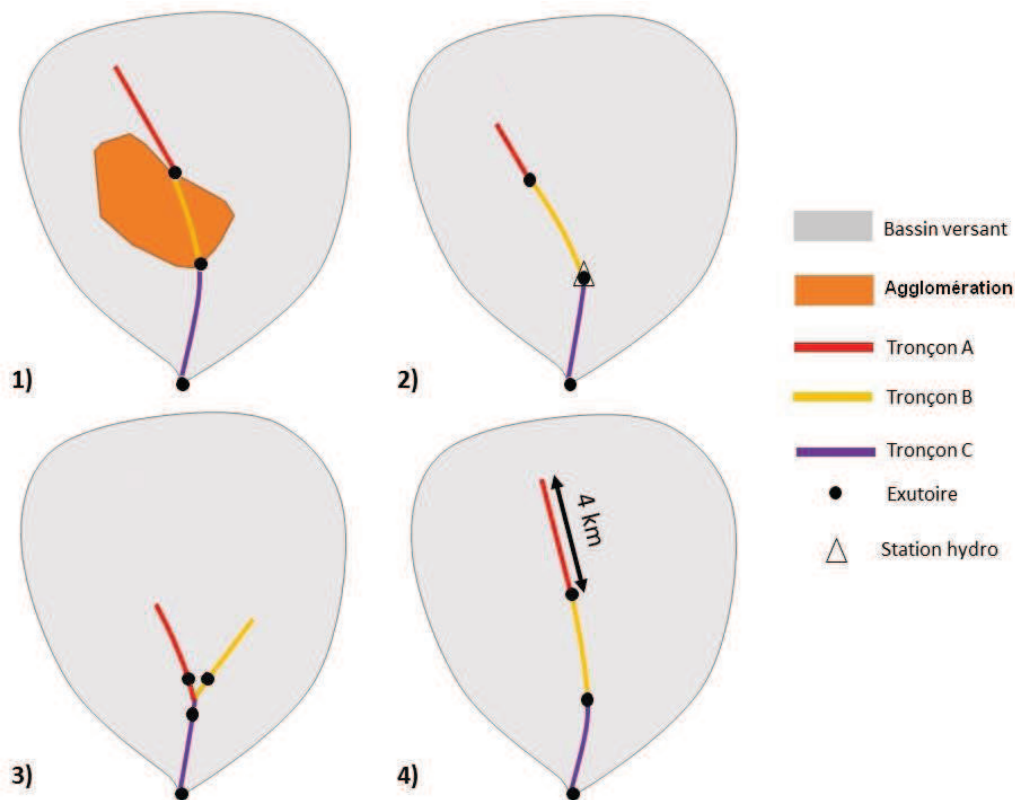


Figure 3.16 : Illustration du choix de positionnement des points de calcul pour la méthode AIGA

Définition de l'unité spatiale « tronçon AIGA / commune »

Dans la section précédente, le risque de dommages a été évalué à l'échelle de la commune pour une emprise inondable de période de retour uniforme. Cela revient donc à évaluer le risque de dommages dans le cas où l'ensemble des cours d'eau d'une commune connaîtraient une crue de période de retour identique. Cette application peut être intéressante pour avoir une indication de l'exposition globale du territoire.

Cependant lors de la survenue de précipitations intenses, la réaction des tronçons de cours d'eau situés dans une même commune va varier selon les caractéristiques de leur surface drainée (voir Chapitre 1). Lors d'un même évènement, deux tronçons d'une même commune peuvent donc présenter des crues de périodes de retour différentes, notamment aux confluences. Il est donc nécessaire de pouvoir caractériser le risque propre à chaque tronçon dans une commune.

Or, estimer le risque à l'échelle communale lors d'une inondation peut s'avérer particulièrement utile pour les gestionnaires de crise. Notre méthode doit donc nous permettre d'évaluer le risque de dommages à l'échelle d'une commune tout en prenant en compte les différents niveaux de risque de chaque tronçon.

Mais les limites d'une commune ne correspondent pas forcément aux limites de la surface drainée par les tronçons AIGA qui se trouvent à l'intérieur. Ainsi un tronçon de cours d'eau

peut être partagé entre deux communes tout comme sa zone inondable. Dans ce cas de figure et afin d'évaluer véritablement le risque propre à chaque commune, nous avons donc morcelé les zones inondables de chaque tronçon par commune. Nous obtenons alors pour un même tronçon une estimation différente du risque en fonction de son emprise inondable dans chaque commune.

Le risque de dommages pour une commune à un instant t peut ainsi être estimé en faisant la somme des valeurs de risque obtenues pour chaque section de tronçon situé dans cette commune selon la période de retour de la crue sur le tronçon à cet instant t . Une illustration est donnée à travers deux exemples en Figure 3.17 et Figure 3.18 où nous avons représenté un cours d'eau qui s'écoule de droite à gauche, et deux tronçons AIGA avec leur surface drainée respective. Dans la première figure, le tronçon 2 est situé sur deux communes A et B. Le morcellement représenté permet ainsi de distinguer le calcul du risque de dommages pour les différentes périodes de la crue $IR(T)$ de sa section située en commune A ($IR_troncon2_communeA(T)$), de celle située en commune B ($IR_troncon2_communeB(T)$).

Dans la deuxième figure, le tronçon 1 ainsi qu'une partie du tronçon 2 servent de démarcation entre deux communes A au nord et B au sud. Un morcellement permet ainsi de distinguer le risque de dommages pour les différentes périodes de la crue en rive droite située en commune A et B ($IR_troncon1_communeA(T)$ et $IR_troncon2_communeA(T)$) et en rive gauche située en commune B ($IR_troncon1_communeB(T)$ et $IR_troncon2_communeB(T)$).

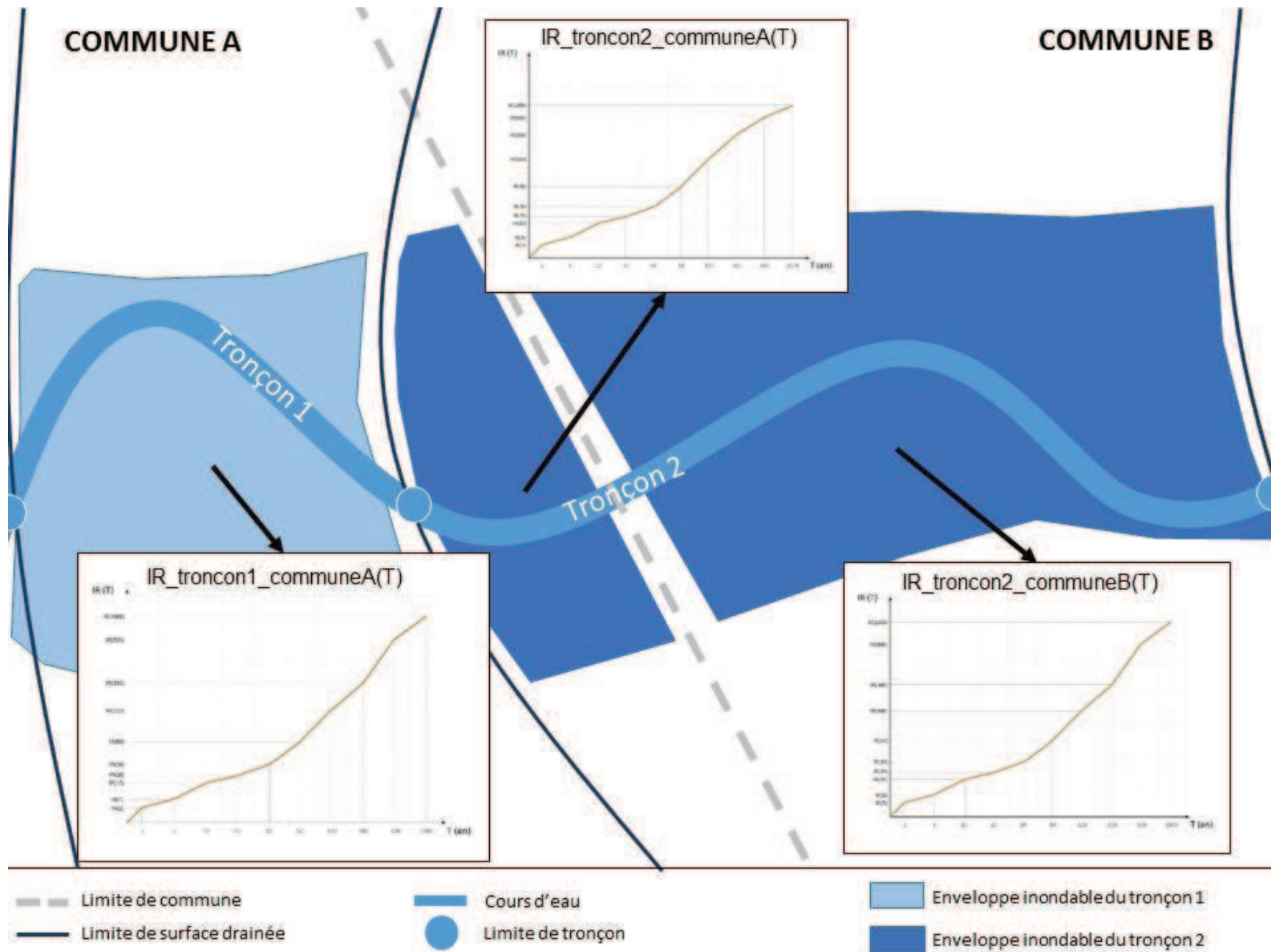


Figure 3.17 : Illustration du morcellement de la zone inondable de chaque tronçon par commune pour l'estimation du risque de dommages

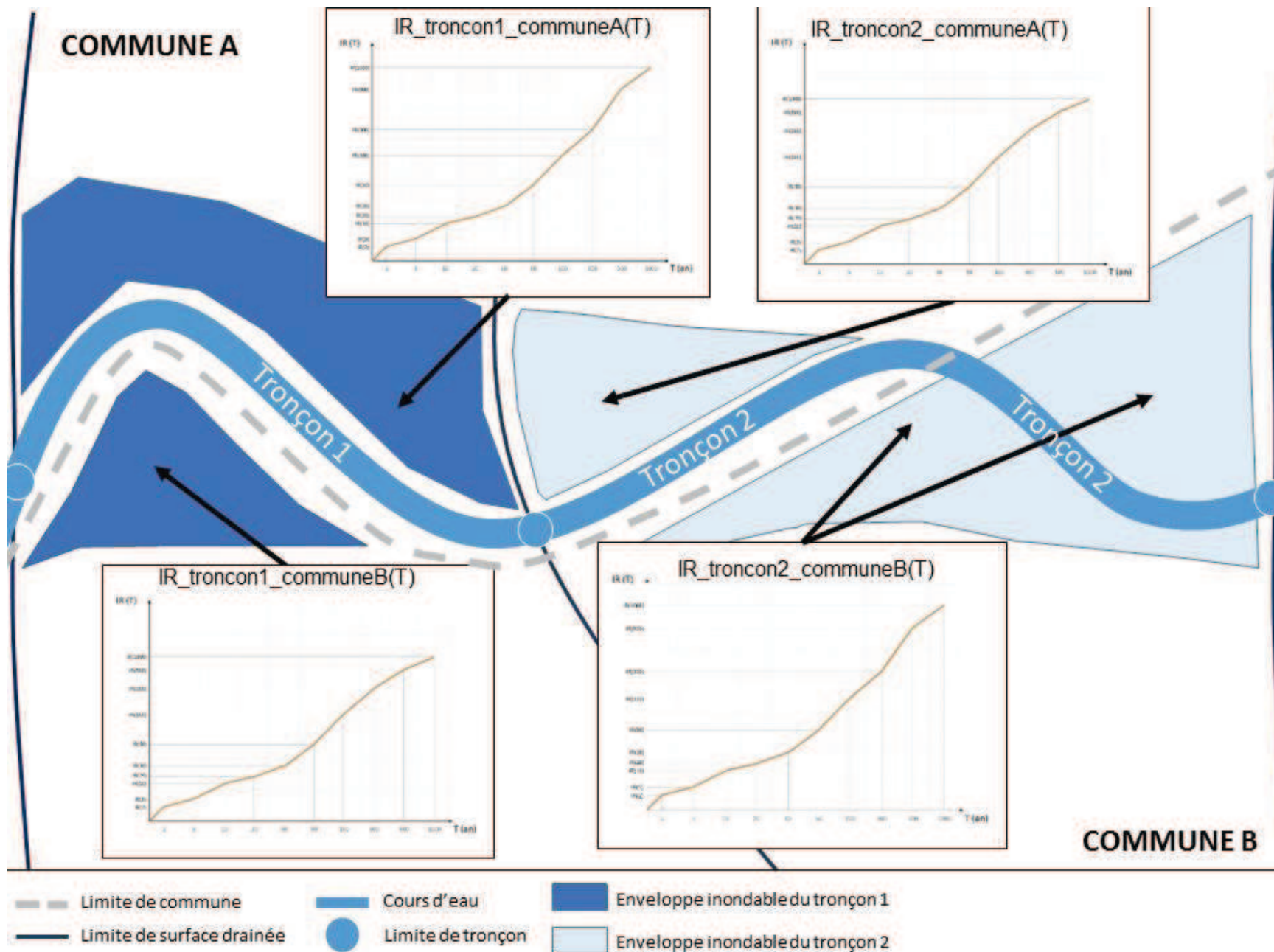


Figure 3.18 : Illustration du morcellement de la zone inondable de chaque tronçon par commune pour l'estimation du risque de dommages. Cas d'un morcellement rive gauche/rive droite.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons montré que le concept de risque est particulièrement complexe car sa caractérisation passe par une multitude de paramètres tels que l'exposition et la vulnérabilité ou encore la résilience. Afin d'évaluer de manière précise et spécifique le risque sur un territoire, il serait nécessaire de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres. Or, une telle approche nécessite d'avoir un grand nombre de données à disposition pour chaque territoire dont on souhaite évaluer le risque. Ainsi notre objectif n'est pas de mesurer de manière précise le risque sur un territoire spécifique mais de proposer une méthode permettant une estimation du risque de dommages à partir de 2 paramètres : l'exposition des enjeux et leur vulnérabilité territoriale.

Nous nous sommes appuyés sur les emprises inondables de la méthode CARTINO afin d'estimer le risque de dommages par tronçon AIGA au sein d'une commune et pour différentes périodes de retour de la crue. Cela nous a permis d'obtenir pour chaque tronçon d'une commune une valeur de risque correspondant aux différents niveaux d'intensité de l'aléa. Ainsi pour toute période de retour de la crue d'un tronçon, nous connaissons le risque de dommages correspondant.

Grâce à un croisement avec les qualifications hydrologiques de la méthode AIGA disponibles par tronçon, une utilisation « dynamique » de cette évaluation du risque pourrait ainsi être envisagée. Cela reviendrait à associer dans le temps, à chaque niveau d'aléa annoncé par AIGA, un risque de dommages potentiels, et cela à l'échelle infra-communale.

Cependant, avant de proposer une application opérationnelle, une évaluation de notre indice de risque est nécessaire. Mais pour mener à bien cette évaluation, des données de validation sont nécessaires. Le prochain chapitre va donc rechercher les données de dommages observés, disponibles à différentes échelles, afin de pouvoir évaluer notre méthode et d'identifier ses éventuelles limites dans le dernier chapitre.

Chapitre 4 : Données de dommages

SOMMAIRE

Introduction du chapitre	135
1. Quelles données de dommages ?.....	137
1.1. Terminologie et définitions	138
1.2. Type de dommages	139
2. Les bases de données existantes sur les dommages liés aux catastrophes	141
2.1. Les bases de données multi-aléa	141
La base de données EM-DAT	141
La base de données NatCat	142
La base de données Sigma	142
2.2. Les bases de données spécialisées.....	144
Dartmouth Flood Observatory (DFO)	144
HANZE-Events	144
Societal impact database	145
2.3. Les bases de données françaises.....	146
La base de données GASPAR.....	146
La Base de Données Historiques sur les Inondations	148
Les données des assurances	149
Les données collectées par les services de gestion de crise : l'exemple des SDIS..	149
2.4. Limites et besoins en termes de données de dommages.....	150
3. La base de données DamaGIS	152
3.1. Présentation de la base de données	152
3.2. Sources d'information	153
3.3. Structure de la base de données	157
Classe d'entités EVENEMENT	158
Classe d'entités BASSIN VERSANT	158
Classe d'entités DOMMAGE	159
3.4. Typologie des enjeux endommagés.....	160
3.5. Evaluation de la sévérité des dommages matériels	163
3.6. Limites et avantages présentés par l'utilisation de DamaGIS.....	167
Conclusion du chapitre	169

Chapitre 4 : Données de dommages

« Alors l'averse déchaîna les fraîcheurs glaciales de son déluge comme la volée brutale d'une poignée de cailloux, et la forêt répondit de tout le rebondissement métallique de ses feuilles. Les rocs nus brillèrent comme de dangereuses cuirasses, la gloire liquide et jaunâtre d'un brouillard humide couronna un instant la tête de chaque arbre de la forêt - un instant une bande jaune et lumineuse, merveilleusement translucide, brilla sur l'horizon où chaque arbre découpa en une seconde ses moindres branches, fit luire les pierres brillantes d'eau du parapet, la blonde chevelure d'Albert trempée de pluie, le brouillard liquide et froid qui roulait sur la cime des arbres d'un rayon doré, glacial et presque inhumain - puis s'éteignit, et la nuit tomba comme un coup de hache. »

Julien Gracq, Au château d'Argol (1938)

Qu'est-ce qu'un dommage ?

Quelles sont les données de dommage existantes disponibles, leurs avantages et leurs limites ?

Quelles données de dommages utiliser pour l'évaluation de l'indice de risque ?

Introduction du chapitre

De récentes études ont estimé que l'impact socio-économique des inondations va plus que tripler d'ici la fin du XXI^e siècle (Alfieri et al. 2015, Munich RE 2017, Pigeon 2002). En effet, on peut s'attendre à une forte augmentation à la fois du nombre, mais également de la sévérité des catastrophes à venir. Face à cette augmentation, les lacunes en matière de collecte de dommages économiques doivent être soulignées.

Il est estimé que seuls 36% des données portant sur les dommages économiques causés par les catastrophes naturelles dans le monde seraient consolidées par des données fiables sur la période 1995-2015 (Wallemacq et al. 2015). Pourtant, ces données sont un support essentiel à la connaissance de ces catastrophes. Elles permettent de mieux comprendre les phénomènes naturels dangereux et de développer ainsi des outils de protection, de prévention et de prévision mieux adaptés et plus efficaces. Elles sont également un support indispensable à la conception et à l'amélioration de modèles car elles permettent leur calibration et leur validation à partir de données observées.

Ce chapitre s'intéressera donc de manière détaillée à ces données en se focalisant sur les dommages liés aux crues et plus particulièrement aux crues rapides, collectés dans le Sud de la France. Ainsi, après avoir défini la notion de dommage, un point sera fait sur les bases de données existantes qui collectent les données de dommages liés aux inondations. Puis, une attention plus particulière sera apportée à la base de données DamaGIS que nous avons développée dans le cadre de la thèse. Une analyse de son contenu sera proposée et détaillée.

1. Quelles données de dommages ?

Le 18 mars 2015 a eu lieu la troisième Conférence mondiale de l'ONU (Organisation des Nations Unies) à Sendai, au Japon (UNISDR 2015). Lors de cette conférence, un nouveau cadre d'action 2015 – 2030 a été adopté pour la réduction des risques de catastrophe dans le monde. Ce cadre fait suite à celui de Hyōgo, adopté en 2005, qui était axé sur le développement de la résilience des collectivités face aux catastrophes. Le cadre de Sendai a défini quatre priorités d'action à savoir :

- **Priorité 1** : comprendre les risques de catastrophe,
- **Priorité 2** : renforcer la gouvernance des risques de catastrophe pour mieux les gérer,
- **Priorité 3** : investir dans la réduction des risques de catastrophe aux fins de la résilience,
- **Priorité 4** : renforcer l'état de préparation aux catastrophes pour intervenir de manière efficace et pour « mieux reconstruire » durant la phase de relèvement, de remise en état et de reconstruction.

Afin de répondre à ces priorités, plusieurs objectifs ont été dégagés pour chacune d'elles. L'un d'entre eux est notamment « *d'améliorer la mise au point et la diffusion de méthodes et d'outils scientifiques permettant d'enregistrer les données relatives aux pertes résultant des catastrophes [...] et de les faire connaître* » (UNISDR 2015). Ainsi, la collecte et la diffusion de données de pertes et de dommages liés aux catastrophes naturelles ont été identifiées comme une priorité dans la lutte contre les catastrophes au niveau mondial.

Dans le but de développer leur collecte et leur diffusion, il semble dans un premier temps nécessaire de définir ces notions de pertes et de dommages. Effectivement, les « *pertes résultant des catastrophes* » (UNISDR 2015) peuvent renvoyer à des objets multiples et variés mais également prendre diverses dénominations selon les auteurs. Dans la prochaine section, ces diverses dénominations seront présentées et comparées afin de choisir la plus adaptée à notre étude.

1.1. Terminologie et définitions

Dans la littérature, les conséquences négatives liées à la survenue d'une catastrophe revêtent des dénominations multiples. On retrouve fréquemment et de manière parfois interchangeable les notions de « perte », « dommage », « dégât » ou encore « d'impact » et de « sinistre ». L'étymologie devrait nous permettre de comprendre ce à quoi elles renvoient mais également de savoir laquelle utiliser dans le cadre de la thèse.

Le terme de « **perte** » renvoie à l'idée de définitif et d'irréparable. Il est issu du latin *perdere* signifiant « détruire, ruiner, anéantir ». Voilà pourquoi il peut se retrouver dans les expressions telles que « pertes humaines », « perte d'exploitation » ou encore « pertes économiques », qui sont toutes trois de potentielles conséquences irréparables d'une catastrophe. Le terme « perte » est donc généralement réservé à la dénomination des victimes humaines ou au domaine économique. La distinction entre les termes de « dommage » et de « dégât » est nettement plus complexe.

Le mot « **dommage** » est issu de l'ancien Français « damage », qui a donné la traduction anglaise du même mot. Cependant si l'on remonte aux origines latines du mot dommage, on trouve le terme « *damnum* » qui peut être traduit par « ce qui résulte d'une action qui nuit » c'est-à-dire le détriment, tort ou préjudice. Son substantif endommagement est également utilisé en géographie des risques afin de désigner les conséquences préjudiciables d'une inondation (Thouret and D'Ercole 1996). Cependant, cette notion d'endommagement est plutôt utilisée pour désigner les conséquences matérielles d'une inondation (modèle d'endommagement de Wöhler).

Les origines du mot « **dégât** » remontent quant à elles au début du XIII^e siècle avec « degast » qui est le déverbal de l'ancien Français « degaster » qui signifiait alors « ravager ». A la différence de « dommage », derrière la notion de dégât se trouve une cause violente. En effet, « degaster » est une adaptation du verbe latin « *devastare* » signifiant ravager, piller ou encore détruire et faire périr. La notion de dégât est plus ponctuelle et moins englobante que celle de dommage. Deux autres notions peuvent également être utilisées bien que plus rarement au sein de la littérature. Il s'agit des notions de sinistre et impact.

La notion d'**impact** est issue du latin « *impactum* » qui est le supin du verbe « *impegere* » signifiant « pousser violemment » ou « jeter en bousculant ». Ce terme est donc rattaché à une notion de violence et de brutalité. En géographie des risques, le terme d'impact sera donc réservé aux conséquences majeures et brutales d'une catastrophe. Il est utilisé de manière générale au singulier. On le retrouve en particulier dans le cas des catastrophes environnementales : étude d'impact, modèle d'impact etc. (Hubert and Ledoux 1999).

Le terme de **sinistre** est quant à lui spécifique au milieu des assurances. Il désigne la perte liée à un objet assuré. Etymologiquement cependant, le mot sinistre vient du latin « *sinister* » signifiant gauche ou qui est à gauche, ce qui se rapporte à l'idée de malheur ou de mauvais présage. L'adjectif sinistre a notamment repris cette signification ; il est utilisé pour désigner quelque chose de sombre et de funeste.

Au vu de ces différentes définitions, nous avons fait le choix dans la suite du manuscrit d'utiliser la notion de « dommage » pour qualifier les conséquences négatives des inondations. Ce

terme est moins ponctuel que celui de « dégât » et moins définitif que celui de « perte ». Comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, il permet de qualifier la conséquence négative d'une inondation sur un enjeu de manière assez globale, sans uniquement se focaliser sur les conséquences matérielles.

1.2. Type de dommages

La pluralité de vocabulaire employée pour parler des conséquences négatives d'une catastrophe peut être rattachée à la pluralité à laquelle celles-ci renvoient. De multiples domaines peuvent être touchés par la survenue d'un événement catastrophique : économique, humain, psychologique, environnemental, etc. Dans la littérature, il est communément admis qu'un dommage peut être classifié en quatre catégories (Merz et al. 2010, Hubert and Ledoux 1999, Parker 2000, Torterotot 1993) qui sont :

- Direct tangible,
- Indirect tangible,
- Direct intangible,
- Indirect intangible.

Ces catégories sont articulées autour de deux facteurs qui sont :

- Selon que le dommage est la conséquence directe ou indirecte de l'inondation,
- Selon que le dommage est objectivement quantifiable (tangible) ou non (intangible) (Smith and Ward 1998, Parker, Green and Thompson 1987).

La Figure 4.1 reprend cette classification des dommages selon ces deux facteurs. En nous appuyant sur celle-ci, il est possible de les illustrer en prenant l'exemple d'une exploitation agricole. Lors d'une inondation, le bâtiment de stockage de cette exploitation agricole est inondé, on peut donc considérer que :

- Les dommages directs et tangibles pourraient correspondre à l'altération ou la destruction du stock contenu dans le bâtiment ainsi que du local en lui-même,
- Les dommages indirects et tangibles pourraient correspondre aux coûts de remise en état, de chômage technique des employés et à la perte d'exploitation induite,
- Les dommages directs et intangibles pourraient correspondre au décès d'un employé se trouvant dans le bâtiment au moment de l'inondation,
- Les dommages indirects et intangibles pourraient correspondre au choc psychologique pour les propriétaires de l'exploitation.

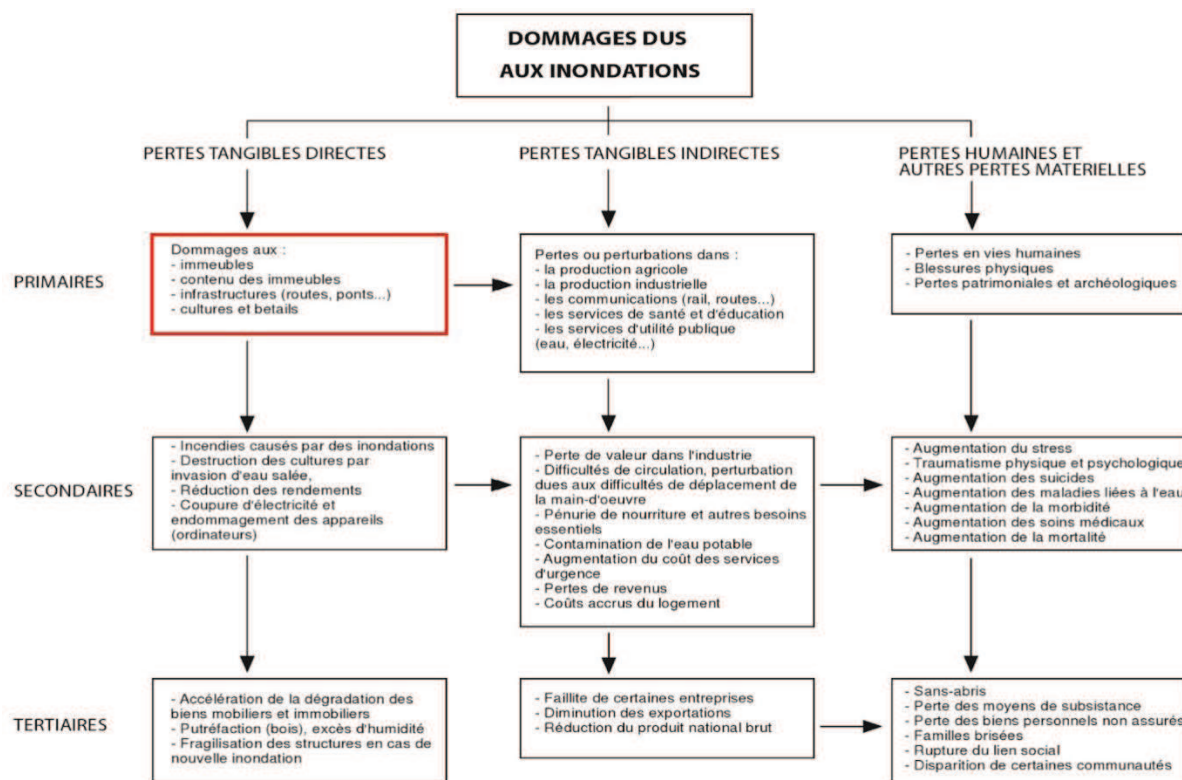


Figure 4.1 : Classification des types de dommage dus aux inondations, en rouge le type de dommages traités dans le cadre de la thèse – (Vinet 2007) à partir de (Parker 2000)

En première approche, dans le cadre de cette thèse, nous ne nous intéresserons qu'aux dommages directs et tangibles. En effet, comme nous le verrons dans la partie suivante, les données sur les dommages sont peu nombreuses, rarement exhaustives et difficiles à obtenir. Or, le développement d'une méthode ayant pour but de qualifier l'ensemble des risques de dommages liés aux crues nécessite de posséder assez de données pour la calibration et la validation de cette méthode. Une prise en compte plus complète de l'ensemble des dommages pourrait sans doute faire partie des perspectives intéressantes de cette thèse.

2. Les bases de données existantes sur les dommages liés aux catastrophes

Depuis plusieurs années, de nombreux chercheurs soulignent le besoin de collecter les données de dommage liées aux catastrophes de manière systématique, mais également d'augmenter la précision et la qualité (Bubeck et al. 2011, Dilley 2005, Elmer 2012, Gerl et al. 2016, Mileti 1999, NRC 1999). Or il existe déjà un grand nombre de bases de données sur les dommages liés aux catastrophes et plus particulièrement aux inondations et ce à différentes échelles spatiales : internationale, régionale et communale.

Cependant, la forme de ces bases de données ainsi que leurs contenus et résolution spatiale sont très hétérogènes étant donné l'absence de standards et de modèles reconnus (Dilley 2005). Dans la prochaine section, plusieurs bases de données vont être présentées en fonction de leur intérêt pour une utilisation potentielle dans le travail de thèse à savoir l'évaluation de l'indice de risque de dommages liés aux crues rapides dans le sud de la France.

2.1. Les bases de données multi-aléa

Parmi les bases de données internationales existantes sur les dommages liés aux catastrophes naturelles dans le monde, les plus connues et proéminentes sont EM-DAT, NatCat et Sigma (Kron et al. 2012). La section suivante propose une description de leurs caractéristiques, reprises également dans le Tableau 4.1 et analyse leur utilisation potentielle dans le cadre de la thèse.

La base de données EM-DAT

Créée en 1988, la base de données Emergency Events Database (EM-DAT) est une base de données internationale sur les dommages liés aux principales catastrophes naturelles et anthropiques survenues dans le monde (Guha-Sapir, Below and Hoyois 2015, Hoyois and Guha-Sapir 2003). Elle est développée par le Centre de la Recherche sur l'Epidémiologie des Catastrophes (CRED) situé en Belgique. La base de données EM-DAT est disponible gratuitement sous conditions via le lien suivant : <http://www.emdat.be/>.

EM-DAT fournit des données sur les dommages directs dus aux catastrophes. On y retrouve notamment des données sur les pertes humaines telles que le nombre de personnes tuées, blessées ou affectées. Elle fournit également des estimations sur les dommages économiques liés aux catastrophes et les aides financières internationales mobilisées. Actuellement, EM-DAT contient des données sur plus de 20 000 événements survenus depuis 1900 dans le monde.

Cependant, si son exhaustivité doit être appréciée étant donné la zone d'étude considérée, malheureusement EM-DAT ne peut être utilisée dans le cadre de la thèse pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle n'offre pas d'informations sur le type de dommages matériels causés par les catastrophes. En outre, elle ne fournit que des données à la résolution spatiale

du pays ou de la région, ce qui est trop large pour notre démarche. Enfin, les critères de sélection des catastrophes incluses dans la base font que les événements aux conséquences mineures ou limitées ne sont pas pris en compte. En illustration, pour qu'un événement soit pris en compte en tant que catastrophe dans la base de données, il faut qu'au moins l'un des critères suivants soit validé :

- 10 personnes tuées ou plus,
- 100 personnes blessées ou plus,
- Appel à l'assistance internationale ou déclaration de l'état d'urgence.

La base de données NatCat

La base de données NatCat propose quant à elle des événements avec une résolution géographique plus précise que EM-DAT (Guha-Sapir and Below 2002). La base de données NatCat est une base de données du réassureur allemand Munich Re mise en partie à disposition du grand public par le biais d'une plateforme en ligne (<http://natcatservice.munichre.com/>). Elle fournit des informations sur les coûts économiques ainsi que les victimes de catastrophes à travers le monde depuis 1980. Des données sur les catastrophes majeures sont cependant également disponibles de 1979 à 1980.

Avec environ 800 entrées par an, la base de données NatCat couvre plus d'événements que la base de données EM-DAT, étant donné que le seul critère pour qu'un événement y soit intégré est la survenue avérée d'un dommage ou d'un décès (Tschoegl, Below and Guha-Sapir 2006). Il faut cependant souligner que les données brutes de cette base de données ne sont pas directement accessibles. La plateforme d'accès aux données mise à disposition par la MunichRe ne permet qu'une exploration partielle des données de la base.

Or via cette plateforme, la recherche de données de dommages événement par événement n'est pas possible. Si la recherche d'un événement par année et par région est possible, elle n'est proposée que de manière comparative avec des événements proches dans le temps et/ou dans l'espace. De plus, tout comme la base de données EM-DAT, NatCat ne propose pas de différenciation des dommages selon leur type. Enfin, étant donné ses sources assurantielles, la base de données NatCat possède moins de données pour les régions où la couverture des assurances est faible. Ainsi, cela limite fortement son utilisation dans le cadre de la thèse.

La base de données Sigma

La base de données Sigma a été créée et développée par le réassureur Swiss Re (Swiss Re Institute 2018). Elle catalogue des données de dommages liés aux catastrophes survenues depuis 1970. La base de données compte plus de 7000 entrées avec près de 300 entrées par an. Tout comme la base de données Munich Re, les données de Sigma ne sont pas librement accessibles. Un accès limité est proposé via une plateforme accessible à l'adresse suivante : <http://www.sigma-explorer.com/>.

A la différence de Natcat cependant, les données ne sont disponibles qu'agrégées à la résolution spatiale du pays. Il n'y a donc pas d'information sur les événements à l'échelle infranationale. De plus, les critères d'insertion d'un événement à la base entraînent d'office une exclusion des événements à ampleur limitée. Ces différents facteurs ne rendent pas l'utilisation de cette base pertinente dans le cadre de notre démarche.

Tableau 4.1 : Comparaison des bases de données internationales EM-DAT, NATCAT et SIGMA), (Debarati Guha-Sapir and Regina Below 2002)

BASE DE DONNEES	EM-DAT	NATCAT	SIGMA
ETABLISSEMENT	CRED	Munich Re	Swiss Re
DATE DE DEBUT	1900	79	1970
NOMBRE D'EVENEMENTS	12 000	15000	7000
NOMBRE D'EVENEMENTS ENTRES PAR AN	700	700	300
CATASTROPHE NATURELLE	Oui	Oui	Oui
CRITERE D'ENTREE D'UN EVENEMENT (UN CRITERE SUFFIT)	≥ 10 décès ≥100 blessés Etat d'urgence	≥1 décès ≥ 1 dommage	≥20 décès ≥50 blessés ≥2000 sans abri ≥14 millions \$ (marine) ≥28 millions \$ (aviation) ≥35 millions \$ (autre) ≥70 millions \$ au total
TYPE D'ENTREE	Par pays	Par pays et par événement	Par événement
SOURCE	Nations Unies, Gouvernement américain, sources gouvernementales officielles, IFRC, centres de recherche, réassureurs, presse, particuliers	Assurances, médias, clients, organisations gouvernementales et non gouvernementales, bases de données en ligne	Assurances, réassurances, bases de données en ligne, médias, rapports
UTILISATEURS	Centres de recherche, institutions gouvernementales, média, nations-unies	Munich Re, clients, gouvernements, universités, centres scientifiques	Assurances, banques, média, institut scientifique
ACCES	Public	Limité	Limité

2.2. Les bases de données spécialisées sur les inondations

Les Etats-Unis ont une longueur d'avance non négligeable sur le reste du monde en ce qui concerne la collecte et le stockage des données de dommages liés aux inondations (Tschoegl et al. 2006). Par exemple, la NOAA propose une base de données répertoriant les victimes et coûts liés aux événements météorologiques depuis 1903 à l'échelle régionale appelée Storm Event Database (Downton, Miller and Pielke Jr 2005).

Entre 2008 et 2010 une expérience a également été menée par le National Severe Storms Laboratory de la NOAA afin de collecter les dommages causés spécifiquement par les crues rapides appelée SHAVE (Severe Hazards Analysis and Verification Experiment) (Calianno, Ruin and Gourley 2013, Ortega et al. 2009).

En France, la collecte de dommages à l'échelle autre que communale est une pratique peu répandue. Cependant, des informations sur les inondations passées à l'échelle régionale peuvent être trouvées dans des bases de données étrangères ou issues de programmes de recherche internationaux.

Dartmouth Flood Observatory (DFO)

L'observatoire des inondations de Dartmouth (DFO – Dartmouth Flood Observatory), est une base de données faisant l'inventaire des principales inondations historiques survenues dans le monde (Adhikari et al. 2010, Brakenridge and Karnes 1996). Elle contient des informations sur les inondations ayant eu lieu de 1985 à nos jours, telles que :

- La taille et la localisation de la zone inondée,
- Le nombre de personnes affectées,
- Une cartographie de l'inondation (inondations depuis 2011),
- La sévérité de l'évènement.

La sévérité de l'inondation est estimée à partir de 3 niveaux qui sont :

- Classe 1 : Inondation importante avec une période de retour de la crue comprise entre 10 et 20 ans,
- Classe 1,5 : Inondation très importante avec une période de retour de la crue comprise entre 20 et 100 ans,
- Classe 2 : Inondation extrême avec une période de retour de la crue supérieure ou égale à 100 ans.

Si cette base de données est souvent citée et reprise, on peut également souligner son absence d'uniformité et d'exhaustivité en fonction des pays, tout particulièrement pour les petites et moyennes inondations.

HANZE-Events

HANZE-Events est une base de données sur les inondations passées compilant différents types d'informations telles que les dates de début et de fin d'un événement, sa localisation précise et les dommages induits. La base de données HANZE-Events compile 1564 inondations survenues entre 1870 et 2016 dans 37 pays européens. (Paprotny, Morales-Nápoles and Jonkman 2018) Ainsi la base couvre environ 70% de la population européenne. Elle est téléchargeable librement via le lien <https://doi.org/10.5194/essd-10-565-2018>.

Le principal avantage de cette base de données est qu'elle propose une normalisation des coûts estimés de dommages en fonction de l'inflation, mais également de l'évolution de la population et du PIB. Cela permet notamment de comparer des événements survenus à des périodes différentes. Cependant, les critères d'intégration d'événements à la base HANZE-Events sont assez stricts. Sont exclus de la base les événements jugés non significatifs c'est-à-dire :

- N'ayant affecté qu'une part réduite d'un territoire (événement localisé),
- N'ayant causé aucun décès,
- Ayant affecté moins de 200 personnes.

Societal impact database

Cette base regroupe des données sur les inondations survenues en Méditerranée entre 1981 et 2010. Elle a été conçue dans le cadre du projet HyMeX (Hydrological cycle in Mediterranean experiment) par le groupe de travail WG5 « Societal and economic impacts » (Llasat et al. 2013). Cette base compile aussi bien des données sur les caractéristiques des inondations que sur leurs conséquences sur les biens et les personnes.

Au niveau du territoire Français, les données contenues dans la base ne concernent que les régions méditerranéennes où les crues rapides sont fréquentes à savoir Provence-Alpes-Côte d'Azur et Occitanie. Les données disponibles concernant les dommages sont les suivantes

- Une description générale des dommages,
- Un indicateur du type de dommage parmi : réseau routier, voiture, réseau ferré, bâtiment, monument, réseau électrique, réseau d'eau, ouvrage de protection, industrie, commerce, tourisme, agriculture et service public,
- Une évaluation économique des dommages.

Contrairement aux bases de données présentées précédemment, la base de données Societal Impact présente l'avantage de différencier le type de dommages causés par les inondations.

Cependant, comme les bases de données précédentes, celle-ci ne permet pas d'obtenir une localisation précise des dégâts liés aux crues mais uniquement des informations agrégées à l'échelle régionale. Or, dans le cadre de ce travail nous cherchons à obtenir des données de calibration et de validation suffisamment fines pour appliquer l'indice de risque présenté dans le chapitre précédent à des territoires de petite taille, notamment dans un but opérationnel de gestion du risque et de la crise.

2.3. Les bases de données françaises

En Europe, plusieurs pays ont développé leurs propres bases de données sur les dommages liés aux inondations. Parmi eux l'Allemagne a développé la base de données HOWAS21 (Kreibich et al. 2017). La Suisse a quant à elle créé une base de données sur les dommages liés aux crues et aux glissements de terrain (Kron et al. 2012).

Enfin l'Italie est au centre de plusieurs projets portant sur la collecte de données de dommages dus aux inondations. Parmi ces projets, la base de données FloodCat (Molinari et al. 2013) s'appuie sur les données d'intervention la Protection Civile Italienne. Un inventaire des crues et glissements de terrain historiques a également vu le jour dans le cadre du projet AVI (Aires Vulnérables Italiennes) (Guzzetti, Cardinali and Reichenbach 1994). Une structure de base de données sur les inondations et leurs conséquences a été proposée par le projet LAND-deFeND (Napolitano et al. 2018).

En comparaison, la France a moins développé la collecte et la diffusion de données de ses dommages. Si plusieurs bases de données existent chez les différents acteurs de la gestion de risque (Forêts 2018), peu d'entre elles sont facilement accessibles et aucune ne propose de regroupement multi sources. Selon D. Molinari et al. (2017) une initiative aurait été lancée dans ce sens en 1976 par le Ministère de l'Environnement sans résultat concret.

La base de données GASPAR

La base de données Gaspar (Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels) recense les procédures réalisées en France au titre de la prévention des risques à l'échelle communale. En termes d'endommagement, la base Gaspar permet de savoir si une commune a bénéficié d'une procédure de type reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

Cette procédure a été instaurée par la loi du 13 juillet 1982 au titre du régime « CATNAT ». La reconnaissance de catastrophe naturelle est demandée par les communes suite à la survenue d'un événement sur leur territoire et permet aux personnes victimes de cette catastrophe d'être dédommagées pour les dommages subis. Ainsi, la reconnaissance de l'état de catastrophe pour une commune signifie que cette commune a subi des « *dommages matériels directs ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel* » (article 1 - Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982).

La Base Gaspar est disponible gratuitement et publiquement à l'échelle communale sur l'ensemble du territoire français depuis 1982. Elle permet de savoir si une commune a subi des dommages liés à un événement naturel et le type d'événement naturel en question. En revanche, elle ne donne aucune information sur le type de dommages causés par les inondations, ni sur leur quantité (information binaire : si pas de dommage, alors l'événement n'est pas répertorié).

Le principal avantage de la base de données CATNAT est son exhaustivité au niveau géographique. Sur les 36 681 communes Françaises, 95% d'entre elles ont été concernées par au moins un arrêté de catastrophe naturelle concernant une inondation. Le nombre total d'arrêtés CATNAT publiés par commune est visible en Figure 4.2.

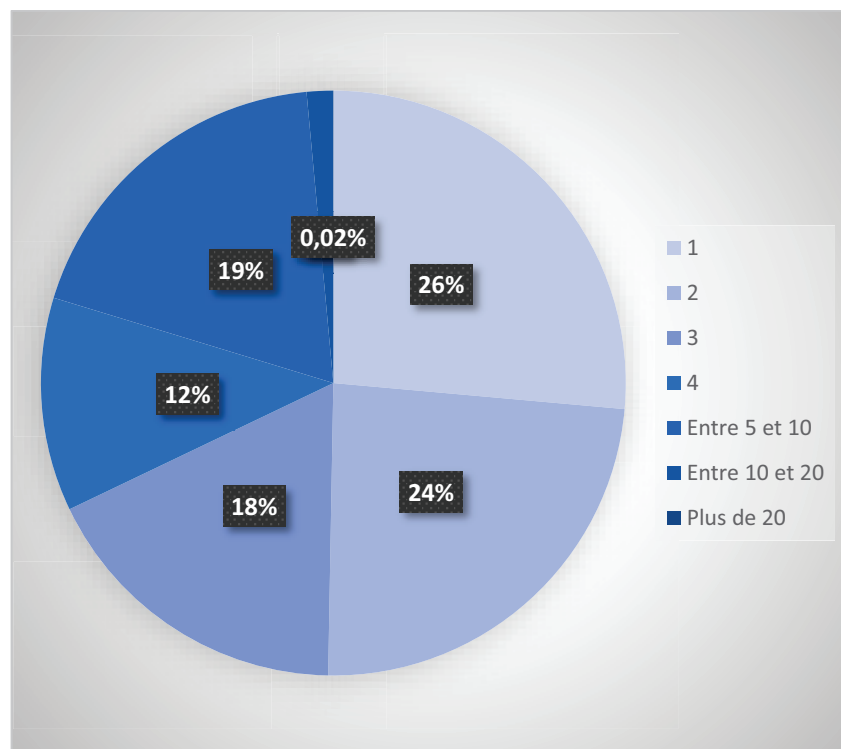


Figure 4.2 : Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle concernant une inondation par commune en France métropolitaine

Cependant, la base de données Gaspar présente plusieurs limites. Parmi elles, on peut notamment citer le choix subjectif de critères de qualification d'un événement en tant que catastrophe naturelle (Douvinet and Vinet 2012). Pour les inondations, l'un des critères est notamment le dépassement par la crue (ou la pluie si aucune donnée de débit n'est disponible) de la période de retour 10 ans.

Certains arrêtés CATNAT sont également issus de « l'effet d'aubaine » qui consiste à profiter d'un événement géographiquement proche pour obtenir la publication d'un arrêté de catastrophe naturelle sur sa commune. En raison de ces limites, des décalages peuvent apparaître entre les communes véritablement endommagées par un événement et les communes répertoriées au titre des arrêtés CATNAT.

La Base de Données Historiques sur les Inondations

La Base de Données Historiques sur les Inondations (BDHI) est une base de données documentaire qui recense les phénomènes de crues ayant causé des dommages sur le territoire français au cours des siècles passés jusqu'à nos jours. Lors de sa mise en place en 2011 par le Ministère de l'Ecologie dans le cadre de l'EPRI, la BDHI comptait 176 événements remarquables, le plus ancien remontant à 1294 (Lang et al. 2016).

Cette base intègre des informations détaillées sur les dommages liés aux inondations aussi bien dans les domaines socio-économiques, environnementaux et culturels. Chaque phénomène recensé est accompagné de renseignements sur l'aléa hydrologique et les dommages causés pour lesquels une vérification systématique doit être réalisée par des modérateurs.

La BDHI ne s'intéresse qu'aux événements majeurs qualifiés de « significatifs ». Voilà pourquoi toute nouvelle entrée dans la base doit répondre aux critères suivants :

- Pour l'aléa crue, ne sont retenus que les événements dont la période de retour estimée est supérieure ou égale à 10 ans,
- Pour les dommages, ne sont retenus que les événements présentant un niveau de gravité supérieur ou égal à 2 dans la classification adoptée par le ministère de l'écologie en 1999 (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Classification des événements naturels selon leur niveau de gravité (Suzanne 1999)

Classe		Dommages humains	Dommages matériels
0	Incident	Aucun blessé	Moins de 0,3 M€
1	Accident	Un ou plusieurs blessés	Entre 0,3 M€ et 3 M€
2	Accident grave	1 à 9 morts	Entre 3 M€ et 30 M€
3	Accident très grave	10 à 99 morts	Entre 30 M€ et 300 M€
4	Catastrophe	100 à 999 morts	Entre 300 M€ et 3 000 M€
5	Catastrophe majeure	1 000 morts et plus	3 000 M€ et plus

Les données des assurances

Les compagnies d'assurance possèdent des données précises sur les dommages causés par les inondations, notamment dans le cadre de leurs expertises conduites post-catastrophe. Mais la protection des données à caractère personnel et le respect de la vie privée des individus rendent difficile de communiquer des informations telles que les dommages aux habitations. Cependant, même les compagnies d'assurance ne possèdent pas de données exhaustives sur les dommages liés aux crues. Leurs données ne concernent que les habitations et les entreprises, ce qui exclut notamment les infrastructures publiques.

Pour autant, certaines données sont accessibles, notamment grâce à la CCR détenue par l'Etat. Ces données sont partagées de manière synthétique, agrégées à l'échelle départementale via la plateforme de l'ONRN <http://www.onrn.fr/site/> ou pour les événements majeurs via la plateforme Erisk (<https://erisk.ccr.fr/faces/erisk-accueil.jsp>).

Les données collectées par les services de gestion de crise : l'exemple des SDIS

Les Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS) collectent quant à eux des informations localisées et horodatées sur leurs opérations lors d'inondations telles que le sauvetage de personnes ou les opérations de pompage.

Ainsi les données d'intervention issues des SDIS pourraient fournir un support de données très riche pour l'identification des zones les plus affectées lors d'inondations. Par exemple en 2016 le nombre d'interventions affectées aux inondations s'élevait en 2016 à 31 562 au niveau national (Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise 2016). Cependant, aucun standard n'est fixé au niveau national. Cette absence d'homogénéité entre les SDIS de France rend difficile l'agrégation, l'utilisation et l'analyse de ces données de manière généralisée. De plus, cette hétérogénéité ainsi que le caractère confidentiel de certaines données compliquent encore leur acquisition.

Ce type de données n'a donc pas été exploré dans le cadre de la thèse. De plus, elles ne sont pas spécifiques aux dommages causés par les inondations, un tri préalable important doit être opéré. Par exemple, 61% des interventions des SDIS concernent le secours aux victimes uniquement (Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise 2016).

2.4. Limites et besoins en termes de données de dommages

Dans le but de calibrer et de valider notre indice de risque à échelle fine, c'est-à-dire communale voire infra communale, trois enjeux principaux peuvent être discernés :

- La précision des données,
- La qualité des données,
- L'exhaustivité des données.

Parmi les bases de données présentées dans cette section, peu d'entre elles fournissent une précision temporelle et géographique suffisante dans le cadre de notre approche. Or, la précision géographique des données est nécessaire à l'établissement de modèles et d'indices de risque opérationnels à l'échelle locale. De la même manière, la précision temporelle des bases de données présentées est souvent limitée aux bornes chronologiques de début et de fin d'un événement de crue. Or, comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, il n'est pas rare que les épisodes méditerranéens s'étendent sur plusieurs jours. Il est donc nécessaire de pouvoir établir à quel moment précis un dommage a été causé par la crue.

Une des lacunes récurrentes des bases de données présentées ci-dessus est également le manque de détails sur le type de dommages en question. Les dommages sont en effet agrégés sans distinction de type à quelques exceptions près, et présentés le plus souvent sous la forme d'un coût total de l'inondation. Ainsi, l'analyse de ces données de dommages ne peut être que partielle car il n'y a pas d'indication précise sur le type de dommage concerné.

Enfin, le manque d'exhaustivité des bases de données présentées doit être souligné. Dans le cas de la France, les bases de données présentées omettent plusieurs événements dommageables et ne peuvent donc être considérées comme exhaustives. Ainsi, le Tableau 4.3 propose une illustration de l'exhaustivité des différentes bases présentées dans cette section pour les inondations survenues sur le territoire français.

Nous avons identifié 23 événements de crues rapides dommageables survenues entre 2011 et 2017 dans le Sud de la France. Pour chacun de ces événements, un aperçu de leur visibilité dans les bases de données présentées dans cette section et à accès libre est proposé. On peut y voir qu'à part la base de données Gaspar, aucune autre base de données n'est exhaustive.

Afin de répondre aux différents enjeux posés par cette section de revue de littérature sur les bases de données sur les dommages, nous avons développé une base de données sur les dommages matériels spécifiques aux crues rapides dans le cadre de la thèse sous le nom de « DamaGIS ».

DamaGIS a pour but de fournir des données précises et détaillées sur les dommages survenus depuis 2011 dans notre zone d'étude à savoir le Sud de la France. Pour cela, une approche multi-sources a été privilégiée. Dans la prochaine section, une présentation plus poussée de DamaGIS sera faite et une première analyse de ses données sera proposée. Cette base a fait l'objet d'un data paper disponible en ligne (Saint-Martin, Javelle, & Vinet, 2018) et en Annexe E.

Tableau 4.3 : Intégration des événements de crue survenus dans le Sud de la France depuis 2011 dans les bases de données existantes à accès libre

Date de début de l'évènement	Date de fin de l'évènement	Département	GASPAR	EM-DAT	NATCAT	Global Archive of Large Flood Events	E-Risk	BDHI	SIGMA	HANZE-Events
06-nov-11	06-nov-11	Var	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui
23-mai-12	24-mai-12	Hautes-Alpes	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
26-mai-12	27-mai-12	Alpes-de-Haute-Provence	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
25-juin-12	25-juin-12	Var	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
26-oct-12	26-oct-12	Var	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
13-déc-12	13-déc-12	Var	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
07-mars-13	07-mars-13	Var	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui
18-juin-13	18-juin-13	Hautes-Pyrénées	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui
19-janv-14	19-janv-14	Var	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Oui
16-sept-14	20-sept-14	Gard, Hérault	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui
29-sept-14	30-sept-14	Hérault	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui
09-oct-14	13-oct-14	Gard, Hérault	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
04-nov-14	04-nov-14	Vaucluse	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
10-nov-14	11-nov-14	Alpes-Maritimes	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
14-nov-14	15-nov-14	Gard	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui
25-nov-14	27-nov-14	Var	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
28-nov-14	28-nov-14	Aveyron	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
29-nov-14	30-nov-14	Aude, Pyrénées-Orientales	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui
09-juin-15	09-juin-15	Hautes-Alpes	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui
23-août-15	23-août-15	Gard, Hérault	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
12-sept-15	13-sept-15	Gard	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
03-oct-15	04-oct-15	Alpes-Maritimes	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
14-sept-16	14-sept-16	Hérault	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non

3. La base de données DamaGIS

3.1. Présentation de la base de données

DamaGIS compile des dommages liés à différents événements de type crue rapide sur plusieurs territoires du Sud de la France depuis 2011, avec une grande précision géographique et temporelle. La base de données regroupe actuellement 729 dommages répartis sur 23 événements (Figure 4.3). Or comme nous l'avons vu précédemment, ces dommages peuvent être de natures très différentes. Ainsi les dommages contenus dans cette base de données diffèrent par leur nature, le lieu ainsi que la date de leur survenue. Du fait de cette importante diversité de données, leur analyse représente un enjeu non négligeable avant leur utilisation dans un but de vérification, calibration ou validation d'indices et de modèles de dommages.

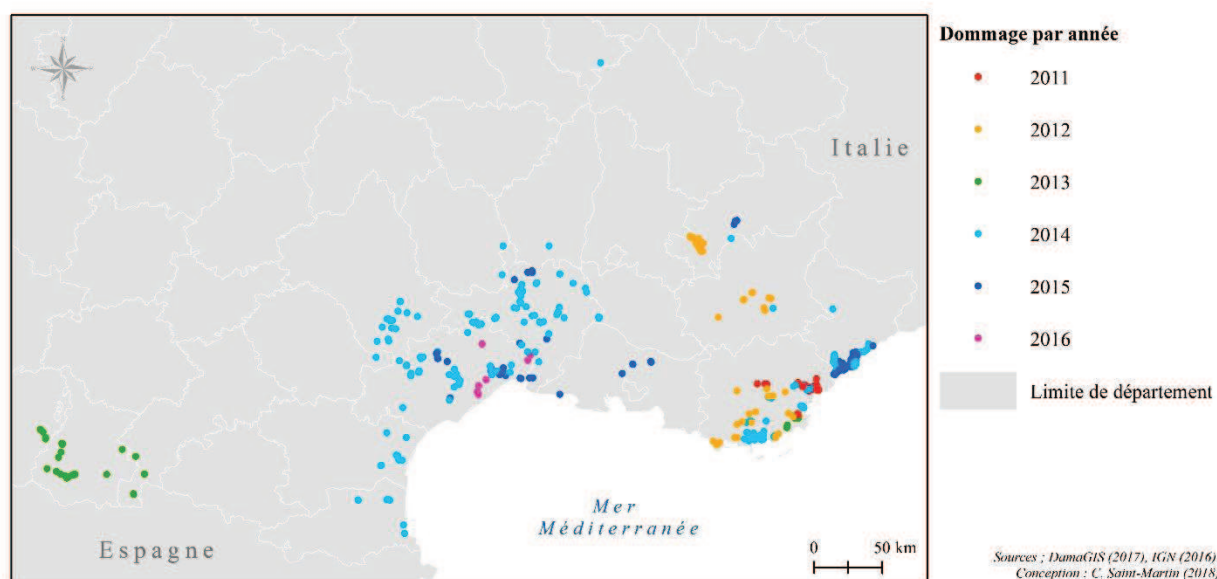


Figure 4.3 : Vue globale des dommages intégrés dans la base de données DamaGIS par année de survenue

Une des particularités de DamaGIS est l'utilisation de multiples sources dans le processus de collecte de données. Le but de cette base de données est, en effet, la compilation de données issues de sources multiples et variées qui pourrait se traduire dans l'avenir par une évolution vers un fonctionnement participatif multi-acteurs. Ainsi la prochaine section s'intéressera aux sources d'information de DamaGIS.

3.2. Sources d'information

Afin d'obtenir le plus grand nombre de données possibles, un fonctionnement multi sources a été privilégié pour remplir la base DamaGIS. Parmi ces sources on peut noter les suivantes :

- Site internet d'entreprise,
- Blog personnel,
- Sites internet de diffusion vidéo (Youtube ; Dailymotion...)
- Autorités locales,
- Administrations publiques
- Observations sur site,
- Réseaux sociaux (Facebook, Twitter...),
- Média en ligne,
- Journal papier.

Afin de pouvoir réaliser un suivi de l'information mais également afin d'assurer la qualité des données présentes dans la base, il est fait mention de la source précise de cette information pour chaque entrée de dommage. Pour le moment DamaGIS a été complétée manuellement par un petit groupe de personnes. Le processus de collecte est donc profondément chronophage. Cependant, ce biais vise à être corrigé par le recours à de multiples contributeurs. En mettant en place un fonctionnement participatif via de multiples acteurs, la base pourrait gagner en quantité et en qualité de données (Guzzetti et al. 1994).

La répartition des différentes sources de données utilisées dans la base de données a été analysée en Figure 4.4. On peut voir que les nouveaux médias représentent 75% des données collectées. Ces nouveaux médias peuvent être définis comme des sources d'information partagée qui utilisent la technologie digitale telle que les blogs, les médias sociaux, les médias en ligne et les sites internet comme moyen de diffusion et de partage. L'utilisation de ces nouveaux médias rend possible l'obtention d'informations précises à échelle fine, là où les médias traditionnels ne sont pas toujours présents.

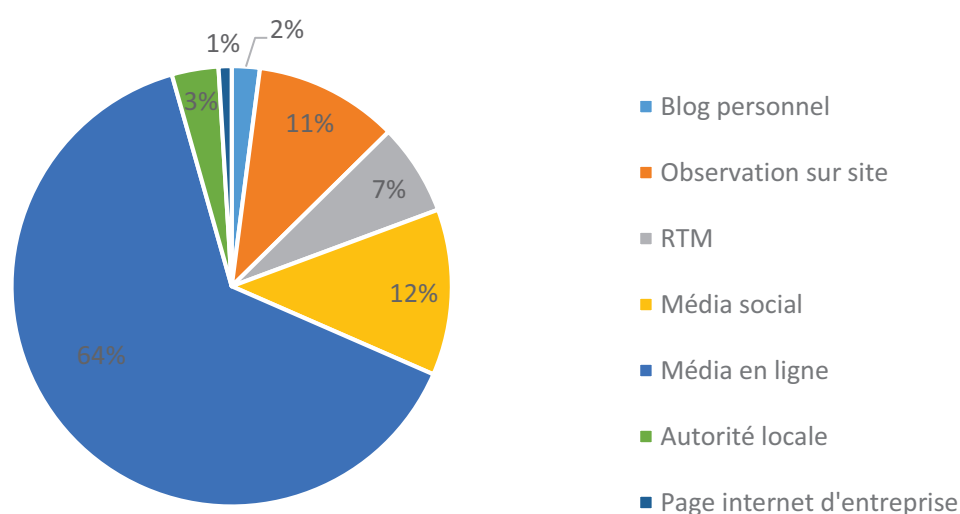


Figure 4.4: Répartition des dommages de DamaGIS par source d'information

Parmi ces nouveaux médias, les réseaux sociaux jouent un rôle proéminent. Ils peuvent être définis comme un « *groupe d'applications Internet qui se construisent sur les fondations idéologiques et technologiques du Web 2.0 et qui permettent la création et l'échange de contenus générés par leurs utilisateurs* » (Kaplan and Haenlein 2010).

L'utilisation croissante des réseaux sociaux permet l'accès direct aux informations sur les dommages auprès des personnes présentes lors d'un événement catastrophique (Figure 4.5) comme par exemple une crue rapide (Dashti et al. 2014). Cela permet ainsi de démultiplier les sources d'information et de contrebalancer la surreprésentation médiatique de certains territoires lors d'un événement à savoir les plus impactés ou ayant un poids économique et politique plus important (Douvinet and Vinet 2012).

Les informations sur les dommages sont collectées dans les nouveaux médias via l'utilisation de mots-clefs dans les moteurs de recherche. Les résultats trouvés sont ensuite triés par ordre chronologique décroissant à savoir du plus récent au plus ancien afin d'être examinés. Quand une information est considérée comme pertinente et possède une localisation précise, elle est ajoutée à la base de données. Cette localisation précise peut être indiquée directement ou peut être déduite par photo-interprétation. Cette dernière tâche consiste à déduire la localisation d'un élément endommagé à partir d'une photographie en utilisant des objets facilement reconnaissables tels que des panneaux de signalisation, des enseignes, une végétation spécifique, etc.

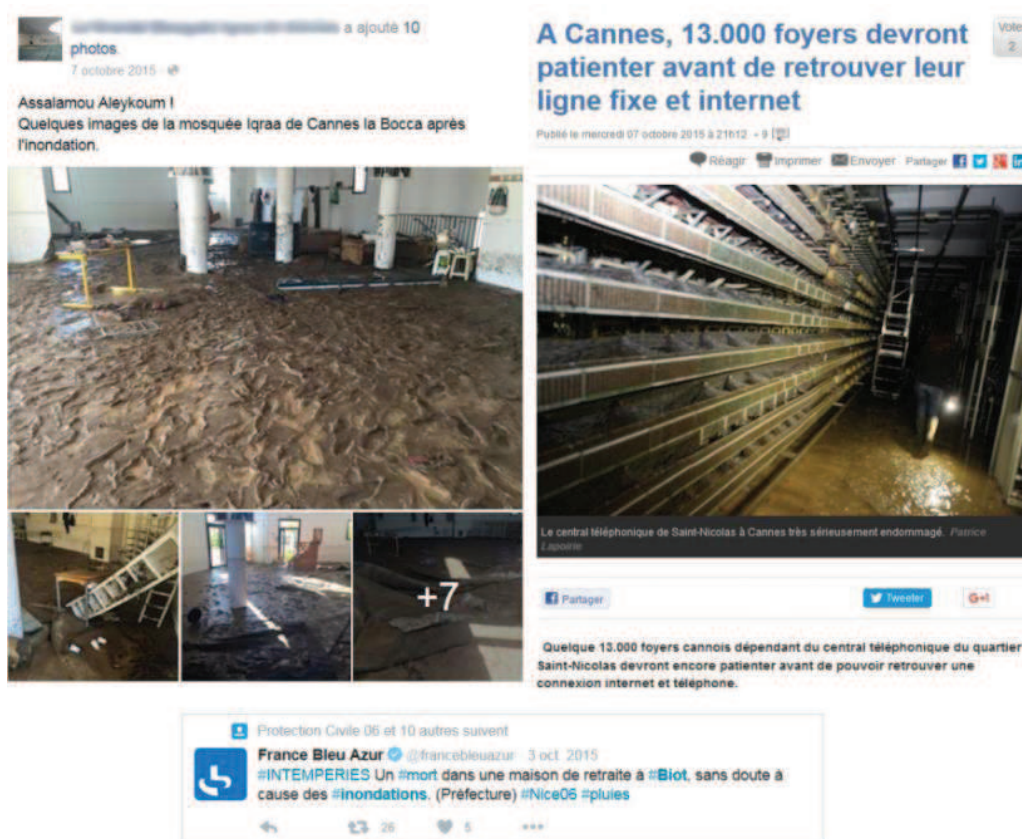
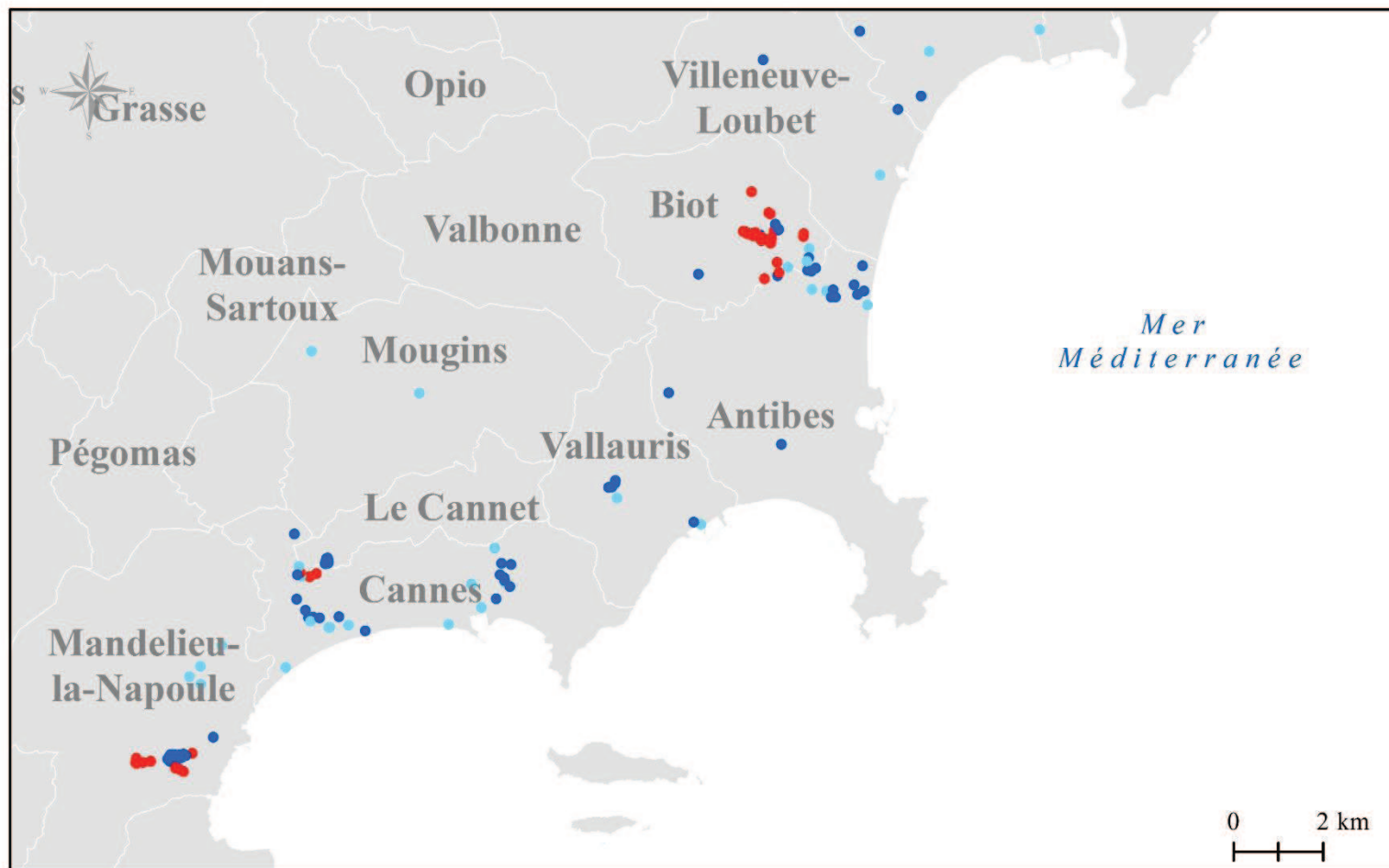


Figure 4.5: Exemple d'informations sur les dommages disponibles dans les nouveaux médias (de gauche à droite : copie d'écran de la page Facebook de la Mosquée de Cannes ; extrait d'un article en ligne du journal Nice Matin ; tweet de la radio France Bleu Azur)

Afin d'illustrer les avantages de l'utilisation des nouveaux médias et plus particulièrement des réseaux sociaux dans la collecte d'information de dommages, une attention particulière a été portée à un évènement spécifique à savoir l'inondation du 3 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes (Saint-Martin 2015). Ainsi, la Figure 4.6 est une cartographie représentant la distribution spatiale des dommages liés à cet évènement en fonction de la source de ces dommages. On peut voir que les trois types de sources d'informations les plus représentées sont les observations sur site, les médias en ligne, et enfin les réseaux sociaux.

L'utilisation de multiples sources d'informations a permis de collecter un grand nombre d'informations sur les dommages liés aux inondations, qui ont été par la suite intégrées à la base de données DamaGIS. Pour faciliter son utilisation ainsi que son analyse, cette base de données a été structurée selon une organisation qui sera présentée dans la section suivante.



Légende

Domage

par type de source

- Blog
- Observation sur site
- Média en ligne
- Réseau social
- Vidéo
- Limite de commune

Sources : DamaGIS (2017), IGN (2016)
Conception : C. Saint-Martin (2018)

Figure 4.6 : Distribution spatiale des dommages liés de la crue du 3 octobre 2015 selon leurs sources d'information

3.3. Structure de la base de données

A partir des sources de données présentées dans la dernière section sont extraites des données de dommages. Il s'agit d'informations sur des événements endommageant le territoire, caractérisés par une localisation précise et un horodatage. Chaque dommage correspond à un objet au sein de la base de données DamaGIS. Cette base de données a été créée sous la forme d'une géodatabase via le logiciel de cartographie ArcGIS. Ainsi, les tables qui composent la base ont un format vectoriel et se présentent sous la forme de classes d'entités.

Cette géodatabase est organisée autour de trois classes d'entités vectorielles, connectées entre elles par des identifiants communs appelés « clefs ». Ce système est présenté sous la forme d'un modèle conceptuel de données en Figure 4.7. Chaque dommage représente une ligne dans la classe d'entités du nom de « DOMMAGE ». Chaque entité de type DOMMAGE est connectée à une unique entité de type BASSIN_VERSANT par la clef « ID_BASSIN » et à une unique entité de type EVENEMENT via la clef « ID_EVT ». Pour autant, une entité EVENEMENT peut être connectée à plusieurs dommages de même qu'une entité de type BASSIN_VERSANT. Il n'y a pas de lien direct entre les classes d'entités BASSIN_VERSANT et EVENEMENT car elles n'ont pas de clef en commun.

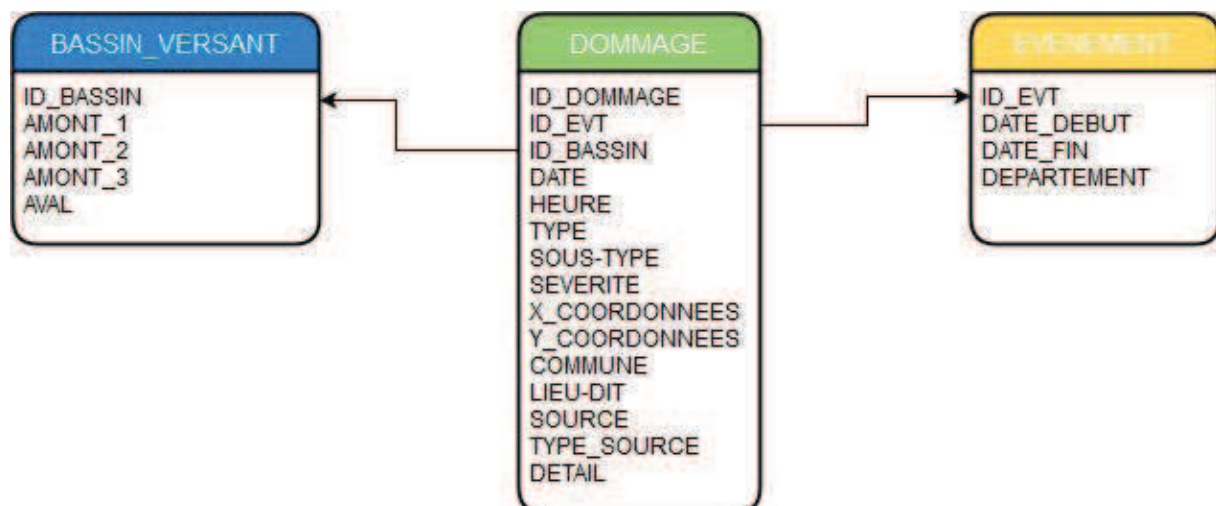


Figure 4.7: Modèle conceptuel représentant l'organisation de la base de données DamaGIS

Dans la prochaine section, nous allons présenter les différentes classes d'entités qui composent la géodatabase DamaGIS ainsi que leurs contenus.

Classe d'entités EVENEMENT

La première classe d'entités est appelée « EVENEMENT ». A cette classe d'entités est liée une table et des entités vectorielles de type polygone. Cette classe d'entités identifie l'ensemble des évènements de crue dommageables survenus dans le Sud de la France depuis 2011. A chaque évènement de crue correspondent un ou des polygones représentant le ou les départements où des dommages ont été enregistrés pour ce même évènement. La table de cette classe d'entités est organisée autour de quatre champs qui sont les suivants :

- ID_EVT : l'identifiant unique propre à chaque évènement de crue répertorié dans la géodatabase. Cet identifiant sert de clef pour jointure avec la classe d'entité DOMMAGES.
- DATE_DEBUT : la date marquant le début de l'évènement de crue,
- DATE_FIN : la date marquant la fin de l'évènement de crue,
- DEPARTEMENT : le nom du ou des départements français où l'évènement de crue a engendré des dommages. Les noms de ces départements sont séparés par des virgules.

Classe d'entités BASSIN VERSANT

La deuxième classe d'entités composant la base de données DamaGIS se nomme « BASSIN_VERSANT ». A cette classe d'entités est liée une table et des entités vectorielles de type polygone. Cette classe d'entités identifie l'ensemble des bassins-versants de la Base Nationale des Bassins-Versants (BNBV). La BNBV est une base de données correspondant aux contours de bassins-versants non-jaugés drainant plus de 5km² sur le territoire français métropolitain. Ils ont été tracés à partir de deux Modèles Numériques de Terrain (MNT) pour la mise en œuvre de la méthode AIGA. (Organde, Javelle and Ardilouze 2013). Chaque bassin versant est représenté par un unique polygone correspondant à son contour. La table de la classe d'entités « BASSIN_VERSANT » présente trois champs qui sont les suivants :

- ID_BASSIN : l'identifiant unique propre à chaque bassin versant de la BNBV. Cet identifiant sert de clef pour la jointure avec la classe d'entité DOMMAGES.
- AMONT_1 : le premier bassin amont (NA si pas de bassin versant correspondant),
- AMONT_2 : le deuxième bassin amont (NA si pas de bassin versant correspondant),
- AMONT_3 : le troisième bassin amont (NA si pas de bassin versant correspondant),
- AVAL : le bassin aval du bassin (NA si pas de bassin versant correspondant).

Classe d'entités DOMMAGE

La troisième et principale classe d'entités de la géodatabase est la classe d'entités « DOMMAGE ». A cette classe d'entités est liée une table et des entités vectorielles de type point. Cette classe d'entités identifie l'ensemble des dommages liés aux évènements de crue renseignés par la classe d'entités « EVENEMENT ». A chaque dommage correspond une entité vectorielle de type point. La table de cette classe d'entités comprend 15 champs tels que :

- ID_DOMMAGE : l'identifiant unique propre à chaque dommage,
- ID_EVT : l'identifiant de l'évènement ayant causé le dommage,
- ID_BASSIN : l'identifiant du bassin versant dont la crue a causé le dommage,
- DATE : date de survenue du dommage,
- HEURE : heure survenue du dommage,
- TYPE : type de l'enjeu endommagé (voir section 3.4 de ce chapitre)
- SOUS-TYPE : sous-type de l'enjeu endommagé (voir section 3.4 de ce chapitre)
- SEVERITE : niveau de sévérité du dommage (voir section 3.5 de ce chapitre)
- X_COORDONNEES : coordonnées X du dommage (Lambert 93),
- Y_COORDONNEES : coordonnées Y du dommage (Lambert 93),
- COMMUNE : commune où s'est produit le dommage,
- LIEU-DIT : lieu-dit où s'est produit le dommage,
- SOURCE : source d'information sur le dommage,
- TYPE_SOURCE : type de la source d'information sur le dommage,
- DETAIL : détails sur l'enjeu endommagé

Ces trois classes d'entités constituent la géodatabase DamaGIS. D'autres formats permettent une utilisation des données DamaGIS sur Mapinfo et QGIS, dans ce cas les classes d'entités ont été converties directement en couches vectorielles, le format de géodatabase étant spécifique au logiciel ArcGIS.

3.4. Typologie des enjeux endommagés

Afin de faciliter le traitement et l'analyse des données de la géodatabase, les enjeux matériels dommageables du territoire ont été répartis en 14 catégories présentées dans le Tableau 4.4. Chaque type d'enjeu peut contenir un ou plusieurs sous-types. Cette typologie est une adaptation des classes utilisées par la BD Topo® de l'IGN. Il s'agit de la même typologie que celle utilisée dans le Chapitre 2 pour la hiérarchisation des enjeux dans le cadre de l'AHP. Les victimes ne sont pas prises en compte dans la base de données DamaGIS car cette base se concentre uniquement sur les dommages matériels.

Tableau 4.4 : Typologie des enjeux endommagés

Type	Sous-type(s)				
Agriculture	Elevage	Culture			
Gestion de crise	Pompiers	Mairie	Police	Préfecture	Sous-Préfecture
Activité économique	Commerce	Entreprise	Association		
Réseau électrique					
Réseau routier	Chemin	Route à 1 voie	Route à 2 voies	Autoroute	Boulevard
	Avenue	Rue	Passage	Pont	Echangeur
Scolarité	Maternelle	Primaire	Collège	Lycée	Université
Hébergement saisonnier	Camping	Hôtel	Location saisonnière		
Service, administration					
Transport	Gare SNCF	Aéroport	Gare routière		
Réseau d'eau					
Santé	Maison de retraite	Hôpital			
Hébergement permanent					
Parking	Souterrain				
Loisirs	Sport	Parc	Lieu de culte	Musée	
Etablissement pénitentiaire					
Réseau ferré					
Industrie dangereuse					

La répartition des dommages de la géodatabase en plusieurs types et sous-types d'enjeux a permis d'obtenir une synthèse présentée en Figure 4.8. Ainsi, deux catégories d'enjeux semblent particulièrement affectées par les inondations. D'une part les activités économiques supportent 23.6% des dommages recensés et d'autre part le réseau routier qui en représente 23.5%. Ainsi ces deux catégories représentent à elles seules près de la moitié des dommages totaux. Au contraire les réseaux d'eau et d'électricité sont particulièrement sous représentés dans la base de données. Ils représentent de manière cumulée moins de 1% des dommages totaux enregistrés. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces analyses.

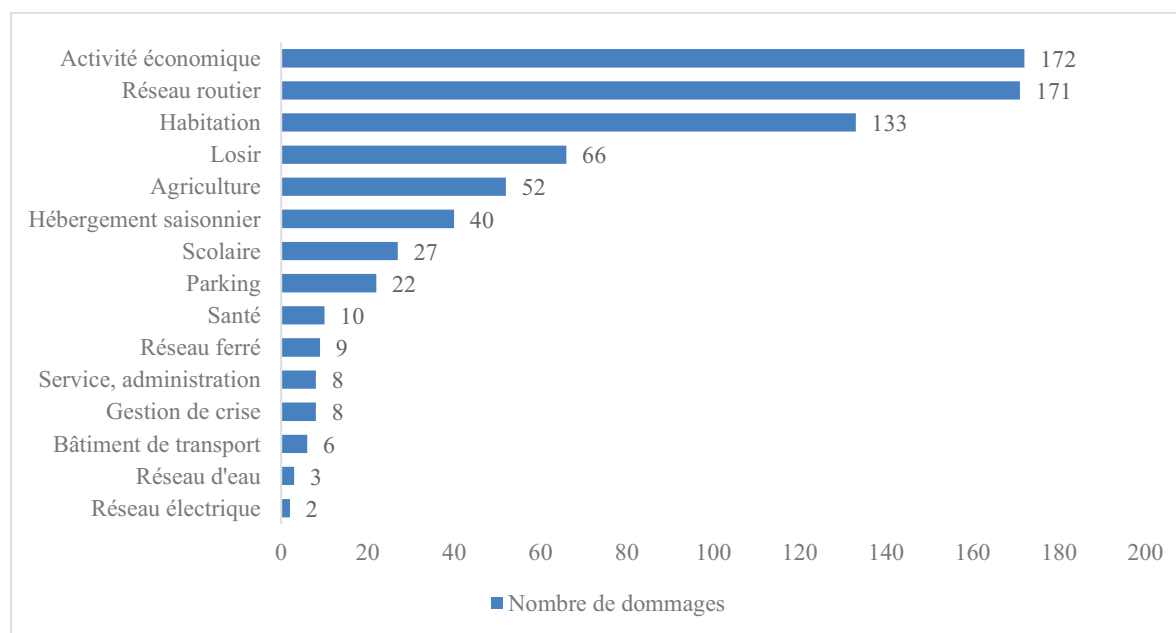


Figure 4.8: Nombre de dommages par catégorie d'enjeux au sein de la base de données DamaGIS

Tout d'abord, dans le cas des activités économiques, l'information est aussi facilement accessible via les médias classiques que les nouveaux médias. Il est courant que les entreprises possèdent une page internet afin de communiquer avec leur clientèle ou pour faire de la publicité. De la même manière, on remarque une forte présence des entreprises sur les réseaux sociaux. Dans le cas d'une inondation, de nombreuses activités économiques partagent des informations à leurs clientèles sur leur situation par l'un de ces deux biais. En effet, les inondations peuvent affecter leur fonctionnement. De manière indirecte, l'utilisation de la photo-interprétation pour la recherche de dommages tend à identifier plus facilement les entreprises par le biais de leurs enseignes notamment.

Dans le cas des réseaux routiers, deux raisons principales peuvent expliquer leur surreprésentation au sein de la base de données. Tout d'abord, le réseau routier est extensif et dense, ce qui le rend particulièrement exposé aux crues en de multiples endroits du territoire (Versini, Gaume and Andrieu 2010), à la différence d'autres enjeux qui se concentrent à des endroits spécifiques. Cette surexposition du réseau routier aux crues peut être illustrée par les circonstances de décès liées aux crues. Par exemple, depuis 1982, 30% des décès liés aux crues dans le Sud de la France correspondent à des véhicules roulant sur une route inondée (Boissier 2013).

Ensuite, les informations sur les routes inondées sont également facilement accessibles au grand public via des applications de navigation partagée (Waze, Google Maps...). De plus, les autorités locales tendent à suivre et partager ce type d'informations à titre préventif via les réseaux sociaux et la radio afin d'informer les usagers de la route et ainsi de limiter les accidents (Bunce, Partridge and Davis 2012, Cheong and Cheong 2011, Latonero and Shklovski 2011).

Au contraire, la faible présence des réseaux d'eau et d'électricité en tant qu'éléments endommagés au sein de la base de données peut être expliquée par deux raisons. D'une part, l'endommagement de ce type de réseau sera moins facilement partagé par le grand public et les autorités locales car les conséquences sur la population ne sont pas directes mais indirectes. D'autre part, les réseaux d'eau sont souvent enterrés tandis que les réseaux électriques sont en hauteur. Ces deux points font que leur atteinte par les eaux est nettement limitée à la différence des autres types d'enjeux présents sur le territoire.

Etant donné le nombre limité de dommages présents dans la base de données sur la période donnée (2011-2017), nous avons choisi d'examiner une nouvelle méthode d'évaluation de la sévérité des dommages, commune à tous les types de dommages, afin de pouvoir mesurer la sévérité d'un événement de crue dans la globalité.

3.5. Evaluation de la sévérité des dommages matériels

Les méthodes d'évaluation des dommages se concentrent habituellement sur l'évaluation des dommages potentiels liés à une inondation future. Or dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à l'évaluation de la sévérité des dommages après leur survenue, dans un but de retour d'expérience. Les méthodes existantes d'évaluation des dommages s'intéressent le plus souvent aux dommages tangibles directs qui sont par nature plus facilement identifiables et quantifiables. Pourtant, si ces méthodes sont nombreuses, elles diffèrent beaucoup dans leur contenu. Il faut noter la grande hétérogénéité existant au sein des méthodes d'évaluation de dommages en fonction de leurs objectifs (Bouwer et al. 2007).

La sévérité des dommages peut être exprimée aussi bien en termes monétaires, qu'en pourcentage de perte estimée, indice de valeur, valeur numérique standardisée sur une échelle de 0 à 1 ou par le biais d'indicateurs (Blong 2003b). Le plus souvent au sein de la littérature spécialisée, les dommages causés à un objet sont évalués en fonction du coût de remplacement des éléments endommagés ou de sa valeur de cet objet (Merz et al. 2010, Jongman et al. 2012, Olesen, Löwe and Arnbjerg-Nielsen 2017). Le principal désavantage de ce type d'approches est qu'elles rendent difficile la comparaison entre deux événements de crue (Blong 2003a). Il peut y avoir d'importantes variations de coûts selon le moment et le lieu de survenue d'une inondation.

L'objectif de notre méthode d'évaluation des dommages est de permettre la compilation et la comparaison des différents types de dommages indépendamment de leur nature. Le but n'est donc pas d'obtenir une évaluation économique mais une évaluation fonctionnelle des dommages. Cette approche rend possible l'obtention d'informations objectives sur la sévérité des dommages liés aux crues.

Différentes études suggèrent que l'analyse de la sévérité de ces dommages à travers le temps et l'espace est rendue difficile par l'absence ou la faible qualité des bases de données existantes disponibles sur les dommages liés aux crues. Il faut également souligner l'absence de consensus sur le sujet de la collecte de ce type d'informations (Sene 2012).

Avec la base de données DamaGIS, ce type d'approche est rendu possible via l'utilisation d'une simple échelle d'évaluation basée sur des indicateurs de dommages. Cette échelle permet une évaluation de la sévérité des dommages à travers le temps et l'espace. Si les coûts sont susceptibles d'évoluer, les conséquences fonctionnelles d'un dommage resteront les mêmes.

Pour ce faire, une échelle ordinale a été utilisée, ce qui signifie que plus un dommage est important, plus sa valeur sur l'échelle sera grande. Cependant, ni la valeur du niveau de l'échelle ni la différence entre deux niveaux n'ont de valeur prises séparément (Velleman and Wilkinson 1993). Cette échelle de sévérité est composée de 4 niveaux, présentés sous la forme d'un arbre de décision en Figure 4.9.

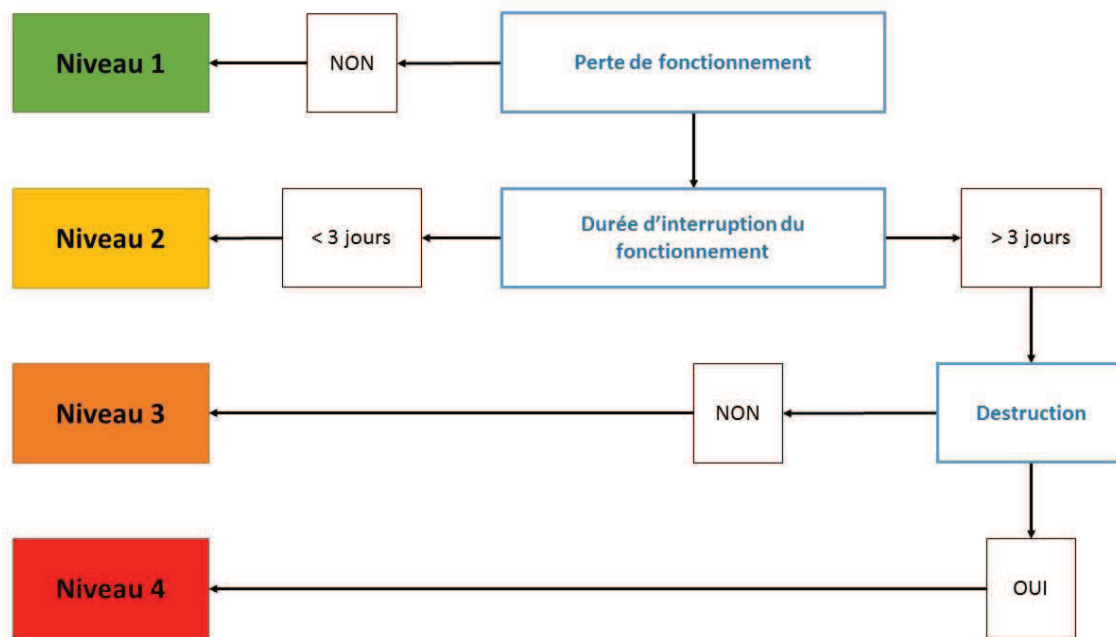


Figure 4.9: Illustration de l'échelle d'endommagement pour l'évaluation de la sévérité des dommages

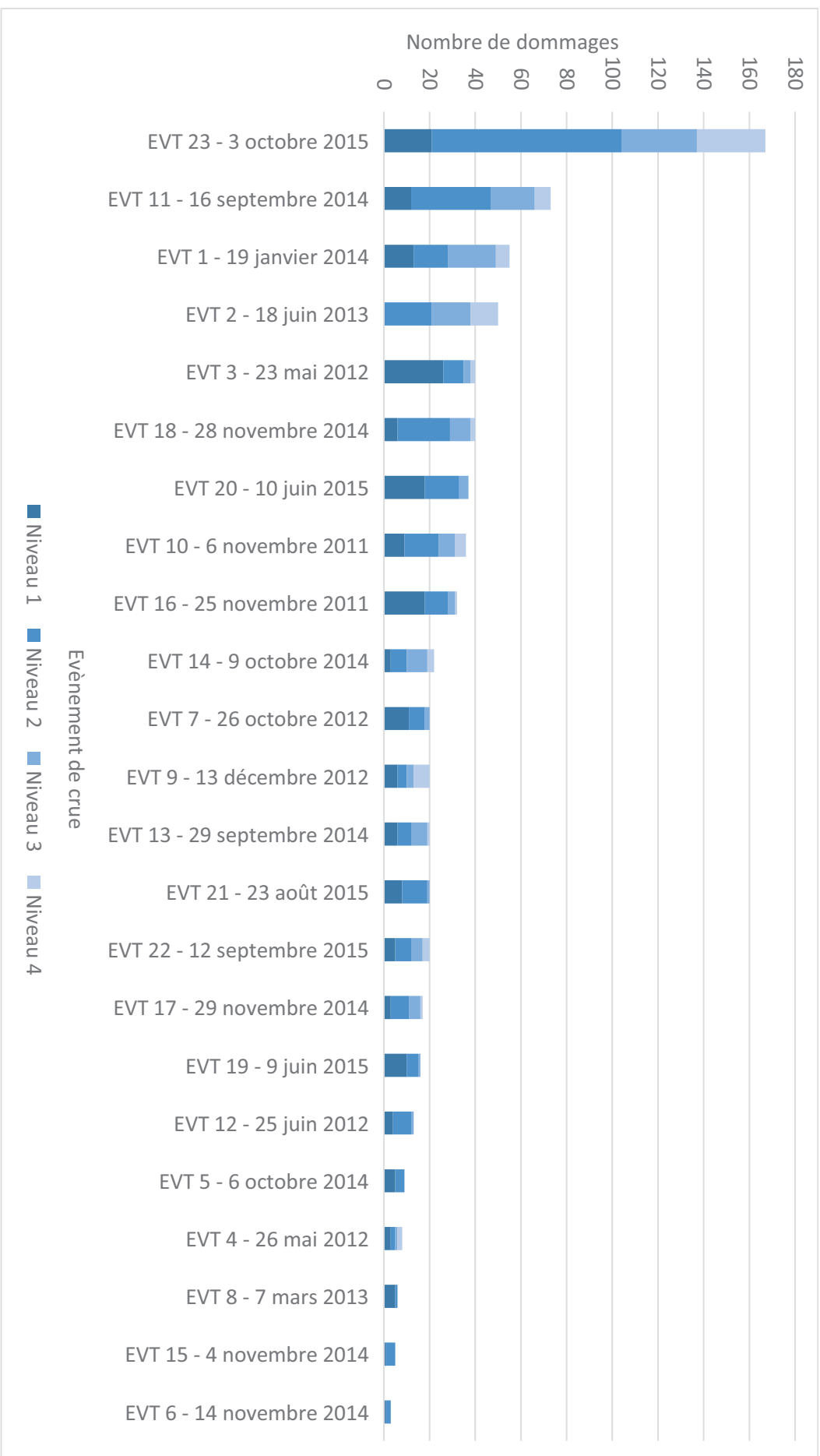
Afin d'illustrer le fonctionnement de notre échelle de sévérité lors de cette présentation, nous utiliserons l'exemple d'une route dont la fonction première est d'assurer l'accessibilité du territoire :

- Le premier niveau de sévérité correspond à l'inondation d'un élément sans perte de fonctionnement. Par exemple, une route est inondée mais les véhicules peuvent toujours circuler sur elle.
- Le second niveau correspond à une durée d'interruption du fonctionnement d'un élément pendant moins de 3 jours. Par exemple, une route inondée ne peut pas être utilisée pendant une journée.
- Le troisième niveau correspond à une durée d'interruption du fonctionnement d'un élément pendant plus de 3 jours. Par exemple, une route inondée ne peut pas être utilisée pendant plus de 3 jours.
- Le quatrième niveau correspond à la destruction d'un élément par l'inondation, ce qui sous-entend un besoin de reconstruction. Par exemple une portion de route est détruite par l'inondation et doit être reconstruite.

Cette méthode est située à mi-chemin entre l'évaluation des dommages directs et indirects étant donné que nous avons choisi d'exprimer la sévérité des dommages causés à un élément en fonction de la perte de fonctionnement de cet élément. Les dommages directs sont habituellement mesurés en termes de perte monétaire et la perte de fonctionnement est communément associée avec des dommages indirects. Cependant, nous choisissons de considérer que la perte de fonctionnement d'un élément est un effet direct de l'inondation car elle affecte le but même de son existence.

Au regard de la sévérité des dommages au sein de la base de données, ces derniers ne sont pas également distribués entre les 4 niveaux. Par exemple, le deuxième niveau de sévérité est plus représenté au sein de DamaGIS (Figure 4.10) que les trois autres. Il comprend 300 dommages alors que le premier niveau de sévérité ne concerne que 194 dommages contre respectivement 151 et 82 dommages pour le troisième et le quatrième niveau de sévérité. Ces variations peuvent s'expliquer par la taille limitée de la chronique de temps utilisée (2011-2017). Le nombre restreint de dommages au sein de la base de données limite sa représentativité. Voilà pourquoi l'utilisation de la base de données doit être faite avec précaution et en connaissance de cause.

Figure 4.10: Nombre de dommages par événement selon leur niveau de gravité



3.6. Limites et avantages présentés par l'utilisation de DamaGIS

DamaGIS soulève plusieurs questions auxquelles nous allons tenter de répondre dans cette section. Dans un premier temps, cette base de données s'intéresse uniquement aux dommages causés par les inondations dans le Sud de la France depuis 2011. Par conséquent, période étudiée est relativement courte et ne permet pas d'obtenir des analyses pertinentes autres qu'évènement par évènement. Toute utilisation de cette base de données doit donc prendre en compte cet état de fait dans son analyse.

Nous avons préalablement souligné que la collecte des données de dommages peut s'avérer être très chronophage si elle ne repose pas sur de multiples contributeurs. Voilà pourquoi un fonctionnement collaboratif est vivement recommandé afin de continuer à compléter la base ou pour son application à d'autres zones d'étude.

L'utilisation des nouveaux médias pose également le problème de l'inégale représentation de la population dans les sources d'information. Selon une étude récente, les Français de plus de 50 ans ne souhaitent pas utiliser les réseaux sociaux et/ou ne savent pas se servir d'internet (Douvinet et al. 2017). Pourtant ils représentent 38% de la population française selon l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE 2017). Ainsi, l'utilisation des nouveaux médias et plus particulièrement des réseaux sociaux serait susceptible de surreprésenter les dégâts subis et rapportés par la tranche de population âgée de moins de 50 ans.

Finalement, il est nécessaire de souligner le manque d'exhaustivité de la base de données. Des informations peuvent être accidentellement écartées lors du processus de recherche. De plus, des informations sur certains types de dommages peuvent ne pas être disponibles via les sources d'informations auxquelles nous avons recours. Ces limites pourraient être en grande partie dépassées par le travail participatif de multiples contributeurs.

Parmi les principaux avantages présentés par DamaGIS, la simplicité d'utilisation de la base de données ainsi que celle de son remplissage doivent être mises en avant. Sa simplicité permet d'envisager une évolution vers un fonctionnement participatif afin de continuer à être alimentée. Cette évolution pourra s'appuyer sur un groupe d'administrateurs afin d'assurer un contrôle et un suivi de la qualité des données. On peut imaginer que ce suivi soit géré par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Un fonctionnement de ce type est notamment proposé sur le site français de gestion des repères de crues (<https://www.reperesdecrues.developpement-durable.gouv.fr/>).

A la différence des bases de données présentées dans ce chapitre, une telle approche permettrait de n'exclure aucune inondation, y compris les plus localisées. Grâce à un système de modération, tous les événements rentrés dans la base pourraient ainsi être conservés, en association avec un indice de fiabilité selon la source de l'information. Une telle démarche permettrait de renseigner les petits événements localisés pour lesquels très peu de données existent.

En outre, un des atouts majeurs de cette base de données consiste à appuyer l'évaluation de ses dommages sur une échelle innovante d'évaluation simplifiée de sévérité. Cette échelle permet de comparer et de confronter des données de dommages indifféremment de leur lieu ou de leur date de survenue. Dans ce sens, DamaGIS peut être également facilement

réutilisée pour d'autres territoires que le sud de la France. Cela permettra une évolution vers un fonctionnement à de multiples contributeurs

De plus, il est nécessaire de rappeler que l'un des avantages majeurs de DamaGIS est de s'appuyer sur des informations issues de multiples sources dont les réseaux sociaux font partie. Cela permet d'obtenir des données de dommages rapidement après une inondation sans avoir à se déplacer mais également d'exploiter une nouvelle manne de données dont l'utilisation exponentielle au cours des dernières années laisse penser à une évolution tout aussi croissante dans les années à venir.

Enfin, l'apport principal de DamaGIS repose sur sa capacité à combler un vide dans le domaine des données de dommages actuellement disponibles. En effet, sa résolution spatiale correspondant au bâtiment fournit un niveau de détail suffisamment avancé pour appuyer la calibration de modèles hydrologiques et d'indices de risque à très fine échelle. Or, il n'existe aucune autre base de données librement accessible sur les dommages liés aux crues procurant un tel niveau de précision pour le territoire Français. Face au faible niveau de partage actuel des données au sein des acteurs du risque, la mise à disposition d'une telle base permet ainsi d'ouvrir la voie à une modélisation plus précise et opérationnelle.

Conclusion du chapitre

Les besoins actuels en termes de données de dommages dus aux inondations sont nombreux. Il est possible de les classer en quatre catégories présentées dans la Figure 4.11 (Nussbaum, 2017). En rouge est encadré le domaine de la modélisation, car répondre aux besoins de calibration et de validation a été le principal objectif de ce chapitre.

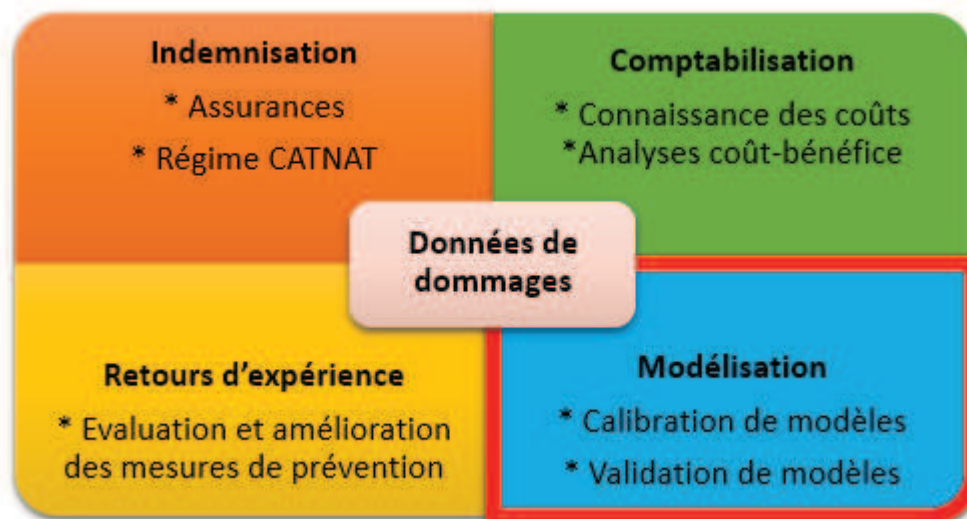


Figure 4.11: Domaines de compétence nécessitant des données de dommages liés aux inondations en France (Nussbaum 2017)

Dans le chapitre précédent, un indice de risque combinant qualification de l'aléa crue et évaluation de la vulnérabilité des territoires aux inondations a été présenté. Or, afin d'en estimer la pertinence mais également l'apport vis-à-vis d'une qualification de l'aléa seul, des données sur les dommages observés doivent être utilisées.

Après un état des lieux sur les bases de données existantes sur le sujet, ce chapitre a mis en évidence quels sont les limites et atouts de chacune d'entre elles. Cette analyse a notamment permis de déterminer quelle utilisation peut en être faite pour la calibration et la validation de notre indice de risque. Ainsi Gaspar, malgré le caractère binaire des informations qu'elle propose, est la seule base qui semble fournir des données suffisantes pour répondre à nos attentes.

Cependant, si l'on veut aller plus loin, c'est-à-dire descendre en dessous de l'échelle communale aucune données en libre accès n'est disponible. Ainsi, afin d'avoir des données sur les dommages survenus à l'échelle infra communale mais également de disposer de données plus complètes sur le type de dommages survenus et leur niveau de gravité, nous avons créé et développé une base de données dédiée à cet emploi dans le cadre de la thèse. DamaGIS offre donc des données librement accessibles à la résolution spatiale du bâtiment, sur les dommages liés aux crues rapides dans le Sud de la France.

Gaspar à l'échelle communale et DamaGIS à plus fine échelle vont donc nous permettre de réaliser une évaluation de notre indice de risque. Ce point fera l'objet du cinquième et dernier chapitre de cette thèse.

Chapitre 5 : Mise en application de la méthode et évaluation des performances

SOMMAIRE

1. Présentation des zones d'études pour l'évaluation de l'indice de risque	174
1.1. Département du Gard : Les Gardons	175
1.2. Département du Var : L'Argens.....	177
1.3. Département des Alpes-Maritimes : le Riou de l'Argentière, la Grande Frayère et la Brague.....	179
2. Evaluation de la méthode dans les zones d'étude	181
Evaluations précédentes de la méthode AIGA.....	181
2.1. Tables de contingence.....	182
Utilisation en épidémiologie	182
Utilisation pour les systèmes d'alerte	183
2.2. Courbe de ROC (Receiver Operating Curve).....	186
AUROC (Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve)	187
3. Evaluation exhaustive à partir de données CATNAT	189
3.1. Données de validation : les arrêtés CATNAT	189
3.2. Méthodologie	192
Scores sur AIGA.....	192
Scores sur l'Indice de risque (IR)	195
3.3. Résultats de l'évaluation à partir des CATNAT	197
Alpes-Maritimes	198
Var.....	199
Gard	200
3.4. Analyse des résultats.....	201
Alpes-Maritimes	204
Var.....	205
Gard	206
4. Evaluation spatiale événementielle à partir des données de DamaGIS	207
4.1. Méthodologie	207
Evènements significatifs et données de dommages.....	208
4.2. Résultats issus des scores	209
4.3. Analyse détaillée de deux évènements.....	211
Evènement du 25 au 27 novembre 2014	212
Evènement du 3 octobre 2015.....	215
Conclusion du chapitre	217

Chapitre 5 : Mise en application de la méthode et évaluation des performances

« La vie est une lutte. Il faut toujours surmonter quelque chose. C'est de là que vient notre amour pour les inondations, les incendies, les tempêtes. Nous avons besoin de lieux pour "manifester du courage et de l'héroïsme" »

Svetlana Alexievitch – La Supplication, Tchernobyl, chronique du monde après l'apocalypse (1997)

Comment évaluer les performances de l'indice de risque ?

Quel est l'apport de l'indice de risque en comparaison de la méthode AIGA seule ?

Les chapitres précédents de la thèse ont permis d'introduire une nouvelle méthode d'évaluation nouvel indice d'estimation du risque de dommages liés aux crues rapides. Cet indice, associé à la méthode AIGA, rend maintenant possible un calcul en temps réel de ce risque. Cependant, avant d'envisager une application opérationnelle de cette méthode, il est nécessaire de l'évaluer sur la base d'événements passés, afin d'en connaître les apports et les limites.

L'objectif de ce chapitre est donc triple :

- Il s'agira d'une part de choisir une méthode d'évaluation afin d'estimer la capacité de la méthode AIGA et de notre indice de risque, à anticiper la survenue de dommages potentiels à partir de données de dommages observés.
- Le deuxième objectif de ce chapitre sera d'appliquer la méthode d'évaluation proposée précédemment à trois zones d'études du Sud de la France. Une comparaison des résultats obtenus à l'échelle communale sera proposée afin de mesurer l'apport de l'évaluation du risque par rapport à la caractérisation de l'aléa seul. Cette évaluation comparative se fera à partir des données CATNAT présentées dans le Chapitre 4.
- Il s'agira enfin d'évaluer notre méthode à l'échelle infra-communale, en s'appuyant sur les données de dommages de DamaGIS présentées dans le Chapitre 4. Pour cela nous adopterons une approche événementielle.

1. Présentation des zones d'études pour l'évaluation de l'indice de risque

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer une méthode d'avertissement du risque de dommages liés aux crues rapides au niveau de l'arc méditerranéen. En raison de la disponibilité des données CARTINO d'emprises inondables nécessaires à l'application de l'indice de risque (Chapitre 3), nous avons réalisé cette évaluation sur 3 zones d'étude

Cependant, bien que la méthode CARTINO n'ait été appliquée qu'à un nombre restreint de territoires, leur choix n'est pas anodin. Ils présentent une forte exposition de leurs enjeux au risque inondation et ont tous été marqués par la survenue d'un ou de plusieurs événements de crues d'une ampleur exceptionnelle au cours des 10 dernières années. Voilà pourquoi ces trois zones ont en commun d'être localisées dans des Territoires à Risque Important d'Inondation (TRI).

Dans le but d'identifier les territoires les plus exposés au risque inondation, l'EPRI menée en 2011 s'est traduite par la détermination de TRI au niveau national. Il s'agit de zones où sont concentrés de nombreux enjeux humains et économiques exposés au risque inondation et où existe un risque important de dommages potentiels. En 2012, 122 TRI ont été définis à l'échelle nationale, dont nos 3 zones d'étude. La section suivante présente de manière détaillée ces zones d'études. La Figure 5.1 localise les TRI du sud de la France et un encadré rouge identifie plus spécifiquement nos zones d'étude déterminées par les cours d'eau suivants:

- Les Gardons dans le Gard,
- L'Argens dans le Var,
- La Grande Frayère, le Riou de l'Argentière et la Brague dans les Alpes-Maritimes.

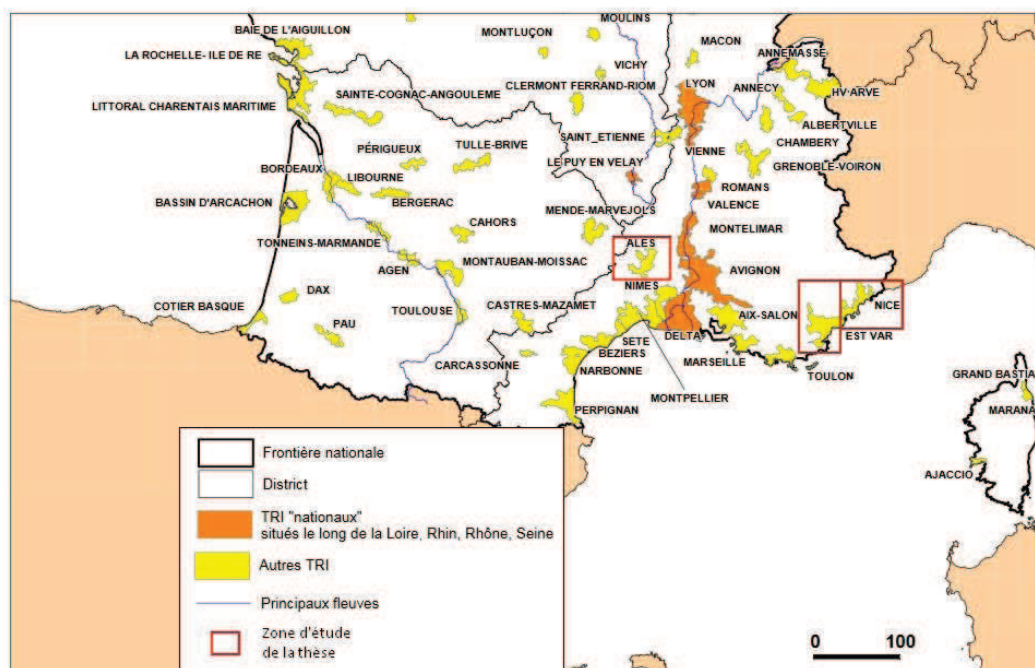


Figure 5.1 : Les TRI situés dans le sud de la France Métropolitaine - CETE (2012)

1.1. Département du Gard : Les Gardons

Situé dans le département du Gard, le bassin-versant des Gardons est particulièrement vaste puisqu'il s'étend sur plus de 2 000 km² et comprend 172 communes. Il a la particularité de bénéficier de deux climats : méditerranéen au sud-est et montagnard au nord-ouest, proche des Cévennes. L'influence des Cévennes joue un rôle majeur sur les précipitations du bassin, avec des cumuls annuels trois fois supérieurs à ceux du littoral gardois.

Plusieurs crues majeures ont marqué ce territoire. On peut notamment citer les crues de 1958, septembre 2002 et novembre 2014. De nombreux enjeux sont présents en zone inondable tels que présentés dans le Tableau 5.1. On peut y voir que le nombre d'enjeux exposés augmente considérablement entre le scénario de crue fréquent et le scénario moyen.

Tableau 5.1: Extrait du recensement des enjeux en zone inondable identifiés dans le TRI d'Alès en 2012

			Scénario fréquent 10 – 30 ans			Scénario moyen 100-300 ans			Scénario extrême >1000 ans		
	Habitants permanents en 2010	Taux d'habitants saisonniers	Habitants permanents impactés	Nombre minimum	Nombre maximum d'emplois	Habitants permanents impactés	Nombre minimum d'emplois	Nombre maximum d'emplois	Habitants permanents impactés	Nombre minimum d'emplois	Nombre maximum d'emplois
ALES	41432	0,1	28	<50	<50	1456	1470	2559	2590	3593	6424
BRANOUX-LES-TAILLADES	1336	0,7	<20			31	<50	<50	60	<50	<50
CENDRAS	1930	0,6				26			50	<50	<50
LA GRAND-COMBE	5150	0,1				158	<50	74	275	<50	99
LES SALLES-DU-GARDON	2551	0,2				138			295		
SAINT-CHRISTOL-LES-ALES	6617	0,1	<20	50	99	35	57	112	37	58	114
SAINT-HILAIRE-DE-BRETHMAS	4160	0,1	<20			29	<50	<50	34	85	162
SAINT-MARTIN-DE-VALGALGUES	4162	0	<20	<50	<50	156	<50	<50	224	<50	<50
SAINTE-CECILE-D'ANDORGE	564	0,8				<20	<50	<50	<20	120	219

Les limites de l'enveloppe inondable maximale obtenue avec CARTINO pour une période de retour de la crue estimée à 1000 ans sont présentées en Figure 5.2. Cette enveloppe s'étend sur 69 communes au total dont la liste est disponible en Annexe F. Pour plus de simplicité dans l'analyse de nos résultats, nous référerons à ce territoire comme au territoire « Gard » dans ce chapitre.

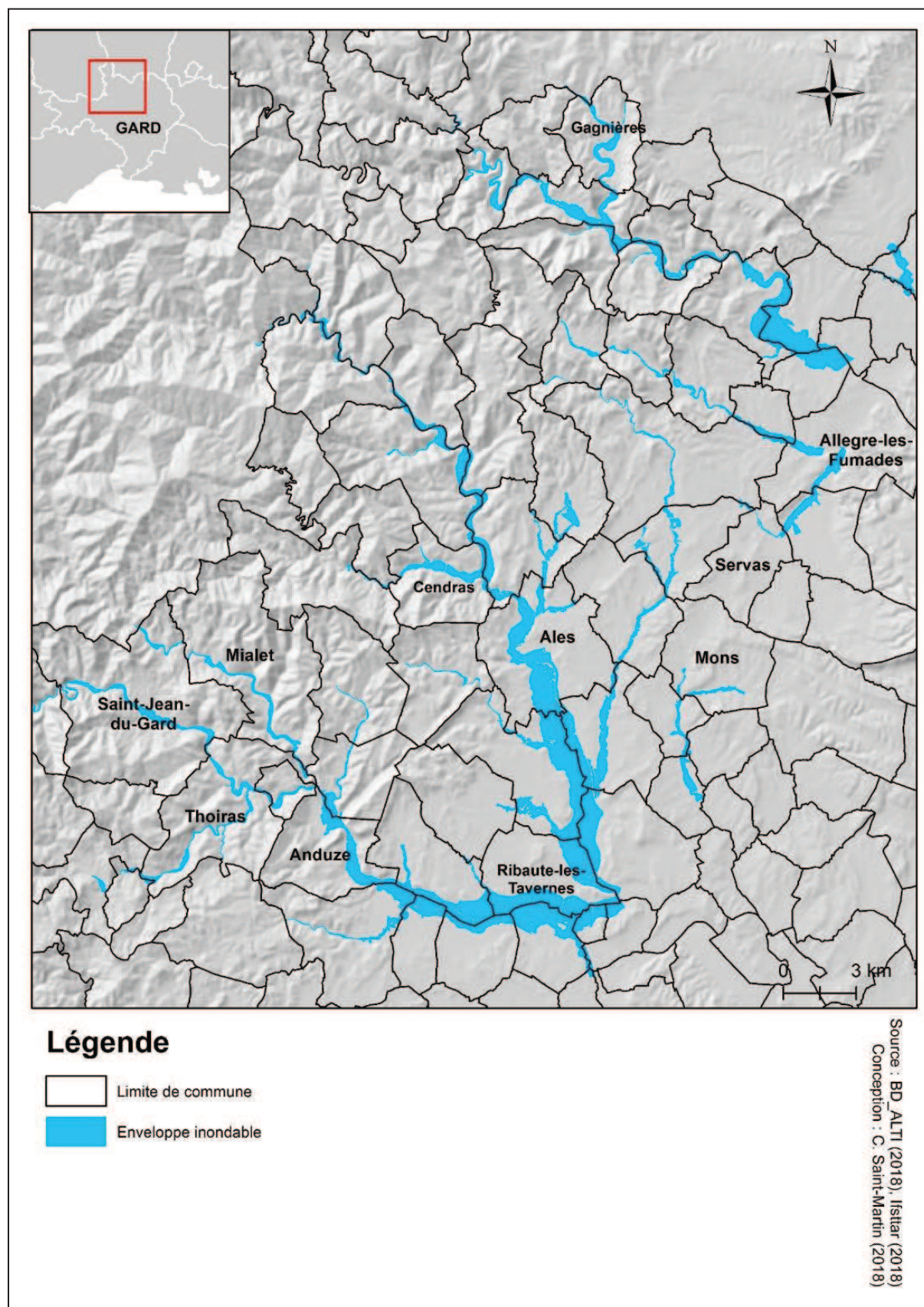


Figure 5.2 : Carte de l'enveloppe inondable maximale disponible pour le bassin des Gardons avec la méthode CARTINO (TR1000)

1.2. Département du Var : L'Argens

Le bassin-versant de l'Argens draine quasi la moitié du département du Var. Tout comme le bassin des Gardons, il est particulièrement vaste avec une surface supérieure à 2 500km². Sous l'influence d'un climat méditerranéen, il présente un régime très contrasté entre de longs étiages l'été et des crues violentes à l'automne. Ces dernières années, ce bassin a connu une importante croissance démographique entraînant une multiplication des enjeux présents en zone inondable, notamment sur sa partie littorale comme cela est visible dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2: Extrait du recensement des enjeux en zone inondable identifiés dans le TRI Est-Var en 2013

	Habitants permanents en 2010	Taux d'habitants saisonniers	Scenario fréquent 10 – 30 ans			Scenario moyen 100-300 ans			Scenario extrême >1000 ans		
			Habitants permanents impactés	Nombre minimum d'emplois impactés	Nombre maximum d'emplois impactés	Habitants permanents impactés	Nombre minimum d'emplois impactés	Nombre maximum d'emplois impactés	Habitants permanents impactés	Nombre minimum d'emplois impactés	Nombre maximum d'emplois impactés
CHATEAUDOUBLE	465	0,93	0	0	0	64	4	7	79	4	7
DRAGUIGNAN	36391	0,09	0	0	0	8978	5139	8175	10715	7383	11303
FREJUS	51839	1,8	10065	1481	2820	6499	1398	2618	22654	3710	7032
LA MOTTE	2930	0,75	0	0	0	256	33	56	317	33	56
LE MUY	9050	0,84	0	0	0	814	210	407	1132	221	426
LES ARCS	6515	0,43	0	0	0	421	108	213	316	119	229
PUGET-SUR-ARGENS	6587	1,24	50	9	14	315	143	248	661	684	1298
ROQUEBRUNE-SUR-ARGENS	12822	3,22	165	66	131	662	455	895	811	501	990
TRANS-EN-PROVENCE	5531	0,18	0	0	0	904	334	627	1045	432	830
VIDAUBAN	10165	0,36	0	0	0	1247	25	45	2532	517	857

Les crues sont fréquentes dans ce bassin mais certaines, particulièrement violentes, ont profondément marqué ce territoire. On peut notamment citer les crues de Juin 2010, novembre 2011 et novembre 2014. Les limites de l'enveloppe inondable maximale obtenue avec CARTINO (TR1000) pour ce territoire sont présentées en Figure 5.3. Cette enveloppe croise 28 communes au total dont la liste est disponible en Annexe F. Pour plus de praticité dans l'analyse de nos résultats, nous référerons à ce territoire comme au territoire « Var » dans ce chapitre.



Figure 5.3 : Carte de l'enveloppe inondable maximale disponible pour le bassin de l'Argens avec la méthode CARTINO (TR1000)

1.3. Département des Alpes-Maritimes : le Riou de l'Argentière, la Grande Frayère et la Brague

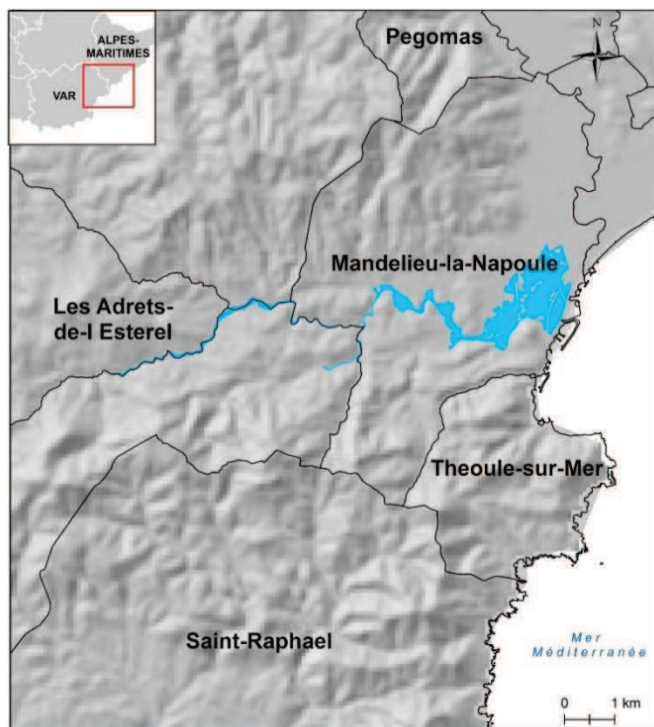
Les bassins-versants du Riou de l'Argentière, de la Grande Frayère et de la Brague sont situés dans le TRI de Nice dans le département des Alpes-Maritimes. Ce territoire est marqué par un relief très contrasté entre la montagne au nord et la plaine littorale au sud. Ces bassins sont caractérisés par des tailles réduites et des pentes prononcées qui les rendent propices aux écoulements rapides. En raison de leur forte exposition (Tableau 5.3), plusieurs inondations majeures ont marqué ce territoire et provoqué des dommages d'une ampleur exceptionnelle comme par exemple en novembre 1994, novembre 2014 et octobre 2015.

Dans le cadre de nos traitements et analyses, nous avons fait le choix de regrouper ces trois bassins-versants dans une seule zone d'étude. En effet, leur taille est plus limitée que celles des bassins des Gardons et de l'Argens avec 68km² pour la Brague, 22km² pour la Grande Frayère et 47km² pour le Riou de l'Argentière (Direction Territoriale Méditerranée du Cerema 2015). De plus, en raison de leur proximité géographique immédiate, ils partagent des conditions climatiques et hydrologiques similaires.

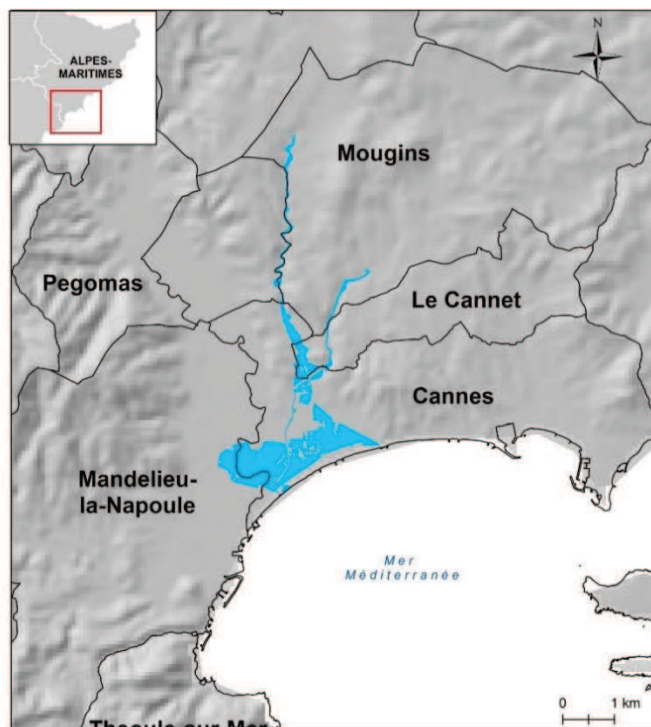
Tableau 5.3: Extrait du recensement des enjeux en zone inondable identifiés dans le TRI de Nice en 2013

	Habitants permanents en 2010	Taux d'habitants saisonniers	Scenario fréquent 10 – 30 ans			Scenario moyen 100-300 ans			Scenario extrême >1000 ans		
			Habitants permanents impactés	Nombre minimum d'emplois impactés	Nombre maximum d'emplois impactés	Habitants permanents impactés	Nombre minimum d'emplois impactés	Nombre maximum d'emplois impactés	Habitants permanents impactés	Nombre minimum d'emplois impactés	Nombre maximum d'emplois impactés
Antibes	74120	1,36	299	556	936	349	563	929	585	686	1161
Biot	9449	0,54	397	69	129	331	60	103	651	109	201
Cannes	73234	2,06	60	133	276	1907	2573	4499	111	940	1770
Grasse	51036	0,18	0	< 5	< 5	0	<5	<5	0	<5	<5
La Roquette-sur-Siagne	4962	0,17	92	70	121	401	269	519	255	240	470
Le Cannet	42320	0,51	0	< 5	<5	54	16	28	0	<5	<5
Mandelieu-la-Napoule	22203	2,09	1414	4139	5861	6076	5239	7534	5253	4811	7177
Mougins	18917	0,52	0	< 5	<5	<20	<5	<5	0	<5	<5
Vallauris	28252	1,01	0	< 5	<5	0	<5	<5	0	<5	<5

Les limites de l'enveloppe inondable maximale obtenue avec CARTINO (TR1000) pour ce territoire sont présentées par bassin en Figure 5.4. Cette enveloppe est plus réduite que pour les départements du Gard et du Var puisqu'elle ne couvre que 12 communes au total dont la liste est disponible en Annexe F. Pour plus de praticité dans l'analyse de nos résultats, nous référerons à ce territoire comme au territoire « Alpes-Maritimes » dans ce chapitre.



Argentière



Frayère



Brague

Figure 5.4 : Carte de l'enveloppe inondable maximale disponible pour les bassins de l'Argentière, de la Frayère et de la Brague avec la méthode CARTINO (TR1000)

2. Evaluation de la méthode dans les zones d'étude

L'objectif de toute méthode d'avertissement est de fournir une information sur un événement à venir avec le plus d'efficacité possible. Afin de déterminer la fiabilité d'une méthode d'avertissement, il est donc nécessaire d'évaluer la pertinence des informations qu'elle fournit.

Selon le type de méthode d'avertissement en question : déterministe ou probabiliste, il existe plusieurs types d'évaluation issus pour la plupart du domaine de la météorologie. Ces évaluations s'appuient sur des critères qui peuvent être répartis en 2 familles :

- **Les critères graphiques** : il s'agit de comparer les valeurs observées et simulées d'une variable donnée sur la base d'une même représentation graphique. Nous les utiliserons notamment pour notre évaluation événementielle en 4^e partie de ce chapitre.
- **Les critères numériques** : il s'agit de comparer les valeurs observées et simulées d'une variable donnée sur la base de scores numériques. Nous utiliserons principalement ce type de critère en raison de leur objectivité et caractère synthétique.

Les critères d'évaluation numériques sont particulièrement nombreux et dépendent de l'objectif poursuivi. Dans le cadre de la thèse, il s'agit de comparer l'émission d'un « avertissement » pour une inondation imminente présentant un haut risque de dommages avec la présence ou non de dommages observés après à la crue. Pour cela, nous avons eu recours à une approche utilisée notamment en prévision météorologique : les tables de contingence.

Evaluations précédentes de la méthode AIGA

Defrance (2014) a proposé une première évaluation de la méthode AIGA seule par le biais de tables de contingence dans le cadre de sa thèse. Son approche a consisté à mettre en relation le débit modélisé du cours d'eau et des données de dommages issues de rapports des services de Restauration des Terrains de Montagne (RTM).

Or, cette méthode s'appuyait sur 3 postulats discutables :

- Postulat 1 : il existe un lien entre la sévérité de l'aléa et les dommages subis, donc deux niveaux de sévérité similaires entraînent les mêmes dommages,
- Postulat 2 : il n'y a pas d'évolution dans l'occupation du sol. Ce postulat exclut donc qu'il puisse y avoir un changement dans l'occupation du sol entre deux événements de crue.
- Postulat 3 : la base de données sur les dommages utilisée est exhaustive et homogène. Ce postulat exclut donc le fait que certains dommages aient pu ne pas être relevés.

Dans la thèse, nous faisons également le postulat 1 : à niveau d'indice de risque comparables, les dégâts observés doivent être similaires. En revanche, concernant les postulats 2 et 3, nous apportons des éléments nouveaux par rapport à la thèse de Defrance. Tout d'abord, nous prenons explicitement en compte l'occupation du sol dans le calcul de notre indice de risque. De plus, comme nous l'avons vu dans le Chapitre 3, le risque de dommages peut être facilement réévalué dans la mesure où les données d'occupation du sol sont disponibles.

Ensuite, concernant le postulat 3, nous estimons que les bases de données sur les dommages en notre possession sont plus exhaustives que celle des rapports RTM utilisée par Defrance. En effet, dans le cas des RTM, des dommages pouvaient ne pas être signalés car trop isolés (glissement sur le talus d'une route peu fréquentée), et des décalages ont été constatés entre la date renseignée de leur découverte et la date réelle du dommage. Enfin, les rapports RTM ne concernaient pas uniquement des enjeux matériels et pouvaient renseigner des dommages aux enjeux environnementaux (impact sur la végétation) que nous ne cherchons pas à évaluer ici.

Ce chapitre va donc s'intéresser à démontrer l'apport de la prise en compte de la vulnérabilité territoriale pour la qualification du risque de dommages, en comparaison de la qualification du seul aléa crue.

2.1. Tables de contingence

Utilisation en épidémiologie

Une table de contingence est une façon de comparer et de tester la relation statistique entre des séries de données issues du comptage d'individus répartis en différentes catégories. Celles-ci sont définies au moyen d'une ou de plusieurs variables qui correspondent à autant de dimensions de la table.

Originellement, cette approche est utilisée dans le domaine de la médecine en épidémiologie afin de mesurer la sensibilité et la spécificité de tests pour le diagnostic de maladies. La sensibilité d'un test de diagnostic se définit comme son aptitude à fournir une réponse positive chez un individu infecté tandis que sa spécificité correspond à son aptitude à fournir une réponse négative chez un individu sain.

Deux populations d'individus sont alors testées, l'une infectée par la maladie et l'autre saine (Tableau 5.4). Si le test est totalement fiable, il ne fournira que des « vrais positifs » pour la population infectée et uniquement des résultats « vrais négatifs » pour la population saine. Cependant, si le test présente un biais, il pourra également fournir des résultats de « faux positifs » pour des individus sains et des résultats de « faux négatifs » pour des individus infectés.

Tableau 5.4 : Présentation simplifiée d'un test de diagnostic en épidémiologie

		Situation réelle	
		Individu infecté	Individu sain (non-infecté)
Réponse du test	Test positif	Vrai positif	Faux positif
	Test négatif	Faux négatif	Vrai négatif

Utilisation pour les systèmes d'alerte

Bien que cette approche ait été utilisée par de nombreux scientifiques avant lui, Schaefer (1990) fut l'un des premiers à réglementer l'utilisation de scores de vérification pour l'évaluation de l'efficacité des systèmes d'alerte. Si l'on considère une chronique d'alertes, pour lesquelles il ne peut y avoir que deux alternatives possible (alerte, pas d'alerte), il est alors possible d'évaluer sa performance à partir d'une chronique « d'évènements » de longueur égale. Pour cela, nous avons recours à un comptage du nombre d'alerte correspondant aux profils suivants :

- **HIT** ou détection correcte : comme le nombre d'évènements survenus qui ont été prévus par le système d'alerte,
- **FA** ou fausse détection : comme le nombre d'évènements non survenus mais qui ont été prévus par le système d'alerte,
- **MISS** ou détection manquée : comme le nombre d'évènements survenus mais qui n'ont pas été prévus par le système d'alerte,
- **Cn** ou non détection correcte : comme le nombre d'évènements non survenus qui n'ont pas été prévus par le système d'alerte.

A partir de ces 4 profils, il est possible de remplir un tableau de contingence tel que celui présenté dans le

Tableau 5.5. La classification des différents scores obtenus par le système d'alerte va permettre de calculer plusieurs critères de performance de ce système.

Tableau 5.5 : Table de contingence des alertes

	Evènement observé	Pas d'évènement observé
Alerte	HIT	FA
Absence d'alerte	MISS	Cn

POD : Probabilité de détection (Probability of Detection)

La **probabilité de détection** notée POD correspond au rapport du nombre d'évènements observés et prévus par le système (HIT) sur le nombre total d'évènements observés (somme du nombre de HIT et MISS). Ce premier indice permet donc d'évaluer la capacité du système d'alerte à détecter des évènements. Cependant il ne peut pas évaluer la performance du système car il ne prend pas en compte les fausses alertes (FA). Le score optimal de cet indice est 1.

$$POD = \frac{HIT}{HIT + MISS}$$

POFD : Probabilité de fausse détection (Probability of False Detection)

La **Probabilité de fausse détection** notée POFD correspond au rapport du nombre d'évènements non observés mais prévus par le système (FA) sur le nombre total d'évènements non-observés (somme du nombre de Cn et FA). Cet indice permet donc d'évaluer la marge d'erreur du système d'alerte. Le score optimal de cet indice est 0.

$$POFD = \frac{FA}{Cn + FA}$$

FAR : Taux de fausses alarmes (False Alarm Rate)

Le **taux de fausse alerte** noté FAR correspond au rapport du nombre d'évènements non observés mais prévus par le système (FA) sur le nombre total d'alertes émises (somme du nombre de HIT et FA). Cet indice permet donc d'évaluer la capacité du système d'alerte à ne pas tenir compte des non-évènements. Le score optimal de cet indice est 0.

$$FAR = \frac{FA}{HIT + FA}$$

On peut noter que le FAR se distingue du POFD par le dénominateur utilisé : le nombre total d'alertes émises par le système pour le FAR (HIT+FA), et le nombre « d'événements » sans alerte observée (Cn+FA, c'est-à-dire le nombre d'individus sains si on se réfère à l'exemple de l'épidémiologie) pour le POFD.

CSI : Critère de qualité (Critical Success Index)

Le **critère de qualité** noté CSI correspond au rapport du nombre d'événements observés et prévus par le système (HIT) sur la somme des événements observés (HIT et MISS) et des fausses détections (FA). Ce dernier indice permet de quantifier la qualité du dépassement d'un seuil d'avertissement. Le score optimal de cet indice est 1.

$$CSI = \frac{HIT}{HIT + MISS + FA}$$

Dans la suite, le CSI nous servira, selon le type d'évaluation effectuée à déterminer le « meilleur » seuil d'alerte, propre à la méthode AIGA seule, et propre à la méthode faisant intervenir notre indice de risque.

Il faut cependant noter que le CSI ne constitue pas un critère « absolu ». En effet, il accorde autant de poids aux fausses alarmes (FA) qu'aux non-détections (MISS). Or, dans un contexte d'avertissement de la survenue d'une inondation, les non-détections constituent la pire situation envisageable pour un gestionnaire de crise car l'ensemble de la chaîne de l'alerte s'en trouve compromise.

Certains gestionnaires pourraient donc être plus tolérants que d'autres à l'égard des fausses alertes, et donc souhaiter un seuil d'alerte plus bas que celui optimisé à l'aide du CSI. C'est la raison pour laquelle, des variantes du CSI (que nous n'utiliserons pas ici) existent, et permettent une pondération entre les MISS et les FA.

2.2. Courbe de ROC (Receiver Operating Curve)

Initialement utilisée lors de la Seconde Guerre mondiale pour détecter les signaux électriques associés aux radars, la courbe de ROC (Receiver Operating Curve) ou courbe caractéristique de performance est un graphique utilisé pour représenter la performance d'un système de détection pour différents seuils donnés. La courbe de ROC est notamment utilisée en statistiques afin de montrer l'évolution de la performance d'un modèle lorsque son seuil de discrimination évolue. Selon les domaines, son objectif est donc de répondre aux questions suivantes :

- En épidémiologie, le test de diagnostic détermine-t-il correctement si le patient est infecté ou sain ?
- En prévision des crues, le modèle d'avertissement détermine-t-il correctement la survenue d'une crue ?

Pour cela, la courbe de ROC représente le taux de vrais positifs (POD) en fonction du taux de faux positifs (POFD) pour différents seuils d'avertissement préalablement fixés. Ces taux ont été obtenus à partir des tables de contingence présentées dans la section précédente. La Figure 5.5 présente un exemple des courbes de ROC obtenues pour trois modèles aux performances distinctes.

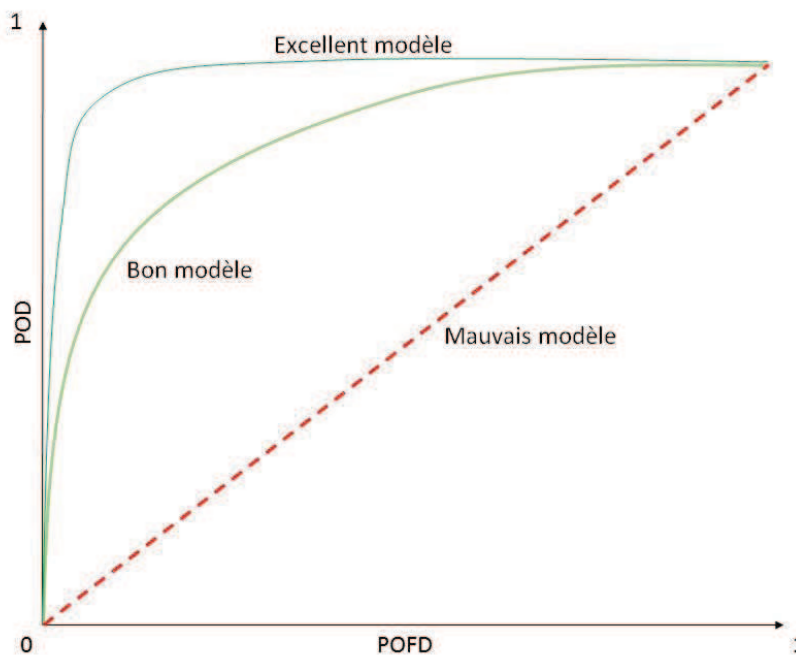


Figure 5.5: Comparaison des performances de 3 modèles à partir de la courbe de ROC

L'intérêt de la courbe de ROC est qu'elle ne dépend pas du choix du seuil, contrairement au CSI. Tous les seuils possibles sont testés, ce qui donne donc une image plus complète de la performance d'un modèle.

AUROC (Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve)

L'aire sous la courbe dite aussi AUROC (Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve) mesure l'aire à deux dimensions située sous la courbe ROC (Figure 5.6). Elle fournit une mesure des performances du modèle, pour chacun des seuils de discrimination choisis. La valeur de l'AUROC est comprise entre 0 et 1. Un système dont l'ensemble des avertissements sont faux aura un AUROC égal à 0 tandis que si tous ses avertissements sont corrects, son AUROC sera égal à 1. Dans le cas d'avertissements aléatoires, l'AUROC sera égal à 0,5. Il s'agit donc du seuil de significativité de ce critère.

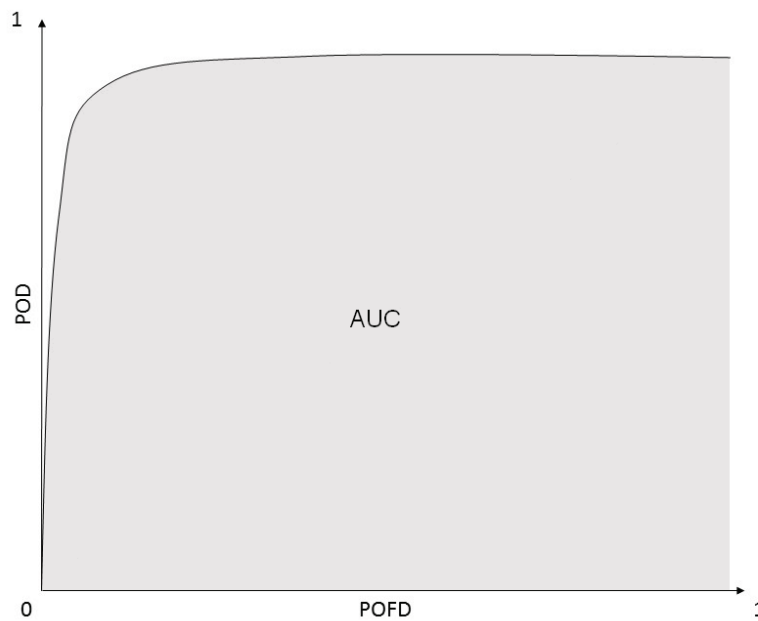


Figure 5.6: Exemple de AUROC

Afin de calculer cette aire sous la courbe, nous avons eu recours à la méthode d'intégration approchée dite aussi des trapèzes. Il s'agit d'une approximation en escalier de l'aire sous la courbe (Figure 5.7) afin d'obtenir la valeur la plus approchée possible de la réalité.

$$AUROC = \sum_{i=1}^n \frac{[f(a_i) + f(a_i + p)] \times p}{2}$$

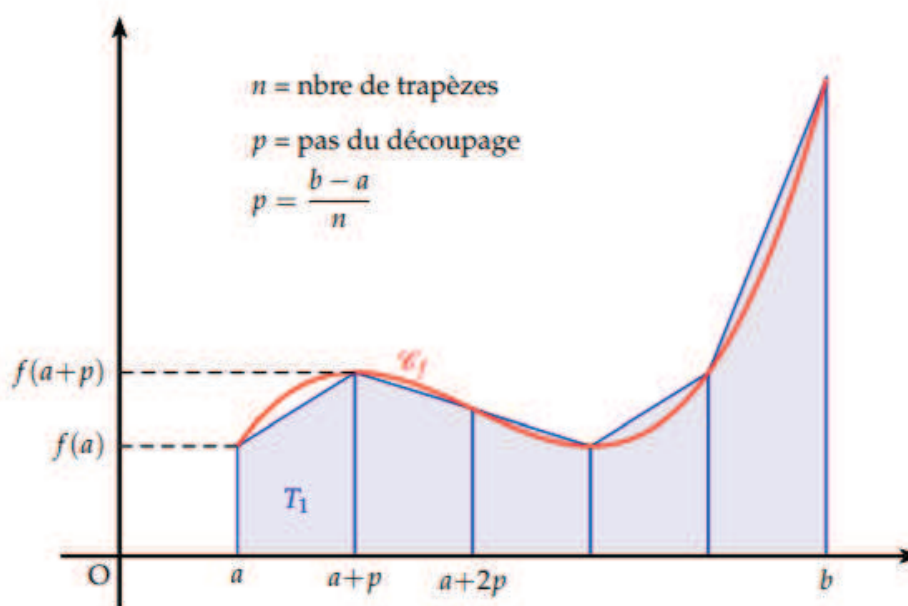


Figure 5.7 : Calcul de l'AUROC par la méthode d'intégration approchée

Les critères présentés dans cette section vont permettre d'évaluer de manière comparative les performances des avertissements issus de la méthode AIGA et ceux issus de notre méthode d'évaluation du risque de dommages. Pour cela, deux types de données de dommages ont été utilisées :

- Les arrêtés de Catastrophe Naturelle concernant les inondations, pour une évaluation continue sur la période 1998-2016 de la méthode à l'échelle communale,
- Les données de dommages matériels issus de la base de données DamaGIS (2011-2016) pour une évaluation spatiale de la méthode à l'échelle infra-communale.

Ces deux évaluations font l'objet des deux sections suivantes.

3. Evaluation exhaustive à partir de données CATNAT

Le Chapitre 4 a présenté les différentes bases de données existantes sur les dommages liés aux crues disponibles dans le sud de la France. La base de données GASPARD s'est avérée être la seule base de données à fournir une information de dommages exhaustive, et ce à l'échelle communale. Cette section va donc s'appuyer sur les données tirées de cette base afin de proposer une première évaluation comparative des méthodes AIGA et de l'indice de risque à l'échelle communale.

3.1. Données de validation : les arrêtés CATNAT

La base de données GASPARD recense par commune l'ensemble des arrêtés de Catastrophes Naturelles survenues depuis juillet 1982 en France. Ainsi nous avons pu extraire les données concernant les communes de nos 3 zones d'étude à partir de cette date.

Cependant, dans le cadre de la thèse nous ne nous intéressons qu'aux données concernant les inondations. Voilà pourquoi nous avons fait le choix de supprimer de notre extraction les phénomènes de type :

- Avalanche,
- Choc mécanique dû à l'action des vagues,
- Eboulement de terrain,
- Eboulement, glissement et affaissement de terrain,
- Eboulement rocheux,
- Effondrement de terrain,
- Effondrement/éboulement,
- Glissement de terrain,
- Tempête,
- Mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols,
- Séisme,
- Mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse,
- Mouvement de terrain,
- Lave torrentielle,
- Inondations par remontées de nappe phréatique,
- Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues,
- Inondations, coulées de boue et mouvements de terrain,
- Inondations, coulées de boue et glissements de terrain

Nous n'avons ainsi conservé que les phénomènes de type :

- Inondations et coulées de boue,
- Inondations, coulées de boue et effets exceptionnels dus aux précipitations.

Nous avons également fait le choix de retirer les arrêtés ne concernant qu'une commune isolée c'est-à-dire qu'aucune autre commune du département ou des départements voisins n'est concernée par un événement du même type. De plus, les données AIGA n'étant disponibles dans le cadre de la thèse que du 1^{er} août 1998 au 1^{er} août 2016, nous avons également supprimé de notre extraction les phénomènes antérieurs et postérieurs à ces deux dates.

Le tri des données CATNAT a permis d'obtenir un nombre d'arrêtés par commune compris entre 0 à 15 sur la période 1998-2016. Une représentation géographique de ces données par commune est disponible de la Figure 5.8 à la Figure 5.10 par zone d'étude.

Dans la zone d'étude du Var (Figure 5.8), on peut voir que 2 communes ne présentent aucun arrêté CATNAT. Il s'agit des communes de La Garde-Freinet et de Clapiers. Ainsi, faute de données d'évaluation, les performances de la méthode AIGA et de l'Indice de Risque n'ont pas pu être mesurées pour ces deux communes qui n'apparaissent donc pas dans nos analyses. Au contraire, les communes de Roquebrune-sur-Argens et Puget-sur-Argens présentent un nombre important d'arrêtés CATNAT inondation compris entre 9 et 11. Les communes de Fréjus, Sainte-Maxime et Vidauban ont quant à elles entre 5 et 8 arrêtés à leur actif. Les communes concernées par le plus d'arrêtés sont les communes littorales.

Dans la zone d'étude du Gard, le nombre d'arrêtés CATNAT par commune (Figure 5.9) est moins important que pour le Var. En effet, si toutes les communes ont au moins 1 arrêté CATNAT à leur actif, le nombre maximal d'arrêtés par commune est de 6. On peut voir que les communes concernées par un nombre important d'arrêtés sont des communes de petite taille comme par exemple Rousson, Saint-Florent-sur-Auzonnet, les Salles-du-Gardon, Générargues, Lézan, Lédignan ainsi qu'Anduze.

La zone d'étude des Alpes-Maritimes compte le plus d'arrêtés CATNAT par commune. La commune d'Antibes détient le record avec un nombre d'arrêtés compris entre 13 et 15. Ainsi, à l'exception de deux communes du Var, nous disposons de suffisamment d'arrêtés CATNAT par commune pour conduire une évaluation basée sur ces données.

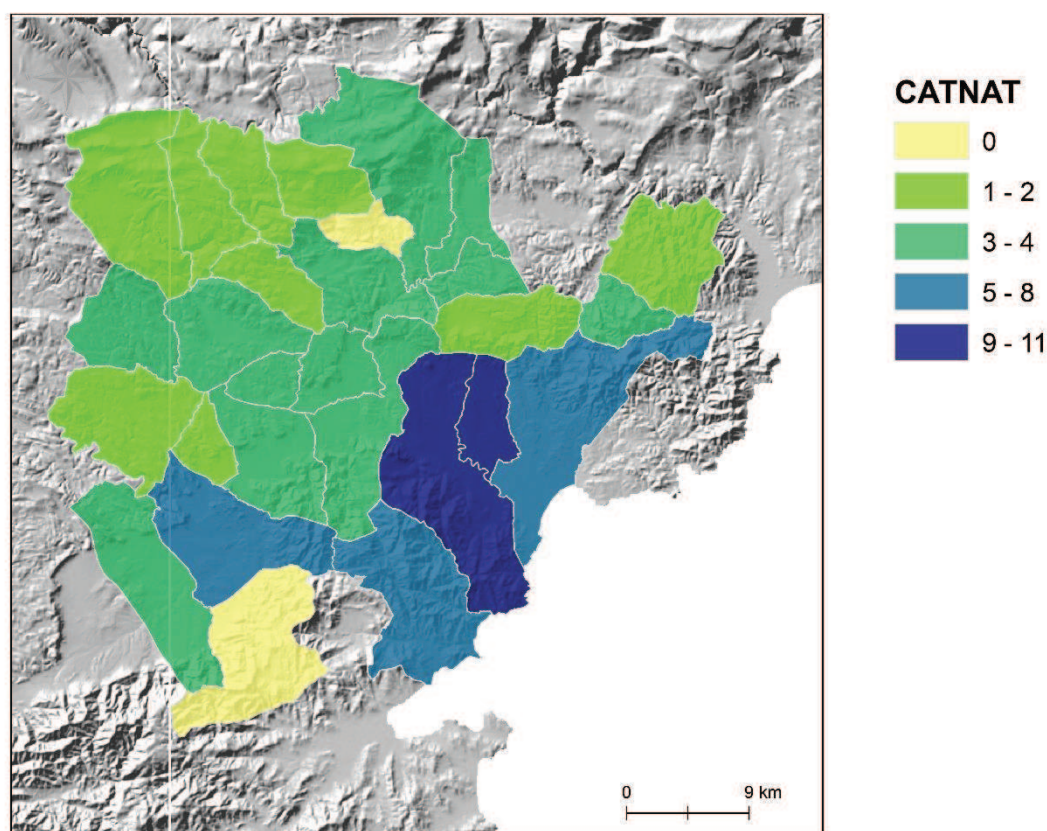


Figure 5.8: Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle de type inondation par commune (1998 – 2016) dans la zone d'étude du Var

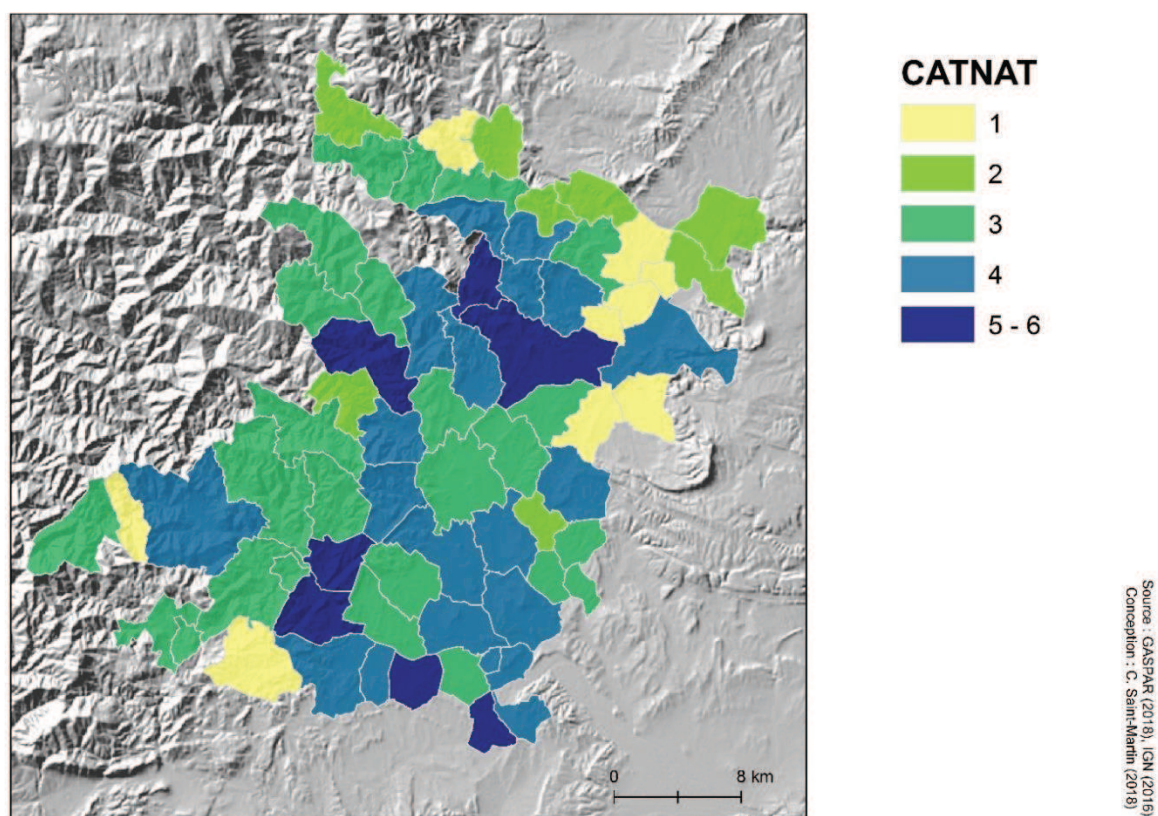


Figure 5.9: Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle de type inondation par commune (1998 – 2016) dans la zone d'étude du Gard

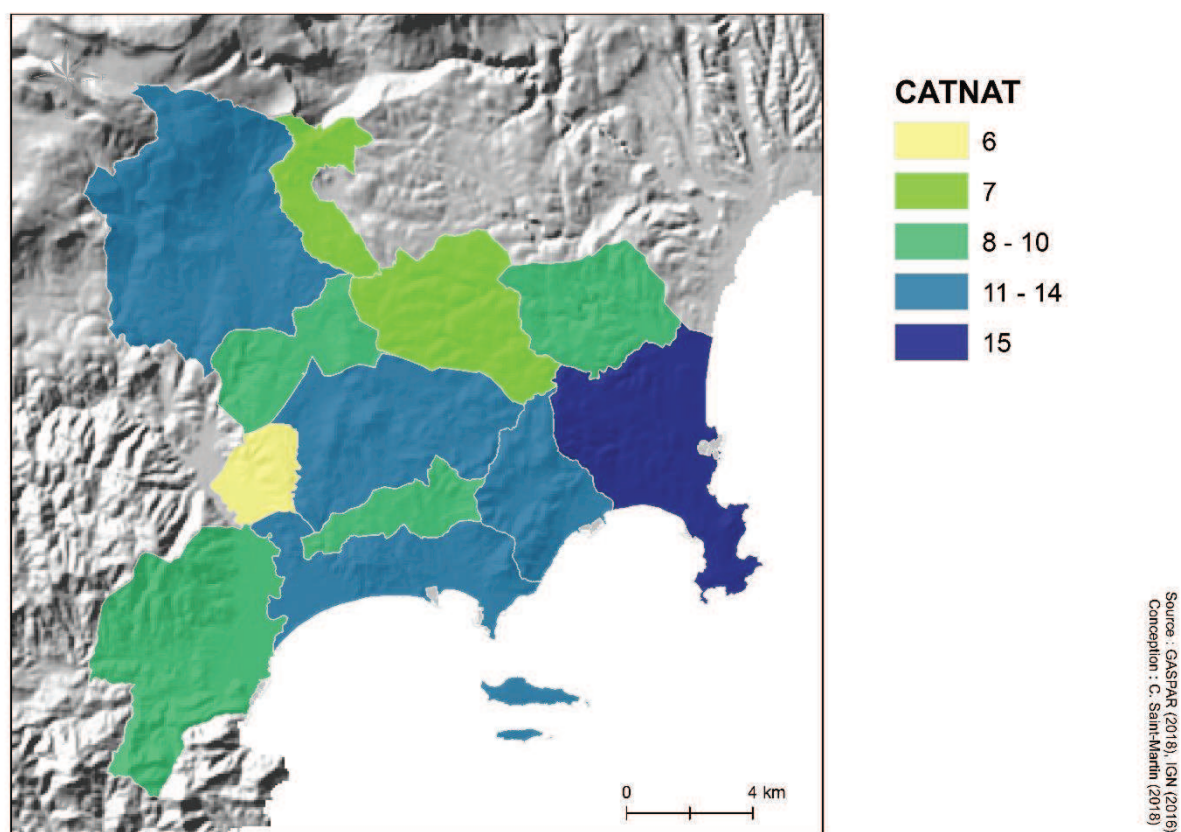


Figure 5.10: Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle de type inondation par commune (1998 – 2016) dans la zone d'étude des Alpes-Maritimes

3.2. Méthodologie

Cette section va s'attacher à décrire les différentes étapes qui ont mené au calcul des scores d'évaluation présentés dans les sections précédentes. Cette première évaluation s'appuie sur les données communales CATNAT. La même approche d'évaluation a été suivie pour l'évaluation des avertissements issus d'AIGA et ceux issus de notre indice de risque.

Scores sur AIGA

Les qualifications AIGA disponibles dans le cadre de la thèse correspondent à une période s'étalant du 1^{er} août 1998 au 1^{er} août 2016. Leur disponibilité est fonction de celle des pluies radars de Météo-France. Ainsi pour chaque tronçon de cours d'eau, on dispose d'une chronique horaire des qualifications de crue AIGA exprimée sous la forme d'une période de retour de la crue. Dans un premier temps, une sélection de données a été réalisée au sein de cette chronique horaire AIGA afin d'obtenir une information sur l'aléa aux mêmes résolutions spatiale et temporelle que les arrêtés CATNAT à savoir une donnée par commune et par jour.

Par tronçon de cours d'eau, la valeur journalière maximale de la qualification AIGA a été extraite afin d'obtenir par jour, la période de retour maximale de la crue estimée par AIGA. Nous avons ensuite extrait par commune la valeur AIGA maximale journalière entre tous les tronçons de cours d'eau situés dans une même commune, afin d'obtenir une période de retour estimée de la crue par jour et par commune. Par exemple, si pour un jour J une commune X présente 5 tronçons de cours d'eau dont les périodes de retour estimées de la crue s'étendent de 2 ans à 25 ans, la valeur AIGA retenue pour la commune X au jour J sera donc de 25 ans.

En parallèle, les arrêtés de catastrophe naturelle relatifs aux inondations ont été également extraits par commune à partir de la base de donnée GASPARD ; Nous les avons croisés à la chronique journalière AIGA obtenue précédemment par date. Au terme de ce croisement nous obtenons donc par commune une chronique journalière à la fois des avertissements AIGA maximaux mais également des arrêtés de catastrophe naturelle relatifs aux inondations.

Le Tableau 5.6 présente un extrait de ce croisement. La colonne CATNAT est renseignée de manière binaire. Pour chaque jour, cette colonne est complétée par un « NA » quand aucun n'arrêté CATNAT inondation ne concerne le jour en question, et par un « CATNAT » quand un arrêté CATNAT a été publié pour cette date. Dans le cas où un arrêté CATNAT concernerait une période de plusieurs jours, l'ensemble de ces jours est affecté de la mention « CATNAT » comme c'est le cas dans le Tableau 5.6 du 4 au 6 novembre 2011.

Tableau 5.6 : Extrait du croisement de la chronique journalière AIGA avec les arrêtés CATNAT pour la commune d'Antibes dans les Alpes-Maritimes

DATE	AIGA MAX	CATNAT
28/10/2011	1	NA
29/10/2011	1	NA
30/10/2011	1	NA
31/10/2011	1	NA
01/11/2011	1	NA
02/11/2011	1	NA
03/11/2011	1	NA
04/11/2011	1	CATNAT
05/11/2011	10,4	CATNAT
06/11/2011	27	CATNAT
07/11/2011	1,1	NA
08/11/2011	1,2	NA
09/11/2011	1,1	NA
10/11/2011	1	NA
11/11/2011	1	NA

La prochaine étape est une étude de sensibilité des scores de contingence en fonction du seuil d'alerte. Pour chaque commune, et un seuil donné, nous calculons les contingences HIT, MISS, FA ou Cn, chaque journée, comme illustré dans la

Figure 5.11.

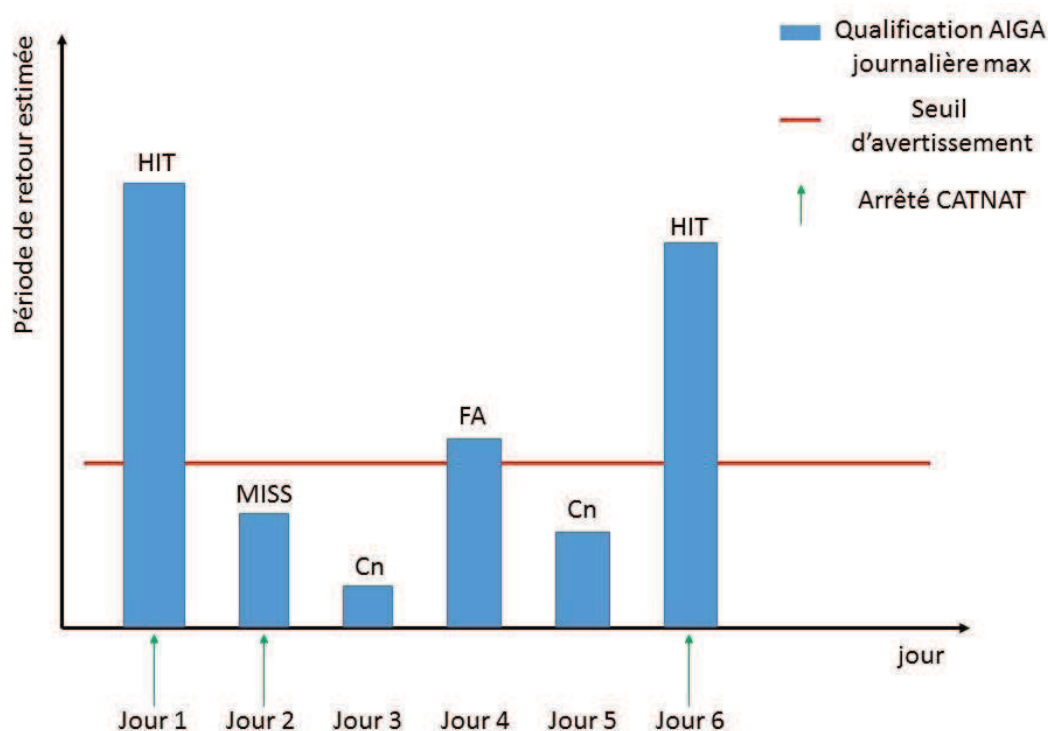


Figure 5.11: Calcul de scores à partir d'arrêtés CATNAT pour une chronique journalière de qualifications AIGA

A titre d'illustration le Tableau 5.7 reprend l'exemple de la commune d'Antibes présenté dans le Tableau 5.6. Une quatrième colonne nommée « SCORE » y renseigne le score obtenu par la méthode AIGA pour un seuil d'avertissement fixé à une période de retour estimée à 20 ans. On peut voir que l'avertissement a été efficace pour une seule date à savoir le 06/11/2011 ce qui s'exprime par un « HIT » tandis que le 05/11/2011 l'avertissement a manqué le CATNAT, ce qui s'exprime par un « Miss ».

Tableau 5.7 : Extrait de la chronique journalière des scores obtenus par la méthode AIGA à partir de données CATNAT pour un seuil d'avertissement fixé à TR=20 ans

DATE	AIGA MAX	CATNAT	SCORE
28/10/2011	1	NA	Cn
29/10/2011	1	NA	Cn
30/10/2011	1	NA	Cn
31/10/2011	1	NA	Cn
01/11/2011	1	NA	Cn
02/11/2011	1	NA	Cn
03/11/2011	1	NA	Cn
04/11/2011	1	CATNAT	Cn
05/11/2011	10,4	CATNAT	Miss
06/11/2011	27	CATNAT	HIT
07/11/2011	1,1	NA	Cn
08/11/2011	1,2	NA	Cn
09/11/2011	1,1	NA	Cn
10/11/2011	1	NA	Cn
11/11/2011	1	NA	Cn

Or, la base de données GASPAR renseigne les dates de début et de fin de chaque arrêté de catastrophe naturelle selon un évènement dans sa globalité. Ainsi, une commune peut être concernée par un arrêté CATNAT étendu sur trois jours même si elle n'a été concernée par l'évènement que le jour 3 ce qui est le cas de notre exemple en Tableau 5.7. Or il n'est pas rare que les épisodes méditerranéens s'étendent sur plusieurs jours (Chapitre 1). Voilà pourquoi nous avons pris le parti, lors d'un évènement CATNAT étendu sur plusieurs jours, de considérer que si un HIT est obtenu pour un des jours de la chronique, il sera renseigné pour l'ensemble de l'évènement.

A partir de cette évaluation journalière, une synthèse a ainsi pu être réalisée par commune pour 200 seuils d'avertissement choisis de manière à couvrir l'ensemble des valeurs possibles. Un récapitulatif par commune du nombre de HIT, MISS, FA et Cn atteint pour chacun des 200 seuils d'avertissement a donc été calculé. Ce récapitulatif a servi de base au calcul des scores de CSI, POD et FAR et POFD par seuil et par commune.

Ensuite, afin d'obtenir une synthèse de ces résultats par commune, nous réalisons deux opérations :

- La première consiste à construire la courbe de ROC décrite précédemment, à partir des 200 valeurs de POD et POFD obtenues, et de calculer l'aire sous la courbe (AUROC). Comme nous l'avons vu, plus le modèle est parfait, plus cette aire se rapproche de 1. Une valeur de 0,5 indique que le modèle n'a aucun pouvoir discriminant ;
- La seconde opération qui revient un peu au même est de regarder pour quel seuil on obtiendrait le meilleur CSI, et quelles seraient les valeurs de POD et FAR correspondantes. Cette opération revient en quelque sorte à « optimiser » un seuil d'alerte par commune, sur la base des CATNAT observées.

Scores sur l'Indice de risque (IR)

Exactement la même méthode a été appliquée pour l'indice de risque IR afin d'obtenir une chronique journalière du risque par commune.

De la même manière que pour les avertissements AIGA, nous avons ensuite croisé la chronique des arrêtés CATNAT inondation à la chronique journalière de risque obtenue précédemment. Au terme de ce croisement nous obtenons donc par commune une chronique journalière à la fois des valeurs de risque mais également des arrêtés de catastrophe naturelle relatifs aux inondations.

De la même façon, il va s'agir ensuite de sélectionner les différents seuils de risque pour lesquels l'efficacité de l'indice de risque va être évaluée avec les scores de vérification présentés dans les sections précédentes. Pour cela nous avons sélectionné l'ensemble des valeurs de risque obtenues par commune et nous avons calculé parmi elles deux-cent quantiles qui vont servir de seuils à l'évaluation de notre indice. Une fois nos 200 seuils identifiés, une évaluation journalière de l'indice de risque a été réalisée pour chacun des seuils, à partir des arrêtés CATNAT (Figure 5.12).

A partir de ces contingences journalières, une synthèse a pu être réalisée par seuil d'avertissement sur l'ensemble de la chronique. Un récapitulatif par commune du nombre de HIT, MISS, FA et Cn atteint pour chacun des 200 seuils d'avertissement a donc été obtenu. Ce récapitulatif a servi de base au calcul des scores de CSI, POD, FAR et POFD par seuil et par commune.

Comme précédemment, ces deux cents valeurs ont permis de calculer pour chaque commune la surface sous la courbe de ROC, et de déterminer une valeur de seuil « optimale » par rapport au CSI.

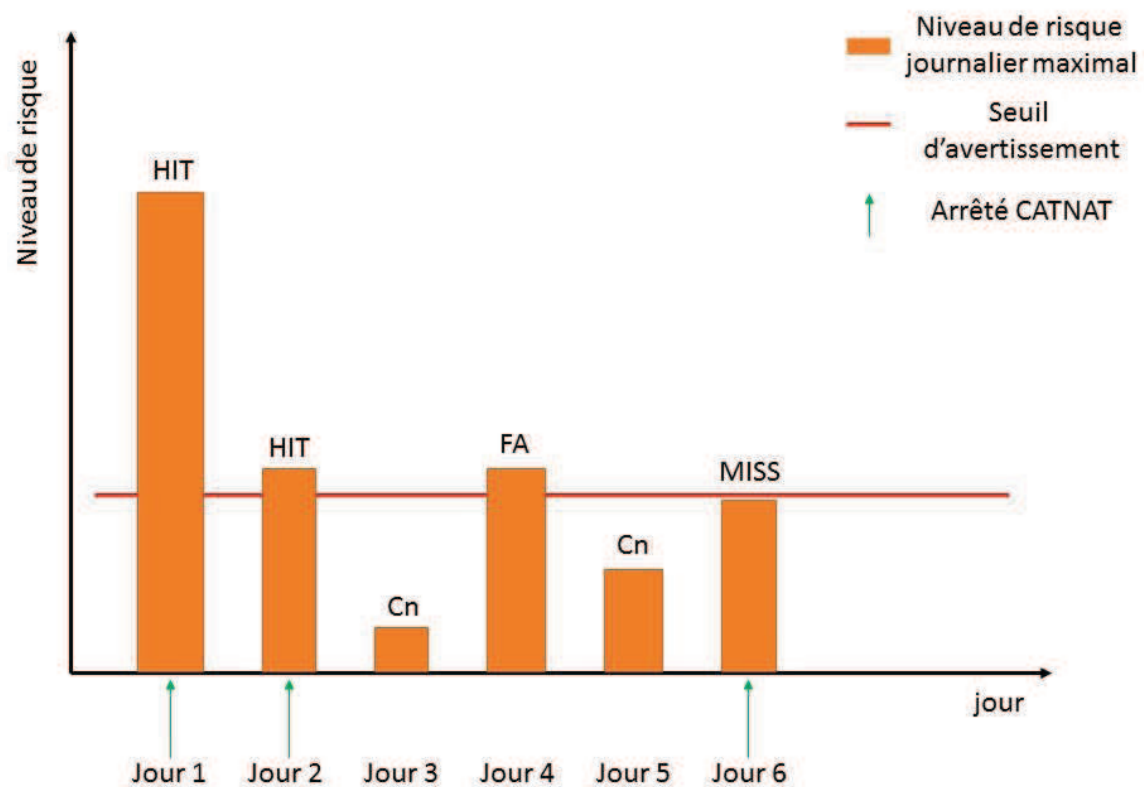


Figure 5.12: Calcul de scores à partir d'arrêtés CATNAT pour une chronique journalière d'évaluation du risque de dommages

3.3. Résultats de l'évaluation à partir des CATNAT

Afin de pouvoir analyser les résultats, nous avons représenté les scores de CSI et de AUROC des deux méthodes (AIGA puis l'indice de risque IR) sur les mêmes graphiques, pour les trois zones (Figure 5.13, Figure 5.14 et Figure 5.15, respectivement les Alpes-Maritimes, le Var et le Gard). Il est ainsi possible de comparer les résultats entre les zones, également entre les méthodes. Pour plus de lisibilité, nous avons trié l'ordre des communes du plus faible au plus fort score obtenus avec la méthode avec l'indice de risque IR.

Une première analyse des Figure 5.13, Figure 5.14 et Figure 5.15 montre que les résultats obtenus d'une méthode à l'autre (sans et avec IR) sont relativement similaires, que ce soit du point de vue du CSI que de la AUROC. Concernant les différences entre les zones, les résultats sont dans l'ensemble bons, avec par exemple une valeur médiane de CSI de 0,7 sur le Var et le Gard, et un peu moins bonne (0,54) sur les Alpes-Maritimes, ce qui reste très acceptable. Il est à noter cependant que du point de vue de l'AUROC, dans les Alpes-Maritimes la méthode avec IR l'emporte assez nettement.

Signalons que les valeurs de AUROC obtenues, proches de 1, sont liées au fait qu'ici le POFD est forcément très faible. En effet, au numérateur nous avons le nombre de jours où il n'y a pas eu de CATNAT soit les Cn (cf partie 2.1), qui reste dans tous les cas largement supérieurs aux fausses alertes, FA. Ces valeurs de AUROC sont donc à apprécier uniquement de manière comparative.

Cependant, ce qui saute aux yeux pour toutes les figures est un ensemble de 11 communes (2 dans les Alpes-Maritimes, 7 dans le Gard, et 2 dans le Var) pour lesquelles le CSI obtenu pour la méthode avec IR est nul ou proche de 0, alors que pour les mêmes communes le CSI obtenu par AIGA seul est bien supérieur. Le même constat peut être fait en analysant les courbes obtenues avec les surfaces AUROC, les mêmes communes présentent une AUROC proche de 0,5 ce qui signifie que le modèle n'a aucun pouvoir discriminant. L'identification de ces communes nous a amenés à nous intéresser à la cause de tels résultats qui sera explorée dans la prochaine section.

Alpes-Maritimes

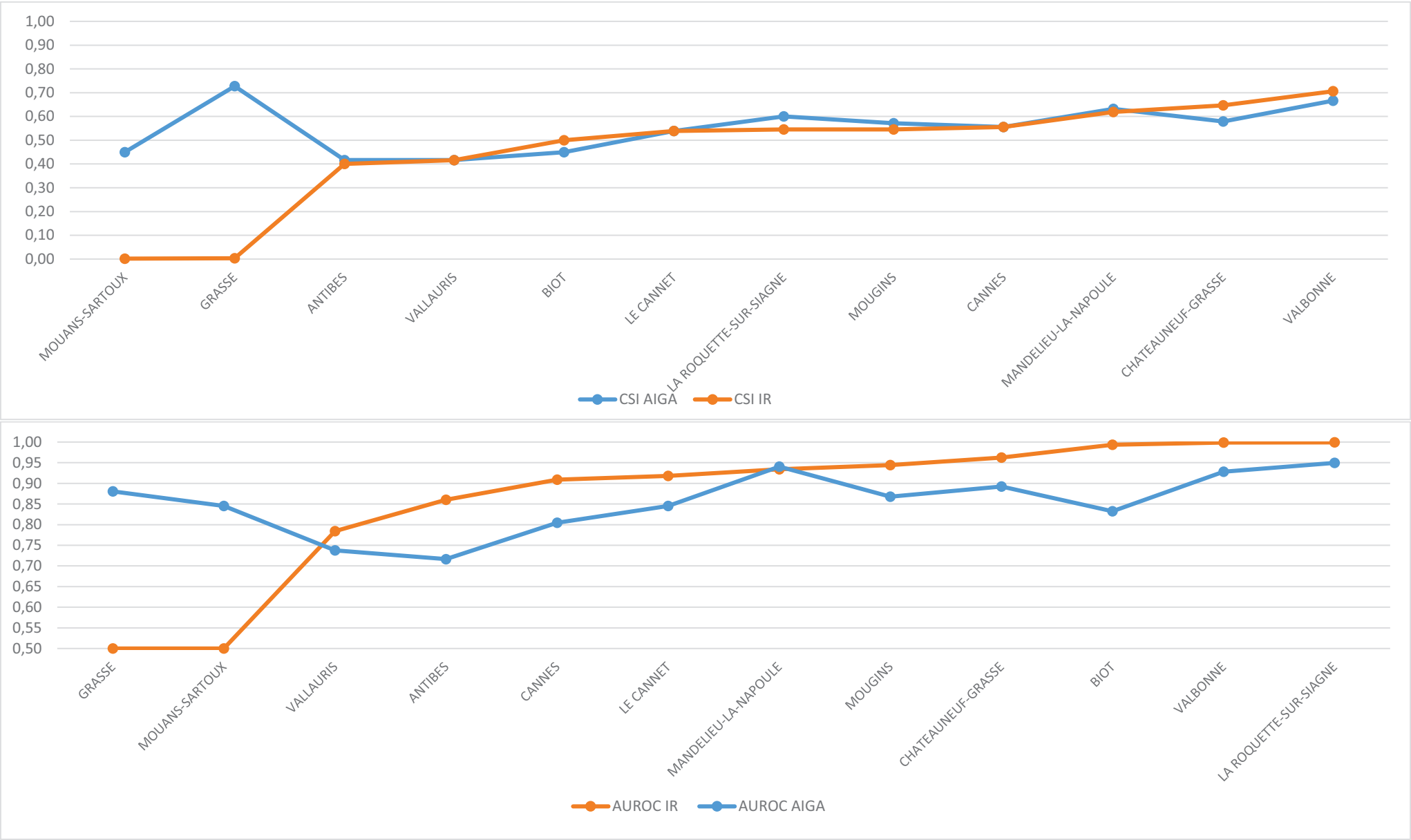


Figure 5.13 : Comparaison des scores CSI et AUROC obtenus avec la méthode AIGA et l'indice de risque à partir de données CATNAT pour les Alpes-Maritimes

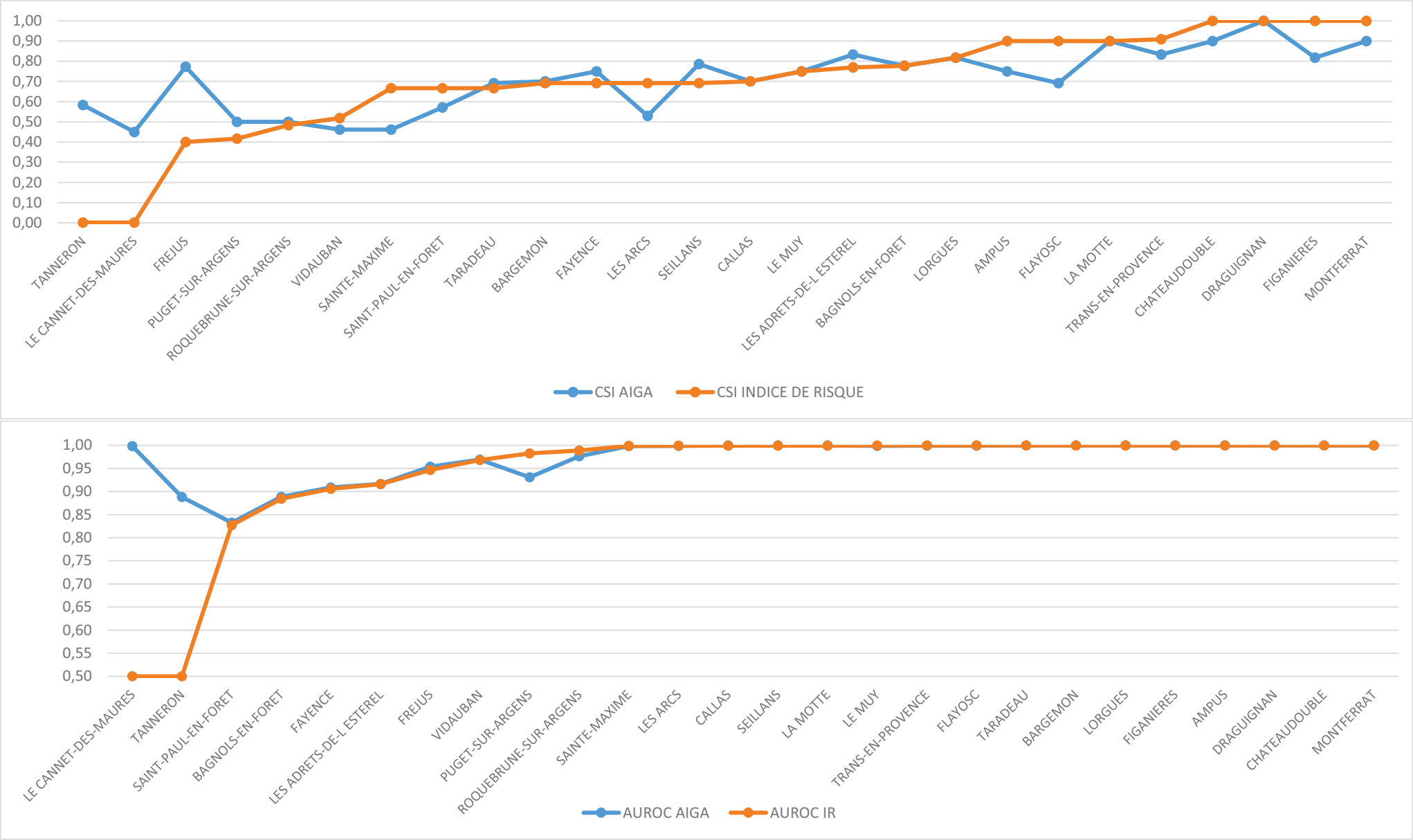


Figure 5.14 : Comparaison des scores CSI et AUROC obtenus avec la méthode AIGA et l'indice de risque à partir de données CATNAT pour le Var

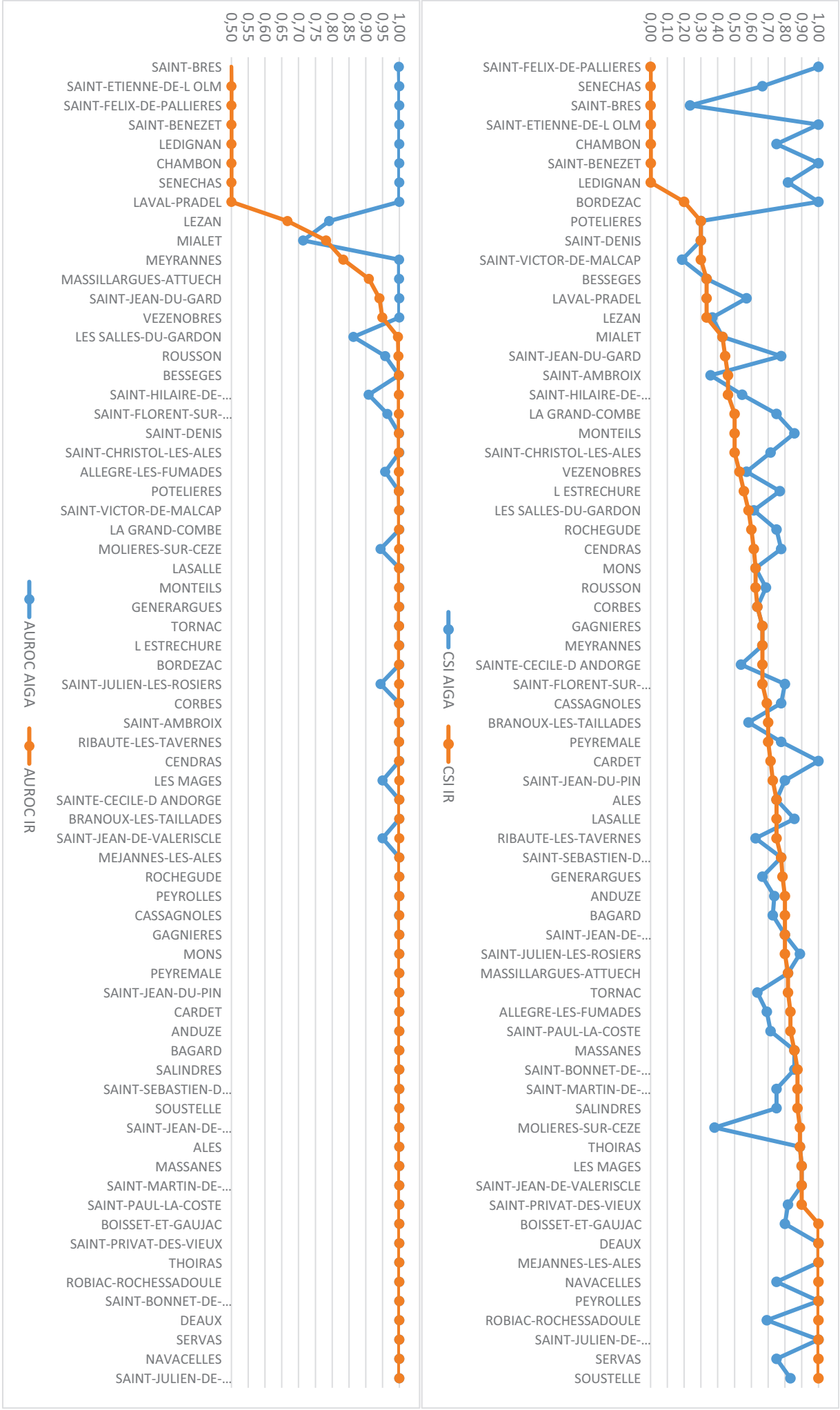


Figure 5.15 : Comparaison des scores CSI et AUROC obtenus avec la méthode AI-GA et l'indice de risque à partir de données CATNAT pour le Gard

3.4. Analyse des résultats

Afin d'expliquer les résultats obtenus sur les 11 communes identifiées précédemment, nous avons réalisé une analyse sur les enveloppes CARTINO fournies. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, l'utilisation des emprises inondables issues de la méthode CARTINO est associée à un certain nombre de limites. Nous pouvons notamment rappeler que ces dernières ne sont pas exhaustives dans notre zone d'étude car elles ne prennent pas en compte les affluents des cours d'eau principaux. De plus, les emprises CARTINO ne nous ont pas été fournies dans un but de traitement à l'échelle communale.

Afin d'évaluer de manière quantitative l'exhaustivité des données CARTINO, nous nous sommes appuyés sur les EAIP (cf Chapitre 3). Nous avons comparé les surfaces d'emprises inondables obtenues avec la méthode CARTINO pour une période de retour de la crue estimée à 1000 ans, avec les surfaces de l'EAIP, par commune. Cette comparaison est exprimée sous la forme d'un ratio $\text{CARTINO_TR1000/EAIP}$ présenté par commune pour nos 3 zones d'étude.

En croisant par commune les deux surfaces inondables issues de CARTINO et des EAIP, il ressort que CARTINO ne fournit pas de données exhaustives sur les emprises inondables dans plusieurs communes. En effet, le ratio CARTINO/EAIP est inférieur à 50% pour plus de 75% des communes du Var et des Alpes-Maritimes. Ce constat est plus nuancé pour les communes de la zone du Gard où il ne concerne 50% des communes (Annexe G).

Bien que l'EAIP tende nettement à surestimer la zone inondable des cours d'eau (Chapitre 3), nous pouvons nous interroger sur la pertinence du calcul des indices de risque avec des emprises inondables CARTINO faibles. Voilà pourquoi nous avons croisé les scores de CSI obtenus par commune avec le ratio CARTINO/EAIP exprimé en pourcentage par zone d'étude dans la Figure 5.16. Seules apparaissent les étiquettes des communes pour lequel le CSI est proche de 0, afin de pouvoir les comparer aux graphiques précédents tout en conservant de la lisibilité. Ce croisement montre que les 11 communes où la méthode avec l'IR pose problème possèdent un ratio CARTINO/EAIP inférieur à 10% environ.

Ainsi sur les 11 communes identifiées, les mauvaises performances de la méthode avec indice de risque proviennent probablement d'un problème sur le calcul des emprises CARTINO. N'ayant pas nous même réalisé ces enveloppes, nous n'avons pas poussé plus loin les investigations. L'IFSTTAR travaille actuellement à leur amélioration dans le cadre d'un projet en cours (projet PICS).

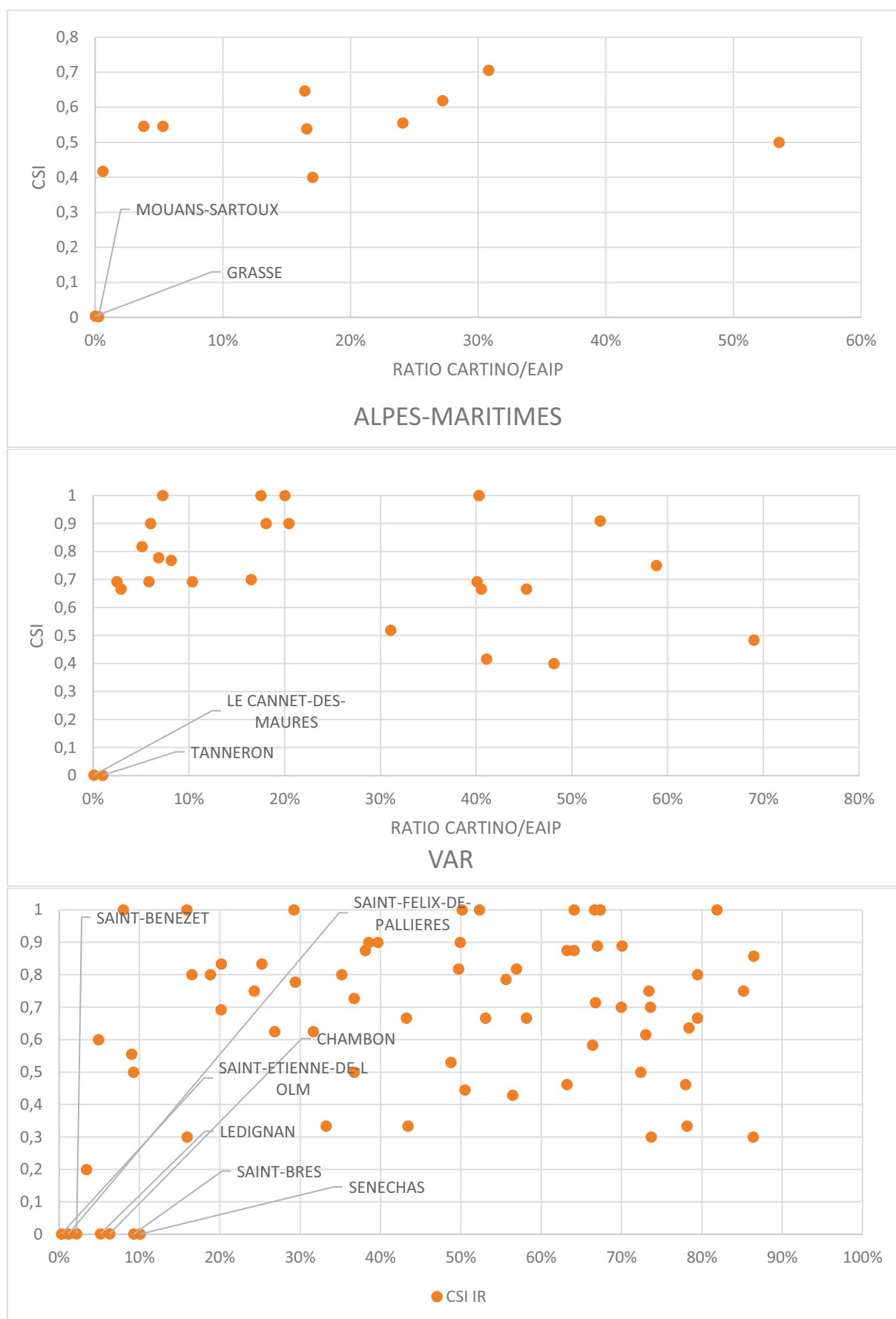


Figure 5.16 : CSI calculé par commune à partir de données CATNAT en fonction du ratio entre la surface d'emprise inondable CARTINO et EAIP

Afin de compléter ces résultats, les Figure 5.17, Figure 5.18 et Figure 5.19 représentent les indices FAR et POD obtenus par commune. Ils sont classés de manière croissante en fonction du CSI de chaque commune.

Sur ces mêmes graphes on peut voir que la méthode IR présente un POD et un FAR par commune meilleurs que ceux obtenus avec la méthode AIGA seule. De plus, en faisant abstraction des 11 communes pour lesquelles CARTINO pose problème, ces résultats sont encore plus nets, notamment pour le FAR dans les départements du Gard et du Var.

On peut ainsi conclure que l'indice de risque et la méthode AIGA fournissent des résultats assez similaires en termes de qualité de l'alerte et de taux de détection. Cependant, une véritable plus-value est apportée par l'indice de risque qui, au niveau du nombre de fausses alertes émises, diminue fortement.

Dans la prochaine section une analyse similaire sera menée mais cette fois par évènement afin de déterminer la plus-value de l'indice de risque à l'échelle du tronçon pour des évènements passés à partir des dommages tirés de la base DamaGIS.

Alpes-Maritimes

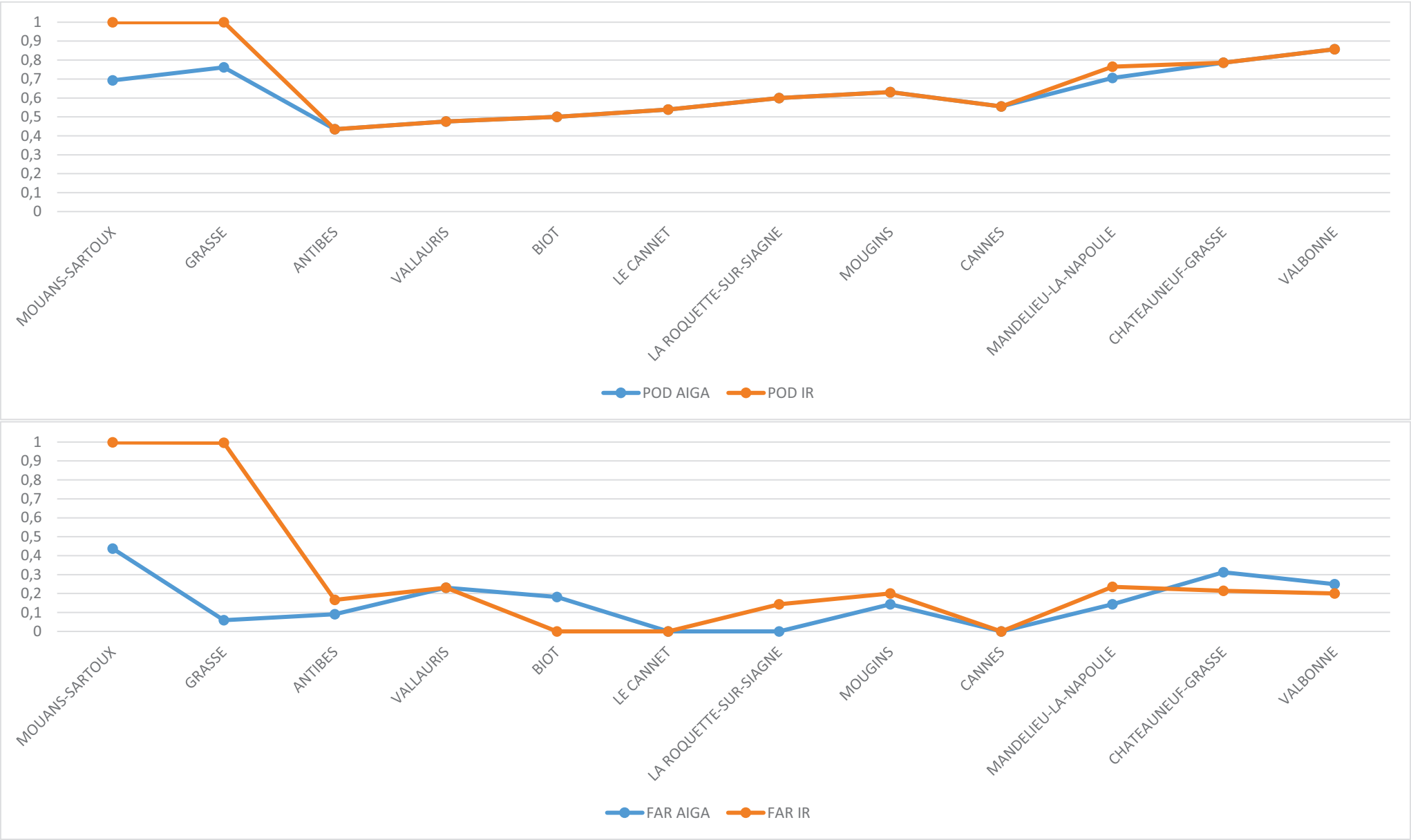


Figure 5.17 : Scores de POD et FAR classés par CSI croissant pour la zone d'études des Alpes-Maritimes

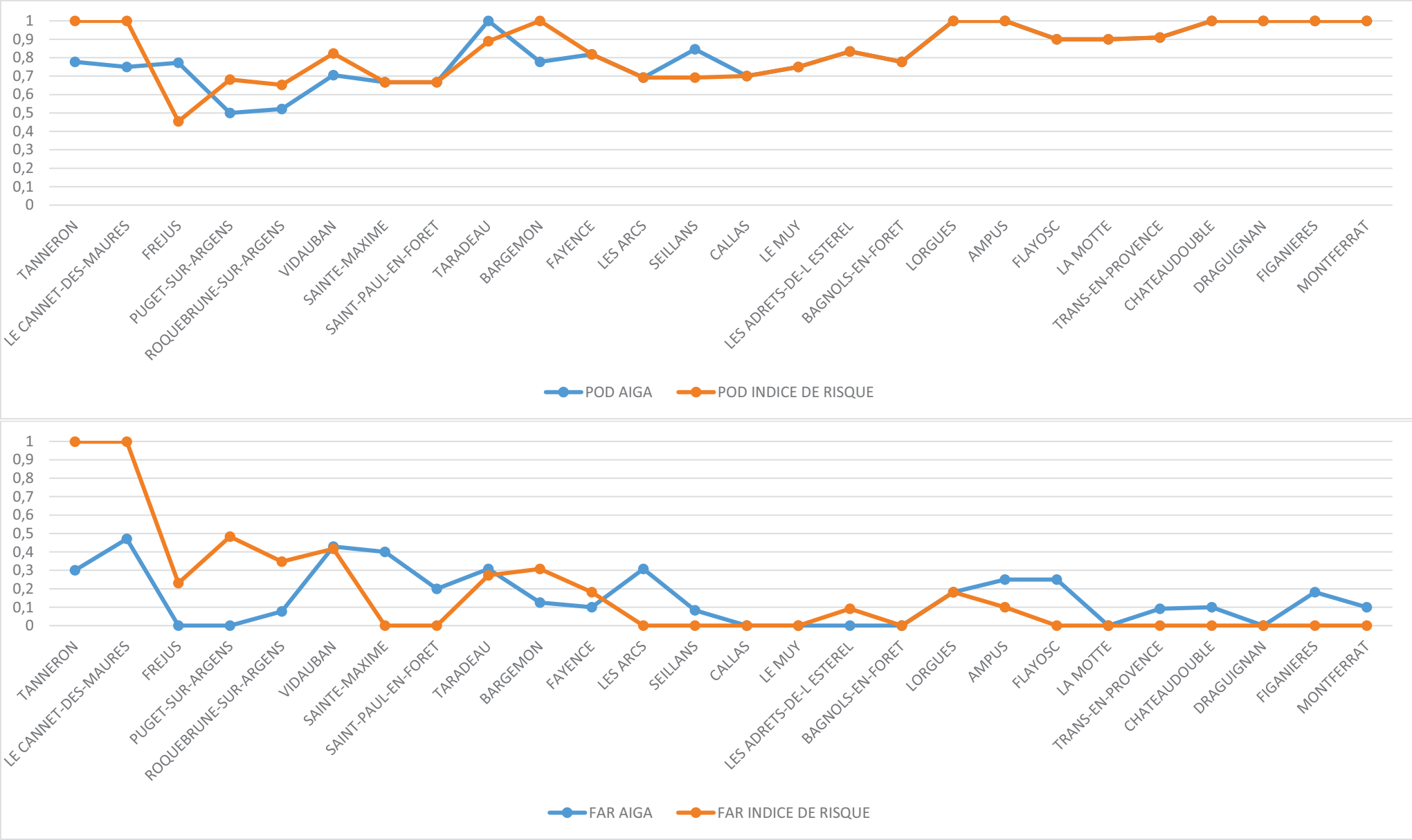


Figure 5.18 : Scores de POD et FAR classés par CSI croissant pour la zone d'études du Var

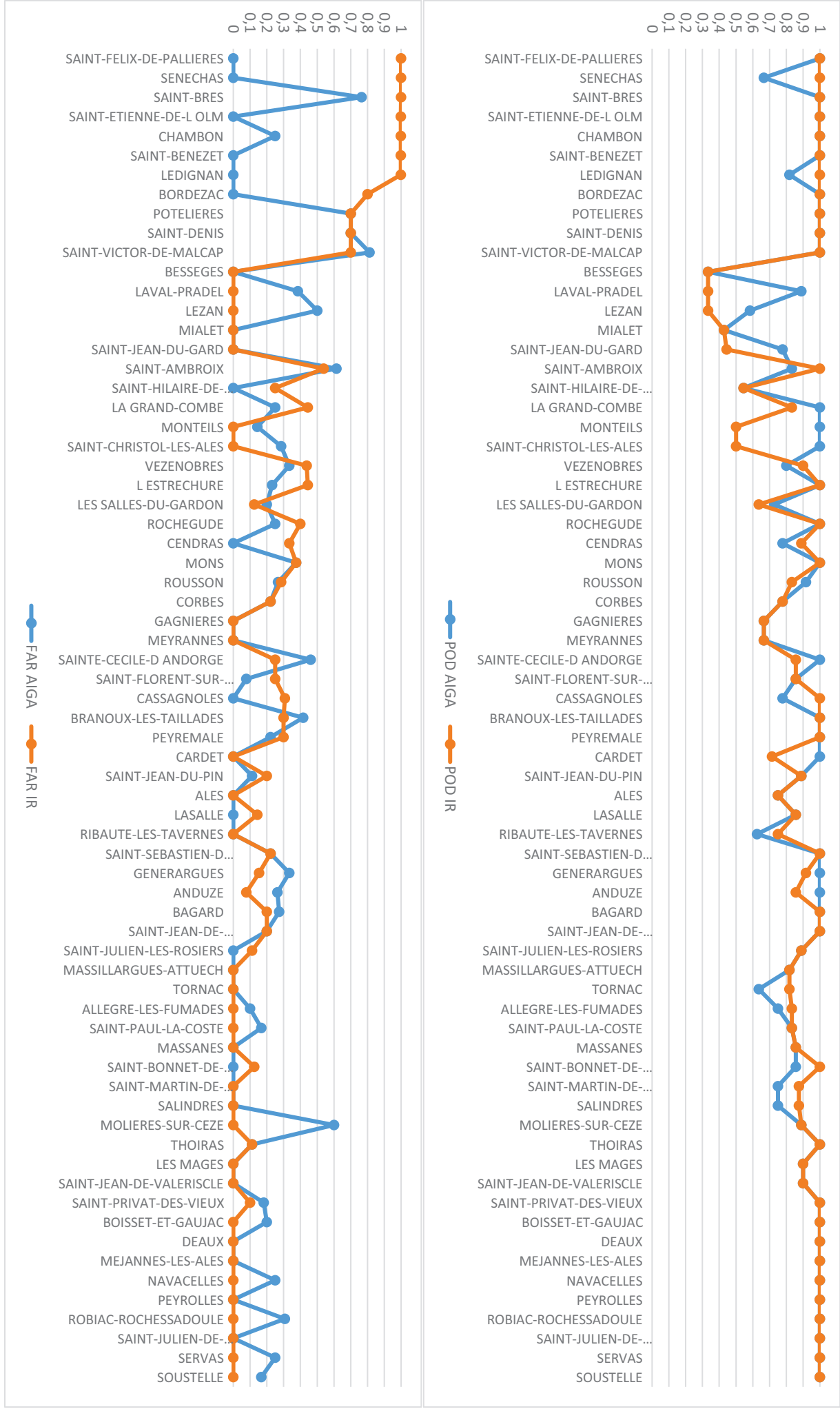


Figure 5.19 : Scores de POD et FAR classés par CSI croissant pour la zone d'études du Gard

4. Evaluation spatiale événementielle à partir des données de DamaGIS

4.1. Méthodologie

Cette section va s'attacher à décrire les différentes étapes qui ont mené au calcul des scores de vérification pour une approche événementielle. Ainsi, à la différence de l'évaluation à partir de données CATNAT cette évaluation va porter sur des dommages renseignés par tronçon de cours d'eau (cf Chapitre 3 sur la définition du tronçon AIGA) donc à une échelle plus fine, infra-communale.

Dans un premier temps nous avons extrait les dommages par événement issus de la base DamaGIS. Pour chacun des dommages, nous avons ensuite associé le tronçon AIGA correspondant à la localisation de ce dommage.

En parallèle, la chronique des qualifications (périodes de retour) AIGA par tronçon été extraite. Nous avons ensuite retenu la qualification AIGA par tronçon maximale au cours de l'événement. Puis, comme dans la section précédente, 100 seuils de qualification ont été appliqués, et pour chacun d'eux, les statistiques de contingence calculées. Mais cette fois-ci, nous ne regardons plus la concomitance temporelle, mais spatiale : le tronçon sur lequel nous émettons un avertissement a-t-il été touché par un dommage (et inversement). Ce principe est illustré à la Figure 5.20.

Puis pour chaque événement, un décompte du nombre de HIT, MISS, Cn et FA a été réalisé pour chacun des 100 seuils d'avertissement tel que présenté dans la Figure 5.20.

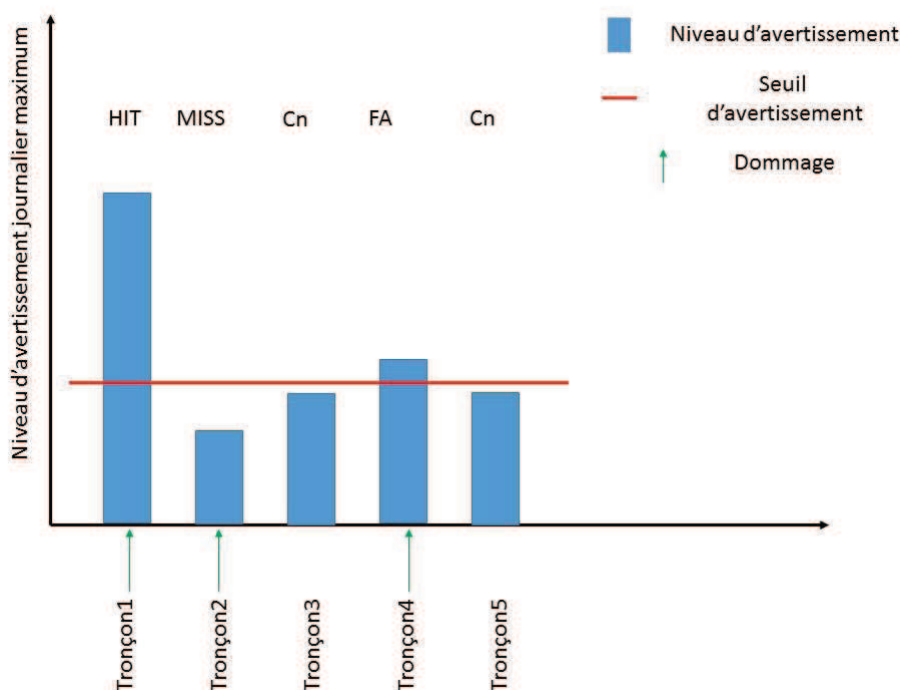


Figure 5.20 : Calcul de scores à partir de données de dommage issues de DamaGIS pour un événement donné

A partir de ce décompte les scores de CSI, POD et FAR ont pu être calculés pour chaque seuil et seront présentés dans la prochaine section. La même approche a été utilisée pour le calcul des scores de l'indice de risque à partir de la chronique des avertissements AIGA.

Evènements significatifs et données de dommages

La disponibilité dans le cadre de la thèse des emprises inondables CARTINO a entraîné un nécessaire tri des évènements de type inondation pour lesquels nous avons pu appliquer notre méthode d'évaluation. Ainsi, le Tableau 5.8 présente la liste des évènements survenus dans les départements de nos zones d'études ainsi que le nombre de dommages survenus dans les emprises inondables de CARTINO.

Ainsi, 9 évènements de crue ont pu être analysés dans le cadre de la thèse. Dans un premier temps, les scores de performance de la méthode seront appliqués à l'ensemble de ces évènements puis une seconde analyse sera apportée en excluant les évènements comportant moins de 2 dommages.

Tableau 5.8 : Liste des évènements de crue survenus dans les départements de nos zones d'étude par date

Evènement	Date de début	Date de fin	Zone	Nombre de dommages dans la zone d'étude
Evt_10	05/11/2011	06/11/2011	Var	36
Evt_7	26/10/2012	26/10/2012	Var	10
Evt_9	13/12/2012	13/12/2012	Var	Pas de données de dommages
Evt_8	07/03/2013	07/03/2013	Var	Pas de données de dommages
Evt_1	19/01/2014	19/01/2014	Var	22
Evt_12	25/06/2014	25/06/2014	Var	Pas de données de dommages
Evt_11	17/09/2014	21/09/2014	Gard	26
Evt_14	06/10/2014	11/10/2014	Gard	2
Evt_26	10/11/2014	10/11/2014	Alpes-Maritimes	29
Evt_6	14/11/2014	15/11/2014	Gard	Pas de données de dommages
Evt_16	25/11/2014	27/11/2014	Var	17
Evt_21	23/08/2015	23/08/2015	Gard	Pas de données de dommages
Evt_22	12/09/2015	13/09/2015	Gard	10
Evt_23	03/10/2015	03/10/2015	Alpes-Maritimes	131

4.2. Résultats issus des scores

A partir de la méthodologie présentée dans la section précédente nous avons pu apporter une évaluation événementielle de la méthode AIGA d'une part et de notre indice de risque d'autre part. Pour chaque événement nous avons donc sélectionné le CSI optimum pour chacune des méthodes et extrait le POD et le FAR correspondants. En raison du nombre limité d'événement à analyser nous avons représenté ces résultats sous la forme d'histogrammes.

La Figure 5.21 présente donc les scores de CSI optimum ainsi que les POD et FAR correspondants obtenus par événement. Comme dans la section précédente, nous avons trié les résultats en fonction du score obtenu avec la méthode prenant en compte l'indice IR. Au niveau du CSI, seuls trois événements (7, 14 et 16) présentent de meilleurs résultats pour la méthode AIGA seule. Ainsi pour 60% des événements traités, la méthode avec l'indice IR amène à une amélioration.

Concernant les taux de détection, les événements 10, 22 et 23 montrent un meilleur POD avec la méthode AIGA seule qu'avec l'indice de risque. Les autres événements présentent des scores de détection similaires pour les deux méthodes à l'exception de l'événement 11 pour lequel la méthode avec indice de risque présente un POD supérieur (Figure 5.21).

Enfin, les scores de FAR obtenus pour la méthode avec l'indice de risque sont nettement inférieurs à ceux d'AIGA pour l'ensemble des événements étudiés. Cela va dans le sens de la conclusion faite dans l'évaluation précédente : le nombre de fausses alertes diminue avec notre méthode (Figure 5.21).

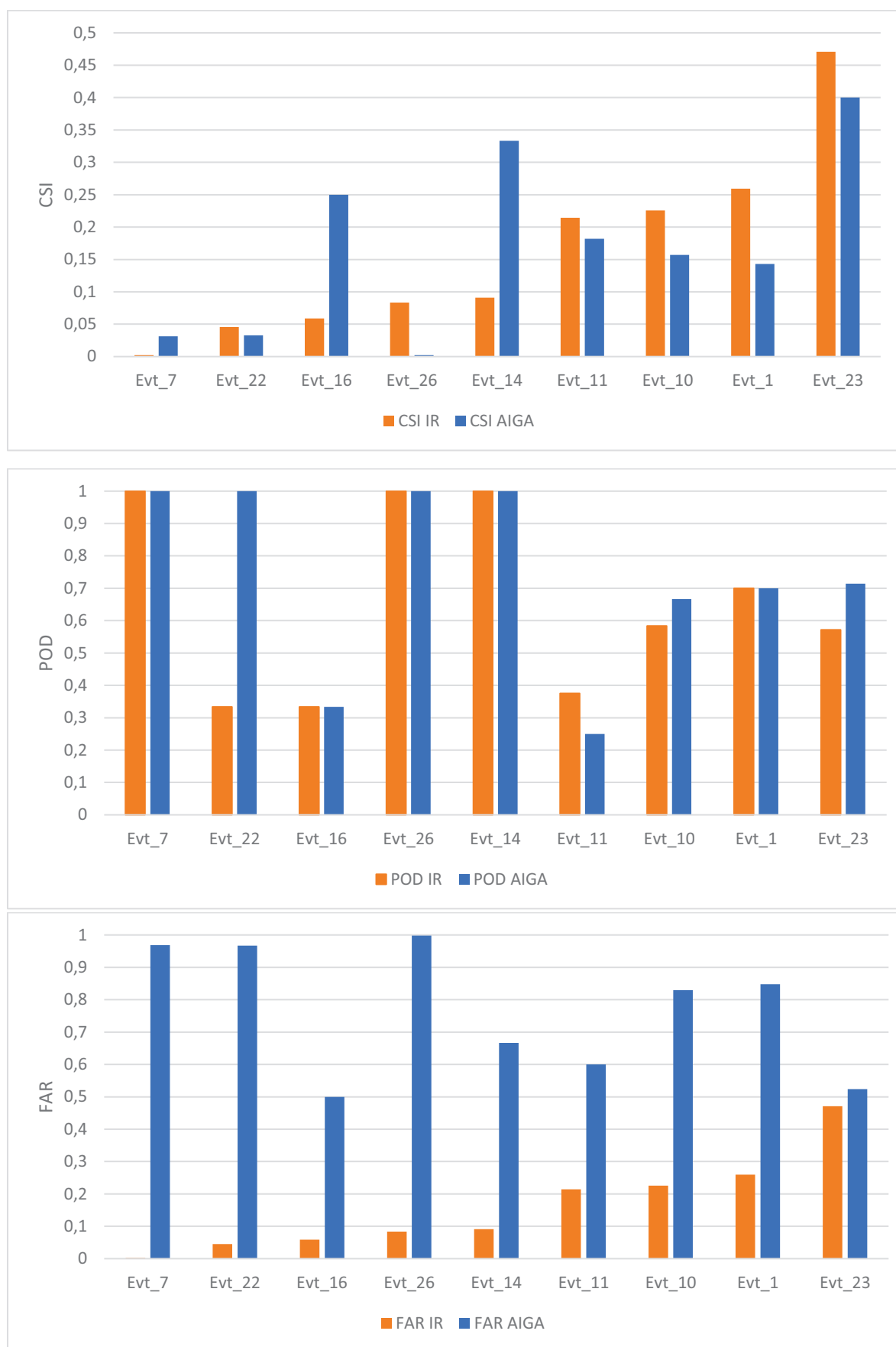


Figure 5.21 : Scores obtenus pour le CSI optimum par évènement

En conclusion, la méthode avec l'indice de risque fournit de meilleurs résultats par évènement et par tronçon que la méthode AIGA seule. En effet les avertissements émis présentent une qualité supérieure (CSI) tout en conservant un bon taux de détection (POD). Cependant, l'apport majeur de notre méthode par rapport à AIGA repose sur le taux de fausses alertes. En effet, la caractérisation du risque permet de diminuer considérablement le nombre de fausses alertes par rapport à une caractérisation de l'aléa crue seul.

Dans la prochaine section, nous proposerons de regarder ces résultats de manière plus détaillée, pour 2 évènements en particulier. Une représentation graphique de l'ensemble des évènements présentant plus de 2 dommages est cependant disponible en Annexe H.

4.3. Analyse détaillée de deux évènements

Les deux évènements sélectionnés pour une analyse plus fine sont :

- L'évènement 16 du 25 au 27 novembre 2014 dans le Var,
- L'évènement 23 du 3 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes.

Comme l'a montré l'analyse précédente, le premier correspond un à évènement où la méthode avec l'indice de risque a mal fonctionné par rapport à AIGA seule, et le second présente le cas inverse. Ces deux évènements vont donc nous apprendre sur les qualités mais aussi les limites de notre méthode.

Evènement du 25 au 27 novembre 2014

Cet évènement s'inscrit dans la lignée d'une série d'épisodes pluvieux exceptionnels survenus dans le quart sud-est de la France. Les pluies exceptionnelles enregistrées lors de cet épisode méditerranéen (Figure 5.22) ont causé d'importantes inondations dont le bilan se monte dans le département du Var à 4 morts et 35 millions d'euros de dommages selon la CCR.

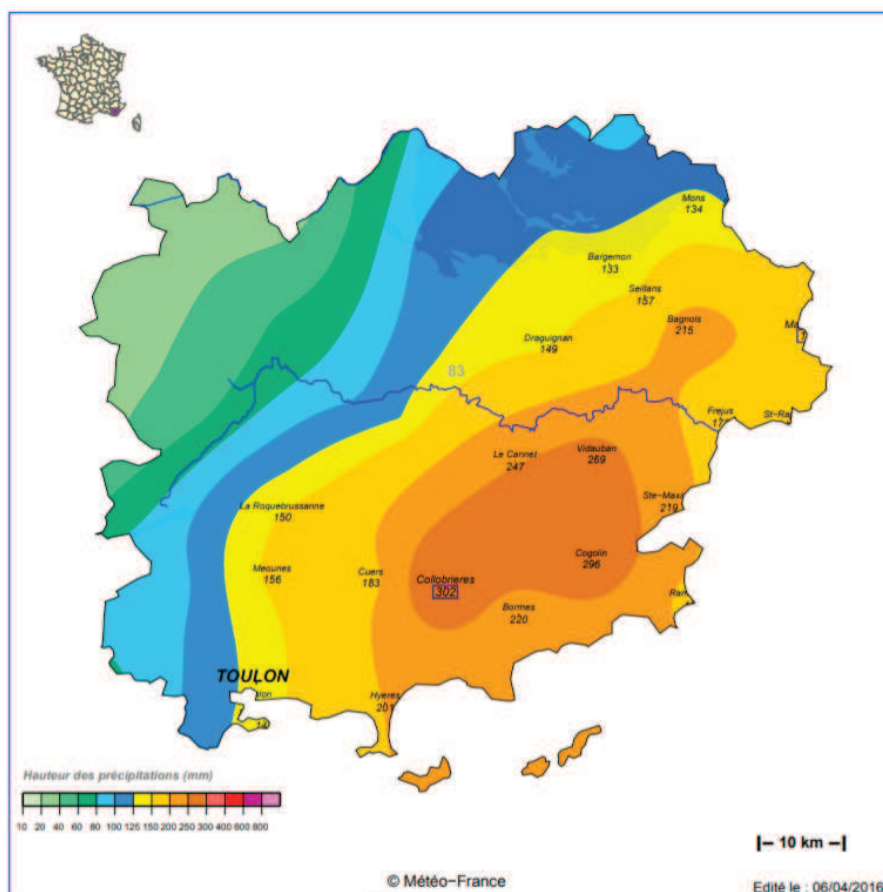


Figure 5.22 : Carte des cumuls de pluie sur 4 jours sur le Var du 24 au 27 novembre 2014

Dans la section précédente, cet évènement présentait de meilleures performances au niveau des scores obtenus avec AIGA (POD et CSI) que pour ceux obtenus avec notre indice de risque. L'objectif de notre analyse est donc de trouver les raisons de cette différence de performance.

Tout d'abord, il est important de souligner le nombre limité de dommages disponibles pour cet évènement dans notre zone d'étude. Ainsi, cette analyse ne reposera que sur 3 points de contrôles répartis sur 3 tronçons de cours d'eau.

Les qualifications maximales journalières obtenues avec AIGA correspondent pour les tronçons en question à une période de retour supérieure à 50 ans pour l'un et comprise entre 2 et 10 ans pour les deux autres. Or, la période de retour comprise entre 2 et 10 ans n'est pas particulièrement élevée. On peut conjecturer que le faible niveau de risque obtenu pour les tronçons où sont survenus des dommages pourrait être lié à la faible intensité de l'aléa

caractérisé par AIGA sur les cours d'eau en question (possible sous-estimation qui pourrait être soit liées aux pluies, soit au modèle hydrologique dans AIGA).

En ce qui concerne le taux de détection, notre indice de risque a fourni des niveaux de risque assez faibles lors de cet évènement ce qui explique que la méthode AIGA ait obtenu un POD plus important en raison d'un plus faible nombre d'alertes manquées. On peut cependant relever que les deux tronçons ayant subi des dommages sans que l'indice de risque ait réagi sont des affluents au cours d'eau principal. On peut ainsi s'interroger aussi ici sur l'exhaustivité de l'emprise inondable CARTINO les caractérisant.

Enfin, le taux de fausse alerte apparaît plus important pour AIGA car un grand nombre de cours d'eau sont caractérisés par une période de retour supérieure à 10 ans. Au contraire, le risque a été globalement évalué par notre indice comme étant modéré mis à part quelques tronçons caractérisés par un risque fort, ce qui explique que le taux de fausse alerte lors de cet évènement ne soit pas égal à 0.

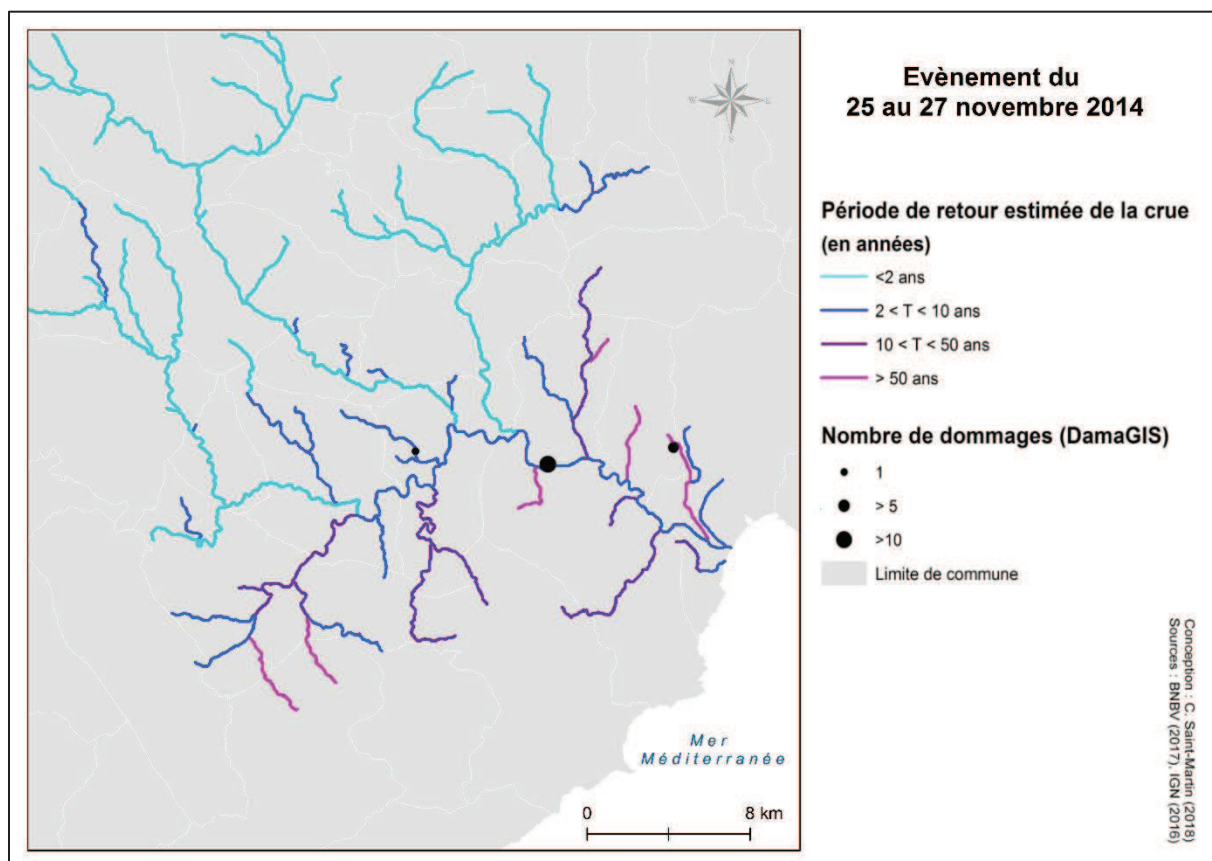


Figure 5.23 : Qualifications AIGA maximales obtenues lors de l'évènement du 25 au 27 novembre 2014

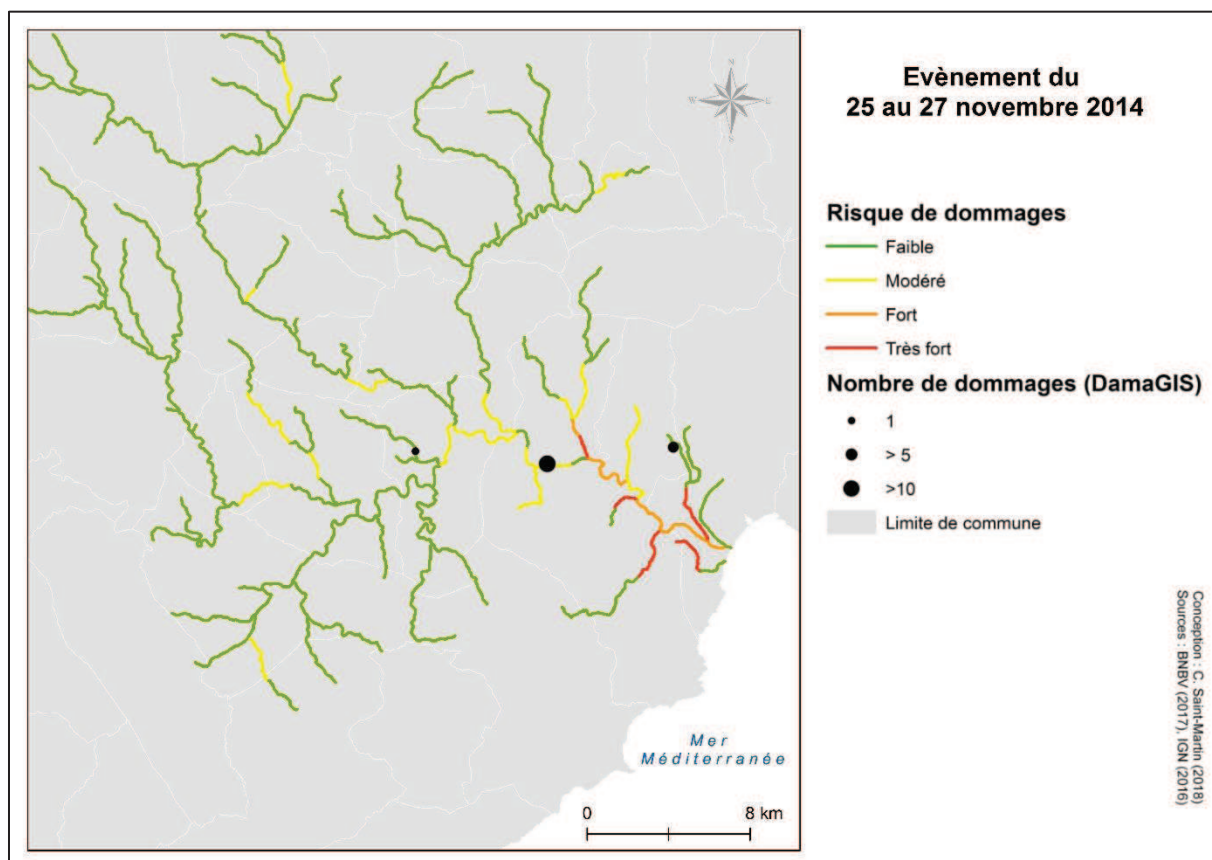


Figure 5.24 : Evaluation maximale du risque de dommages lors de l'évènement du 25 au 27 novembre 2014

Evènement du 3 octobre 2015

Dans la nuit du 3 au 4 octobre 2015, des inondations d'une intensité exceptionnelle se sont produites sur le littoral des Alpes-Maritimes. Cet évènement a provoqué d'importants dommages matériels ainsi que le décès de 20 personnes. Les cumuls de pluie relevés lors de cet évènement (Figure 5.25) sont remarquables.

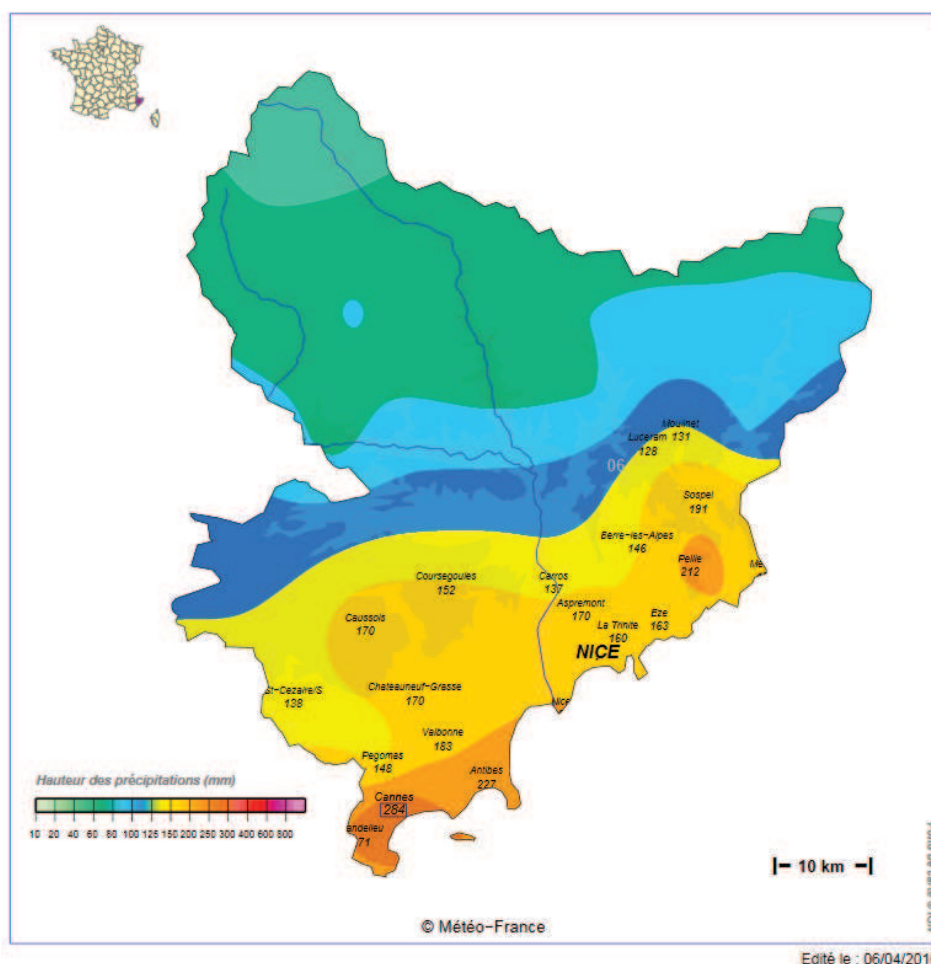


Figure 5.25: Carte des cumuls de pluie relevés sur 3 jours du 1er au 3 octobre 2015

La Figure 5.26 illustre les qualification AIGA maximales obtenues par bassin-versant lors de l'évènement du 3 octobre. On peut y voir qu'une grande partie des tronçons est caractérisée par une période de retour de la crue supérieure à 50 ans. Cela explique le taux important de fausses alertes obtenu par AIGA lors de cet évènement mais également qu'AIGA ait un meilleur score de POD pour cet évènement.

Si l'indice de risque présente également un nombre de fausses alertes significatif, il est inférieur à celui obtenu par AIGA et on peut voir que la caractérisation des tronçons les plus à risque semble plus pertinente. Les tronçons présentant plus de 10 dommages sont tous caractérisés par le niveau de risque maximal (Figure 5.27) et vice versa à l'exception d'un tronçon.

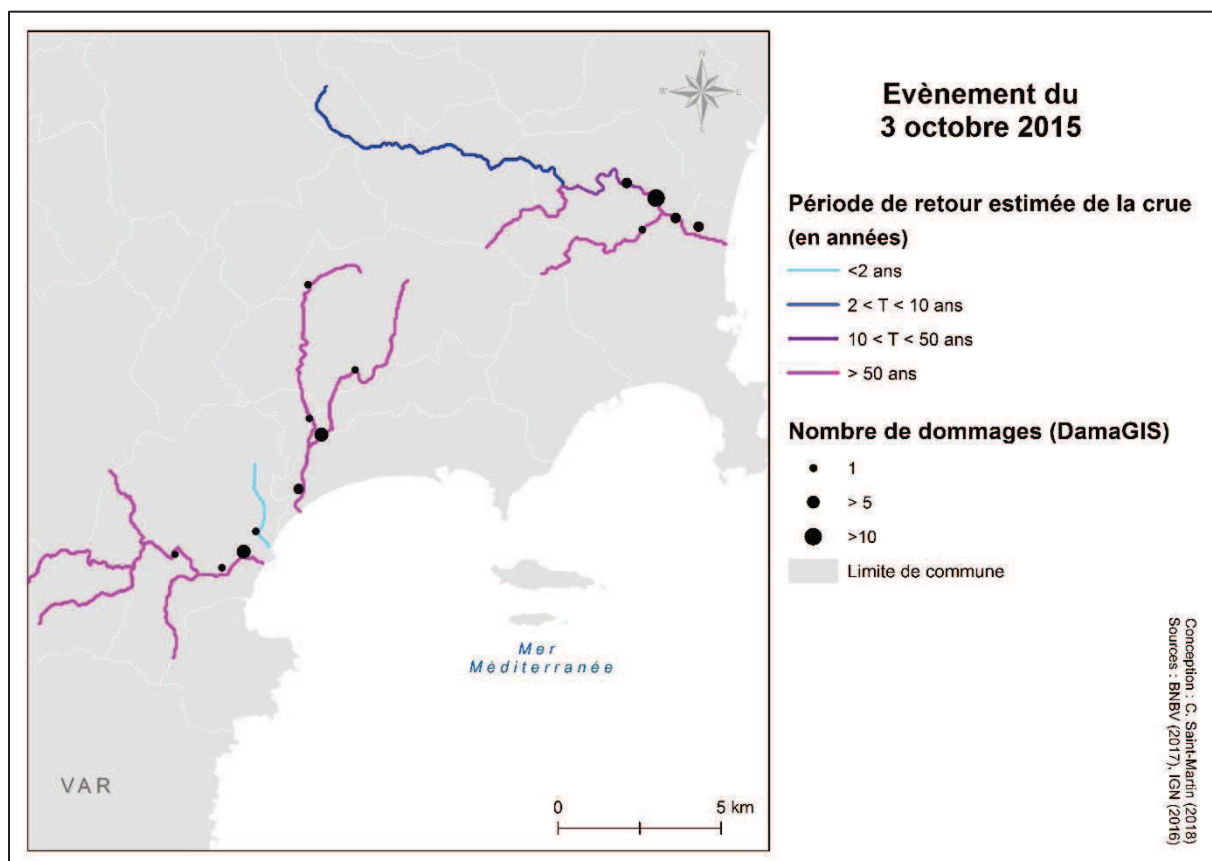


Figure 5.26 : Qualifications AIGA maximales obtenues lors du 3 octobre 2015

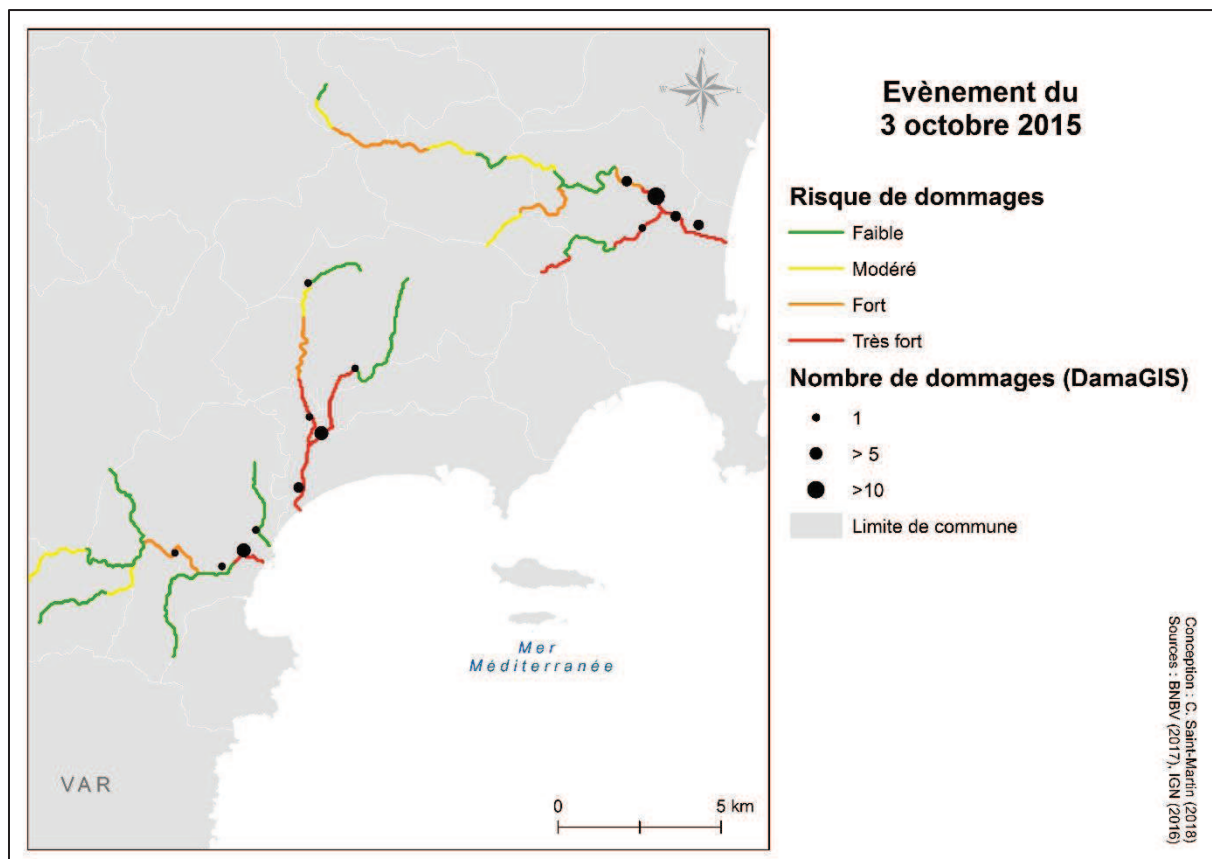


Figure 5.27 : Evaluation du risque de dommages lors du 3 octobre 2015

Conclusion du chapitre

Dans cet ultime chapitre de la thèse, nous avons pu proposer et appliquer une méthode d'évaluation de notre indice de risque, comparativement aux qualifications hydrologiques de la méthode AIGA seule. Deux évaluations ont été réalisées : l'une continue sur la période 1998-2016 grâce aux données CATNAT et un rejeu de la méthode AIGA, l'autre événementielle à partir des données de notre base DamaGIS permettant d'aller à l'échelle infra-communale.

Évalué à l'échelle communale, nous avons ainsi pu voir que l'indice de risque ne conduisait pas à un gain important par rapport à la méthode AIGA seule. On note cependant une tendance à faire un peu moins de fausses alertes. Ce résultat vient essentiellement du mode d'évaluation choisi. Les données CATNAT sont des données agrégées à la commune. On n'évalue donc ici la méthode que « globalement » sans savoir exactement dans la commune où les dommages ont pu se produire et si les localisations fournies par notre indice étaient pertinentes ou pas. Il faut cependant noter que d'un point de vue méthodologique, la mise au point de cette méthode d'évaluation, continue et sur une période de près de 20 ans, est un apport précieux. De plus, les résultats confirment que la méthode AIGA actuellement utilisée dans Vigicrues Flash donne des résultats tout à fait corrects à l'échelle communale. Dans la littérature, peu de méthode d'alerte ont bénéficié d'une telle quantité de données pour leur évaluation.

C'est à l'échelle infra-communale, celle du tronçon que l'on peut voir une plus nette amélioration de notre méthode par rapport à la méthode AIGA seule. Les avertissements fournis sont de meilleure qualité avec un taux de fausses alertes bien inférieur. Le taux de détection est quant à lui équivalent par rapport à AIGA seul. Un seul bémol est à porter à cette évaluation : elle n'est pas exhaustive dans le temps contrairement à l'évaluation avec les CATNAT. Ces deux types d'évaluation sont donc grandement complémentaires : nous avons montré les améliorations apportées à l'échelle infra-communale mais avec un nombre limité d'observations, en nous assurant que nous ne dégradions pas les résultats sur le long terme avec une évaluation plus simple, à l'échelle communale.

En perspective de cette analyse il serait également intéressant de pouvoir proposer une validation de la méthode à partir de données de dommages exhaustives disponibles à haute résolution spatiale telles que les données assurantielles ou des SDIS ou des reconnaissances post événement automatisées par drone (Jean-Frédéric et al. 2018). En effet, comme cela a été démontré dans le Chapitre 4, la base de données DamaGIS n'est pas exhaustive et peut présenter des incohérences. Certains dommages relevés peuvent ainsi être dus par exemple au ruissellement urbain ou à une rupture d'embâcle en amont de la zone inondée

De plus, la méthode AIGA peut elle aussi présenter des incohérences dans l'estimation de ses qualifications. On peut notamment relier le nombre de détections manquées à une sous-estimation de l'intensité de la crue AIGA. En effet, l'indice de risque étant calculé à partir des sorties du modèle, si le débit est sous-estimé, l'indice de risque sera également sous-estimé. Inversement, le nombre de fausses alertes peut être dû à un défaut du modèle pluie-débit : si le débit est surestimé, l'indice de risque le sera également. Une perspective intéressante serait donc de chercher à améliorer le modèle hydrologique, au regard des résultats obtenus avec notre indice de risque. Ce faisant, cela permettrait de pallier au manque de données de calage dans le modèle hydrologique, en utilisant les données de dommage disponibles.

Conclusion générale

« Le plus fort n'est pas d'être dans l'évènement même, c'est d'être dans l'imminence de l'évènement, dans son retournement, dans son anticipation »

Jean Baudrillard, Cool memories (1991)

Anticiper l'inondation est un enjeu majeur pour les communes exposées aux crues. C'est sur cette anticipation que repose l'ensemble de la chaîne d'alerte, garante de la sécurité des personnes et des biens. L'anticipation des dommages qu'elles provoquent constitue un champ encore expérimental dans la littérature tandis que la prévision opérationnelle reste encore centrée sur les paramètres hydrométéorologiques surtout pour les 100 000km de cours d'eau non surveillés par l'Etat en France.

L'approche développée dans cette thèse renseigne un maillon actuellement manquant de la chaîne d'alerte aux inondations en France en proposant un système innovant d'anticipation des dommages liés aux crues rapides pour les cours d'eau non-surveillés du réseau hydrographique méditerranéen.

L'originalité de cette thèse repose notamment sur sa capacité à répondre, par des méthodologies adaptées, aux trois problématiques présentées en introduction.

- **Comment passer de l'aléa crue au risque de dommages liés aux inondations ?**

La première des problématiques auxquelles ce travail a su répondre correspond au passage d'une évaluation de l'intensité de l'aléa à l'évaluation d'un risque de dommages pour une zone donnée. Pour cela, la thèse s'est appuyée sur des données d'emprises inondables disponibles pour différentes périodes de retour (Chapitre 3) ainsi que sur une évaluation de la vulnérabilité du territoire (Chapitre 2). L'évaluation de la vulnérabilité a été construite à partir d'une approche bottom-up innovante, directement auprès des acteurs du risque du territoire de PACA. Le croisement de ces deux types de données a permis de fournir une première estimation statique du risque de dommages.

- **Comment passer d'une caractérisation « statique » à une caractérisation « dynamique » du risque de dommages ?**

La deuxième innovation proposée dans le cadre de la thèse a été de coupler notre indice de risque à la méthode AIGA. Ainsi, une courbe de « l'endommagement potentiel » a été calculée sur chaque tronçon de rivière défini par AIGA. Cette courbe donne localement, en fonction de la période de retour, le niveau de dommage à attendre en cas d'inondation des enjeux exposés à la crue du dit tronçon. Ce croisement a permis de développer une méthode de caractérisation du risque de dommages pouvant s'appliquer en temps réel grâce à la méthode AIGA.

- Comment passer d'une évaluation qualitative à une évaluation exhaustive ?

En adaptant des tests de performances issus des domaines de l'épidémiologie et de la météorologie, nous avons pu éprouver la pertinence de notre méthode AIGA « améliorée » par rapport à la méthode AIGA courante (Chapitre 5). Des données de dommages existantes ou spécifiquement collectées, constituent le matériau de test à l'échelle communale et infra communale (Chapitre 4). Cette évaluation a été menée pour différents seuils d'avertissement afin d'analyser la sensibilité des deux méthodes.

Principaux résultats

La méthode d'évaluation du risque de dommages proposée dans cette thèse a permis de démontrer l'apport de la prise en compte de la vulnérabilité du territoire aux méthodes d'avertissement des crues actuellement fondées sur une évaluation de l'aléa seul pour une augmentation de leur pertinence.

Le passage de la caractérisation de l'aléa à celle du risque diminue fortement le nombre de fausses alertes au niveau communal tandis qu'à l'échelle du tronçon, c'est l'amélioration de l'ensemble des performances de la méthode d'évaluation du risque qui a pu être soulignée en comparaison avec la méthode AIGA pour les mêmes évènements de crue.

Ainsi, si la méthode d'évaluation du risque proposée dans cette thèse offre une grande capacité d'adaptation multi-échelles l'ultime chapitre de ce manuscrit a souligné la pertinence d'une application à l'échelle infra-communale. Cette échelle est la plus adaptée à la chaîne de l'alerte, permettant d'organiser une meilleure réponse des services de secours et de gestion de crise face à l'annonce de dommages potentiels.

En testant la sensibilité de la méthode d'évaluation du risque pour différents seuils d'avertissement, nous proposons une nouvelle conception des systèmes d'avertissement. Ceux-ci s'adapteraient aux besoins et aux potentielles demandes de leurs utilisateurs et permettraient à ces derniers de se les réapproprier. Une telle évolution rendrait possible l'obtention d'avertissements cohérents avec les attentes des gestionnaires locaux, pour une plus grande opérationnalité.

Perspectives de la thèse

Grâce à sa grande capacité d'adaptation aux différentes échelles et territoires, les perspectives de ce travail de thèse sont nombreuses. Cependant, certaines d'entre elles méritent plus particulièrement qu'on s'y attarde et pourront constituer une piste de continuation du travail de thèse.

Une continuation de DamaGIS en fonctionnement participatif ?

Afin d'améliorer l'évaluation de notre méthode et de pouvoir l'appliquer à un plus grand nombre de territoires, il sera nécessaire d'enrichir la base DamaGIS dans les années à venir. Pour cela, une évolution vers un fonctionnement participatif multi-acteurs est souhaitable, afin notamment de corriger les limites de son manque d'exhaustivité.

Une évaluation de l'exposition humaine ?

La démarche que nous avons suivie pour l'avertissement des dommages matériels pourrait se voir appliquer à l'identification des territoires les plus exposés aux pertes de vies humaines en lien avec les inondations. De nombreuses méthodes s'intéressent déjà à la caractérisation de la vulnérabilité humaine en fonction du profil, des circonstances de décès ou encore du comportement des victimes

Notre but serait dans un premier temps de proposer une évaluation simplifiée de l'exposition humaine à partir d'indicateurs objectivables fondés sur des données épidémiologiques collectées et de la littérature et disponibles sur l'ensemble de la zone d'étude. L'objectif serait donc d'identifier les territoires où l'exposition humaine est particulièrement élevée et où la vigilance des autorités locales doit être renforcée.

Une telle approche nécessiterait un nombre important de données sur les victimes des inondations et sur une période de temps longue. Or, pendant la thèse, la collecte des dégâts matériels a été accompagnée d'une collecte parallèle des données concernant les victimes. Cette démarche vient s'inscrire en continuation de la base Vict-In, développée dans la thèse de Boissier (2013). Ainsi serait-il possible de suivre la même approche que celle proposée dans le cadre de la thèse afin d'évaluer la concordance spatiale et temporelle entre la survenue de victimes d'une part et un niveau d'exposition humaine élevé d'autre part.

Une application multirisque ?

Une autre perspective de la méthode pourrait être son application à différents aléas. La caractérisation du risque de dommages peut être facilement répliquable sous condition d'une disponibilité des données d'aléa. Une nouvelle évaluation de la vulnérabilité des enjeux majeurs du territoire peut être facilement obtenue selon le risque choisi auprès de gestionnaires spécialistes du risque en question. Ainsi on peut imaginer une application de notre méthode à l'évaluation du risque de dommages liés aux aléas glissement de terrain ou feu de forêt.

A partir des qualifications AIGA, une évaluation du risque de dommages à la résolution spatiale du pixel (1km²) serait également envisageable, notamment dans un but d'anticipation des dommages liés au ruissellement.

Une fois ces différentes évaluations de risques obtenues, leur combinaison pourrait être envisagée au travers d'une approche multirisque pour les territoires soumis à de multiples aléas tels que les territoires composant nos zones d'études ou plus généralement l'Arc Méditerranéen par exemple.

Bibliographie

- Adger, W. N. (2006) Vulnerability. *Global environmental change*, 16, 268-281.
- Adhikari, P., Y. Hong, K. R. Douglas, D. B. Kirschbaum, J. Gourley, R. Adler & G. R. Brakenridge (2010) A digitized global flood inventory (1998–2008): compilation and preliminary results. *Natural Hazards*, 55, 405-422.
- Affeltranger, B. & N. M. de Richemond (2003) Gestion de l'alerte et de l'information lors des crues: conditions et limites d'une démarche participative locale. L'exemple des Deux-Sèvres. *Flux*, 16-27.
- Aguezoul, A. & P. Ladet (2006) Sélection et évaluation des fournisseurs: Critères et méthodes. *Revue française de gestion industrielle*, 2, 5-27.
- Alexander, D. (1991) Natural disasters: a framework for research and teaching. *Disasters*, 15, 209-226.
- Alfieri, L., L. Feyen, F. Dottori & A. Bianchi (2015) Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 35, 199-212.
- Alfieri, L., F. Pappenberger & F. Wetterhall (2014) The extreme runoff index for flood early warning in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1505.
- Alfieri, L., P. Smith, J. Thielen-del Pozo & K. Beven (2011a) A staggered approach to flash flood forecasting-case study in the Cévennes region. *Advances in Geosciences*, 29, 13.
- Alfieri, L. & J. Thielen (2015) A European precipitation index for extreme rain-storm and flash flood early warning. *Meteorological Applications*, 22, 3-13.
- Alfieri, L., J. Thielen & F. Pappenberger (2012) Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern Switzerland. *Journal of hydrology*, 424, 143-153.
- Alfieri, L., D. Velasco & J. Thielen (2011b) Flash flood detection through a multi-stage probabilistic warning system for heavy precipitation events. *Advances in Geosciences*, 29, 69-75.
- Alonso, J. A. & M. T. Lamata (2006) Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. *International journal of uncertainty, fuzziness and knowledge-based systems*, 14, 445-459.
- Antoine, J.-M., B. Desailly & F. Gazelle. 2001. Les crues meurtrières, du Roussillon aux Cévennes/Casualty-causing flood: from the Roussillon region to the Cevennes country. In *Annales de géographie*, 597-623. JSTOR.
- Antonelli, C. & M. Provansal (2003) Impact des crues méditerranéennes dans le bilan sédimentaire du Rhône aval. *IAHS PUBLICATION*, 243-250.
- Arnaud, P. (2009) Guide méthodologique sur l'approche SHYPRE. Partie 1: analyse du risque pluvial. *Edition QUAE*.
- Arnaud, P., Y. Aubert, D. Organde, P. Cantet, C. Fouchier & N. Folton (2014) Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG* : présentation – performances – bases de données. *La Houille Blanche*, 20-26.
- Aubert, Y., P. Arnaud, P. Ribstein & J.-A. Fine (2014) La méthode SHYREG débit—application sur 1605 bassins versants en France métropolitaine. *Hydrological Sciences Journal*, 59, 993-1005.
- Balica, S., N. Douben & N. Wright (2009) Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water science and technology*, 60, 2571-2580.
- Balica, S. F. 2007. Development and application of flood vulnerability indices for various spatial scales. Unesco-IHE.
- Ballais, J.-L., S. Chave, N. Dupont, É. Masson & M.-J. Penven (2011) La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables. *Physio-Géo* (www.physio-geo.fr), collection "Ouvrages".

- Ballandras, S. (1993) Les crues torrentielles de l'été 1987 dans les Alpes françaises. Interprétations et enseignements. *Revue de Géographie Alpine*, 81, 13-32.
- Barredo, J. I. (2007) Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42, 125-148.
- Barrère-Lutloff, C. 2000. Le système urbain niçois face à un séisme: méthode d'analyse des enjeux et des dysfonctionnements potentiels. Chambéry.
- Barroca, B., M. DiNardo & I. Mboumoua (2013) De la vulnérabilité à la résilience: mutation ou bouleversement? *EchoGéo*.
- Barroca, B., N. Pottier & E. Lefort (2005) Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'Orge aval. *Septièmes Rencontres de Théo Quant*, 12.
- Baussart, O., V. Cambot, R. D'Ercole, L. Gnemmi, P. Pigeon & J. Wattez. 2000. Analyse du système urbain d'Annecy et définition de ses enjeux. Rapport non publié, Département de Géographie, Université de Savoie, Chambéry.
- Beck, U. (2008) La société du risque: Sur la voie d'une autre modernité.
- Belin, P. & C. Moulin (2016) La complexité des dispositifs de vigilance pour les inondations rapides. Constats et évolutions possibles. *La Houille Blanche*, 5-10.
- Belmonte, A. M. C., M. J. López-García & J. Soriano-García (2011) Mapping temporally-variable exposure to flooding in small Mediterranean basins using land-use indicators. *Applied Geography*, 31, 136-145.
- Bernard, G. & M.-L. Besson (1971) Douze méthodes d'analyse multicritère. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle. Série verte*, 5, 19-64.
- Berz, G., W. Kron, T. Loster, E. Rauch, J. Schimetschek, J. Schmieder, A. Siebert, A. Smolka & A. Wirtz (2001) World Map of Natural Hazards – A Global View of the Distribution and Intensity of Significant Exposures. *Natural Hazards*, 23, 443-465.
- Bhushan, N. & K. Rai. 2007. *Strategic decision making: applying the analytic hierarchy process*. Springer Science & Business Media.
- Birkmann, J. & B. Wisner. 2006. Measuring the un-measurable. The challenge of vulnerability. Source, No. 5/2006. United Nations University—Institute for Environment and Human Security, Bonn.
- Blaikie, P., T. Cannon, I. Davis & B. Wisner. 2004. *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge.
- Blong, R. (2003a) A new damage index. *Natural hazards*, 30, 1-23.
- (2003b) A review of damage intensity scales. *Natural hazards*, 29, 57-76.
- Bogard, W. C. (1988) Bringing social theory to hazards research: conditions and consequences of the mitigation of environmental hazards. *Sociological Perspectives*, 31, 147-168.
- Bohle, H.-G. (2001) Vulnerability and criticality: perspectives from social geography. *IHDP update*, 2, 3-5.
- Boissier, L. 2013. La mortalité liée aux crues torrentielles dans le Sud de la France: une approche de la vulnérabilité humaine face à l'inondation. Université Paul Valéry-Montpellier III.
- Bouwer, L. M., R. P. Crompton, E. Faust, P. Höppe & R. A. Pielke Jr (2007) Confronting disaster losses. *Science-New York then Washington-*, 318, 753.
- Brakenridge, G. & D. Karnes. 1996. The Dartmouth Flood Observatory: an electronic research tool and electronic archive for investigations of extreme flood events. In *Geoscience Information Society Proceedings*, 31-36.
- Bubeck, P., H. De Moel, L. Bouwer & J. Aerts (2011) How reliable are projections of future flood damage? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 3293.
- Bunce, S., H. Partridge & K. Davis (2012) Exploring information experience using social media during the 2011 Queensland Floods: a pilot study. *The Australian Library Journal*, 61, 34-45.
- Caeymaex, F. (2007) Risquer, gérer, sécuriser: techniques politiques de la modernité? *Technique et philosophie des risques*, 111-122.
- Caliano, M., I. Ruin & J. J. Gourley (2013) Supplementing flash flood reports with impact classifications. *Journal of Hydrology*, 477, 1-16.

- Capitant, H. 1936. *Adages de droit français: extrait du Vocabulaire juridique*. Presses Univ. de France.
- Cardona, O. (2004) The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management¹.
- Carpenter, T., J. Sperflage, K. Georgakakos, T. Sweeney & D. Fread (1999) National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. *Journal of Hydrology*, 224, 21-44.
- Carter, T. R., M. Parry, S. Nishioka & H. Harasawa (1992) Preliminary guidelines for assessing impacts of climate change.
- CCR. 2017. Caisse Centrale de Réassurance.
- Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. 2009. Analyse et traitement informatique de la langue française. UMR 7118.
- CEREMA. 2017. Collecte d'informations sur le terrain suite à une inondation. 69 p.
- Chakhar, S. 2006. Cartographie décisionnelle multicritère: formalisation et implémentation informatique. Université Paris Dauphine-Paris IX.
- Chambers, R. (1989) Editorial introduction: vulnerability, coping and policy. *IDS bulletin*, 20, 1-7.
- Chardon, A.-C. & J.-C. Thouret (1994) Cartographie de la vulnérabilité d'une population citadine face aux risques naturels: le cas de Manizales. *Mappemonde*, 4.
- Cheong, F. & C. Cheong. 2011. Social media data mining: A social network analysis of tweets during the Australian 2010-2011 floods. In *15th Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS)*, 1-16. Queensland University of Technology.
- Cherqui, F. 2005. Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier-méthode ADEQUA. Université de la Rochelle.
- Combe, C. 2007. La ville endormie? Le risque d'inondation à Lyon: approche géohistorique et systémique du risque de crue en milieu urbain et périurbain. Lyon 2.
- Commission des Communautés Européennes. 2006. Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil relative à l'évaluation et à la gestion des inondations. ed. C. Européenne. Bruxelles.
- Cosandey, C. & J. Didon-Lescot (1990) Etude des crues cévenoles: conditions d'apparition dans un petit bassin forestier sur le versant sud du Mont Lozère, France. *Regionalisation in Hydrology, IAHS Publication, Ljubljana, Slovenia*, 191, 103-115.
- Council, N. R. 1983. *Risk assessment in the federal government: managing the process*. National Academies Press.
- Creutin, J. D., M. Borga, E. Grunfest, C. Lutoff, D. Zocatelli & I. Ruin (2013) A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. *Journal of Hydrology*, 482, 14-24.
- Cutter, S. L. 1994. *Environmental Risks and Hazards*. Prentice Hall.
- Cutter, S. L. (1996) Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, 20,4, pp. 529-539.
- Cutter, S. L., B. J. Boruff & W. L. Shirley (2003) Social vulnerability to environmental hazards. *Social science quarterly*, 84, 242-261.
- Cutter, S. L., D. B. Richardson & T. J. Wilbanks. 2014. *The geographical dimensions of terrorism*. Routledge.
- D'Ercole, R. & P. Metzger (2004) Les enjeux au coeur de la définition du risques. Application à Quito (Equateur). *Espaces tropicaux et risques. Du local au global, Actes des X e Journées de Géographie Tropicale, Presses Universitaires d'Orléans/IRD*, 185-196.
- (2005) Repenser le concept de risque pour une gestion préventive du territoire. Repensar el concepto de riesgo para una gestión preventiva del territorio. Rethinking the concept of risk for preventive land management. *Pangea*, 43/44, 19-36.
- D'Ercole, R. & P. Metzger (2009) La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- d'Ercole, R. & P. Pigeon. 1999. L'expertise internationale des risques dits naturels: intérêt géographique. In *Annales de géographie*, 339-357.

- D'Ercole, R., J.-C. Thouret, O. Dollfus & J.-P. Asté (1994a) Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés: concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de géographie alpine*, 82, 87-96.
- (1994b) Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés: concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine/Journal of Alpine Research*, 82, 87-96.
- Dartmouth Flood Observatory. 2018. Global Active Archive of Large Flood Events. ed. G. R. B. Dartmouth Flood Observatory. University of Colorado.
- Dashti, S., L. Palen, M. P. Heris, K. M. Anderson, T. J. Anderson & S. Anderson. 2014. Supporting disaster reconnaissance with social media data: A design-oriented case study of the 2013 Colorado floods. In *ISCRAM*.
- Dauge, Y. (1999) Les politiques publiques de prévention des inondations. *Rapport au Premier ministre*.
- Dauphiné, A. & D. Provitolo (2007) La résilience: un concept pour la gestion des risques.
- Daupras, F. 2015. Envisager la vigilance crues comme système organisationnel: les conditions de sa robustesse en territoires inondés dans le bassin Adour-Garonne (Sud-Ouest de la France). Université Toulouse le Mirail-Toulouse II.
- De Saint-Aubin, C., L. Garandeau, B. Janet & P. Javelle. 2016. A new French flash flood warning service. In *E3S Web of Conferences*, 18024. EDP Sciences.
- Debarati Guha-Sapir & Regina Below (2002) The quality and accuracy of disaster data. *Prevention consortium*.
- Defossez, S., F. Vinet & F. Leone. 2017. 14 - Assessing Vulnerability to Flooding: Progress and Limitations. In *Floods*, ed. F. Vinet, 241-257. Elsevier.
- Defrance, D. 2014. Adaptation et évaluation d'un système d'anticipation de crues éclair sur des bassins de montagne non-jaugés. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Delrieu, G., J. Nicol, E. Yates, P.-E. Kirstetter, J.-D. Creutin, S. Anquetin, C. Obled, G.-M. Saulnier, V. Ducrocq & E. Gaume (2005) The catastrophic flash-flood event of 8-9 September 2002 in the Gard region, France: A first case study for the Cevennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. *Journal of Hydrometeorology*, 6, 34-52.
- Dilley, M. 2005. *Natural disaster hotspots: a global risk analysis*. World Bank Publications.
- Direction Générale de la Prévention des Risques. 2018. Base GASPARE. ed. D. G. d. I. P. d. Risques.
- Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise. 2016. Les statistiques des services d'incendie et de secours. Ministère de l'intérieur.
- Direction Territoriale Méditerranée du Cerema. 2015. Retour d'expérience sur les inondations des Alpes-Maritimes des 3 et 4 octobre 2015. Contribution partielle au GT3. Contribution du GT4. Rapport d'étape au 23/11/15. 37.
- Doswell III, C. A., H. E. Brooks & R. A. Maddox (1996) Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, 11, 560-581.
- Douvinet, J. 2008. Les bassins versants sensibles aux "crues rapides" dans le Bassin Parisien-Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes. Université de Caen, Thèse de Doctorat.
- Douvinet, J., B. Gisclard, J. S. Kouadio, C. Saint-Martin & G. Martin (2017) Une place pour les technologies smartphones et les Réseaux Sociaux Numériques (RSN) dans les dispositifs institutionnels de l'alerte aux inondations en France? *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Douvinet, J. & F. Vinet (2012) La carte des arrêtés "CatNat" pour les inondations: limites et améliorations possibles. *Mappemonde*, 107, 17-30.
- Dow, K. (1992) Exploring differences in our common future (s): the meaning of vulnerability to global environmental change. *Geoforum*, 23, 417-436.
- Downing, T. E. (1991) Vulnerability to hunger in Africa: A climate change perspective. *Global Environmental Change*, 1, 365-380.

- Downing, T. E., R. Butterfield, S. Cohen, S. Huq, R. Moss, A. Rahman, Y. Sokona & L. Stephen (2001) Vulnerability indices: climate change impacts and adaptation. *UNEP Policy Series, UNEP, Nairobi*.
- Downton, M. W., J. Z. B. Miller & R. A. Pielke Jr (2005) Reanalysis of US National Weather Service flood loss database. *Natural Hazards Review*, 6, 13-22.
- Dubert, G., F. Guillier, R. Nussbaum, N. Spinousa, H. Champion, G. Verrhiest-Leblanc, S. Laporte, C. Arnal & N. Marcot (2016) L'analyse de la vulnérabilité aux inondations en région PACA : l'apport des observatoires. *La Houille Blanche*, 18-21.
- Ducrocq, V., I. Braud, S. Davolio, R. Ferretti, C. Flamant, A. Jansa, N. Kalthoff, E. Richard, I. Taupier-Letage & P.-A. Ayrat (2014) HyMeX-SOP1: The field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern Mediterranean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 1083-1100.
- Ducrocq, V., S. Davolio, R. Ferretti, C. Flamant, V. H. Santaner, N. Kalthoff, E. Richard & H. Wernli (2016) Introduction to the HyMeX Special Issue on 'Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation in the Mediterranean through the HyMeX SOP1 field campaign'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, 1-6.
- Dupouey, J.-L. (1989) Classification floue non hiérarchique: le programme Fuzzy. *Rev Modu-lad*, 4, 1-7.
- Dupuy, J. L., G. Garry & E. Graszka. 1997. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) : Guide général. p. 76. Paris.
- Eckenrode, R. T. (1965) Weighting Multiple Criteria. *Management Science*, 12, 180-192.
- Elmer, F. 2012. Improving flood damage modelling: damage assessment, model development and application. xxii, 160, CII S.: Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
- Esposito, C. 2003. Crues de septembre 2002 sur le bassin versant du Gardon. Étude comparative entre les limites de la cartographie hydrogéomorphologique et le relevé de la zone inondée. In *Mémoire de DEA*, ed. U. d. Provence, 40 p. Aix-en-Provence.
- Esposito, C., J.-L. Ballais, S. Chave & V. Delorme-Laurent (2014) Comparaison entre zones inondées et zones inondables Le cas du département du Var (France) en juin 2010. *Geo-Eco-Trop*, 38, 53-60.
- Fabiani, J.-L. & J. Theys. 1987. *La société vulnérable: évaluer et maîtriser les risques*. Presses de l'école normale supérieure.
- Forêts, O. N. d. 2018. Base de Données RTM Evénements. ed. O. N. d. Forêts.
- Fouchier, C., C. Saint Martin, P. Javelle, P. Meriaux, D. Organde & J. Demargne (2017) Mises en œuvre opérationnelles de la méthode AIGA pour anticiper les crues sur les cours d'eau non surveillés. *Sciences Eaux et Territoires*, 48-55.
- Garambois, P.-A. 2012. Etude régionale des crues éclair de l'arc méditerranéen français. Elaboration de méthodologies de transfert à des bassins versants non jaugés.
- Garandeau L., B. A., Demargne J., Fouchier C., Janet B., Javelle P., Organde D. 2018. Vigicrues Flash, un service automatique d'avertissement pour les crues rapide. In *De la prévision des crues à la gestion de crise* ed. S. H. d. France. Avignon, 14-16 novembre 2018.
- Gaume, E. 2002. Eléments d'analyse sur les crues éclair. ENGREF (AgroParisTech).
- Gaume, E., V. Bain, P. Bernardara, O. Newinger, M. Barbuc, A. Bateman, L. Blaškovičová, G. Blöschl, M. Borga & A. Dumitrescu (2009) A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367, 70-78.
- Gautier, Y. 2018. Universalis.
- Gerard, F., A. Bachoc, P. Chassagneux, F. Helloco, R. Feunteun, A. Kapfer, P. Mallet, C. Mengus & J.-F. Raffoux. 2013. Prévision, vigilance, alerte, bilan et perspectives. Rapport du Groupe de Travail AFPCN-IMDR «Vigilance et Alerte». 41.
- Gerl, T., H. Kreibich, G. Franco, D. Marechal & K. Schröter (2016) A Review of Flood Loss Models as Basis for Harmonization and Benchmarking. *PLoS ONE*, 11, e0159791.

- Gheorghe, A. V. 2005. *Integrated risk and vulnerability management assisted by decision support systems: Relevance and impact on governance*. Springer Science & Business Media.
- Gilbert, C. 2006. Préface. In *Risques industriels. complexité, incertitude et décision: une approche interdisciplinaire*, eds. L. Magne & D. Vasseur, pp. 5-21. Paris: Lavoisier, Tec & Doc.
- Gourley, J. J., J. M. Erlingis, Y. Hong & E. B. Wells (2012) Evaluation of tools used for monitoring and forecasting flash floods in the United States. *Weather and forecasting*, 27, 158-173.
- Griffith, T. K. & T. Gabor (1979) The assessment of community vulnerability to acute hazardous materials incidents.
- Griot, C. (2007) Vulnérabilité et transport de matières dangereuses: une méthode d'aide à la décision issue de l'expertise de la Sécurité Civile. *Cybergeog: European Journal of Geography*.
- Gruntfest, E. & J. Handmer. 2001. *Coping with flash floods*. Springer Science & Business Media.
- Guha-Sapir, D. & R. Below (2002) The quality and accuracy of disaster data: A comparative analyse of 3 global data sets. *Disaster Management facility, World Bank, Working paper ID*.
- Guha-Sapir, D., R. Below & P. Hoyois (2015) EM-DAT: International disaster database. *Catholic University of Louvain: Brussels, Belgium*.
- . 2018. EM-DAT: The Emergency Events Database. ed. D. G.-S. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Brussels, Belgium: Université catholique de Louvain (UCL).
- Guzzetti, F., M. Cardinali & P. Reichenbach (1994) The AVI project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management*, 18, 623-633.
- Holzer, B. & Y. Millo (2005) From risks to second-order dangers in financial markets: Unintended consequences of risk management systems. *New Political Economy*, 10, 223-245.
- Hoyois, P. & D. Guha-Sapir (2003) Three decades of floods in Europe: a preliminary analysis of EMDAT data. *WHO collaborating centre for research on the epidemiology of disasters (CRED), Catholique University of Louvain*.
- Hubert, G. & B. Ledoux. 1999. *Le Coût du risque...: l'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Hufschmidt, G. (2011) A comparative analysis of several vulnerability concepts. *Natural Hazards*, 58, 621-643.
- Huuskonen, A., E. Saltikoff & I. Holleman (2014) The Operational Weather Radar Network in Europe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 897-907.
- INSEE. 2017. INSEE.
- ISO/IEC. 2002. Guide 73: Risk Management Vocabulary Guidelines for use in standards. International Organisation for Standardization.
- Javelle, P., J. Demargne, D. Defrance, J. Pansu & P. Arnaud (2014) Evaluating flash-flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: a case study with the AIGA warning system. *Hydrological sciences journal*, 59, 1390-1402.
- Javelle, P., D. Organde, C. Saint-Martin, J. Demargne, C. d. Saint-Aubin, L. Garandeau & B. Janet. 2016. Setting up a French national flash flood warning system for ungauged catchments based on the AIGA method In *3rd European Conference on Flood Risk Management*. 17th-21st october 2016, Lyon, France.
- Jean-Frédéric, B., G. le Natur, B. Delpine, S. Claire & V.-L. Ghislaine. 2018. Drone et risque inondation, recommandations issues d'une expérience terrain. p. 77. CESIR – Entente Valabre, Syndicat mixte de l'Argens, DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- Joint Research Centre. 2018. European Flood Awareness System (EFAS) European Union.

- Jongman, B., H. Kreibich, H. Apel, J. Barredo, P. Bates, L. Feyen, A. Gericke, J. Neal, J. Aerts & P. Ward (2012) Comparative flood damage model assessment: towards a European approach.
- Jonkman, S. N. (2005) Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Natural hazards*, 34, 151-175.
- Kabeche, F., J. Figueras I Ventura, B. Fradon & P. Tabary (2012) X-band polarimetric quantitative precipitation estimation: The RHYTMME project. *IAHS-AISH publication*, 176-181.
- Kaplan, A. M. & M. Haenlein (2010) Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media. *Business Horizons*, 53, 59-68.
- Kaplan, S. & B. J. Garrick (1981) On the quantitative definition of risk. *Risk analysis*, 1, 11-27.
- Karapetrovic, S. & E. Rosenbloom (1999) A quality control approach to consistency paradoxes in AHP. *European Journal of Operational Research*, 119, 704-718.
- Kates, R. W., J. H. Ausubel & M. Berberian. 1985. *Climate impact assessment*.
- Keeney, R. L. & H. Raiffa. 1993. *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge university press.
- Kermisch, C. (2012) Vers une définition multidimensionnelle du risque. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12.
- Klein, R. J. & R. J. Nicholls (1999) Assessment of coastal vulnerability to climate change. *Ambio*, 182-187.
- Koenig, T. A., J. L. Bruce, J. O'Connor, B. D. McGee, R. R. Holmes Jr, R. Hollins, B. T. Forbes, M. S. Kohn, M. Schellekens & Z. W. Martin. 2016. Identifying and preserving high-water mark data. US Geological Survey.
- Kreibich, H., A. Thieken, S.-N. Haubrock & K. Schröter. 2017. HOWAS21, the German Flood Damage Database. In *Flood Damage Survey and Assessment*, 65-75. John Wiley & Sons, Inc.
- Kron, W., M. Steuer, P. Löw & A. Wirtz (2012) How to deal properly with a natural catastrophe database – analysis of flood losses. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 535-550.
- Kwiesielewicz, M. & E. Van Uden (2004) Inconsistent and contradictory judgements in pairwise comparison method in the AHP. *Computers & Operations Research*, 31, 713-719.
- Lallemant, C. & G. Gronier (2016) Méthodes de design UX. *Paris, Eyrolles*.
- Lang, M., B. Chastan & F. Grelot. 2009. La méthode Inondabilité: appropriation par les hydrologues de la vulnérabilité dans le diagnostic sur le risque d'inondation. L'Harmattan.
- Lang, M., D. Coeur, A. Audouard, M. Villanova Oliver & J. P. Pene. 2016. BDHI: a French national database on historical floods. In *3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016)*, 04010. Lyon, France.
- Latonero, M. & I. Shklovski (2011) Emergency management, Twitter, and social media evangelism.
- Lavabre, J. & Y. Grégoris (2005) AIGA: un dispositif d'alerte des crues sur l'ensemble du réseau hydrographique. *Ingénieries-EAT*, p. 3-p. 12.
- Le Bihan, G. 2016a. Distributed flash flood forecasts based on regional hydrological models: towards the forecast of flood possible impacts and damages. Université Bretagne Loire.
- . 2016b. Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides: vers une estimation des impacts et des dommages potentiels. Université Bretagne Loire.
- Le Bihan, G., O. Payrastre, E. Gaume & D. Moncoulon. 2015. Regional hydrological models for distributed flash-floods forecasting: towards an estimation of potential impacts and damages. In *9th Hymex Workshop*. Mykonos, Greece
- Ledoux, B. 2006. *La gestion du risque inondation*. Tec & doc.

- Lefrou, C., X. Martin, J.-P. Labarthe, J. Varret, B. Maziere, R. Tordjeman & R. Feunteun (2000) Les crues des 12, 13 et 14 novembre 1999 dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn. *Inspection Générale de l'Environnement Rep. 00/004*.
- Leone, F. 2007. Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes "naturelles": contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones). Université Paul Valéry-Montpellier III.
- Leone, F., J.-P. Asté & E. Leroi (1996) L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrains: pour une meilleure quantification du risque/The evaluation of vulnerability to mass movements: towards a better quantification of landslide risks. *Revue de géographie alpine*, 84, 35-46.
- Leone F., V. F. 2007. La vulnérabilité un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels In *La vulnérabilité des sociétés et des territoires dace aux menaces naturelles*, ed. Géorisques, 9-25. Université Montpellier III.
- Liverman, D. M. (1990) Vulnerability to global environmental change. *Understanding global environmental change: The contributions of risk analysis and management*, 26, 27-44.
- Llasat, M., M. Llasat-Botija, O. Petrucci, A. Pasqua, J. Rosselló, F. Vinet & L. Boissier (2013) Towards a database on societal impact of Mediterranean floods within the framework of the HYMEX project. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1337.
- Llasat, M. C., R. Marcos, M. Llasat-Botija, J. Gilabert, M. Turco & P. Quintana-Seguí (2014) Flash flood evolution in North-Western Mediterranean. *Atmospheric Research*, 149, 230-243.
- Luhmann, N. 1990. Risiko und Gefahr. In *Soziologische Aufklärung* 5, 131-169. Springer.
- Magne, L. 2010. Histoire sémantique du risque et de ses corrélats. In *Journées d'histoire de la comptabilité et du management*.
- Mandych, A. (2009) Classification of floods. *Water Interactions with Energy, Environment, Food and Agriculture-Volume II*, 218.
- Mariotti, A., M. V. Struglia, N. Zeng & K.-M. Lau (2002) The Hydrological Cycle in the Mediterranean Region and Implications for the Water Budget of the Mediterranean Sea. *Journal of Climate*, 15, 1674-1690.
- Masson, M., G. Garry & J.-L. Ballais. 1996. *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique*. Les Editions Villes et Territoires.
- McEnery, J., J. Ingram, Q. Duan, T. Adams & L. Anderson (2005) NOAA'S Advanced Hydrologic Prediction Service: Building Pathways for Better Science in Water Forecasting. 86.
- MEDDE. 2012. Principaux enseignements de la première évaluation des risques d'inondation sur le territoire français - EPRI 2011. 72.
- Mena, S. B. (2000) Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 4, 83-93.
- Merz, B., H. Kreibich, R. Schwarze & A. Thieken (2010) Review article" Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1697.
- Météo-France. Glossaire.
- . 2018. La météo de A à Z.
- Météo Languedoc. 2018. L'épisode méditerranéen. Lexiweb.
- Metzger, P. & R. D'Ercole. 2008. Enjeux territoriaux et vulnérabilité: une approche opérationnelle. In *Colloque interdisciplinaire «Vulnérabilités sociétales, risques et environnement: comprendre et évaluer»*.
- Milanesi, L., M. Pilotti & R. Ranzi (2015) A conceptual model of people's vulnerability to floods. *Water Resources Research*, 51, 182-197.
- Mileti, D. 1999. *Disasters by design: A reassessment of natural hazards in the United States*. Joseph Henry Press.
- Miller, G. A. (1956) The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63, 81.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 2018a. Géorisques.

- . 2018b. Vigicrues. ed. S. c. d. h. e. d. a. à. l. p. d. inondations. Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 2018.
- Mitchell, J. K. 1989. *Hazards research*. Merrill Publishing Company.
- Molinari, D., L. Legnani, P. T. di Lecco & D. Di Architettura (2013) La procedura Flood-IMPAT per la valutazione e mappatura del rischio alluvionale.
- Moliner-Dubost, M. (2016) Le territoire du risque. *Revue juridique de l'environnement*, 41, 468-475.
- Munich RE. 2017. Year of the floods. In *TOPICS GEO*, p. 80.
- Napolitano, E., I. Marchesini, P. Salvati, M. Donnini, C. Bianchi & F. Guzzetti (2018) LAND-deFeND—An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. *Journal of environmental management*, 207, 203-218.
- Naulin, J.-P. 2012. Modélisation hydrologique distribuée pour la prévision des coupures de routes par inondation: application au département du Gard.
- Naulin, J.-P., O. Payrastre & E. Gaume (2013) Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. *Journal of hydrology*, 486, 88-99.
- Norbiato, D., M. Borga & R. Dinale (2009) Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds. *Meteorological Applications*, 16, 65-75.
- NRC. 1999. *The impacts of natural disasters: A framework for loss estimation*. National Academies Press.
- Nussbaum, R. 2017. 2 - Observation and Measurement of Losses Due to Flooding. In *Floods*, ed. F. Vinet, 21-32. Elsevier.
- Olesen, L., R. Löwe & K. Arnbjerg-Nielsen (2017) Flood Damage Assessment.
- Orduña-Malea, E., J. M. Ayllón, A. Martín-Martín & E. D. López-Cózar (2015) Methods for estimating the size of Google Scholar. *Scientometrics*, 104, 931-949.
- Organde, D., P. Javelle & C. Ardilouze. 2013. Base nationale des bassins versants du schapi (BNBV). ed. D. G. d. I. P. d. R. n. i. DPGR.
- Ortega, K. L., T. M. Smith, K. L. Manross, A. G. Kolodziej, K. A. Scharfenberg, A. Witt & J. J. Gourley (2009) The severe hazards analysis and verification experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 1519-1530.
- Pagano, T. C., A. W. Wood, M.-H. Ramos, H. L. Cloke, F. Pappenberger, M. P. Clark, M. Cranston, D. Kavetski, T. Mathevet & S. Sorooshian (2014) Challenges of operational river forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 1692-1707.
- Pappenberger, F., K. Beven, K. Frodsham, R. Romanowicz & P. Matgen (2007) Grasping the unavoidable subjectivity in calibration of flood inundation models: A vulnerability weighted approach. *Journal of Hydrology*, 333, 275-287.
- Paprotny, D., O. Morales-Nápoles & S. N. Jonkman (2018) HANZE: a pan-European database of exposure to natural hazards and damaging historical floods since 1870. *Earth System Science Data*, 10, 565-581.
- Park, S., M. Berenguer, D. Sempere-Torres, C. Baugh & P. Smith. 2017. Toward seamless high-resolution flash flood forecasting over Europe based on radar nowcasting and NWP: An evaluation with case studies. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 12158.
- Parker, D., C. Green & P. Thompson. 1987. Urban Flood protection Benefits, a project appraisal guide "The Red Book". Gower Publishing Company, Brookfield, USA.
- Parker, D. J. 2000. *Floods*. London: Routledge.
- Parker, D. J. & J. W. Handmer (1998) The role of unofficial flood warning systems. *Journal of contingencies and crisis management*, 6, 45-60.
- Payrastre, O., J. P. Naulin, C. C. Nguyen & E. Gaume. 2012. Analyse hydrologique des crues de juin 2010 dans le Var. IFSTTAR-Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'....

- Peduzzi, P., H. Dao, C. Herold & F. Mouton (2009) Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 1149-1159.
- Penning, P., M. Fordham, C. Green, G. Hubert, A. Ketteridge, D. Parker, E. Peerbolte, W. Pflugner, B. Reitano & J. Rocha (1995) Floods across Europe; Hazard assessment, modelling and management. Results from the EUROFLOOD project.
- Perry, C. A. 2000. Significant floods in the United States during the 20th century-USGS measures a century of floods. US Geological Survey.
- Pigeon, P. (2002) Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. *Annales de Géographie*, 452-470.
- . 2005. *Géographie critique des risques*. Economica.
- Pijawka, D., A. Radwan & J. Soesilo (1988) Emergency response to a hazardous-materials rail incident in Casa Grande, Arizona. *Crisis Management: A Casebook*, 43-63.
- Pons, F., J.-L. Delgado, P. Guero & E. Berthier. 2010a. EXZECO: A GIS and DEM based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods. In *9th International Conference on Hydroinformatics HIC 9*. Tianjin, CHINA.
- Pons, F., J. Delgado, P. Guero, E. Berthier, B. Kerloc'h, S. Piney & D. Felts. 2010b. Une contribution à l'évaluation de l'aléa inondation par ruissellement et crues soudaines. In *Actes du colloque SimHydro*, 2-4.
- Pons, F., C. Laroche, P. Fourmigue & M. Alquier (2014) Cartographie des surfaces inondables extrêmes pour la directive inondation : cas de la Nartuby. *La Houille Blanche*, 34-41.
- Pradier, P.-C. 1998. Concepts et mesures du risque en theorie economique essai historique et critique. Cachan, Ecole normale supérieure.
- (2006) Histoire du risque. *Repères*, Volume 1, 8-15.
- Ramos, M., J. Thielen & A. de Roo (2009) Prévision hydrologique d'ensemble et alerte avec le système européen d'alerte aux crues (EFAS): cas des crues du bassin du Danube en août 2005. *Paris, Ed. Hermès Lavoisier*.
- Reghezza, M. (2009) Géographes et gestionnaires face à la vulnérabilité métropolitaine. Quelques réflexions autour du cas francilien (Coping with Metropolitan Vulnerability. The Case of the Paris Metropolitan Area). *Annales de géographie*, 669, 459-477.
- Renard, F. 2010. Le risque pluvial en milieu urbain: de la caractérisation de l'aléa à l'évaluation de la vulnérabilité: le cas du Grand Lyon. Lyon 3.
- Restrepo, P. J. (2017) The United States National Weather Service Real-Time Flood Forecasting. *Natural Hazard Science*.
- Roche, M. (1975) Méthodes de mesure des crues brutales. *Bulletin*.
- Ruin, I., J.-D. Creutin, S. Anquetin & C. Lutoff (2008) Human exposure to flash floods—Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France. *Journal of Hydrology*, 361, 199-213.
- Saaty, T. L. (1990) How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48, 9-26.
- Saaty, T. L. & M. S. Ozdemir (2003) Why the magic number seven plus or minus two. *Mathematical and computer modelling*, 38, 233-244.
- Saint-Martin, C. 2015. Les RS en appui au système d'avertissement des crues AIGA-Hydro. In *Les Smartphones et les réseaux sociaux comme outils d'aide à l'alerte face aux inondations : Enjeux et perspectives*. Université d'Avignon.
- Scarwell, H.-J. & R. Laganier (2003) Les recompositions de l'action publique en contexte transfrontalier.. L'exemple du district hydrographique de l'Escaut. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*.
- Scawthorn, C., N. Blais, H. Seligson, E. Tate, E. Mifflin, W. Thomas, J. Murphy & C. Jones (2006) HAZUS-MH flood loss estimation methodology. I: Overview and flood hazard characterization. *Natural Hazards Review*, 7, 60-71.
- Schaefer, J. T. (1990) The critical success index as an indicator of warning skill. *Weather and forecasting*, 5, 570-575.

- Schärlig, A. 1985. *Décider sur plusieurs critères: panorama de l'aide à la décision multicritère*. PPUR presses polytechniques.
- Sene, K. 2012. *Flash floods: forecasting and warning*. Springer Science & Business Media.
- Shabou, M. S. 2016. Extrêmes hydro-météorologiques et exposition sur les routes: Contribution à MobRISK: modèle de simulation de l'exposition des mobilités quotidiennes aux crues rapides. Université Grenoble Alpes.
- Smith, K. 2003. *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster*. Routledge.
- Smith, K. & R. Ward. 1998. *Floods: physical processes and human impacts*. John Wiley and Sons Ltd.
- Stocker, T., D. Qin, G. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. Midgley. 2013. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1535 pp. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, and New York.
- Summann, F. & N. Lossau (2004) Search engine technology and digital libraries-Moving from theory to practice. *D-Lib Magazine*, 10.
- Susman, P., P. O'Keefe & B. Wisner (1983) Global disasters, a radical interpretation. *Interpretations of calamity*, 263-283.
- Suzanne, J.-C. 1999. Rapport d'activité pour l'année 1999 de la mission d'inspection spécialisée de l'environnement. Pages : 41. . Paris: METT.
- Svoray, T., P. Bar & T. Bannet (2005) Urban land-use allocation in a Mediterranean ecotone: Habitat Heterogeneity Model incorporated in a GIS using a multi-criteria mechanism. *Landscape and Urban Planning*, 72, 337-351.
- Sweeney, T. L. (1992) Modernized areal flash flood guidance.
- Swiss Re Institute. 2017. Preliminary sigma estimates for 2017. In *global insured losses of USD 136 billion are third highest on sigma records*. Zurich, Switzerland.
- . 2018. Sigma explorer. Zurich, Switzerland.
- Terti, G. 2017. Forecasting of flash-flood human impacts integrating the social vulnerability dynamics. Grenoble Alpes.
- Thielen, J., J. Bartholmes, M.-H. Ramos & A. d. Roo (2009) The European flood alert system—Part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 125-140.
- Thouret, J.-C. & R. D'Ercole (1996) Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. *Cahier des Sciences Humaines*, 407-422.
- Timmerman, P. (1981) Vulnerability resilience and collapse of society. *A Review of Models and Possible Climatic Applications*. Toronto, Canada. Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
- Tixier, J., A. Dandrieux, G. Dusserre, R. Bubbico, B. Mazzarotta, B. Silveti, E. Hubert, N. Rodrigues & O. Salvi (2006) Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project. *Journal of Hazardous Materials*, 130, 251-264.
- Toreti, A., E. Xoplaki, D. Maraun, F.-G. Kuglitsch, H. Wanner & J. Luterbacher (2010) Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1037.
- Torterotot, J.-P. 1993. Le coût des dommages dus aux inondations: estimation et analyse des incertitudes.
- Treich, N. (2005) L'analyse coût-bénéfice de la prévention des risques. *LERNA-INRA, Université de Toulouse*.
- Tschoegl, L., R. Below & D. Guha-Sapir. 2006. *An analytical review of selected data sets on natural disasters and impacts*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters Louvain.
- UNISDR. 2005. Proceedings of the Conference. In *World Conference on Disaster Reduction, 18-22 January 2005*, p. 147 Kobe, Hyogo, Japan.
- . 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. 30 p.

- . 2015. Proceedings of the third UN World Conference on Disaster Reduction. In *UN World Conference on Disaster Risk Reduction, 14-18 March 2015*, p. 169. Sendai - Japan.
- United Nations Disaster Relief Coordinator. 1979. Natural Disasters and Vulnerability Analysis. In *Report of Expert Group Meeting, July 9-12, 1979*, 49 pp. Geneva.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction. 2009. Terminology on disaster risk reduction. UNISDR Geneva.
- Valdiserra, T. 2017. Application d'une méthode multicritère d'aide à la décision auprès d'un panel d'experts, en appui à une méthode d'estimation de l'exposition en Méditerranée. In *Mémoire de Master 2*, ed. Irstea, p. 87. Université Paul-Valéry, Montpellier III.
- Vallaud, R., G. Bernard, M. Christophe & G. Philippe. 2016. Référentiel national de vulnérabilité aux inondations. ed. CEREMA, 176 p.
- Varnes, D. J. 1984. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*.
- Velleman, P. F. & L. Wilkinson (1993) Nominal, ordinal, interval, and ratio typologies are misleading. *The American Statistician*, 47, 65-72.
- Versini, P. A. 2007. Surveillance du risque hydrologique diffus le long des itinéraires routiers: Eléments pour la construction d'un outil d'annonce de coupure. Ecole des Ponts ParisTech.
- Versini, P. A., E. Gaume & H. Andrieu (2010) Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information—test in a flash flood prone area (the Gard region, France).
- Veyret, Y. & M. Reghezza. 2005. Aléas et risques dans l'analyse géographique. In *Annales des mines*, 61-69.
- . 2006. Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité. In *Annales des mines*, 9-13.
- Vinet, F. 2007. Institutional approach vs. local constraints in risk management. Investigations into flood risk in Languedoc-Roussillon (southern France). Université Paul Valéry - Montpellier III.
- (2010) Le risque inondation. *Diagnostic et gestion, Collection Science du Risque et du Danger (SRD), série Innovations, Edition Tec et Doc Lavoisier*.
- Wallemacq, P., D. Guha-Sapir, D. McClean, Cred & Unisdr. 2015. *The Human Cost of Weather Related Disasters - 1995 - 2015*.
- Walter, F. 2009. *Catastrophes. Une histoire culturelle (XVIe-XXIe siècle): Une histoire culturelle (XVIe-XXIe siècle)*. Le Seuil.
- Wang, Y.-M. & K.-S. Chin (2011) Fuzzy analytic hierarchy process: A logarithmic fuzzy preference programming methodology. *International Journal of Approximate Reasoning*, 52, 541-553.
- Watson, R. T., M. C. Zinyowera & R. H. Moss. 1996. *Climate Change 1995 impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analysis*. Cambridge University Press.
- Watts, M. J. & H. G. Bohle (1993) The space of vulnerability: the causal structure of hunger and famine. *Progress in human geography*, 17, 43-67.
- Westrelin, S., S. Diss, P. Mériaux & J.-L. Chèze. 2010. Hydrometeorological risks in Mediterranean mountainous areas. In *Proc. Sixth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*.
- Westrelin, S., P. Mériaux, P. Tabary & Y. Aubert. 2012. RHYTMME Project: Risk management based on a radar network. In *Proc. European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*.

Annexes

Annexe A : Recueil de définitions pour la notion de vulnérabilité dans la littérature

Définition	Auteur	Année
The threat (to hazardous materials) to which people are exposed (including chemical agents and the ecological situation of the communities and their level of emergency preparedness). Vulnerability is the risk context.	(Griffith and Gabor)	1979
The degree of loss to a given element or set of elements at risk resulting from the occurrence of a natural phenomenon of a given magnitude.	(United Nations Disaster Relief Coordinator)	1979
The degree to which a system acts adversely to the occurrence of a hazardous event.	(Timmerman)	1981
Le risque est la combinaison de la réponse à trois questions: "Que peut-il arriver?", "Quelle est la probabilité que ça arrive?", "si cela arrive quelles seront les conséquences?"	(Kaplan and Garrick)	1981
The degree to which different classes of society are differentially at risk.	(Susman, O'Keefe and Wisner)	1983
The potential degree of damage that can be expected depending on the characteristics of an 'element at risk' with respect to a certain hazard	(Varnes)	1984
The capacity to suffer harm and react adversely.	(Kates, Ausubel and Berberian)	1985
The threat or interaction between risk and preparedness. It is the degree to which hazardous materials threaten a particular population (risk) and the capacity of the community to reduce the risk or adverse consequences of hazardous materials releases.	(Pijawka, Radwan and Soesilo)	1988

Vulnerability is operationally defined as the inability to take effective measures to insure against losses. When applied to individuals, vulnerability is a consequence of the impossibility or improbability of effective mitigation and is a function of our ability to detect the hazards.	(Bogard)	1988
Vulnerability is the potential for loss.	(Mitchell)	1989
A potential for loss with two sides: the shocks and perturbations from outside exposure and the ability or lack of ability from the internal side, its resilience.	(Chambers)	1989
Vulnerability in geographic space (where vulnerable people and places are located) and vulnerability in social space (who in that place is vulnerable).	(Liverman)	1990
Vulnerability has three conditions: it refers to a consequence (e.g., famine rather than a cause (e.g., drought); it implies an adverse consequence (e.g., maize yields are sensitive to drought; households are vulnerable to hunger); and it is a relative term that differentiates among socioeconomic groups or regions, rather than an absolute measure of deprivation.	(Downing)	1991
Human vulnerability is a function of the costs and benefits of inhabiting areas at risk from natural disaster.	(Alexander)	1991
The degree of incapability to cope with the consequences of climate change and sea-level rise	(Carter et al.)	1992
The differential capacity of groups and individuals to deal with hazards, based on their positions within physical and social worlds.	(Dow)	1992
Vulnerability is defined in terms of exposure, capacity and potentiality.	(Watts and Bohle)	1993
L'évaluation quantitative voire monétaire des dommages ou impacts.	(Torterotot)	1993
La propension d'une société donnée à subir des dommages ou des dysfonctionnements en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique	(d'Ercole et al.)	1994
Le niveau d'endommagement potentiel (compris entre 0 et 1) d'un élément exposé donné, soumis à l'action d'un phénomène pressenti ou déclaré, d'intensité donnée.	(Leone et al.)	1994

The likelihood that an individual or group will be exposed to and adversely by a hazard. It is the interaction of the hazards of place (risk and mitigation) with the social profile of communities.	(Cutter)	1996
The extent to which climate change may damage or harm a system; it depends not only on a system's sensitivity but also on its ability to adapt to new climatic conditions	(Watson et al.)	1996
The extent to which climate change may damage or harm a system; it depends not only on a system's sensitivity but also on its ability to adapt to new climatic conditions.	Watson et al.	1999
La fragilité d'un système socio-économique dans son ensemble face au risque.	(Hubert and Ledoux)	1999
A function of three main components: resistance, resilience and susceptibility	(Klein and Nicholls)	1999
Elle traduit la fragilité d'un système dans son ensemble, et de manière indirecte sa capacité à surmonter la crise provoquée par l'aléa.	(d'Ercole and Pigeon)	1999
An aggregate measure of human welfare that integrates environmental, social, economic and political exposure to a range of potential harmful perturbations.	(Bohle)	2001
The breadth of social and economic tolerance available at the same site.	(Smith)	2003
En France, cette notion demeure floue, évolutive dans le temps et multiple, elle caractérise tantôt le matériel (dégâts) et tantôt l'immatériel (vécu des populations)	(Scarwell and Laganier)	2003
The characteristics of a person or group in terms of their capacity to anticipate, cope with, resist and recover from the impact of a natural hazard.	(Blaikie et al.)	2004
The potential for a receptor to be harmed	(Penning et al.)	2004
An internal risk factor of the subject or system that is exposed to a hazard and corresponds to its intrinsic predisposition to be affected, or to be susceptible to damage.	(Cardona)	2004
A function of susceptibility, resilience, and state of knowledge	(Gheorghe)	2005

This concept is a powerful analytical tool to describe states of susceptibility to harm, powerlessness, and marginality of both physical and social systems, and for guiding normative analysis of actions to enhance well-being through reductions of risk.	(Adger)	2006
Vulnerability is considered as the extent of harm, which can be expected under certain conditions of exposure, susceptibility and resilience. More specific in the case of floods: the extent to which a system is susceptible to floods due to exposure, a perturbation, in conjunction with its capacity/incapacity to be resilient, to cope, recover or adapt	(Balica, Douben and Wright)	2009
The characteristics and circumstances of a community, system or asset that make it susceptible to the damaging effects of a hazard.	(United Nations International Strategy for Disaster Reduction)	2009
L'ensemble des faiblesses ou défaillances susceptibles de dégrader ou d'interrompre son fonctionnement [d'un enjeu], voire de le détruire, quelles qu'en soient les causes.	(D'Ercole and Metzger)	2009
A concept offering potent explanations for differences in the degree of damage incurred from natural hazards that manifested for an individual person, for a whole community, a city or an entire region.	(Hufschmidt)	2011
A function of exposure, resilience and resistance	(Cutter, Richardson and Wilbanks)	2014
A function of the potential damage to a target due to the occurrence of the hazardous event.	(Milanesi et al.)	2015

Annexe B : Support de présentation des entretiens AHP

Evaluation de la vulnérabilité aux inondations à l'échelle locale



Stage de recherche Thibault Valdiserra
Thèse de Clotilde Saint-Martin



1

Organisation de l'entretien

EVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ AU RISQUE INONDATION

• Présentation du sujet de recherche

- Contexte général
- Présentation de la thèse
- Présentation du stage

• Présentation de la méthode

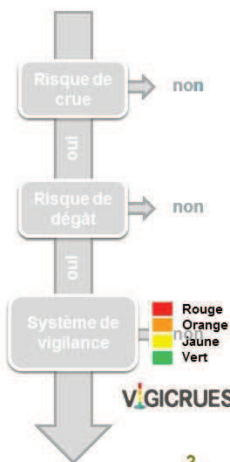
• Réalisation de l'entretien



2

Présentation du sujet de recherche CONTEXTE GÉNÉRAL

PARTIE 1 :
PRÉSENTATION
DU SUJET DE
RECHERCHE

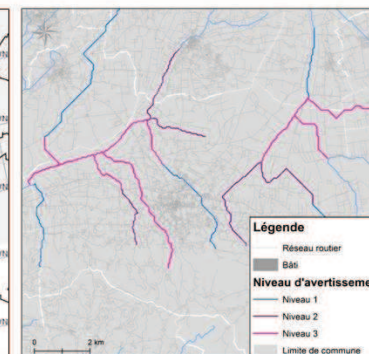
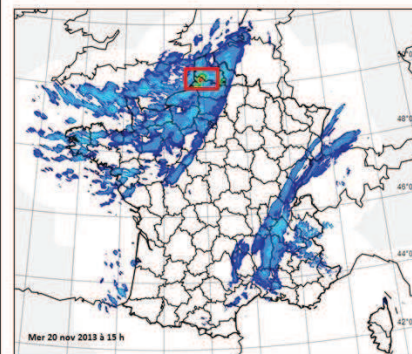


3

PLUIE OBSERVEE

MODELE
HYDROLOGIQUE

ALERTE

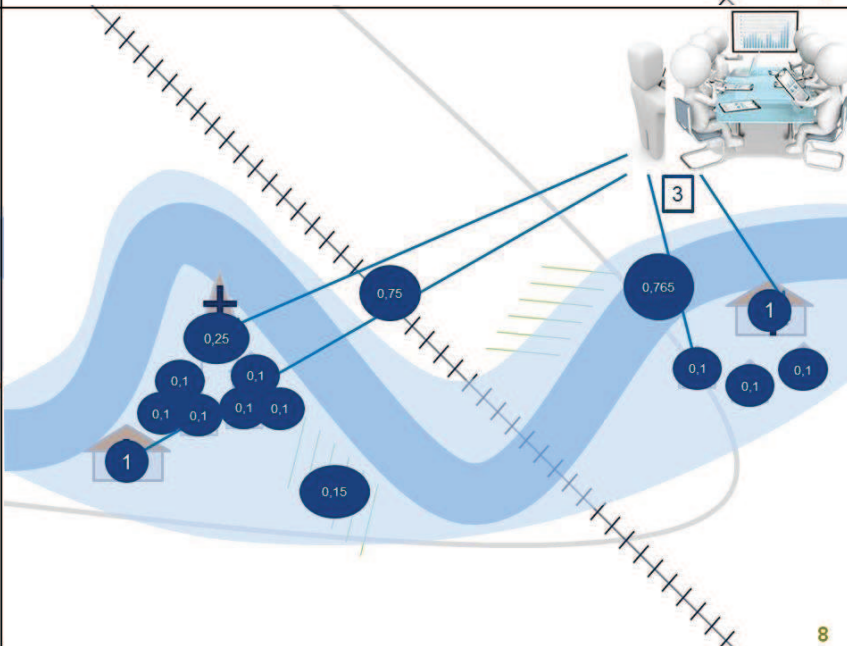
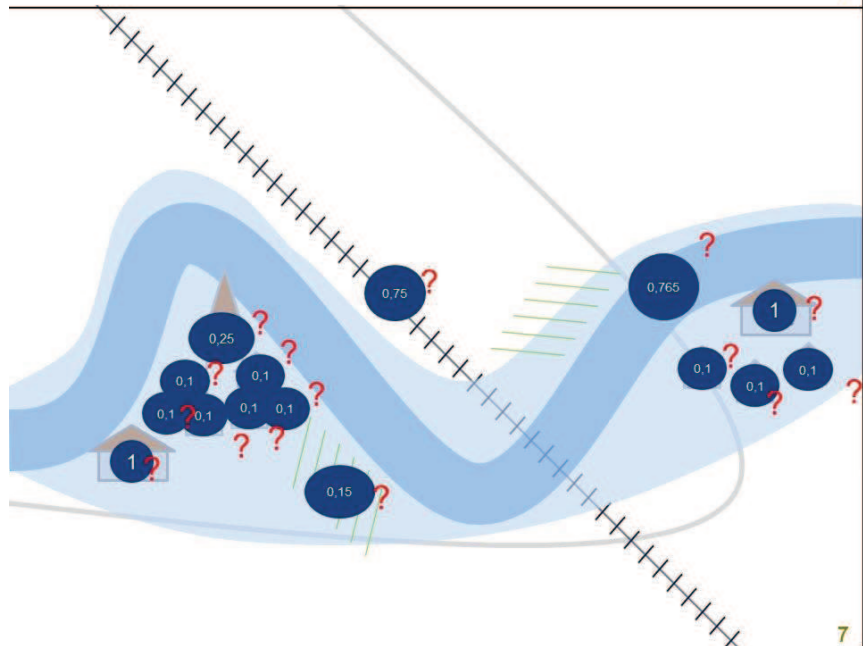
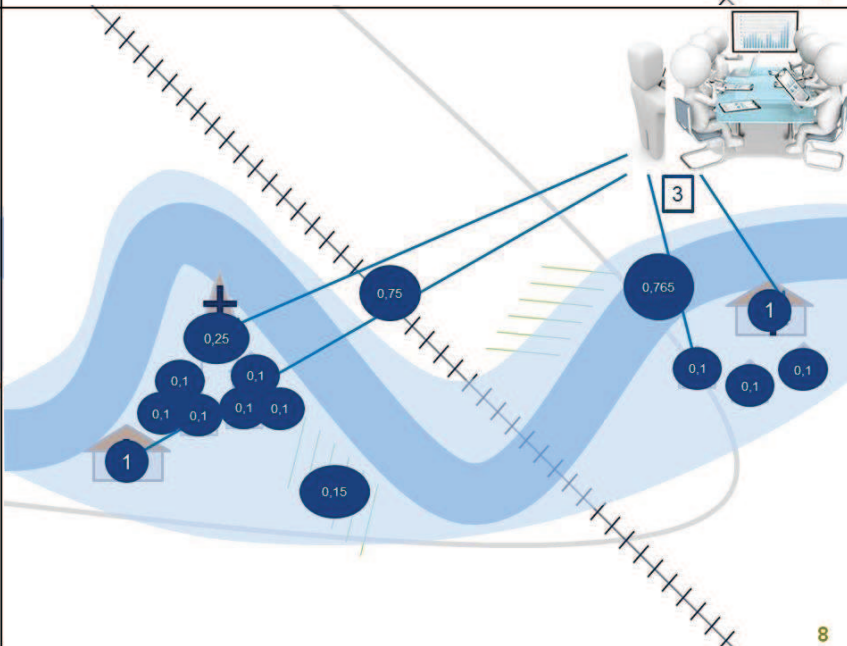
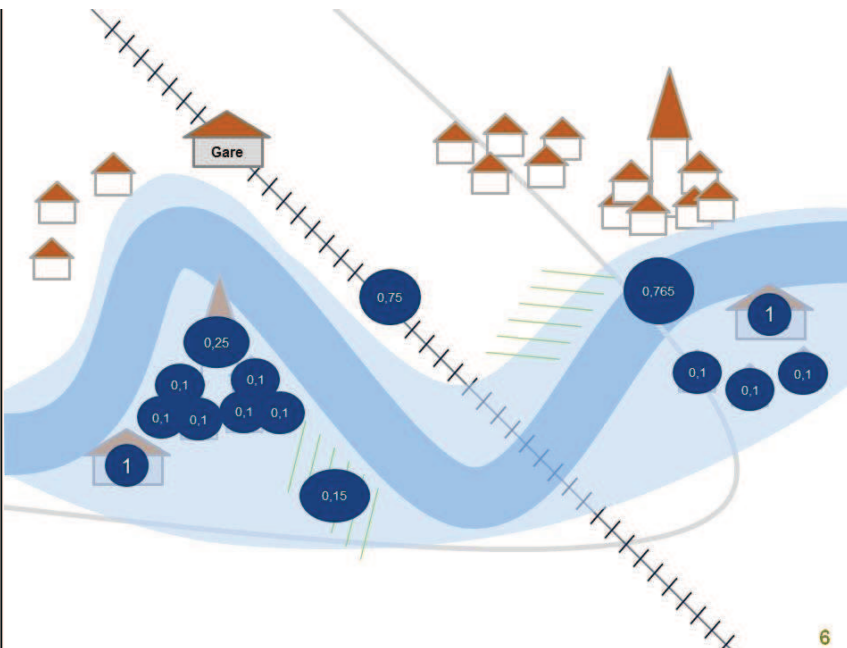
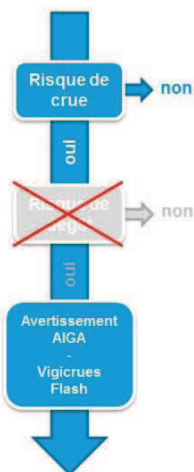


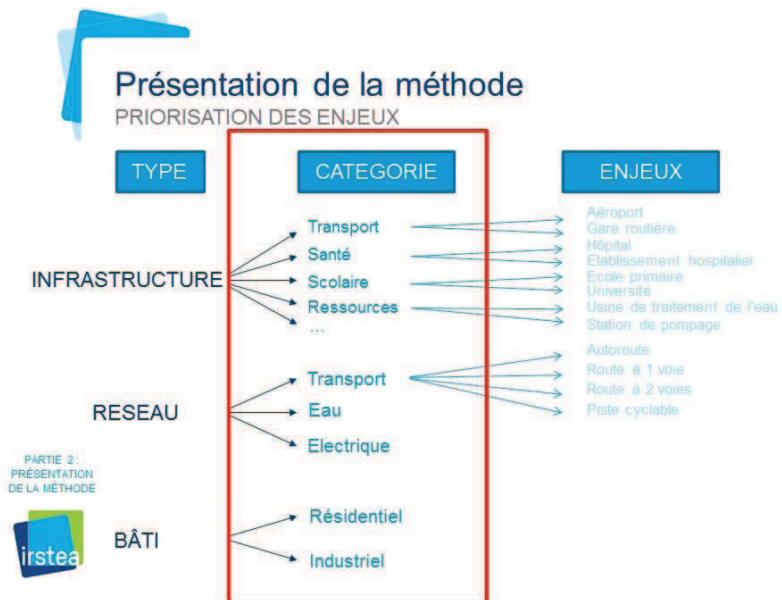
4

Présentation du sujet de recherche

CONTEXTE GÉNÉRAL

PARTIE 1 :
PRÉSENTATION
DU SUJET DE
RECHERCHE





9

Présentation de la méthode

PRIORISATION DES ENJEUX

Méthode : comparaison d'éléments du territoire deux à deux pour établir une hiérarchisation.

Mise en contexte : sur une commune imaginaire, **quel est, selon vous le type d'infrastructure dont l'endommagement serait le plus grave pour la commune entre X et Y?**

Ex :

	PARKING	ECOLE
PARKING	1	3
ECOLE	1/3	1

Puis 9 (e: ale) à

Ex: si l'école était inondée ce serait selon moi 3 fois plus grave

PARTIE 2: PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

irstea

10

Présentation de la méthode

MÉTHODE DITE DE L'AHP

Degré d'importance numérique	Degré d'importance verbale	Explication
1	Egale importance	Les deux éléments sont d'une vulnérabilité égale
3	Importance modérée	Un élément est légèrement plus vulnérable que l'autre
5	Importance forte	Un élément est plus vulnérable que l'autre
7	Importance très forte	Un élément est beaucoup plus vulnérable que l'autre
9	Importance extrême	Un élément est extrêmement plus vulnérable que l'autre

PARTIE 2: PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

irstea

11

Présentation de la méthode

MÉTHODE DITE DE L'AHP

TABLEAU DE COMPARAISON

PARTIE 2: PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

irstea

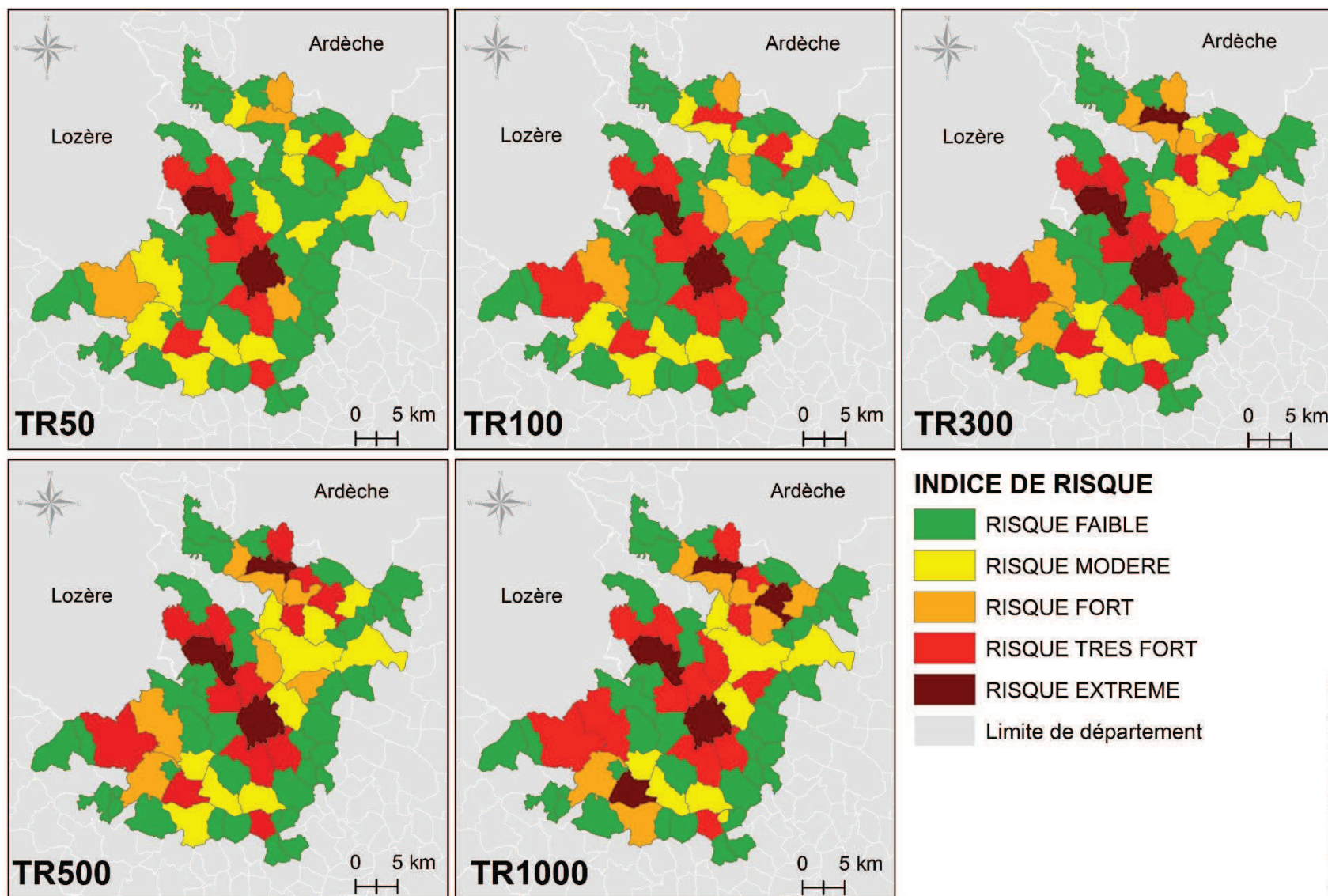
12

	PARKING	PRISON	SERVICE ADMINISTRATION	SANTE	SCOLAIRE	LOGEMENT SAISONNIER	ZONE D'ACTIVITE	INDUSTRIE DANGEREUSE	LOISIR	GESTION DE CRISE	RESEAU FERROVIAIRE	BÂTIMENT TRANSPORT	RESEAU ROUTIER	RESEAU ELECTRIQUE	RESEAU D'EAU	ZONE RESIDENTIELLE	AGRICOLE
PARKING	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PRISON	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SERVICE ADMINISTRATION	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SANTE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SCOLAIRE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LOGEMENT SAISONNIER	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ZONE D'ACTIVITE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
INDUSTRIE DANGEREUSE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LOISIR	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	0
GESTION DE CRISE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0	0
RESEAU FERROVIAIRE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0	0
BÂTIMENT TRANSPORT	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0	0
RESEAU ROUTIER	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0	0
RESEAU ELECTRIQUE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0	0
RESEAU D'EAU	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0	0
ZONE RESIDENTIELLE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	0
AGRICOLE	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1

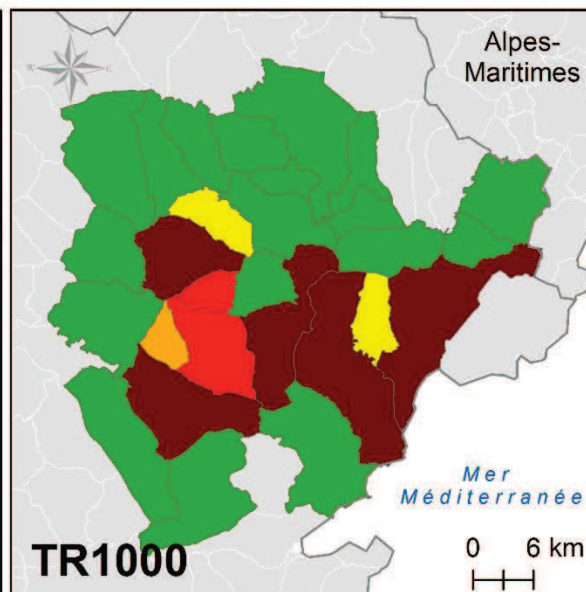
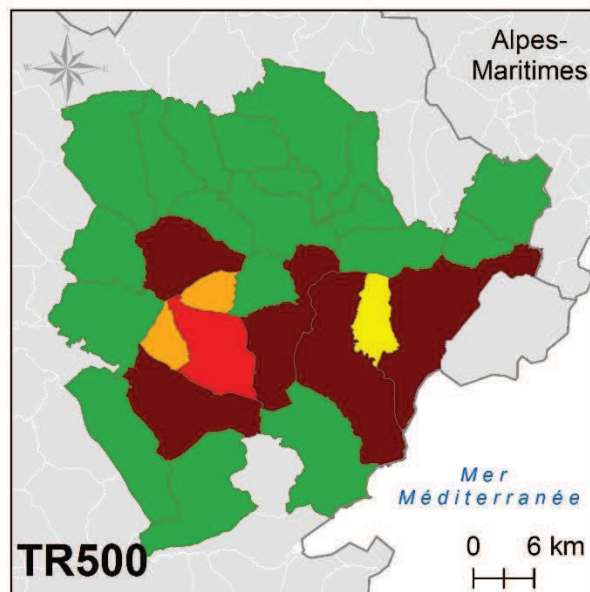
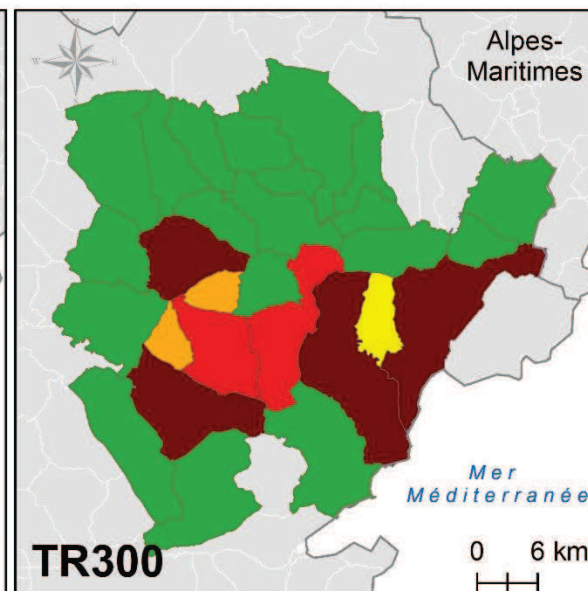
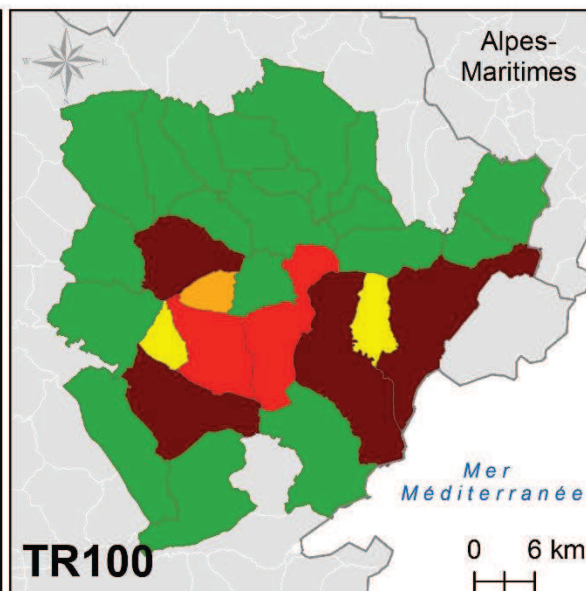
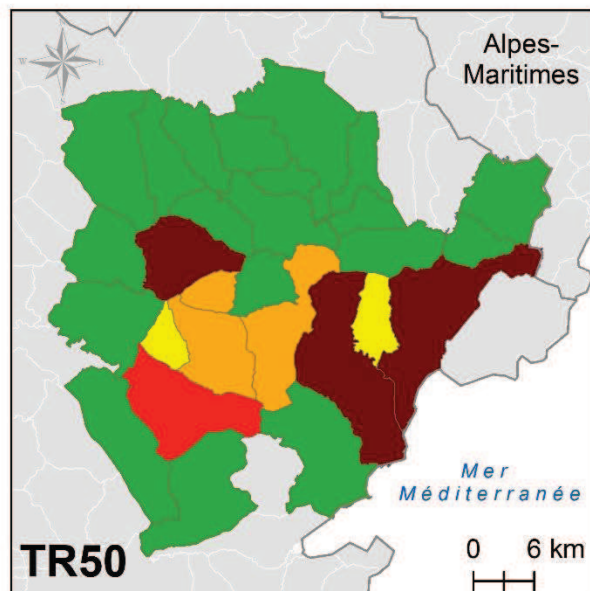
Annexe C : Support de présentation des entretiens AHP

	Commune 1	Commune 2	Commune 3	Commune 4	Commune 5	Commune 6	Commune 7	Commune 8	Commune 9	Commune 10	Commune 11	Commune 12	Commune 13	Commune 14	Commune 15	Commune 16	Commune 17	Commune 18	Commune 19
PARKING	0,13	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,11	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
PRISON	0,01	0,06	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,06	0,01	0,06	0,09	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,03	0,01	0,04
SERVICE ADMINISTRATIF	0,02	0,02	0,04	0,01	0,02	0,03	0,06	0,07	0,02	0,05	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,08	0,05	0,01	0,03
SANTÉ	0,06	0,10	0,09	0,12	0,19	0,10	0,10	0,08	0,16	0,10	0,12	0,04	0,10	0,05	0,07	0,12	0,11	0,14	0,20
SCOLAIRE	0,08	0,11	0,02	0,13	0,19	0,13	0,09	0,18	0,08	0,09	0,14	0,09	0,19	0,05	0,12	0,13	0,11	0,14	0,15
LOGEMENT SAISONNIER	0,06	0,09	0,03	0,04	0,02	0,06	0,03	0,02	0,10	0,05	0,06	0,04	0,02	0,03	0,02	0,10	0,02	0,04	0,10
ZONE D'ACTIVITÉ	0,07	0,04	0,05	0,06	0,06	0,02	0,08	0,06	0,07	0,04	0,05	0,05	0,06	0,11	0,07	0,09	0,06	0,03	0,07
INDUSTRIE DANGEREUSE	0,07	0,12	0,16	0,07	0,08	0,20	0,14	0,09	0,09	0,13	0,18	0,10	0,04	0,01	0,13	0,02	0,06	0,17	0,07
LOISIR	0,03	0,02	0,05	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03	0,07	0,03	0,04	0,08	0,02	0,03	0,08	0,07	0,02	0,05	0,02
GESTION DE CRISE	0,10	0,11	0,09	0,20	0,06	0,21	0,11	0,15	0,06	0,22	0,05	0,07	0,11	0,01	0,13	0,09	0,19	0,10	0,10
RESEAU FERROVIAIRE	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
BÂTIMENT TRANSPORT	0,07	0,05	0,06	0,06	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	0,06	0,04	0,03	0,08	0,04	0,01	0,03	0,02
RESEAU ROUTIER	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,07	0,04	0,02	0,04	0,08	0,20	0,05	0,05	0,09	0,06	0,03
RESEAU ELECTRIQUE	0,07	0,06	0,07	0,07	0,04	0,01	0,05	0,11	0,06	0,04	0,02	0,07	0,05	0,10	0,04	0,03	0,08	0,04	0,04
RESEAU D'EAU	0,06	0,06	0,03	0,08	0,04	0,02	0,06	0,01	0,06	0,03	0,02	0,09	0,03	0,09	0,04	0,02	0,06	0,10	0,05
ZONE RESIDENTIELLE	0,05	0,06	0,13	0,03	0,09	0,05	0,06	0,03	0,06	0,04	0,12	0,08	0,13	0,07	0,09	0,07	0,07	0,04	0,03
AGRICOLE	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,03	0,08	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Cohérence	0,40	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,20	0,40	0,20	0,10	0,20	0,10	0,30	0,30	0,30	0,20	0,30	0,20

Annexe D : Evaluation du risque de dommages à l'échelle communale de T50 à T1000



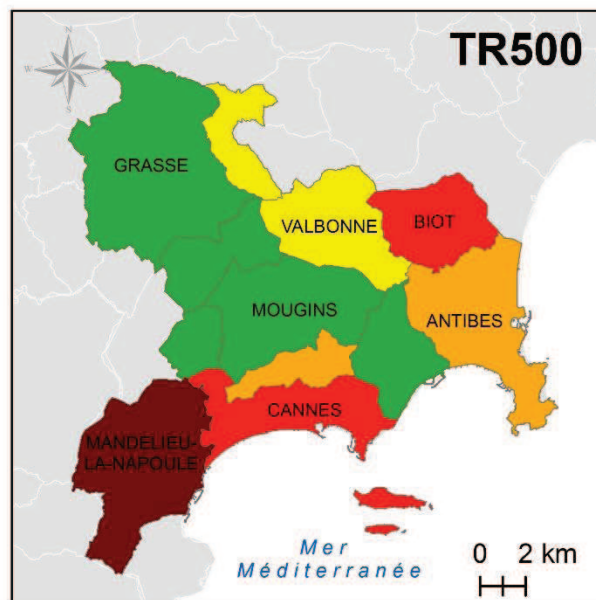
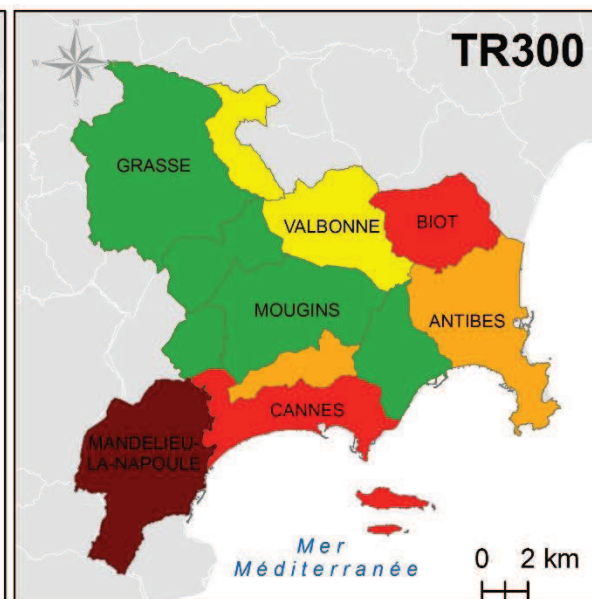
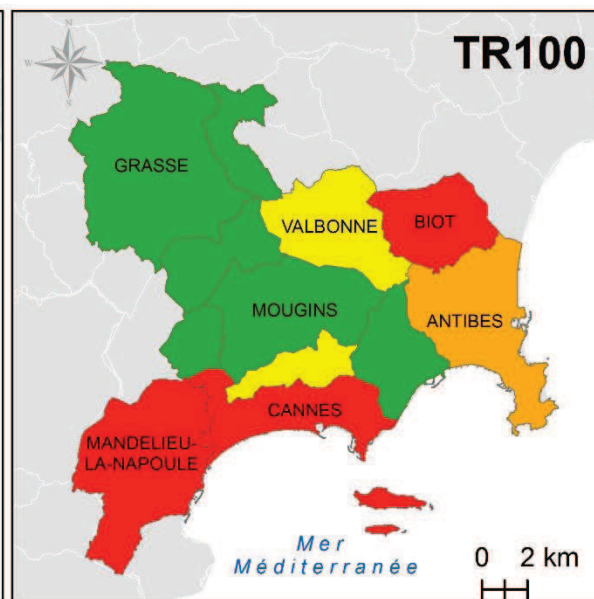
Conception : C. Saint-Martin (2018)



INDICE DE RISQUE

- RISQUE FAIBLE
- RISQUE MODERE
- RISQUE FORT
- RISQUE TRES FORT
- RISQUE EXTREME
- Limite de département

Conception : C. Saint-Martin (2018)



INDICE DE RISQUE

- RISQUE FAIBLE
- RISQUE MODERE
- RISQUE FORT
- RISQUE TRES FORT
- RISQUE EXTREME
- Limite de département

Conception : C. Saint-Martin (2018)

Earth Syst. Sci. Data, 10, 1019–1029, 2018
<https://doi.org/10.5194/essd-10-1019-2018>
© Author(s) 2018. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.



Open Access
Earth System
Science
Data

DamaGIS: a multisource geodatabase for collection of flood-related damage data

Clotilde Saint-Martin¹, Pierre Javelle¹, and Freddy Vinet²

¹Institut de Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement, IRSTEA,
Unité de recherche RECOVER, Aix-en-Provence, France

²Université Paul Valéry Montpellier III, Montpellier, France

Correspondence: Clotilde Saint-Martin (clotilde.saint-martin@irstea.fr)

Received: 27 February 2018 – Discussion started: 2 March 2018

Revised: 4 May 2018 – Accepted: 12 May 2018 – Published: 7 June 2018

Abstract. Every year in France, recurring flood events result in several million euros of damage, and reducing the heavy consequences of floods has become a high priority. However, actions to reduce the impact of floods are often hindered by the lack of damage data on past flood events. The present paper introduces a new database for collection and assessment of flood-related damage. The DamaGIS database offers an innovative bottom-up approach to gather and identify damage data from multiple sources, including new media. The study area has been defined as the south of France considering the high frequency of floods over the past years. This paper presents the structure and contents of the database. It also presents operating instructions in order to keep collecting damage data within the database. This paper also describes an easily reproducible method to assess the severity of flood damage regardless of the location or date of occurrence. A first analysis of the damage contents is also provided in order to assess data quality and the relevance of the database. According to this analysis, despite its lack of comprehensiveness, the DamaGIS database presents many advantages. Indeed, DamaGIS provides a high accuracy of data as well as simplicity of use. It also has the additional benefit of being accessible in multiple formats and is open access. The DamaGIS database is available at <https://doi.org/10.5281/zenodo.1241089>.

1 Introduction

Between 1995 and 2015, floods have affected more than 2.3 billion people and caused about USD 662 billion in damage around the world. By comparison, landslides and wildfires have affected 8 million people and caused USD 100 billion in damage, whereas all geophysical hazards combined have caused USD 787 billion in damage in the same period of time (Wallemacq et al., 2015). Although the current situation is already alarming, different studies have estimated that the socioeconomic impact of river floods will more than triple by the end of the century due to continued changes in land use (Alfieri et al., 2015; Pigeon, 2002; Munich RE, 2017). Moreover for the future, it is planned that climate change will also contribute significantly to the increase of human exposure to floods (Pachauri et al., 2014).

To date in France, the insurance trade associations have estimated the total cost of flood-related damage at EUR 1–

1.4 billion a year (Bourguignon, 2014). For example, floods in the Alpes-Maritimes area in October 2015 resulted in 20 fatalities and a total amount of estimated damage greater than EUR 600 million (Saint-Martin et al., 2016; CCR, 2017). More recently, from May to June 2016, large parts of the Parisian basin were also flooded. More than 2000 municipalities were affected by this event for a total cost of damage to insured goods higher than EUR 1.4 billion (Van Oldenborgh et al., 2016; Ramos et al., 2017; CCR, 2016).

In 2015, the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction defined four new priorities for action to reduce the impact of disasters around the world. Because of this, the need to “Systematically evaluate, record, share and publicly account for disaster losses” (UNISDR, 2015) was acknowledged as a major priority. It has been shown that collection of loss data would help to increase knowledge on disasters, in-

cluding floods, and thereby reduce their consequences (Molinari et al., 2017).

1.1 Damage data collection

Although the word “damage” is usually defined as physical harm caused to an object, the concept of “flood damage” may refer to a wide range of items. There is a common understanding that flood damage can be described as direct or indirect as well as tangible or intangible (Parker, 2000). We may refer to the notion of direct damage if caused by contact with flood water. On the other hand, tangible damage results if damage can be measured in monetary value and thus objectively quantified (Parker et al., 1987; Smith and Ward, 1998). This paper only focuses on direct and tangible damage data to enable the assessment of damage severity.

The need for a comprehensive and inclusive flood damage database has been underlined by many authors over the years (Gerl et al., 2016; Mileti, 1999; NRC, 1999; Dille, 2005; Bubeck et al., 2011; Elmer, 2012). The most prominent disaster-related damage databases used today are EM-DAT and NatCat (Kron et al., 2012). The emergency events database (EM-DAT) is a free and worldwide database on disaster-related damage using multiple sources (Guha-Sapir et al., 2015; Hoyois and Guha-Sapir, 2003). It contains information on fatalities and costs resulting from more than 20 000 disasters which have occurred since 1900. However, EM-DAT is only available at a country level and does not offer information on the type of damage. The Munich RE NatCatService private database also provides information on the natural disasters that have taken place since 1980 around the world. It also provides information on damage costs and fatalities per event at a regional scale, which is more precise than the EM-DAT database (Guha-Sapir and Below, 2002). However, information on the type of damage is still lacking. At the European scale, the HyMeX project has led to the creation of a database recording the societal impact of Mediterranean floods (Llasat et al., 2013). This database has gathered 385 flood events which occurred between 1981 and 2010. This HyMeX database is more accurate and comprehensive than EM-DAT and NatCat databases. But unfortunately it does not provide details about damage due to flood events.

It is fair to say that the United States is years ahead of the rest of the world with regard to disaster-related damage data collection (Tschoegl et al., 2006). For instance, the American National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) provides a database for flood fatalities and costs caused by weather events since 1903 at a county level, called the Storm Events Database (Downton et al., 2005; National Climatic Data Center, 2015). SHELATUS is another county-level hazard database for the United States (Hazards and Vulnerability Research Institute, 2013). Unlike NOAA's Storm Events Database, which is foremost interested in weather events independent of loss, SHELATUS focuses on loss data. Between

2008 and 2010, an experiment was also conducted by one of NOAA's laboratories to collect specific data on flash floods called the Severe Hazards Analysis and Verification Experiment (SHAVE; Gourley et al., 2013; Cialanno et al., 2013; Ortega et al., 2009).

In Europe, several countries have implemented their own databases on flood damage at the national scale. Germany has the HOWAS21 database (Kreibich et al., 2017), Switzerland the Swiss Flood and Landslide Damage Database (Kron et al., 2012) and Italy the FloodCat database (Molinari et al., 2013). Italy also has developed several projects to enhance the collection of flood damage at the national scale. Among these projects, the AVI (Italian vulnerable area or Aree Vulnerate Italiane) project may be mentioned. The AVI project aimed to create a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy based on newspaper screening from 1918 to 1990 (Guzzetti et al., 1994). More recently, the LAND-deFeND (LANDslides and Floods National Database) project has developed a new database structure to store and organize information on landslide and flood events (Napolitano et al., 2018). Both of these projects are very similar initiatives to the work presented in this paper.

In France today, neither an easily accessible nor a complete database on flood-related damage is available at the local scale, that is, at the scale of the municipality. However, an initiative was launched to this effect in 1976 by the French Ministry of Environment, although it did not yield a concrete outcome, as suggested in Molinari et al. (2017).

The French GASPARD database is available at the municipal scale. However, it only contains information on whether or not a municipality has been damaged by a flood and provides no information on damage type or severity. Although insurance companies have been collecting accurate data on flood damage, they only disseminate synthetic data at the department level (through ONRN <http://www.onrn.fr/site/>, last access: 2 February 2018) or for major events only (through the web site <https://erisk.ccr.fr/faces/erisk-accueil.jspx>, last access: 2 February 2018). The respect of privacy rights and/or commercial confidentiality makes it difficult to openly communicate information such as damage to private housing. However, even insurance companies do not have access to complete flood damage data. Their data only concern private households and business premises, excluding all information on public infrastructures.

Emergency services also have time-stamped and localized records of their operations during flood events such as rescue services or emergency pumping. However, there are no established standards on how to collect and organize those data at the national scale. This might make them difficult to aggregate but also to use and analyse from one location to another. Moreover, this heterogeneity as well as the confidentiality of these data add to the complexity of acquiring them.

This review of the existing databases on flood-related damage at different scales has made it possible to identify the shortcomings and the requirements that need to be addressed

in order to implement a new database. This paper presents a new database, called the DamaGIS database, which compiles and structures flood-related damage in the south of France. It is a new approach which aims to provide fine-scale damage data and a preliminary assessment of its severity.

1.2 Structure of the paper

Although it is not fully comprehensive, DamaGIS provides a detailed database for flood-related damage combined with an assessment of damage severity. This database has only been implemented in the south of France for now, but this paper initiates a new approach to characterize, organize and share flood damage data at a fine spatial scale. This paper contains the necessary information to understand, use and continue completing the DamaGIS database.

First in Sect. 2, the characteristics of the DamaGIS database are introduced along with its content and organization. Section 3 presents and explains the damage rating method used within the database. In Sect. 4, an analysis of the damage contents is provided. Section 5 presents the benefits, limitations and perspectives of the DamaGIS database.

2 The DamaGIS database

2.1 Sources of information

DamaGIS is a community-based and multisource database for object-specific flood damage caused by river floods. Since 2011, direct and tangible damage caused by flash floods in the south of France have been systematically collected in the DamaGIS database. To this aim, numerous sources of information have been used for comprehensiveness purposes:

- corporate websites;
- personal blogs;
- local authorities;
- public administration;
- on-site observations;
- social network media (Facebook, Twitter) and video-sharing websites (Youtube, Dailymotion), and
- online media.

To ensure data reliability, a direct web link to the sources of information is added to the database for each damage occurrence. For now, DamaGIS data have been manually entered by a small group of people, a very time-consuming process. This bias will be corrected by means of multiple contributors. The objective for the database is to evolve it towards a participatory functioning. However, data may also be directly bought from social media companies using keywords and an

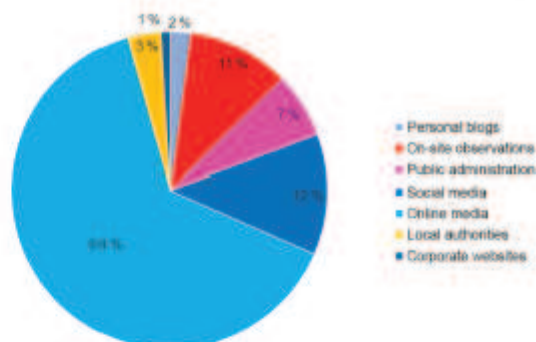


Figure 1. Distribution of data sources in the DamaGIS database for the 2011–2016 period. New media are represented in shades of blue.

area with a given radius. In this case, substantial extra costs should be taken into consideration.

The various sources of DamaGIS damage data were analysed (Fig. 1) to highlight the prominence of new media, accounting for three-quarters of the data collected (78 %). New media can be defined as the sources of information shared using digital technology such as blogs, social media, online media and websites. Using these new media makes it possible to obtain information at a fine spatial scale where traditional media are not always present.

Among the new media, social media holds a prominent place. It can be defined as “a group of Internet-based applications that build on the ideological and technological foundations of Web 2.0, and that allow the creation and exchange of user-generated content” (Kaplan and Haenlein, 2010). The rise of social media enables direct access to damage data from the people who are present during or after a flood event (Dashti et al., 2014; Fig. 2). Sources of information are therefore multiplied. This is a way to counterweigh the overrepresentation of large or more impacted cities during and after floods (Douvinet and Vinet, 2012).

Indeed, the use of social media in addition to traditional media will contribute to give more information about territories which get less traditional media coverage but have as much damage as territories with a strong media coverage. For instance, after the flood of the 3 October 2015 many municipalities have been affected by floods but traditional media have only focused their attention on two of them because of the fatalities.

Information on flood damage is collected in new media by entering flood-related keywords in search engines. Then the outcomes are sorted from the most recent to the oldest to be later assessed. When information is considered relevant with a precise location, it is added to the database. To obtain precise information on damage location, an extensive photographic recognition task was completed for non-localized



Figure 2. Examples of flood-related damage information publicly available in new media (from left to right and below: screenshot of the Facebook page of a mosque in Cannes, screenshot from the Nice-Matin newspaper website, and a screenshot of a tweet from the France Bleu Azur radio).

damage. This means deducing the location of a damaged element from a picture, using easily recognizable objects such as road signs, store fronts, vegetation, etc.

2.2 Structure of the database

From the different sources presented in the previous section, we extract what we call “damage data”. It consists of information on damaged elements, with a time-stamp and a location. Each damaged element corresponds to a single object organized within the DamaGIS database, implemented as a geodatabase in the ArcGIS software to have a vectorial format for data tables in the form of feature classes. DamaGIS is based on a system with two feature classes interconnected by keys. The conceptual data model which organizes this system is presented in Fig. 3. Each DAMAGE entry is related to a row within the DAMAGE feature class and is connected to a single EVENT feature. However, one EVENT feature might refer to several DAMAGE entries. For both feature classes, the Lambert-93 reference system has been used because it is the reference system for national geographic data in France (Decree no 2006-272 of 3 March 2006). However, the use of Lambert-93 is specific to the French territory and not suitable for other countries. However, using a more generic coordinate system would cause a loss of precision in the damage location. Then, if needed, the coordinate system can be easily transformed using a geographic information system (GIS) software from Lambert-93 to a more generic coordinate system such as WGS84.

The first feature class is called “EVENT”. It is a shape field containing polygon geometries for geographic features.

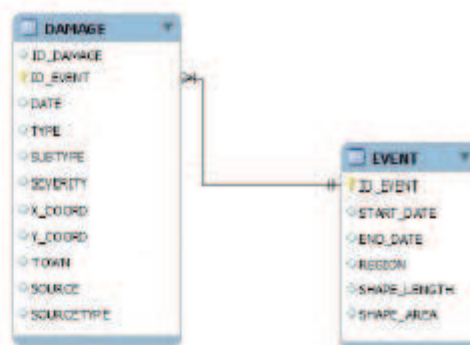


Figure 3. Data structure diagram organizing the connections between the DAMAGE and EVENT feature classes.

The EVENT feature class identifies flood events that have caused damage. We define a flood event as “the overflowing of one or several rivers due to a similar meteorological phenomenon that causes the flooding of lands that are normally dry”. Since 2011, 23 flood events have been recorded in the south of France and included in the database. Each flood event corresponds to a polygon feature. It is related to a single row within the EVENT feature class and has a unique identifier. The polygon features correspond to French administrative entities known as departments (NUTS3 European level) where flood events have caused damage. The EVENT feature class contains six fields in addition to the shape field.

- ID_EVENT: unique identifier of the flood event,
- START_DATE: starting date of the flood event,
- END_DATE: ending date of the flood event,
- REGION: name of the area impacted by the event,
- Shape_Length: the length of the shapefile feature,
- Shape_Area: the area of the shapefile feature.

Both Shape_Length and Shape_Area attribute fields are automatically added during the creation of the polygon feature classes such as EVENT. Those fields can not be deleted and represent the length and area of the shapefile features.

More detailed information about flood events could have been included in the database such as magnitude or amount of cumulated rainfall during an event. However, this type of information has been kept separate. Instead, precise location and date of damage are provided. This enables the potential users to cross DamaGIS with any other data sources such as the research “FloodHymex database” (http://mistrals.sedoo.fr/HyMeX/?project_name=HyMeX) (Liasat et al., 2013).

The second and main feature class of the structure is the DAMAGE one, which catalogues flood-related damage. It

is a shape field containing point geometries for geographic features. Each damage entry in the feature class is associated with a unique identifier and connected to a single flood event. Since 2011, 729 damage entries have been included in the DamaGIS geodatabase in the south of France. The DAMAGE feature class contains 11 fields besides the shape field.

- ID_DAMAGE: unique identifier of the damage entry,
- ID_EVENT: unique identifier of the flood event,
- DATE: date of the occurrence of the damage entry ("day/month/year" format),
- TYPE: type of damage (Table 1)
- SUBTYPE: subtype of damage (Table 1)
- SEVERITY: severity of damage (see Sect. 2.3.),
- X_COORD: x coordinates in Lambert-93 of the damaged element,
- Y_COORD: y coordinates in Lambert-93 of the damaged element,
- TOWN: municipality where the damaged element is located,
- SOURCE: source of information on the damage entry,
- SOURCETYPE: type of source.

2.3 Type of damaged element

To facilitate the exploitation of this geodatabase, potential damaged elements are sorted into 15 types presented in Table 1. Each type of damaged element might also contain several subtypes. These different categories of damaged elements were obtained from an adaptation of the classes used by the BD Topo[®] generated by the French National Geographic Institute (IGN). This vector database offers a description of geographic objects relating to land use and infrastructure. For now, there are no subtypes for water and electric networks because the data we had access to did not have this level of detail. But these subtypes could be added and shared in the future if needed by a specific user of the database.

DamaGIS does not take fatalities into account. The choice was made so as to focus only on material damage. However, information on flood-related fatalities is included in another database called the Vict-In database, which has gathered the circumstances of death and the profiles of the flood victims in the French Mediterranean departments since 1988 (Boissier, 2013; Vinet et al., 2016). Both Vict-In and DamaGIS share the same EVENT feature class.

Given the very wide range of damage types within the database, an appropriate rating system had to be found to

assess their severity on a comparable basis. The severity assessed for each damage entry can be found within the DAMAGE feature class with the "SEVERITY" field. In the following section, this rating system is presented and explained.

3 The rating system for flood-related damage

Damage assessment methodologies usually focus on assessing potential future flood damage. But in this paper we chose to focus on the assessment of post-flood damage for feedback purposes. Damage assessment almost always includes the assessment of direct and tangible damage because it is easier to identify and quantify. However, although there are numerous methods to assess the severity of this type of damage, they vary greatly in their content. Indeed, there is substantial heterogeneity among damage assessment methodologies depending on their purpose (Bouwer et al., 2007).

Damage severity may be expressed in raw monetary value, percent loss estimates, an index value on a scale, a numerical standardized value on a scale from 0 to 1 or a range of indicators (Blong, 2003b). In the literature, damage is often assessed with the replacement cost or the value of the impaired element (Jongman et al., 2012; Merz et al., 2010; Olesen et al., 2017). One major disadvantage of this kind of approach is that it weakens the possible comparison between two flood events (Blong, 2003a). Indeed, depending on where and when a flood event occurs, there might be a considerable variation in costs.

The objective of the damage assessment method presented in this paper was to easily gather and compare different types of damage regardless of the nature of the damaged element. The aim is not to obtain an economic evaluation but a functional assessment of damage. This approach also makes it possible to obtain objective information on damage severity. Different studies suggest that the analysis of damage severity over time and space is made difficult by the absence or low quality of available databases on flood damage and the lack of consensus upon flood data collection (Sene, 2012). With the DamaGIS database, this type of approach is made possible by using a simple rating scale operating on a range of damage indicators. This scale enables comparison over time and space as well as for a single flood severity category; the functional consequences of a flood on an element will stay the same.

We use an ordinal scale, which means that the greater the damage is, the higher the value is on the scale. However, neither the value of the scale level nor the difference between two scale levels is meaningful separately (Velleman and Wilkinson, 1993). This scale is made up of four levels, shaped like a decision tree, ranging from level one to level four (Fig. 4). To illustrate this scale, we might use the example of a road whose primary function is to provide land access.

Table 1. Types and subtypes of damaged elements within the DAMAGE feature class.

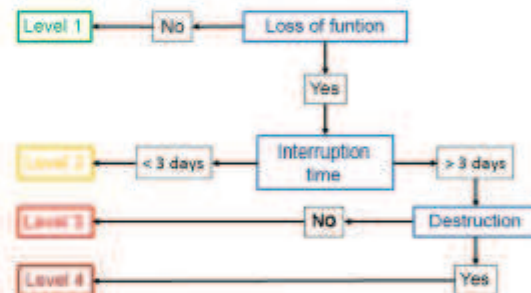
Type	Subtype(s)				
Agriculture	Animal husbandry	Cultivation			
Crisis management	Firehouse	Centre of crisis management	Police station		
Economic activity	Store	Business	Association		
Electric network					
Road network	Small road	One-lane road	Two-lane road	Highway	Boulevard
	Avenue	Street	Passage	Bridge	Motorway interchange
School	Pre-school	Elementary	Junior-high	High-school	University
Seasonal accommodation	Camping	Hotel	Lodging		
Government service, administration	Town hall				
Transport building	Train station	Airport	Bus station		
Water network					
Health	Nursing home	Hospital			
Housing	Individual	Collective			
Rail Network					
Parking	Underground	Outdoor			
Public place of recreation	Sport facility	Park	Place of worship	Museum	

- The first level of damage severity corresponds to the flooding of an element without the loss of its function. For example, a road is flooded but cars can still drive on it.
- The second level means that the flooding caused the loss of the element's function for fewer than 3 days. For example, a road is flooded and cars cannot drive on it for a day.
- The third level of severity indicates an interruption time of the flooded element function longer than 3 days. For example, a road is flooded and cars cannot drive on it for a week.
- Finally, the fourth severity level is based on the destruction of the element by the flood. For example, a road is destroyed by a flood.

This approach is midway between the assessment of direct and indirect damage given that we chose to express damage severity as a loss of function. Direct damage is usually measured in terms of monetary loss and loss of function is commonly associated with indirect damage. However, we consider that the loss of function is a direct effect of flooding on an element because it affects the purpose for which it exists.

4 Analysis

Since 2011, the DamaGIS database has been completed with 729 damage entries amongst 23 flash flood events in the south of France (Fig. 5). It might seem difficult to draw

**Figure 4.** Illustration of the measurement scale used to assess damage severity.

conclusions for such a reduced period of time, but the next section will attempt to provide an overview of the entire database content entered to date.

According to the database, two main categories of damaged elements seem to be more affected by floods: 23.6 % of the damage entries involves an economic activity, while 23.5 % affects the road network (Fig. 6). The over-representation of these two types of elements can be explained by different factors.

In the case of economic activities, information is easily accessible through traditional media as well as new media. It is not unusual that these entities own a web page to advertise. Similarly, a strong presence on social media can also be highlighted. In the case of a flood, numerous economic

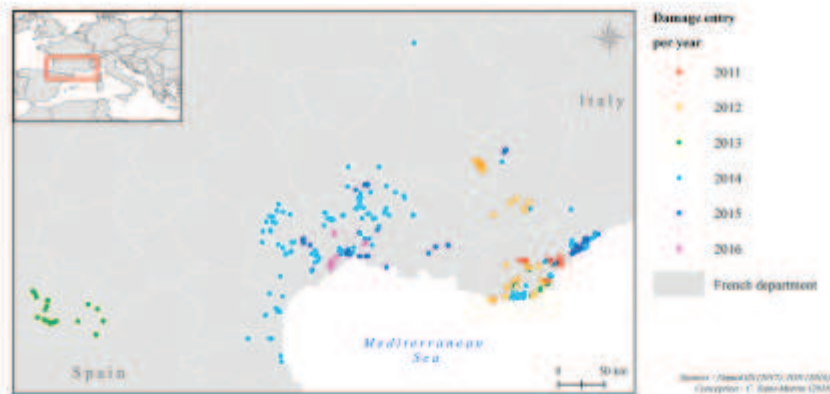


Figure 5. Spatial distribution of flood-related damage within the DamaGIS database.

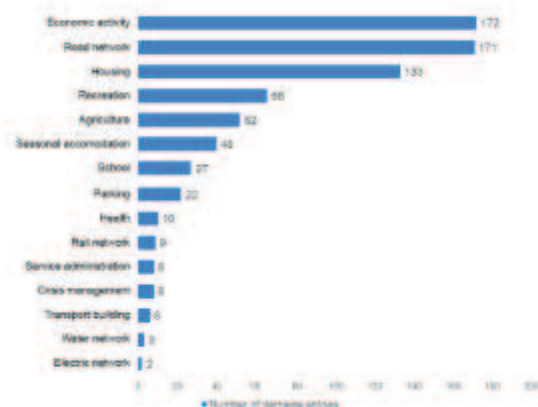


Figure 6. Number of flood-related damage events by type of element affected since 2011 in the south of France.

activities often contact their clients through either one of these two means to update them on the situation because floods may affect their functioning. In terms of indirect input to the database, economic activities are easily recognizable on unidentified pictures because of distinctive signs such as shop signs.

Two main reasons for road network damage as recorded in the database can be cited. First of all, the road network is extensive and dense, and highly exposed to flooding (Naulin et al., 2013). This can be illustrated by the circumstances involved in deaths related to floods. For instance, since 1982, 30 % of flood-related fatalities in the south of France were caused by a vehicle driven on a flooded road (Boissier, 2013). Secondly, information on flooded roads is easily accessible by means of navigation software available to the public. Moreover, local authorities increasingly tend to monitor and

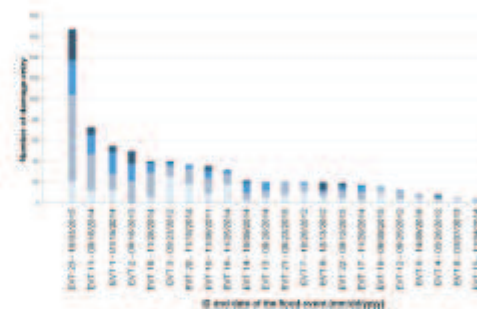


Figure 7. Severity and number of damage entries per flood event.

share information on social media and by radio concerning the condition of the road network to keep the public informed (Bunce et al., 2012; Cheong and Cheong, 2011; Latonero and Shklovski, 2011).

Regarding the severity of damage, flood events are not equally distributed among the four levels. For instance, the second level of severity is the most frequent within the database (Fig. 7). This level comprises 302 damage entries while the first level has 194 and the third and fourth levels 151 and 82 entries, respectively. These differences may be caused by the use of a short-term series of damage data. Due to the limited size of the database, the damage data may not be fully representative. For this reason, the results of the database analysis need to be interpreted cautiously.

The 3 October 2015 flood event

The average number of damage entries per flood event within the database is about 32. Four of these flood events seem to stand out with more than 50 damage entries. These events took place in 2013, 2014 and 2015. The most damaging flood



Figure 8. Spatial distribution of damage from 3 October 2015 flood according to their sources.

event within the database occurred on 3 October 2015 in the Alpes-Maritimes region (Fig. 7).

There are as many entries associated with this event, as for the other three major floods within the database (Fig. 7). Therefore, it seems relevant to focus on this particular event. On 3 October 2015, a storm produced more than 175 mm of rainfall in 2 h and caused significant flash floods in a short period of time on small basins in the Alpes-Maritimes region (Javelle et al., 2015). This flood event caused 20 fatalities and more than EUR 650 million of damage (Direction Territoriale Méditerranée du Cerema, 2015).

Within the DamaGIS database, 167 damage entries refer to this specific event. They are distributed among 14 towns and villages in the Alpes-Maritimes region. The main data sources are social networks, online media and fieldwork. The fieldwork has made it possible to obtain localized information about three specific zones in the Mandelieu-la-Napoule, Biot and Cannes municipalities, while online and social media provided information on larger zones (Fig. 8).

Regarding the type of damage, the over-representation of damaged housing might be underlined in comparison with other flood events. Indeed, housing represents more than one-third of the damage entries within the DamaGIS database, even though it accounts for only one-tenth of the entire database. This discrepancy might be explained by the large number of damage entries obtained with fieldwork. Indeed, it is easier to obtain information about damage in residential areas on site. This example underlines why it is important to use multiple sources of data to improve the comprehensiveness and quality of data.

5 Data availability

The DamaGIS open-access database and its description are available at the following link: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1241089>.

6 Conclusions and outlook

Benefits of the database

Amongst the main benefits of the DamaGIS database, the high resolution of the data available within the database can be highlighted. Indeed, the use of the building scale provides significantly detailed information. There is currently no other open access database offering this level of detail.

The simplicity of use and data entry of the database must also be underlined. For it to be continued, DamaGIS depends on a wide range of contributors that must be able to easily add information to the current database. To this end, this paper has presented a new scale to assess damage severity. This scale makes it possible to compare and contrast damage data regardless of the type of information, and across time and space. In that respect, the DamaGIS database can be easily used in other areas than the south of France. The implementation of this fine scale is in itself an innovative approach.

The DamaGIS database also uses multisource data including social media. This presents many advantages, notably its ability to obtain damage data rapidly after a flood without necessarily having to necessarily go on site.

Finally, one of the main advantages of the database is its format. As a geodatabase, DamaGIS can be used as a simple database to be accessed through GIS software. The vectorial format of the feature classes within the database allows one to easily visualize and represent the data these categories contain.

Limitations of the database

Despite the advantages of the DamaGIS database presented in the previous section, certain questions and concerns should be addressed. First, this database only focuses on damage caused by flood events in the south of France since 2011. Consequently, the available data time series are relatively short and do not yet allow relevant statistical analysis.

Secondly, the use of new media may raise concerns about the discrepancies among the sources of information. Indeed, according to a recent study, French people aged 50 and above are unwilling to use social media and do not know how to properly use the Internet (Douvinet et al., 2017). They make up 38 % of the French population (INSEE, 2017). It should also be underlined that there is one major drawback about the use of online or social media; some data won't be available online after several years.

Finally, it must be underscored that the database is not comprehensive. Some information might be eluded during the search process. Moreover, certain required information about damage data might not be available with the data sources used in this DamaGIS. This is why the need for collaborative work from a variety of contributors as well as a multisource approach are encouraged in the future.

Perspectives

From the various benefits and limits addressed in the previous section, many prospects can be highlighted for the DamaGIS database.

As discussed above, even though the database has only focused on the south of France for now, it can easily be applied to different areas given its high adaptability and simplicity of use. Due to the time-consuming process for damage collection, an online platform could be considered in the future to encourage collaborative work as well as the creation of multi-stakeholder working groups. We also consider that such a participatory work should be moderated by a dedicated institution such as local or national authorities.

The current content of the DamaGIS database is framed at a fine spatial scale: damage data are provided at the building scale. This means that damage data available at a larger scale are not included within the database. However, to prevent the database contributors from excluding valuable but less precise data, a quality index could be provided to assess the geographic accuracy of the data. For instance, a damage data available at the building scale would have a high index, while damage data at the neighbourhood scale would have a low one. In the same vein, an index to assess the temporal accuracy of the data might be considered.

At this time, however, one of the main and most immediate prospects for the DamaGIS database would be its use for modelling purposes. For instance, DamaGIS has already been used in this regard in Saint-Martin et al. (2016). Currently flood damage data are needed to calibrate and validate

flood damage models at a fine scale. In this respect, this paper presents a new approach to compile and assess flood-related damage data from multiple sources in a participatory type of functioning within the DamaGIS database.

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgements. The authors would like to thank the SCHAPI (French central office for hydrometeorology and assistance to flood forecasting) as well as the Palladio Foundation for their financial support to this work. The authors would also like to thank the reviewers for their willingness to thoroughly evaluate and improve this work.

Edited by: Giulio G.R. Iovine

Reviewed by: Olivier Payraastre and four anonymous referees

References

- Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F., and Bianchi, A.: Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios, *Global Environ. Change*, 35, 199–212, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004>, 2015.
- Blong, R.: A review of damage intensity scales, *Nat. Hazards*, 29, 57–76, 2003a.
- Blong, R.: A new damage index, *Nat. Hazards*, 30, 1–23, 2003b.
- Boissier, L.: La mortalité liée aux crues torrentielles dans le Sud de la France: une approche de la vulnérabilité humaine face à l'inondation, Université Paul Valéry-Montpellier III, 2013.
- Bourguignon, D.: Événements et territoires-le coût des inondations en France: analyses spatio-temporelles des dommages assurés, Université Paul Valéry-Montpellier III, 2014.
- Bouwer, L. M., Crompton, R. P., Faust, E., Hölpe, P., and Pielke Jr., R. A.: Confronting disaster losses, *Science*, New York then Washington, 318, 753, 2007.
- Bubeck, P., de Moel, H., Bouwer, L. M., and Aerts, J. C. J. H.: How reliable are projections of future flood damage?, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 3293–3306, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3293-2011>, 2011.
- Bunce, S., Partridge, H., and Davis, K.: Exploring information experience using social media during the 2011 Queensland Floods: a pilot study, *The Aust. Library J.*, 61, 34–45, <https://doi.org/10.1080/00049670.2012.10722300>, 2012.
- Calianno, M., Ruin, I., and Gourley, J. J.: Supplementing flash flood reports with impact classifications, *J. Hydrol.*, 477, 1–16, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.036>, 2013.
- CCR: Floods of may-June 2016 in France: Modeling the risks and damages, available at: https://www.ccr.fr/documents/23509/29230/Inondations+de+Seine+et+Loire+mai+2016-ANGLAIS_DEF+OK.pdf/ad34f06c-ea26-4318-a602-04c9a82302f0 (last access: 8 January 2018), 2016.
- CCR (Caisse Centrale de Réassurance): available at: <https://www.ccr.fr/>, last access: 9 June, 2017.

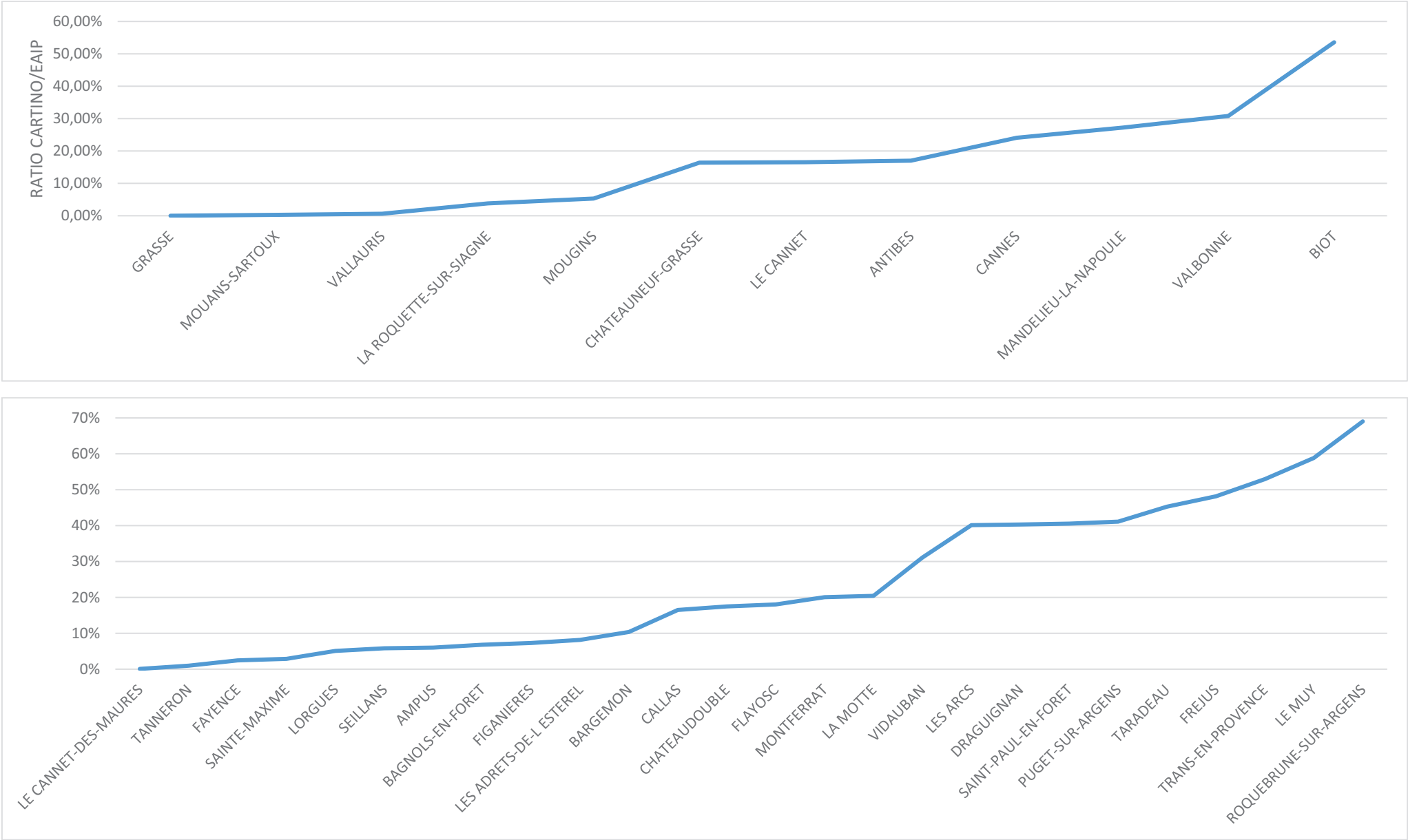
- Cheong, F. and Cheong, C.: Social Media Data Mining: A Social Network Analysis Of Tweets During The 2010–2011 Australian Floods, *PACIS*, 11, 46–46, 2011.
- Dashti, S., Palen, L., Heris, M. P., Anderson, K. M., Anderson, T. J., and Anderson, S.: Supporting disaster reconnaissance with social media data: A design-oriented case study of the 2013 Colorado floods, *ISCRAM*, 2014.
- Dilley, M.: Natural disaster hotspots: a global risk analysis, World Bank Publications, 2005.
- Direction Territoriale Méditerranée du Cerema: Retour d'expérience sur les inondations des Alpes-Maritimes des 3 et 4 octobre 2015, Contribution partielle au GT3, Contribution du GT4, Rapport d'étape au 23/11/15, 37, 2015.
- Douvinet, J. and Vinet, F.: La carte des arrêtés "CatNat" pour les inondations: limites et améliorations possibles, *Mappemonde*, 107, 17–30, 2012.
- Douvinet, J., Gisclard, B., Kouadio, J. S., Saint-Martin, C., and Martin, G.: Une place pour les technologies smartphones et les Réseaux Sociaux Numériques (RSN) dans les dispositifs institutionnels de l'alerte aux inondations en France?, *Cybergeot: European Journal of Geography [En ligne]*, Espace, Société, Territoire, document 801, available at: <http://journals.openedition.org/cybergeot/27875>, last access: 28 May 2018.
- Downton, M. W., Miller, J. Z. B., and Pielke Jr., R. A.: Reanalysis of US National Weather Service flood loss database, *Nat. Hazards Rev.*, Vol. 6, 13–22, 2005.
- Elmer, F.: Improving flood damage modelling: damage assessment, model development and application, Potsdam: Deutsches Geo-Forschungszentrum GFZ xxii, 160, CII S. pp., 2012.
- Gerl, T., Kreibich, H., Franco, G., Marchal, D., and Schröter, K.: A Review of Flood Loss Models as Basis for Harmonization and Benchmarking, *PLoS ONE*, 11, e0159791, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159791>, 2016.
- Gourley, J. J., Hong, Y., Flamig, Z. L., Arthur, A., Clark, R., Calliano, M., Ruin, I., Ortel, T., Wiczorek, M. E., and Kirstetter, P.-E.: A unified flash flood database across the United States, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 94, 799–805, 2013.
- Guha-Sapir, D. and Below, R.: The quality and accuracy of disaster data: A comparative analysis of 3 global data sets, Disaster Management facility, World Bank, Working paper ID, 2002.
- Guha-Sapir, D., Below, R., and Hoyois, P.: EM-DAT: International disaster database, Catholic University of Louvain: Brussels, Belgium, 2015.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., and Reichenbach, P.: The AVI project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy, *Environ. Manage.*, 18, 623–633, 1994.
- Hoyois, P. and Guha-Sapir, D.: Three decades of floods in Europe: a preliminary analysis of EMDAT data, WHO collaborating centre for research on the epidemiology of disasters (CRED), Catholic University of Louvain, 2003.
- INSEE, Population par sexe et groupe d'âges en 2018, available at: <http://www.insee.fr>, last access date: 17 February 2018.
- Javelle, P., Catherine, F., Clotilde, S.-M., Stéphane, E., Mathieu, T., Philippe, C., Jean, O., Patrice, M., and Patrick, A.: Retour sur les inondations du 03 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes vues par la méthode AIGA – Note provisoire – Version 1, 19 October 2015, p. 26, 2015.
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J. C. J. H., and Ward, P. J.: Comparative flood damage model assessment: towards a European approach, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3733–3752, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012>, 2012.
- Kaplan, A. M. and Haenlein, M.: Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media, *Business Hor.*, 53, 59–68, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2009.09.003>, 2010.
- Kreibich, H., Thieken, A., Haubrock, S.-N., and Schröter, K.: HOWAS21, the German Flood Damage Database, in: *Flood Damage Survey and Assessment*, John Wiley & Sons, Inc., 65–75, 2017.
- Kron, W., Steuer, M., Low, P., and Wirtz, A.: How to deal properly with a natural catastrophe database – analysis of flood losses, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 535–550, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-535-2012>, 2012.
- Latonero, M. and Shklovski, I.: Emergency management, Twitter, and social media evangelism, 2011.
- Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A. A., Rosselló, J., Vinet, F., and Boissier, L.: Towards a database on societal impact of Mediterranean floods within the framework of the HYMEX project, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1337–1350, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1337-2013>, 2013.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., and Thieken, A.: Review article "Assessment of economic flood damage", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1697–1724, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>, 2010.
- Mileti, D.: Disasters by design: A reassessment of natural hazards in the United States, Joseph Henry Press, 1999.
- Molinari, D., Legnani, L., di Lecco, P. T., and Di Archietture, D.: La procedura Flood-IMPAT per la valutazione e mappatura del rischio alluvionale, 2013.
- Molinari, D., Menoni, S., and Ballio, F.: Flood Damage Survey and Assessment: New Insights from Research and Practice, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2017.
- Munich RE: Year of the floods, TOPICS GEO, p. 80, 2017.
- Napolitano, E., Marchesini, I., Salvati, P., Donini, M., Bianchi, C., and Guzzetti, F.: LAND-deFeND – An innovative database structure for landslides and floods and their consequences, *J. Environ. Manage.*, 207, 203–218, 2018.
- National Climatic Data Center: Storm Events Database, available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/stormevents/> (last access: 1 December 2017), 2015.
- Naulin, J.-P., Payrastra, O., and Gaume, E.: Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France, *J. Hydrol.*, 486, 88–99, 2013.
- NRC: The impacts of natural disasters: A framework for loss estimation, National Academies Press, 1999.
- Olesen, L., Löwe, R., and Arnbjerg-Nielsen, K.: Flood damage assessment – Literature review and recommended procedure, Melbourne, Australia: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, 2017.
- Ortega, K. L., Smith, T. M., Manross, K. L., Kolodziej, A. G., Scharfenberg, K. A., Witt, A., and Gourley, J. J.: The severe hazards analysis and verification experiment, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 90, 1519–1530, 2009.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., and Dasgupta, P.: Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working

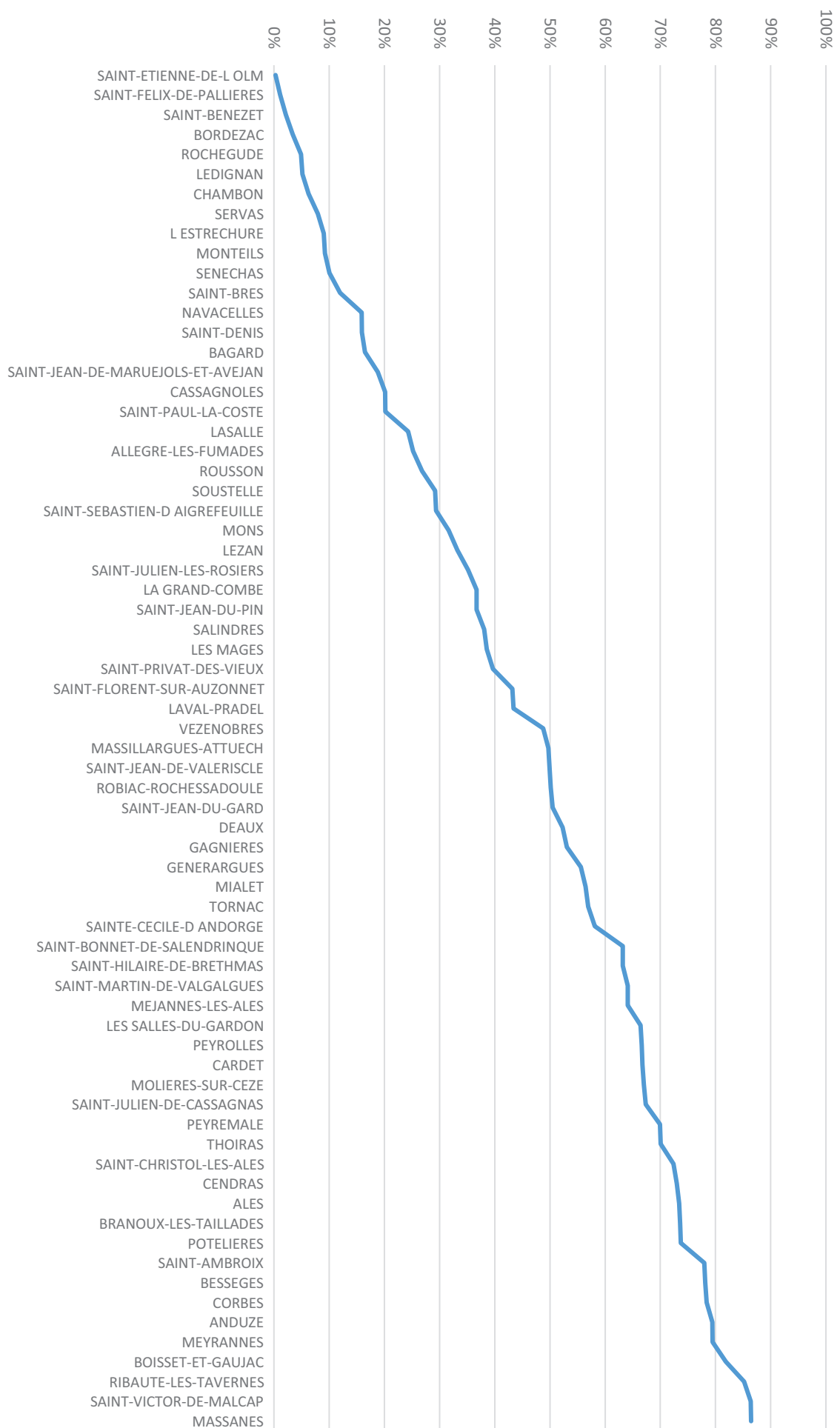
- Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2014.
- Parker, D. J.: Floods, edited by: Parker, D., Vol. 1, London: Routledge, 2000.
- Parker, D., Green, C., and Thompson, P.: Urban Flood protection Benefits, a project appraisal guide "The Red Book", Gower Publishing Company, Brookfield, USA, 1987.
- Pigeon, P.: Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels, *Ann. Géogr.*, 111, 452–470, 2002.
- Ramos, M. H., Perrin, C., Andréassian, V., Olivier Delaigue, and Viatgé, J.: Assessment report on the 2016 flood event on the Seine and Loire basins (France), Final report, European Flood Awareness System (EFAS) dissemination centre, Rijkswaterstaat (NL), Vigicrues network/SCHAPI (France), Irstea (France), p. 43, 2017.
- Saint-Martin, C., Fouchier, C., Javelle, P., Douvinet, J., and Vinet, F.: Assessing the exposure to floods to estimate the risk of flood-related damage in French Mediterranean basins, 3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016), 04013, 2016.
- Saint-Martin, C.: DamaGIS [Data set], Zenodo, available at: <http://doi.org/10.5281/zenodo.1241089>, last access: 6 March 2018.
- Sene, K.: Flash floods: forecasting and warning, Springer Science & Business Media, 2012.
- Smith, K. and Ward, R.: Floods: physical processes and human impacts, John Wiley and Sons Ltd, 1998.
- Tschögl, L., Below, R., and Guha-Sapir, D.: An analytical review of selected data sets on natural disasters and impacts, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters Louvain, 2006.
- UNISDR: Proceedings of the third UN World Conference on Disaster Reduction, UN World Conference on Disaster Risk Reduction, 14–18 March 2015, Sendai, Japan, p. 169, 2015.
- van Oldenborgh, G. J., Philip, S., Aalbers, E., Vautard, R., Otto, F., Haustein, K., Habets, F., Singh, R., and Cullen, H.: Rapid attribution of the May/June 2016 flood-inducing precipitation in France and Germany to climate change, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2016-308>, 2016.
- Velleman, P. F. and Wilkinson, L.: Nominal, ordinal, interval, and ratio typologies are misleading, *The Am. Stat.*, 47, 65–72, 1993.
- Vinet, F., Boissier, L., and Saint-Martin, C.: Flashflood-related mortality in southern France: first results from a new database, *E3S Web Conf.*, 7, 06001, 2016.
- Wallemacq, P., Guha-Sapir, D., McClean, D., Cred, and Unisdr: The Human Cost of Weather Related Disasters – 1995 – 2015, 2015.

Annexe F : Liste des communes par zone d'étude

FRAYERE, ARGENTIERE, BRAGUE	GARDONS		ARGENS
ANTIBES	ALES	POTELIERES	AMPUS
BIOT	ALLEGRE-LES-FUMADES	RIBAUTE-LES-TAVERNES	BAGNOLS-EN-FORET
CANNES	ANDUZE	ROBIAC-ROCHESSADOULE	BARGEMON
CHATEAUNEUF-GRASSE	BAGARD	ROCHEGUDE	CALLAS
GRASSE	BESSEGES	ROUSSON	CHATEAUDOUBLE
LA ROQUETTE-SUR-SIAGNE	BOISSET-ET-GAUJAC	SAINT-AMBROIX	CLAVIERS
LE CANNET	BORDEZAC	SAINT-BENEZET	DRAGUIGNAN
MANDELIEU-LA-NAPOULE	BRANOUX-LES-TAILLADES	SAINT-BONNET-DE-SALENDRINQUE	FAYENCE
MOUANS-SARTOUX	CARDET	SAINT-BRES	FIGANIERES
MOUGINS	CASSAGNOLES	SAINT-CHRISTOL-LES-ALES	FLAYOSC
VALBONNE	CENDRAS	SAINT-DENIS	FREJUS
VALLAURIS	CHAMBON	SAINT-ETIENNE-DE-L OLM	LA GARDE FREINET
	CORBES	SAINT-FELIX-DE-PALLIERES	LA MOTTE
	DEAUX	SAINT-FLORENT-SUR-AUZONNET	LE CANNET-DES-MAURES
	GAGNIERES	SAINT-HILAIRE-DE-BRETHMAS	LE MUY
	GENERARGUES	SAINT-JEAN-DE-MARUEJOLS-ET-AVEJAN	LES ADRETS-DE-L ESTEREL
	L ESTRECHURE	SAINT-JEAN-DE-VALERISCLE	LES ARCS
	LA GRAND-COMBE	SAINT-JEAN-DU-GARD	LORGUES
	LASALLE	SAINT-JEAN-DU-PIN	MONTFERRAT
	LAVAL-PRADEL	SAINT-JULIEN-DE-CASSAGNAS	PUGET-SUR-ARGENS
	LEDIGNAN	SAINT-JULIEN-LES-ROSIERS	ROQUEBRUNE-SUR-ARGENS
	LES MAGES	SAINT-MARTIN-DE-VALGALGUES	SAINT-PAUL-EN-FORET
	LES SALLES-DU-GARDON	SAINT-PAUL-LA-COSTE	SAINTE-MAXIME
	LEZAN	SAINT-PRIVAT-DES-VIEUX	SEILLANS
	MASSANES	SAINT-SEBASTIEN-D AIGREFEUILLE	TANNERON
	MASSILLARGUES-ATTUECH	SAINT-VICTOR-DE-MALCAP	TARADEAU
	MEJANNES-LES-ALES	SAINTE-CECILE-D ANDORGE	TRANS-EN-PROVENCE
	MEYRANNES	SALINDRES	VIDAUBAN
	MIALET	SENECHAS	
	MOLIERES-SUR-CEZE	SERVAS	
	MONS	SOUSTELLE	
	MONTEILS	THOIRAS	
	NAVACELLES	TORNAC	
	PEYREMALE	VEZENOBRES	
	PEYROLLES		

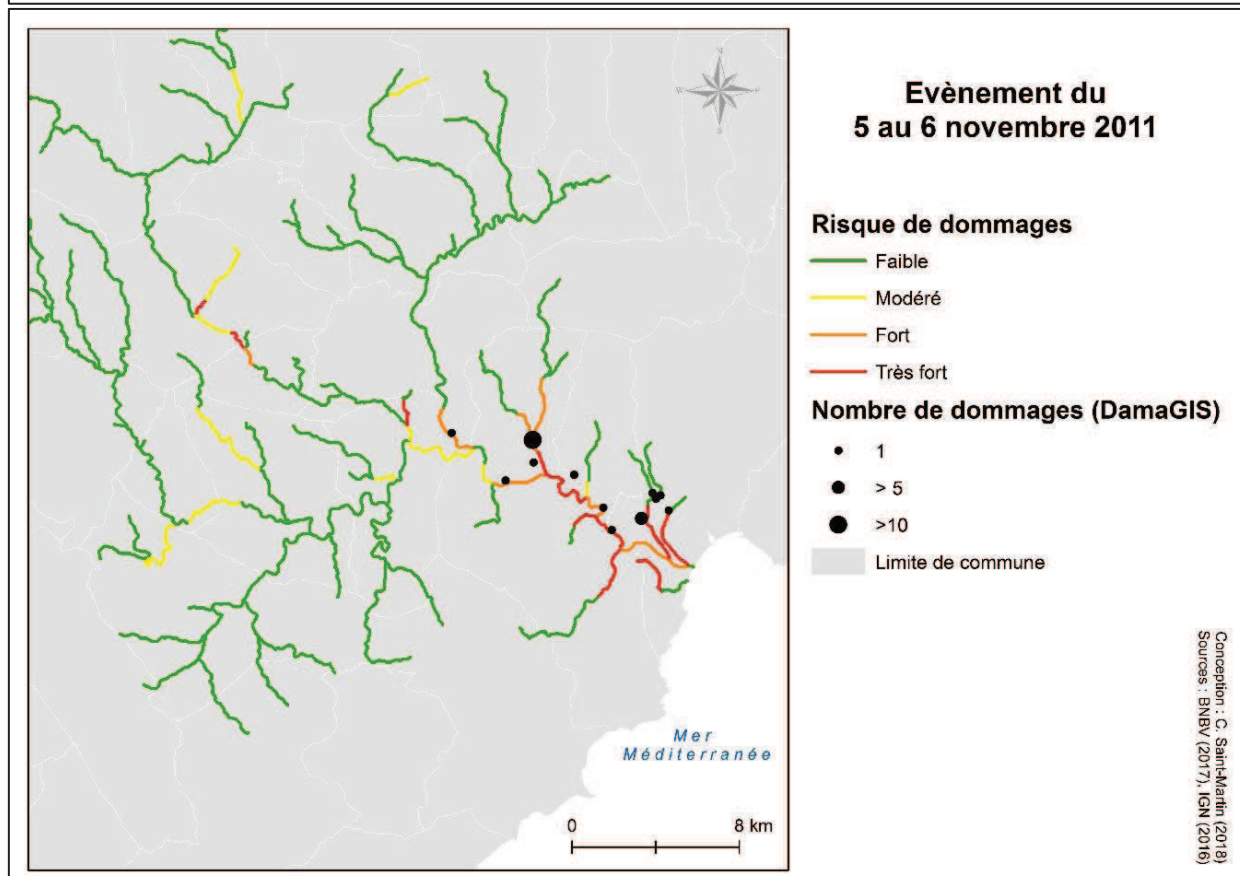
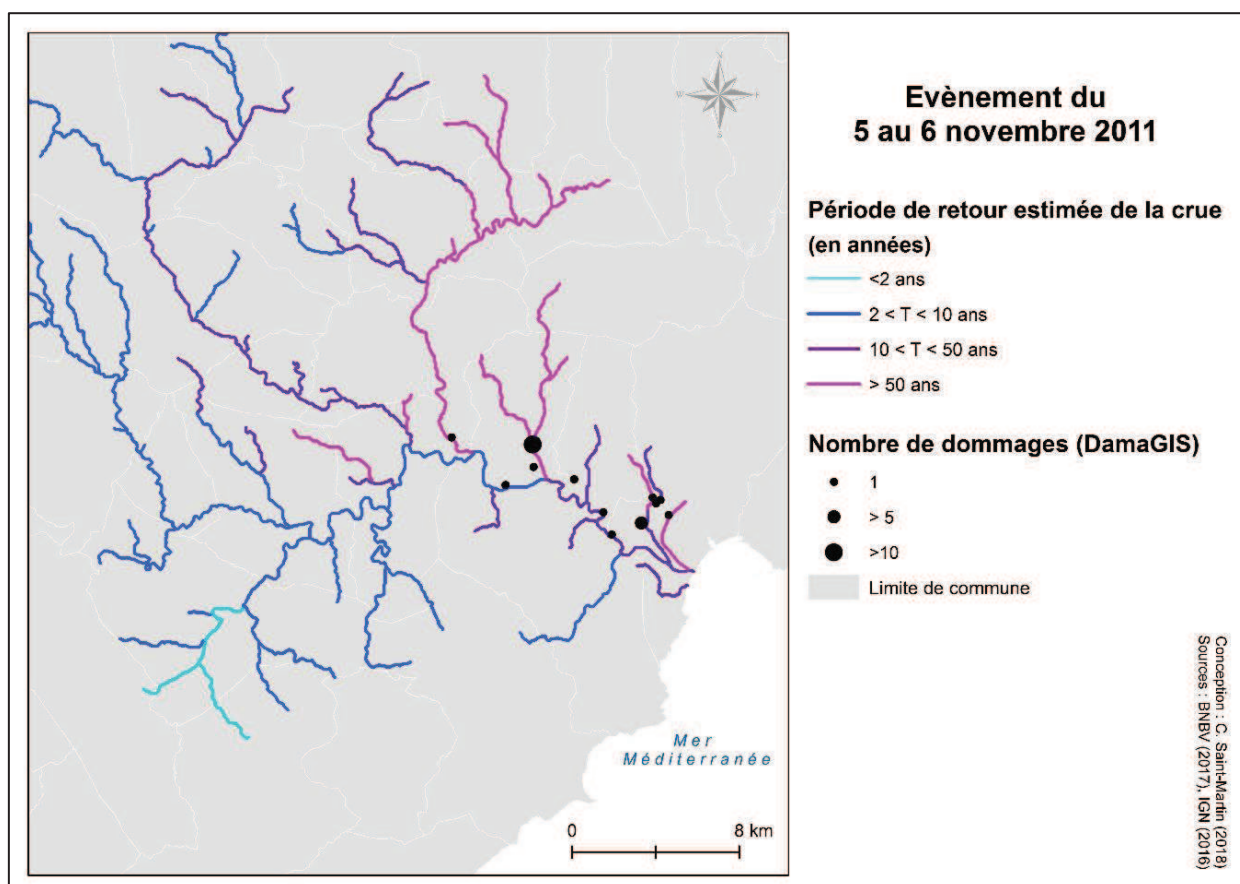
Annexe G : Ratio de la surface CARTINO/EAIP par commune et par zone d'étude



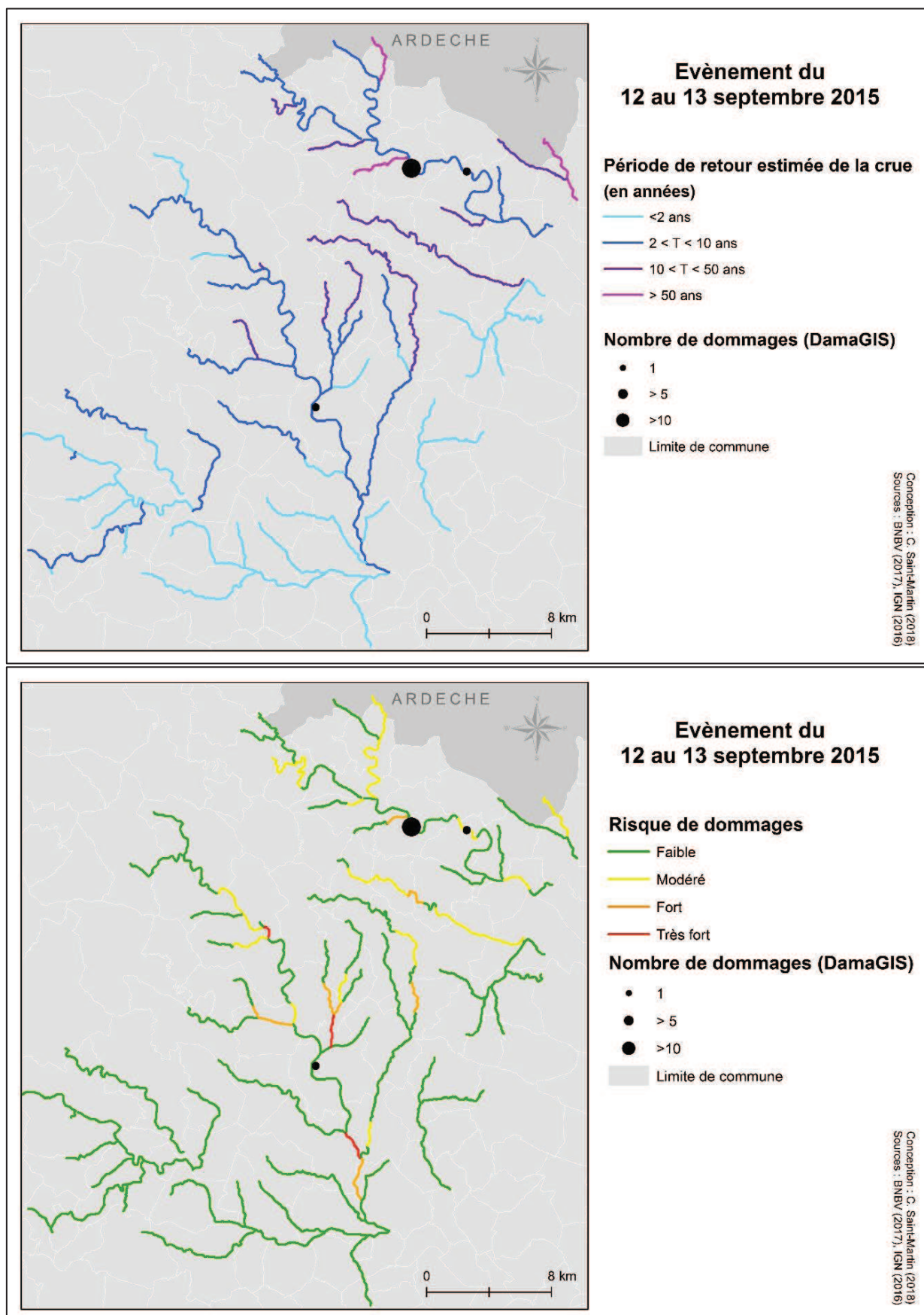


Annexe H : Comparaison des qualifications AIGA avec l'estimation du risque de dommages potentiels et les dommages observés pour différents évènements de crues

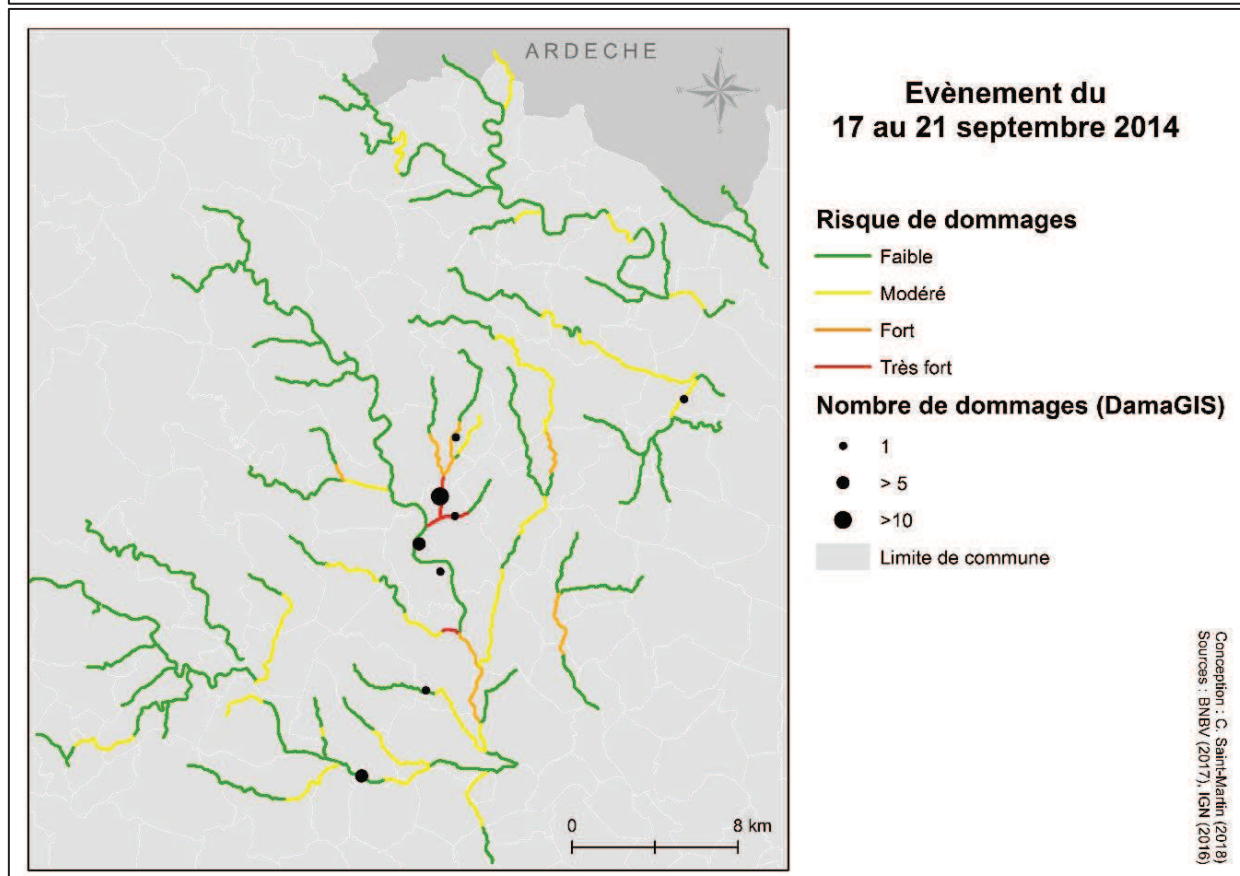
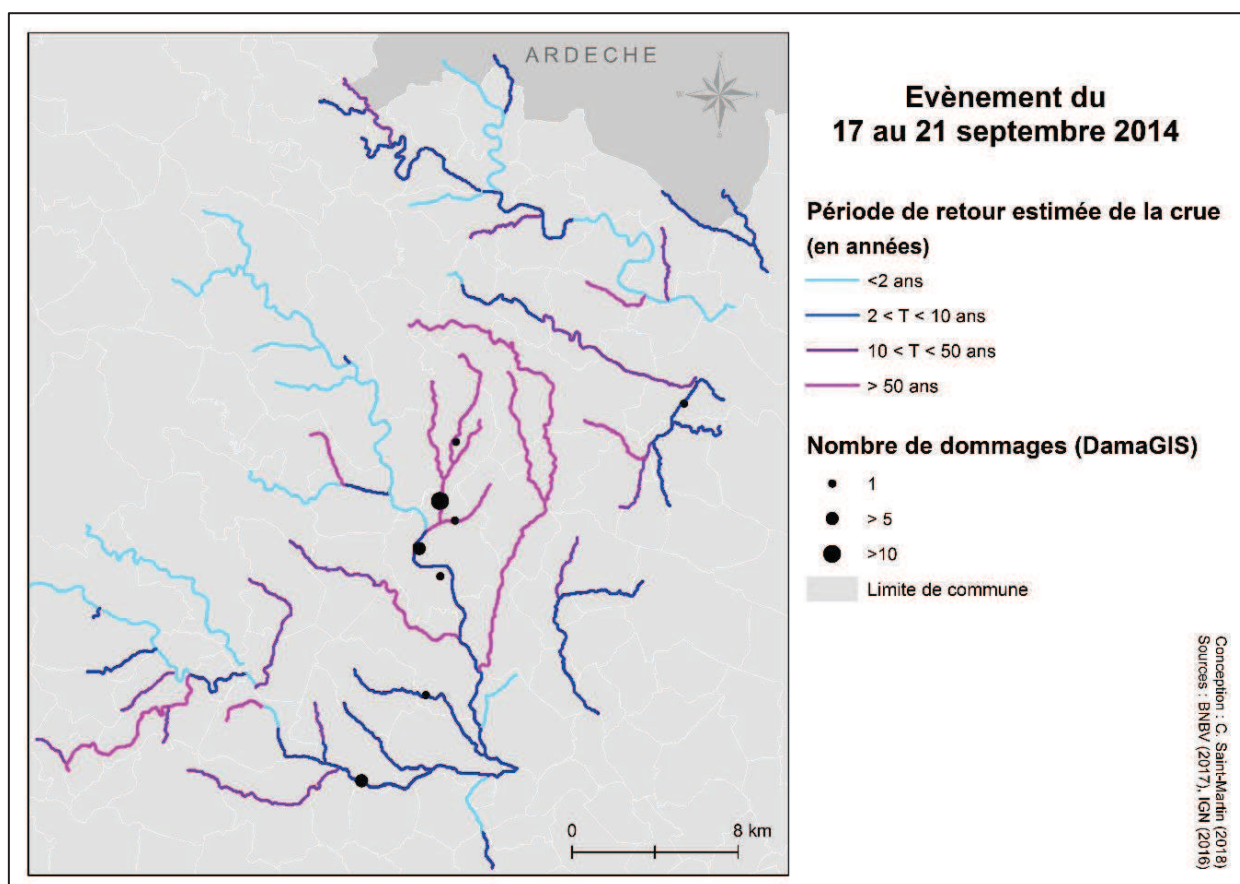
Evènement du 5 au 6 novembre 2011



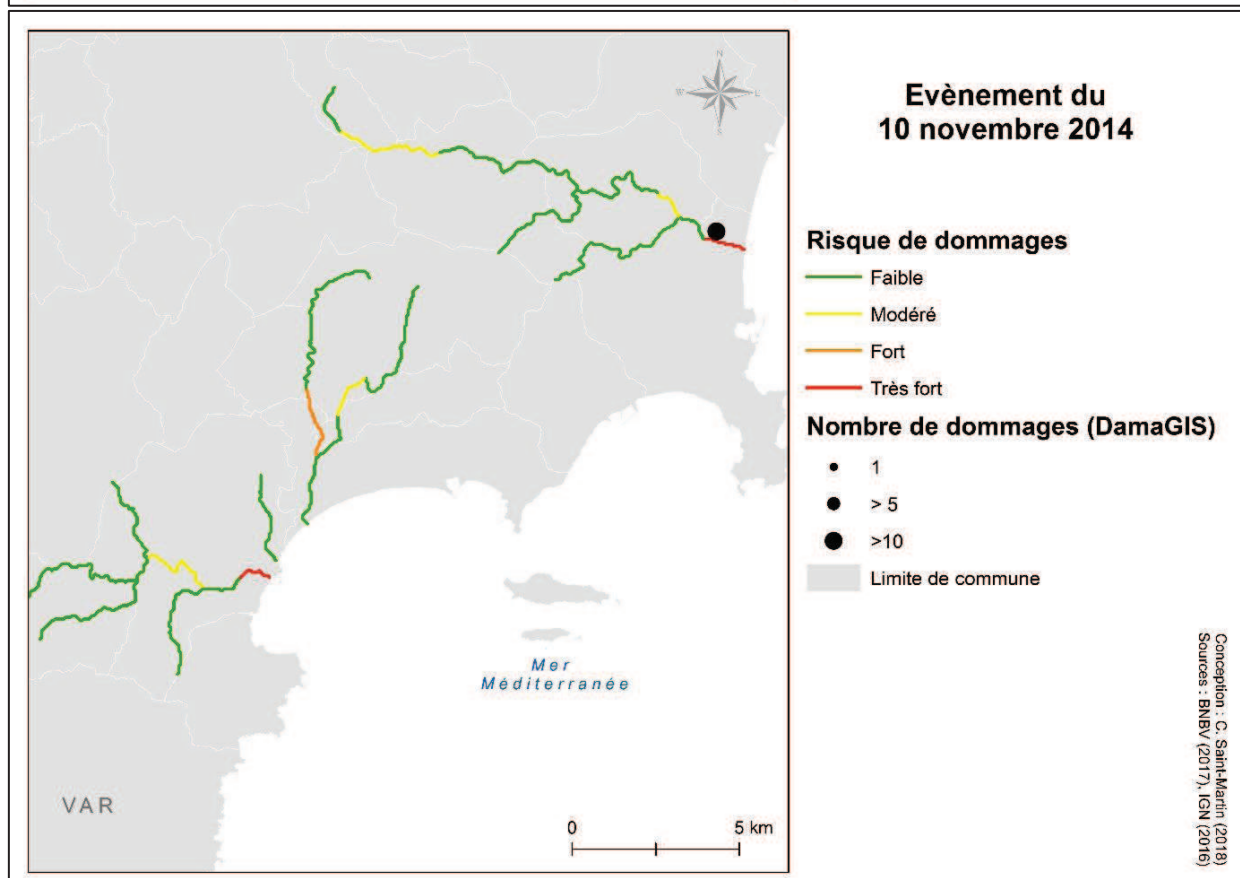
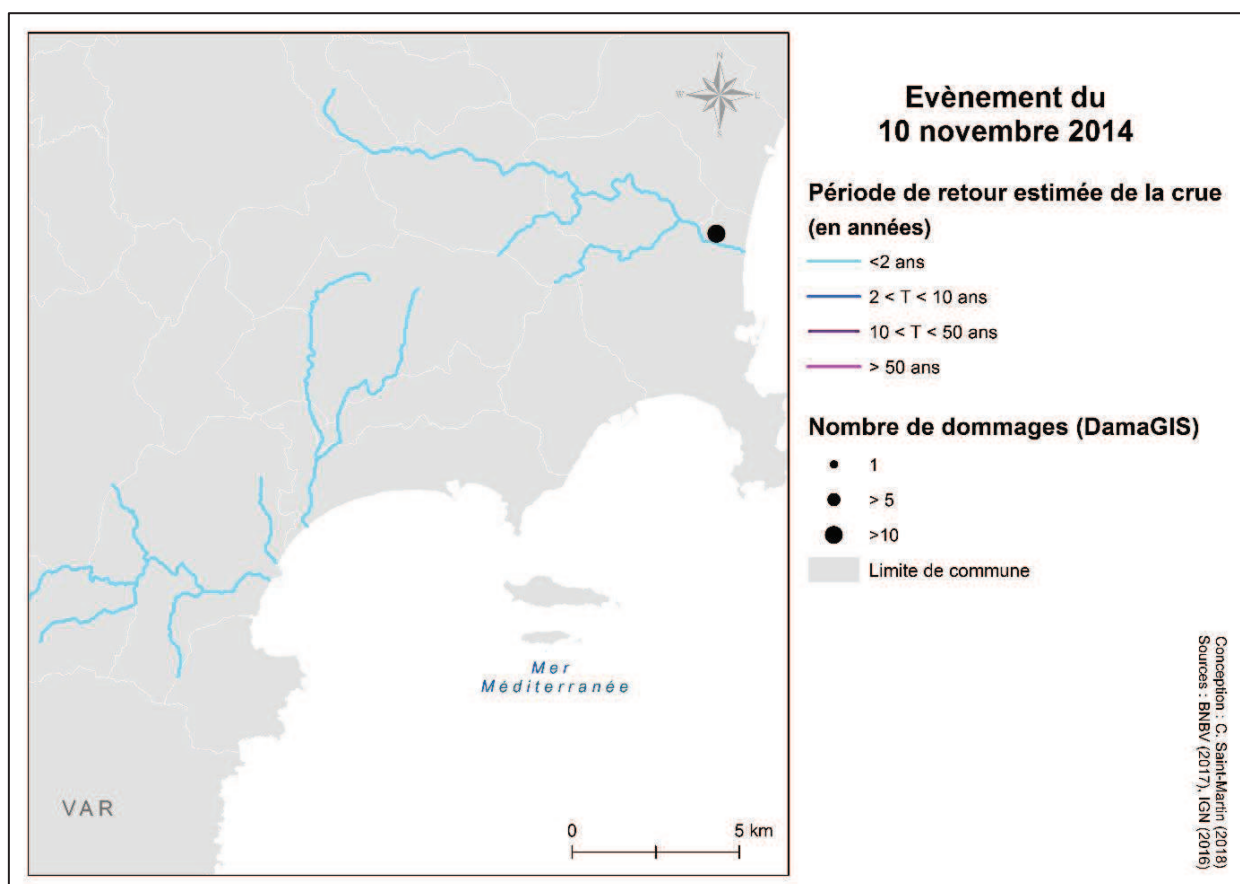
Evènement du 12 au 13 septembre 2015



Evènement du 17 au 21 septembre 2014



Evènement du 10 novembre 2014



Evènement du 19 janvier 2014

