



**HAL**  
open science

## Anticiper les dégâts liés aux crues rapides, pour une meilleure gestion de crise en Méditerranée

Cédric Saint Martin

► **To cite this version:**

Cédric Saint Martin. Anticiper les dégâts liés aux crues rapides, pour une meilleure gestion de crise en Méditerranée. irstea. 2016, pp.27. hal-02606109

**HAL Id: hal-02606109**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02606109>**

Submitted on 16 May 2020

**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.



# Anticiper les dégâts liés aux crues rapides, pour une meilleure gestion de crise en Méditerranée

17 juin 2016

**SAINT-MARTIN CLOTILDE**

**Directeur de thèse : Freddy Vinet**

**Encadrant : Pierre Javelle**

IRSTEA  
GROUPEMENT D'AIX-EN- PROVENCE  
3275, route Cézanne - CS 40061  
13 182 AIX-EN-PROVENCE Cedex 5

## SOMMAIRE

---

Tables des illustrations .....	3
1. Introduction .....	4
2. Etat de la prévision des crues en France .....	4
2.1. Le système Vigicrues et ses limites .....	4
2.2. La méthode AIGA et ses limites .....	5
2.3. Les apports de la thèse au système actuel.....	8
3. Etat de l'art .....	8
3.1. Exposition ou vulnérabilité ? .....	8
3.2. Terminologie adoptée .....	11
3.3. Travaux similaires .....	12
4. Proposition d'un indice d'exposition .....	13
4.1. Délimitation de la zone à risque .....	13
4.2. Sélection des enjeux .....	13
4.3. Indicateur d'exposition .....	14
5. Quelles données pour la validation ? .....	14
5.1. Base de données sur les dégâts .....	14
5.2. Echelle d'endommagement.....	16
5.3. Le cas particulier des victimes.....	17
6. Premiers résultats et limites .....	18
Conclusion .....	22
Références bibliographiques .....	23

## TABLES DES ILLUSTRATIONS

---

### TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Copie d'écran du site Vigicrues ( <i>source : www.vigicrues.gouv.fr</i> ) .....	5
Figure 2 : Avertissements AIGA pluie pour l'évènement du 03/10/2015 ( <i>source : Irstea</i> ).....	6
Figure 3 : Avertissements AIGA débit pour l'évènement du 03/10/2015 ( <i>source : Irstea</i> ).....	6
Figure 4 : Exemple de biais présenté par la méthode AIGA ( <i>source : Irstea</i> ).....	7
Figure 5 : La genèse du risque inondation ( <i>source : prim.net</i> ) .....	8
Figure 6 : La définition triptyque du risque ( <i>source : PCET-Ademe</i> ).....	9
Figure 7 : Schéma illustrant le problème de l'autoroute ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ).....	12
Figure 8 : Carte de synthèse des dégâts et victimes liés aux crues rapides depuis 2011 en Méditerranée ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ) .....	17
Figure 9 : Qualification des pluies AIGA, maximale pour l'évènement du 3 octobre 2015 ( <i>source : Irstea</i> ) .....	18
Figure 10 : Avertissements hydrologiques maximaux donnés par AIGA lors de l'évènement du 3 octobre 2016 ( <i>source : Irstea</i> ).....	19
Figure 11 : Exposition des bassins versants au risque inondation dans les Alpes-Maritimes ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ) .....	19
Figure 12 : Etat de l'exposition aux crues dans les Alpes-Maritimes ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ).....	20
Figure 13 : Avertissements AIGA maximum pour l'évènement du 3 octobre 2015 ( <i>source : Irstea</i> ).....	20
Figure 14 : Risque de dégât maximal estimé pour l'évènement du 3 octobre 2016 ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ).....	21

### LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Définitions de la vulnérabilité dans la littérature ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ) .....	9
Tableau 2 : Evènements majeurs de type « crue rapide » étudiés et leurs bilans matériels et humains depuis 2011 ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ) .....	15
Tableau 3 : Echelles d'endommagement existantes dans la littérature ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ).....	16
Tableau 4 : Décès hors évènement majeurs depuis 2011 ( <i>Saint-Martin, 2016</i> ).....	17

## 1. INTRODUCTION

---

Les inondations du 3 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes ont constitué un prélude pertinent au démarrage de ma thèse, en rappelant le besoin pressant en systèmes d'avertissements qui auraient pu alléger le bilan catastrophique de 20 morts et 605 millions d'euros de dommages assurés (Caisse Centrale de Réassurance, 2016). Alors qu'actuellement seulement 20 000 des 120 000 km de cours d'eau français bénéficient du service de prévision des crues géré par l'Etat (service Vigicrues, supervisé par le SCHAPI) (DGPR, 2014), la nécessité de fournir des informations sur les inondations à une échelle plus fine est régulièrement rappelée par l'actualité. C'est ainsi que depuis plusieurs années – et notamment suite à la publication en 2011 du « Plan Submersions Rapides » (PSR) par le Ministère en charge de l'environnement – le SCHAPI travaille à la mise en place, en amont des cours d'eau déjà suivis, d'un système automatique d'avertissement en cas crues soudaines, dont les maires sont les premiers destinataires. Ce contexte explique la genèse de cette thèse démarrée en décembre 2015, sous le co-financement de l'Irstea Aix-en-Provence et du SCHAPI.

L'objectif principal de cette thèse est d'intégrer au système d'avertissement des crues soudaines en cours de montage, la notion de « dommage potentiel ». Actuellement, le déclenchement de ces avertissements n'est basé que sur l'aléa : la crue du cours d'eau, et ne prend pas en compte l'occupation du sol soit les conséquences possibles en termes de dégâts. L'objectif est donc de fournir un système capable de déterminer le risque réel de dommages en temps-réel.

Pour répondre à cette problématique, nous rappellerons dans un premier temps le fonctionnement de la prévision des crues en France ainsi que les apports potentiels de la thèse au système actuel. Puis nous dresserons un état de l'art sur la terminologie et les travaux existant sur notre problématique. Ensuite, nous présenterons la méthodologie adoptée et les adaptations envisagées durant la deuxième année. Enfin, nous présenterons le résultat des travaux menés lors des six premiers mois, en revenant notamment sur l'évènement des Alpes-Maritimes.

## 2. ETAT DE LA PREVISION DES CRUES EN FRANCE

---

Bien que les premiers services de prévision des crues remontent au XIXème siècle, ce n'est qu'avec la création du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), en 2003, que l'on assiste à la naissance d'un véritable système centralisé de surveillance et de prévision des crues en France.

### 2.1. LE SYSTEME VIGICRUES ET SES LIMITES

Le SCHAPI publie sur le site [www.vigicrues.gouv.fr](http://www.vigicrues.gouv.fr), 2 fois par jour (10h et 16h) une carte et un bulletin de vigilance rendant compte de la situation des cours d'eau en crue au niveau national, à partir des données transmises par les 20 services de prévision des crues (SPC). En période de crues, quand la situation l'exige, les informations (carte, bulletins national et locaux) sont réactualisées hors heures nominales. La vigilance « crue » permet de prévenir les autorités et le public qu'il existe un risque d'inondation dans les 24 heures à venir, plus ou moins important selon la couleur de la vigilance (du vert au rouge) (Figure 1). La carte de vigilance informe sur le niveau de vigilance par cours d'eau sur l'ensemble du réseau hydrographique surveillé par l'État.

Chaque tronçon est coloré selon le niveau de vigilance requis pour faire face au danger susceptible de se produire dans les heures ou les jours à venir. Ainsi, les niveaux de vigilance « crue » ne rendent pas seulement compte du niveau d'aléa, mais bien du niveau de risque, car la présence d'enjeux est prise en compte dans le calcul de ces niveaux. La vigilance « crue » est destinée à informer tous les publics aussi bien particuliers ou professionnels, sous une forme simple et claire. Elle est aussi et surtout destinée aux pouvoirs publics en charge de la sécurité

civile (préfets et maires), qui peuvent déclencher localement l’alerte lorsque c’est nécessaire et mobiliser les moyens de secours.



Figure 1 : Copie d'écran du site Vigicrues (source : [www.vigicrues.gouv.fr](http://www.vigicrues.gouv.fr))

Cependant, pour des questions de coût et de faisabilité technique, le système Vigicrues ne couvre que les grands bassins versant, soit 20 000 sur les 120 000km de cours d'eau du réseau hydrographique français. Ainsi, la grande majorité des cours d'eau ne bénéficient pas d'un système de surveillance. Malheureusement, la plupart des inondations meurtrières survenues en zone Méditerranéenne ces dernières années, ont concerné des bassins hors du système Vigicrues. Il y a donc un réel besoin en systèmes complémentaires d'avertissement afin de fournir une information sur le risque hydrologique à l'échelle locale. C'est d'ailleurs ce qu'a exprimé le PSR publié par le ministère en charge de l'environnement suites aux inondations de juin 2010 aux alentours de Draguignan.

## 2.2. LA METHODE AIGA ET SES LIMITES

Du provençal « AIGA » qui signifie eau, la méthode AIGA développée depuis 2003 par Irstea et Météo-France est une méthode d'avertissement de la gravité d'un événement de pluie ou de crue en temps réel (Lavabre & Grégoris, 2005). Les avertissements émis sont à destination des collectivités territoriales et des services de l'État. Cette méthode a été développée pour le sud de la France où elle a été testée en temps réel par divers expérimentateurs depuis une dizaine d'année, notamment à travers le projet CPER RHyTMME (2007-2013) (Westrelin, Mériaux, Tabary, & Aubert, 2012). Ce projet a d'ailleurs débouché sur la mise en place par Météo-France et avec le soutien de l'Etat et de la région Provence-Alpes-Côte-D'azur (PACA), d'une plateforme web temps-réel actuellement opérationnelle à destination des collectivités de PACA. Suite à quelques modifications et améliorations, notamment pour pouvoir être appliquée à la France entière, la méthode AIGA, dans son volet « débit », a également été retenue par le SCHAPI pour son système national d'avertissement « crues soudaines » évoqué en introduction. La méthode AIGA est basée sur le croisement des données de pluie obtenues en temps réel et des données statistiques de référence :

- **Les données de pluie** sont fournies en temps réel par les radars météorologiques de Météo-France à la maille du km<sup>2</sup>. Elles sont ensuite converties en données de débit grâce à un modèle pluie-débit qui fonctionne au pas de temps horaire, en estimant les débits à l'exutoire des bassins-versants.
- **Les données statistiques** sont issues de quantiles SHYREG (Arnaud et al., 2014) pour la pluie et pour le débit, aujourd'hui que de longues séries temporelles de données pluviométriques sont disponibles, de quantiles générés par la simulation d'AIGA sur la période continue de 1998 à 2015 (18 ans) (Javelle et al., 2016).

Ainsi en comparant les données de pluie et de débit obtenues en temps réel et les quantiles obtenus statistiquement, AIGA est capable de fournir une information en temps réel sur la sévérité de la pluie (Figure 2) et de la crue (Figure 3) d'un cours d'eau. Afin de faciliter l'utilisation de la méthode, notamment aux non-

hydrologues, 3 seuils de gravité de l'aléa ont été fixés avec un code couleur, similaire pour l'aléa pluie et l'aléa crue :

- **Seuil 2 ans** : les valeurs pluviométriques temps réel ou débitmétriques anticipées dépassent les quantiles de période de retour 2 ans (couleur bleu foncé) ;
- **Seuil 10 ans** : les valeurs dépassent les quantiles de période de retour 10 ans (couleur violet) ;
- **Seuil 50 ans** : les valeurs dépassent les quantiles de période de retour 50 ans (couleur magenta).

L'intérêt de la méthode est double, à savoir d'une part donner des informations sur les crues des cours d'eau non-jaugés et d'autre part, anticiper ces crues par conversion immédiate des précipitations observées en débit, d'où un gain de temps par rapport au processus naturel, ce qui souligne l'intérêt de AIGA pour la gestion de crise. De plus, le sud de la France est fréquemment marqué par des crues dites « rapides » car survenant sur de petits bassins versants aux temps de concentration très réduits. Ainsi, une anticipation du phénomène, même réduite, peut s'avérer particulièrement utile à la gestion de crise.

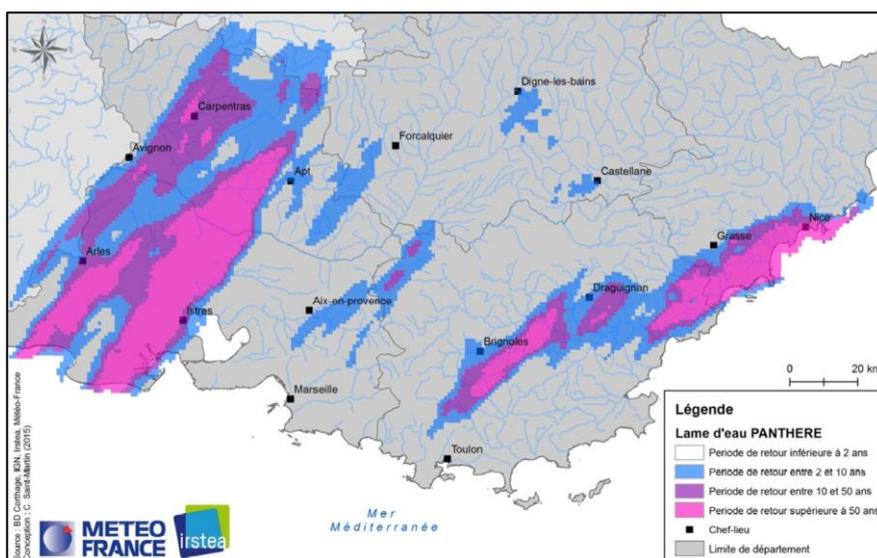


Figure 2 : Avertissements AIGA pluie pour l'évènement du 03/10/2015 (source : Irstea)

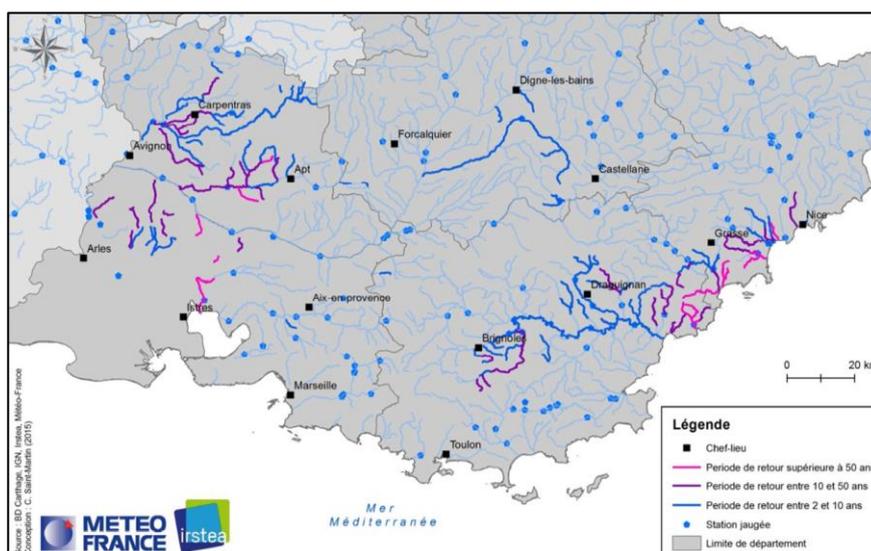


Figure 3 : Avertissements AIGA débit pour l'évènement du 03/10/2015 (source : Irstea)

Les autres types de crues (crues lentes, remontée de nappe) qui concernent plutôt le nord de la France, sont des phénomènes à cinétique lente, donc prévisibles à plus longue échéance (grands bassins versants aux temps de

concentration élevés) voilà pourquoi la méthode AIGA a d'abord été développée dans le sud de la France, en particulier pour les crues rapides. Pour autant, même si la méthode AIGA a su prouver sa pertinence à de nombreuses reprises depuis sa mise en place en 2003 – son principal intérêt étant de pouvoir être appliquée à des bassins non-jaugés pour lesquels on ne dispose pas d'autre information – sa principale limite est qu'elle ne base ses avertissements que sur l'aléa.

Ainsi sur l'exemple présenté en Figure 4 (inondations du 19 janvier 2014 sur la commune de la Londe-les-Maures) on peut effectivement voir que les dégâts observés (5.1) ne sont pas concentrés autour du cours d'eau caractérisé par le plus fort niveau d'avertissement AIGA (>50 ans), mais plutôt autour de l'affluent situé à l'ouest de la commune et qualifié par un niveau d'avertissement inférieur (10-50 ans). Ce biais peut facilement être relié au fait que la méthode AIGA ne se base que sur l'information hydrologique sans prendre en compte l'occupation du sol. Ainsi, pour une crue de même intensité, le même niveau d'avertissement sera donné pour un cours d'eau en zone rurale et un cours d'eau en zone urbaine, alors que le risque est plus important dans le deuxième cas.

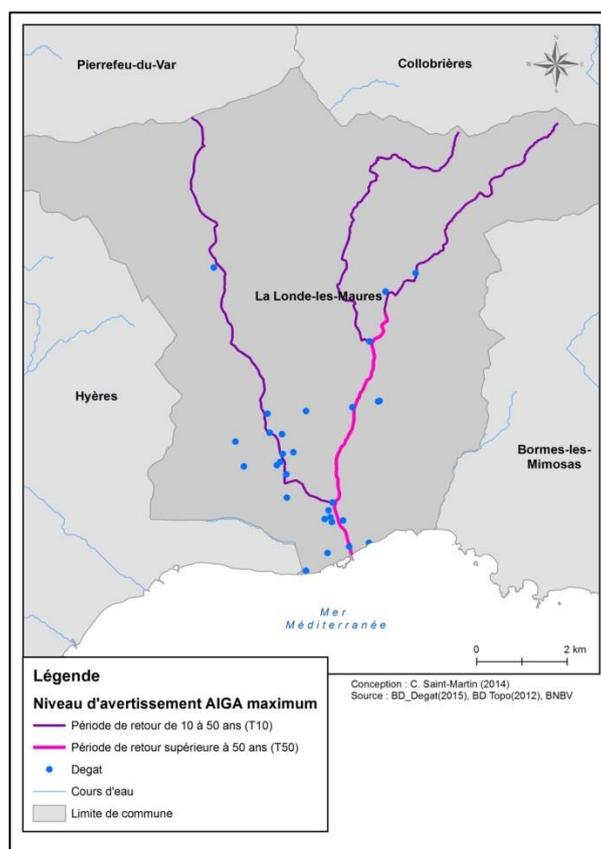


Figure 4 : Exemple de biais présenté par la méthode AIGA (source : Irstea)

Voilà pourquoi les avertissements hydrologiques actuellement fournis par AIGA ne sont pas suffisants aux gestionnaires de crise. Afin de gérer en temps réel ou d'anticiper un événement, il est nécessaire de pouvoir prioriser les actions (de protection, de secours...) en cours ou à venir via une hiérarchisation des territoires en fonction du risque et non pas de l'aléa seul.

Ainsi, la prévision des crues actuelle oscille entre deux systèmes pertinents mais présentant tous deux une lacune. D'une part « la vigilance crue » actuelle (Vigicrues) permet de caractériser le risque lié aux inondations, mais sur un nombre réduit de cours d'eau. D'autre part les qualifications AIGA qui concernent un grand nombre de cours d'eau (la méthode a été développée pour tout bassin versant drainant une surface supérieure à 5km<sup>2</sup>), mais ne tiennent compte que de l'aléa : la crue du cours d'eau, et non pas du risque inondation à part entière.

## 2.3. LES APPORTS DE LA THESE AU SYSTEME ACTUEL

Le but de la thèse est donc d'améliorer la pertinence des avertissements qui seraient issus des qualifications produites par la méthode AIGA. Il s'agirait de baser ces avertissements non plus uniquement sur le niveau de rareté de l'événement en cours comme c'est le cas actuellement, mais en y associant la notion d'impact potentiel pour obtenir une information sur le risque réel. L'objectif serait donc *in fine* de proposer une méthode qui permette d'évaluer en temps réel l'ampleur et la gravité des dommages potentiels d'une crue en cours voire même à venir. Si elle s'avère suffisamment pertinente, cette méthode pourra ensuite être appliquée à l'échelle nationale (hors objectif de la thèse) pour venir enrichir le futur système d'avertissement « crue soudaine » mis en place par le SCHAPI. Ainsi, les services avertis seraient mieux à même de prendre les mesures appropriées à la protection des personnes et des biens.

Afin de mener ce projet à terme, trois points-clefs ont été identifiés comme suit :

- Définir un indicateur « statique » permettant d'évaluer le « potentiel de dommage » à proximité de chaque cours d'eau identifié par la méthode AIGA ;
- Mettre en place et alimenter une base de données sur les dégâts liés aux crues rapides dans le sud de la France, afin de valider les différentes approches qui seront proposées ;
- Déterminer le risque de dégâts en temps réel, en croisant les différents indices, statiques et temporels qui auront pu être testés dans le cadre de cette thèse.

Afin de répondre à ces différents objectifs, une grande partie de cette première année de thèse a d'abord été consacrée à un important travail bibliographique afin de comprendre la terminologie et de dresser un état de l'art des travaux existant sur le sujet.

## 3. ETAT DE L'ART

---

L'état de l'art a été compliqué à dresser car la thèse s'inscrit dans un contexte complexe à mi-chemin entre l'hydrologie et la géographie. Peu de travaux se sont consacrés à croiser ces deux domaines. Dans un premier temps, afin de caractériser l'occupation du sol, nous nous sommes focalisés sur la terminologie afin de différencier la vulnérabilité de l'exposition.

### 3.1. EXPOSITION OU VULNERABILITE ?

L'équation du risque peut se résumer, de la manière la plus simplifiée possible à la combinaison d'un aléa et d'un (ou des) enjeu(x) (Figure 5) (Varnes, 1984). En effet, lors de la survenue d'un aléa du type crue d'un cours d'eau, si aucun enjeu n'est à proximité de ce cours d'eau, le risque est nul. De même s'il n'y a pas d'aléa, il n'y a pas de risque.



Figure 5 : La genèse du risque inondation (source : prim.net)

Les études portant sur l'évaluation des risques naturels se sont longtemps focalisées sur l'aléa en mettant de côté la partie enjeu. Ce n'est que récemment que le rôle joué par les sociétés humaines dans la survenue des catastrophes a été mis en lumière (Bolin & Stanford, 1998). Les études portant sur l'évaluation des vulnérabilités des territoires se sont alors multipliées : vulnérabilité sociale, économique, environnementale... Or la vulnérabilité seule ne suffit pas à caractériser un enjeu à risque.

Chaque enjeu est caractérisé par deux éléments complémentaires mais distincts que sont l'exposition et la vulnérabilité (Figure 6) (Alexander, 2000). Mais la notion d'exposition, mal-définie, est souvent mise de côté ou confondue avec celle de vulnérabilité. Ainsi, on peut légitimement se poser la question suivante : quelle est la différence entre exposition et vulnérabilité et comment les définir ? Plusieurs auteurs se sont déjà posé la question de cette distinction (J. Birkmann & Wisner, 2006; Jörn Birkmann et al., 2014; Cardona, 2005) sans pour autant aboutir à une réponse identique.

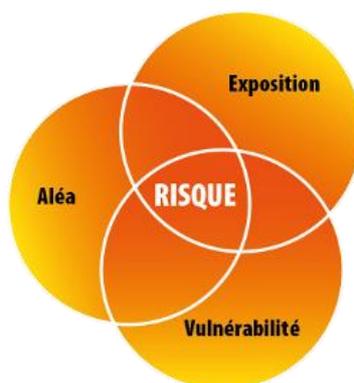


Figure 6 : La définition triptyque du risque (source : PCET-Ademe)

### Exposition

Le cadre théorique confus explique l'absence de consensus sur ce qu'est exactement l'exposition, et des écarts parfois importants peuvent être constatés entre les définitions que l'on trouve dans la littérature : « les valeurs/humains qui sont présent à tel endroit » (Kron, 2002), « le potentiel de dommage » (Lewis, 1999), « les conditions qui font que les gens ou les lieux sont vulnérables » (S. Cutter, Boruff, & Shirley, 2006). Les Nations Unies définissent, elles, l'exposition comme « les personnes, propriétés, systèmes ou autres éléments présents en zone à risque qui sont de ce fait susceptibles de subir des dommages/pertes » (UNISDR, 2009). Ces quelques définitions montrent à quel point vulnérabilité et exposition sont liées et difficilement dissociables.

### Vulnérabilité

Préférée à l'exposition dans les analyses du risque, la notion de vulnérabilité n'est pas plus simple à assimiler pour autant. Au contraire, le grand nombre de recherches qui lui ont été consacrées (Adger, 2006; J. Birkmann & Wisner, 2006; Cannon, 2000; S. L. Cutter, 1996; Hufschmidt, 2011; Nicholls & Misdorp, 1993; Veyret & Reghezza, 2006) explique la multiplicité de définitions qui tentent de la caractériser. Parmi ces définitions nous en avons listé 30 depuis 1980 (Tableau 1), date à laquelle le terme « enjeu » est apparu dans la littérature de l'analyse du risque (D'Ercole & Metzger, 2009) :

Tableau 1 : Définitions de la vulnérabilité dans la littérature (Saint-Martin, 2016)

Num	Définition	Auteur	Année
1	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.	Gabor and Griffith	1980
2	The degree to which a system acts adversely to the occurrence of a	Timmerman	1981

	hazardous event.		
3	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.	UNDRO	1982
4	The degree to which different classes of society are differentially at risk.	Susman et al.	1984
5	The capacity to suffer harm and react adversely.	Kates	1985
6	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
7	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 and Radwan	1985
8	Vulnerability is the potential for loss.	Mitchell	1989
9	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	1989
10	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
11	Vulnerability in geographic space (where vulnerable people and places are located) and vulnerability in social space (who in that place is vulnerable).	Liverman	1990
12	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
13	The differential capacity of groups and individuals to deal with hazards, based on their positions within physical and social worlds.	Dow	1992
14	The breadth of social and economic tolerance available at the same site.	Smith	1992
15	Human vulnerability is a function of the costs and benefits of inhabiting areas at risk from natural disaster.	Alexander	1993
16	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	1993
17	Vulnerability is defined in terms of exposure, capacity and potentiality.	Watts and Bohle	1993
18	L'évaluation quantitative voir monétaire des dommages ou impacts.	Torterotot	1993
19	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	1994
20	An aggregate measure of human welfare that integrates environmental, social, economic and political exposure to a range of potential harmful perturbations.	Bohle et al	1994

21	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	1994
22	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, Asté, Leroi	1994
23	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
24	La fragilité d'un système socio-économique dans son ensemble face au risque.	Hubert et Ledoux	1999
25	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
26	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	2009
27	The characteristics and circumstances of a community, system or asset that make it susceptible to the damaging effects of a hazard.	UNISDR	2009
28	L'ensemble des faiblesses ou défaillances susceptibles de dégrader ou d'interrompre son fonctionnement, voire de le détruire, quelles qu'en soient les causes.	D'Ercole et Metzger	2011
29	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	2014
30	A function of the potential damage to a target due to the occurrence of the hazardous event.	Milanesi and al	2014

Si plusieurs de ces définitions semblent se recouper (potentialité d'endommagement, capacité à faire face à la catastrophe), l'amalgame entre la notion de vulnérabilité et celle d'exposition, ou encore de résilience, sont nettement visibles dans le tableau ci-dessus.

### 3.2. TERMINOLOGIE ADOPTÉE

Afin de définir l'exposition et la vulnérabilité, nous nous sommes rapprochés de la conception de Bohle (Bohle, 2001) qui définit d'une part la vulnérabilité interne (*internal side*), qui renvoie à la propension d'un enjeu à être endommagé selon ses caractéristiques propres (vulnérabilité) et d'autre part la vulnérabilité externe (*external side*) qui caractérise, elle, la propension d'un enjeu à être endommagé selon sa localisation et sa fonction (exposition).

Ainsi nous choisissons de définir la vulnérabilité comme l'ensemble des caractéristiques propres à un enjeu qui vont conditionner son endommagement (matériaux de construction, adaptations du bâti, préparation des personnes). Elle peut être mesurée grâce à un examen approfondi de l'enjeu et un entretien avec ses usagers. L'exposition est quant à elle définie comme l'ensemble des modalités extérieures qui conditionnent l'endommagement d'un enjeu. Elle peut se mesurer grâce à une cartographie détaillée de l'occupation du sol sans examen approfondi.

Afin de répondre au premier objectif de la thèse à savoir l'évaluation de l'occupation du sol à grande échelle, nous avons choisi de nous focaliser sur le facteur d'exposition en construisant un indicateur qui permette de le mesurer. La principale raison qui explique ce choix est notamment la grande flexibilité de la mesure de

l'exposition par rapport à celle de la vulnérabilité. Si l'analyse de la vulnérabilité est nécessaire à la juste appréhension d'un risque sur un territoire donné, elle est également très demandeuse en expertise et en temps. Cependant nous n'excluons pas la vulnérabilité de notre analyse. Nous avons choisi de mesurer l'exposition pour des raisons pratiques (simplicité de mesure, données disponibles) en considérant une vulnérabilité similaire pour tous les enjeux. Or nous sommes conscients que certains biais peuvent apparaître au niveau local.

Par exemple, si l'on ne considère que l'exposition, comment savoir si une autoroute située en zone inondable est surélevée ou non, donc vulnérable ou pas ? Or si l'exposition correspond à la nature et à la localisation des enjeux, même surélevée cette autoroute sera considérée comme très exposée car elle est située en zone inondable et étant donné sa fonction, son endommagement aurait des conséquences importantes sur le territoire (Figure 7).

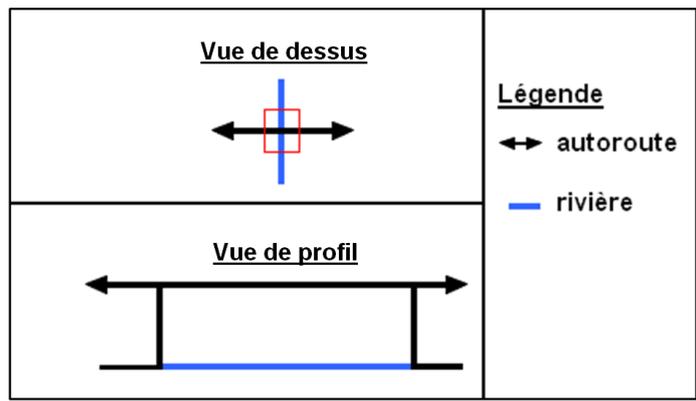


Figure 7 : Schéma illustrant le problème de l'autoroute (Saint-Martin, 2016)

La suite de la thèse sera en partie consacrée à entrevoir les possibles corrections de ce genre de biais, par l'adaptation de la mesure de l'exposition et/ou la mesure de la vulnérabilité, tout en conservant le caractère facilement généralisable de la mesure de l'occupation du sol.

### 3.3. TRAVAUX SIMILAIRES

Plusieurs auteurs ont cherché comme nous à caractériser le risque d'inondation du territoire en se basant sur le paramètre de l'exposition. Cependant, la plupart d'entre eux caractérisent l'exposition comme une donnée qualitative de localisation en zone inondable de sorte que, à la différence de notre approche, l'évaluation de l'exposition n'est que partielle.

Cependant, une poignée d'auteurs ont comme nous entrepris d'utiliser l'exposition comme un paramètre majeur pour leur évaluation du risque. Deux études ont particulièrement retenu notre attention. Ana Camarasa Belmonte a notamment entrepris avec son équipe de recherche de caractériser l'exposition à l'inondation dans la région de Valence en Espagne (Belmonte, López-García, & Soriano-García, 2011). Malheureusement cette étude ne prend pas en compte l'aléa mais fait seulement un état des lieux statique de l'exposition. Cependant, cette étude est remarquable du fait qu'elle met l'accent sur l'exposition des populations, en faisant varier le paramètre temporel jour/nuit et semaine/week-end. Le deuxième travail sur le sujet est celui de Soto et Renard qui ont tenté de caractériser le risque de dégâts lié aux inondations sur le Grand Lyon. Dans cette étude également, l'accent est mis sur l'exposition mais sous le terme de vulnérabilité. Pour autant, ce n'est pas la vulnérabilité qui est caractérisée dans le sens où ils ne prennent en compte que les limites de zone inondable et la nature des enjeux. Malgré cette confusion, la méthodologie utilisée est également simple et facilement réapplicable bien que le risque caractérisé soit un risque statique de ruissellement urbain. Cependant, seuls les enjeux de type bâti sont pris en compte, excluant ainsi les routes, voies ferrées...

Le premier objectif de la thèse étant de caractériser l'exposition du territoire sur un large territoire, nous avons également développé une méthode facilement généralisable de mesure de ce paramètre. Cette méthode est détaillée dans la partie suivante. Y sera également présentée la méthode de validation et de calage.

## 4. PROPOSITION D'UN INDICE D'EXPOSITION

---

Dans la partie précédente nous avons souligné la nécessité de prendre en compte les enjeux afin d'évaluer le risque sur un territoire donné. Bien que la mesure de l'exposition semble de prime abord plus accessible que celle de la vulnérabilité, elle n'en est pas plus simple pour autant. Selon l'ADEME (L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) l'exposition « *est caractérisée par une nature d'exposition et par un niveau d'exposition* ». Deux paramètres doivent donc être pris en compte pour mesurer l'exposition : la nature des enjeux et la portée de l'aléa, donc la localisation. Pour cela, nous allons procéder en 3 étapes :

- La délimitation de la zone à risque, soit la zone inondable,
- La sélection des enjeux exposés,
- L'implémentation d'un indicateur d'exposition.

Ce travail commencé dans le cadre de mon stage de Master 2 est donc largement avancé. Cependant, des adaptations sont nécessaires afin de rendre la méthode, et donc l'évaluation de l'exposition la plus juste possible.

### 4.1. DELIMITATION DE LA ZONE A RISQUE

Afin de déterminer si oui ou non un enjeu est exposé à un risque, il s'agit de savoir si cet enjeu est à la portée de l'aléa. Ainsi, une ville du bassin parisien n'est pas exposée au risque submersion marine car elle est hors de portée de la mer. De la même manière une ville de la plaine Varoise n'est pas exposée au risque avalanche etc. Ainsi, pour qu'un enjeu soit exposé au risque inondation, il faut qu'il soit à la portée de la crue d'un cours d'eau. Pour déterminer quels sont les enjeux exposés il suffit donc de prendre les enjeux situés dans la zone inondable d'un cours d'eau.

Cependant, délimiter la zone inondable d'un cours d'eau n'est pas une chose facile. En effet, la zone inondable varie en fonction du relief, de l'intensité de l'aléa, de la présence d'ouvrages de protection... Or notre objectif est de développer une méthode simple et facilement généralisable de mesure de l'exposition. Voilà pourquoi les limites des zones inondables utilisées doivent être d'une part simplifiées, et d'autre part disponibles pour l'ensemble du pourtour méditerranéen. Voilà pourquoi nous avons choisi d'utiliser les EAIP (Enveloppes Approchées des Inondations Potentielles). Ces enveloppes ont été développées par le CEREMA pour la France entière dans le cadre de l'évaluation préliminaire des Risques d'Inondation de la Directive Inondation, à partir de la méthode EXZECO (Pons, Delgado, Guero, & Berthier). Les EAIP délimitent les zones potentiellement inondables maximales à partir d'un bruitage du MNT; il n'y a donc pas de différenciation du niveau d'aléa et les ouvrages humains ne sont pas pris en compte. Les enjeux exposés au risque inondation sont donc les enjeux présents dans les EAIP.

### 4.2. SELECTION DES ENJEUX

Pour pouvoir modéliser les impacts liés aux crues, il est nécessaire d'avoir une vision globale des enjeux susceptibles d'être endommagés. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte le maximum de types d'enjeux possibles afin de fournir une information exhaustive sur l'endommagement potentiel. Pour cela nous avons choisi de nous focaliser dans un premier temps sur les enjeux statiques via la BD Topo de l'IGN qui fait l'inventaire des infrastructures présentes sur le territoire Français, avec une précision métrique. Plusieurs types d'enjeux ont été pris en compte, regroupés en 3 catégories selon leur forme géométrique pour un traitement facilité sur SIG :

- Linéaire : voie ferrée, autoroute, route à 2 voies, route à 1 voie, bretelles d'autoroute, chemin, piste cyclable...
- Surfacique : tous les bâtiments de manière indifférenciée,
- Ponctuel : les infrastructures à vulnérabilité particulière : hôpitaux, usines, commerce....

Cependant les cultures, qui sont également une catégorie d'enjeux statiques fréquemment inondés, ne sont pas incluses dans la BD Topo. Voilà pourquoi, après une première utilisation insatisfaisante des données de la base CORINE Land Cover, qui fait l'inventaire biophysique de l'occupation du sol en Europe, nous avons été amenés à travailler avec le Registre Parcellaire Graphique (RPG), qui reproduit le contour des cultures et indique le groupe de culture majoritaire de toutes les exploitations agricoles françaises et européennes. La localisation des parcelles agricoles se fait à l'échelle du 1:5000 sur le fond photographique de la BD Ortho© également produite par l'IGN. Cette base de données est mise à jour tous les ans par les exploitants des parcelles eux-mêmes.

Une fois ces enjeux identifiés nous les avons croisés avec les EAIP afin de sélectionner uniquement les enjeux exposés au risque d'inondation. La prochaine étape est l'agrégation de ces enjeux exposés en valeur d'exposition, afin de pouvoir comparer les territoires entre eux.

### **4.3. INDICATEUR D'EXPOSITION**

Un des objectifs de la thèse étant de pouvoir comparer l'exposition des territoires, nous avons cherché un moyen d'évaluer cette exposition sous une forme numérique en attribuant à chaque bassin versant une valeur d'exposition. Le choix de cette échelle (le bassin-versant) est lié au fait que la même échelle est utilisée pour les avertissements AIGA. Nous avons donc attribué une valeur d'exposition à chaque type d'enjeu (**Annexe 1**) afin de pouvoir donner une valeur à chaque enjeu. Une fois ces valeurs attribuées, elles sont agrégées à l'échelle du bassin-versant pour obtenir une valeur d'exposition par bassin-versant. Le choix de cette valeur d'exposition a été décidé selon une hiérarchisation des enjeux en amont.

La méthode que nous implémentons est destinée à améliorer un système d'avertissement pour les gestionnaires de crise. La hiérarchisation des enjeux doit donc suivre la même logique que ces acteurs. C'est pourquoi nous avons basé cette hiérarchisation sur les résultats d'études pour lesquelles un panel de gestionnaires du risque ont été interrogés (Renard & Soto, 2015; Ruin, Creutin, Anquetin, & Lutoff, 2008), en utilisant le processus de hiérarchie analytique de Saaty (AHP) (Saaty, 1990). Cette hiérarchisation a donc été faite en fonction de la nature des enjeux, excepté pour les polygones pour lesquels cultures et bâti ont été différenciés afin de les hiérarchiser selon leur taille : la valeur d'exposition est donc proportionnelle à la taille de la parcelle ou du bâtiment. Ce protocole permet donc d'obtenir, par bassin versant une valeur d'exposition, que nous avons choisi de discrétiser sous la forme de 6 niveaux d'exposition allant d'une exposition nulle à une exposition extrêmement élevée. Grâce à sa simplicité, cette hiérarchisation peut être revue en fonction des besoins des gestionnaires de risque.

Pendant la seconde année de la thèse, il s'agira d'effectuer une enquête auprès de ces gestionnaires, et en particulier des maires afin de revoir la hiérarchisation proposée en fonction de leurs besoins, et d'ajouter d'autres enjeux non-pris en compte (sites SEVESO). D'autres ajustements seront également possibles à différents niveaux :

- Le choix des données d'enjeux en entrée
- La prise en compte de l'exposition humaine
- Les variations temporelles (jour/nuit, semaine/week-end)
- L'échelle de mesure de l'exposition (bassin-versant, commune, département...)

Les niveaux d'exposition obtenus pour le moment ont pu vérifier leur pertinence via le rejeu d'anciens évènements. En effet, nous avons développé une base de données sur les dégâts liés aux crues afin de pouvoir tester en situation similaire au temps réel, les avertissements AIGA et les niveaux d'exposition obtenus.

## **5. QUELLES DONNEES POUR LA VALIDATION ?**

---

### **5.1. BASE DE DONNEES SUR LES DEGATS**

Le nombre et la dispersion géographique importants d'évènements de type crue rapide en zone Méditerranéenne, rendent difficile l'appréciation de l'endommagement global que peut engendrer ce phénomène.

Nous avons donc entrepris de regrouper au sein d'une même base de données, l'ensemble des informations disponibles sur l'endommagement lié aux crues rapides au sein de l'arc Méditerranéen. Le but de cette démarche n'est pas seulement de donner une vue d'ensemble de la sinistralité propre aux crues rapides dans cette région mais bien de tester la pertinence de la méthode AIGA et de l'indicateur d'exposition présenté précédemment. En comparant les avertissements hydrologiques d'AIGA avec les données de dégâts, il est en effet possible d'en vérifier la validité (Fouchier, 2012).

Ce travail de collecte de données est rendu nécessaire par la retenue d'information pratiquée notamment par les assureurs (Bourguignon, 2014), pour des raisons de confidentialité principalement. Cependant, dans l'hypothèse où nous disposerions des données des assurances, celles-ci ne couvrent pas tous les types d'enjeux comme les routes, les bâtiments publics, les infrastructures... Les données de dégâts sont collectées à partir 2011, date à laquelle les données de pluie fournies par les radars météorologiques dans le sud de la France sont considérées de bonne qualité. Chaque dégât renseigné est donc associé à une géolocalisation précise, un horodatage quand cela est possible et un niveau de dégât estimé selon une échelle d'endommagement développée à Irstea (Saint-Martin, 2014). La base est construite sur le modèle d'une géodatabase développée sur SIG et composée de 4 tables (Evènement, Dégât, Victimes, Tronçon de cours d'eau) et dont la table principale est la table « Dégât » qui est constituée de 23 champs (**Annexe 2**).

Ne pouvant accéder aux données officielles sur l'endommagement, nous avons dû trouver d'autres sources d'information. Nous avons d'abord eu recours aux sources les plus évidentes à savoir les médias (papier et virtuel) et les retours d'expérience. Or, cette approche a l'inconvénient de privilégier les zones les plus endommagées et donc les plus médiatisées, posant ainsi un problème d'exhaustivité. Pour parer ce problème, l'utilisation des réseaux sociaux (twitter et facebook) a été développée, via un travail chronophage mais riche en information. Actuellement 21 évènements hydrométéorologiques ont été recensés (Tableau 2). A ces différents évènements sont imputés 740 dégâts et 46 décès entre 2011 et 2015.

**Tableau 2 : Evènements majeurs de type « crue rapide » étudiés et leurs bilans matériels et humains depuis 2011 (Saint-Martin, 2016)**

<b>ID de l'évènement</b>	<b>Date de début d'évènement</b>	<b>Date de fin d'évènement</b>	<b>Nombre de dégâts</b>	<b>Nombre de décès</b>	<b>Département</b>
<b>Evt_10</b>	05/11/2011	06/11/2011	39	3	Var ; Hérault
<b>Evt_3</b>	23/05/2012	24/05/2012	41	0	Hautes-Alpes
<b>Evt_4</b>	26/05/2012	27/05/2012	8	0	Alpes-de-Haute-Provence
<b>Evt_12</b>	25/06/2012	25/06/2012	13	0	Alpes-Maritimes
<b>Evt_7</b>	26/10/2012	26/10/2012	24	2	Var
<b>Evt_9</b>	13/12/2012	13/12/2012	22	0	Var
<b>Evt_8</b>	07/03/2013	07/03/2013	6	0	Var
<b>Evt_2</b>	18/06/2013	19/06/2013	49	3	Hautes-Pyrénées
<b>Evt_1</b>	19/01/2014	19/01/2014	69	3	Var
<b>Evt_11</b>	16/09/2014	20/09/2014	88	5	Gard ; Hérault
<b>Evt_13</b>	29/09/2014	30/09/2014	20	0	Hérault
<b>Evt_5</b>	06/10/2014	07/10/2014	3	0	Hérault
<b>Evt_14</b>	09/10/2014	13/10/2014	20	1	Gard ; Hérault
<b>Evt_15</b>	04/11/2014	05/11/2014	6	0	Vaucluse
<b>Evt_6</b>	14/11/2014	15/11/2014	6	4	Gard
<b>Evt_16</b>	25/11/2014	28/11/2014	44	5	Var
<b>Evt_18</b>	28/11/2014	28/11/2014	40	0	Aveyron
<b>Evt_17</b>	29/11/2014	30/11/2014	18	1	Hérault, Aude, Pyrénées-Orientales
<b>Evt_19</b>	09/06/2015	11/06/2015	16	1	Hautes-Alpes ; Bouches-du-Rhône
<b>Evt_21</b>	23/08/2015	23/08/2015	21	2	Hérault ; Gard

<b>Evt_22</b>	12/09/2015	13/09/2015	20	0	Hérault
<b>Evt_23</b>	03/10/2015	04/10/2015	167	20	Alpes-Maritimes ; Var
<b>Total</b>			<b>740</b>	<b>46</b>	

La deuxième année de thèse devrait voir plusieurs améliorations apportées à cette base. Le but est d'une part d'automatiser le système de collecte et de traitement des données de dégâts, et d'autre part de continuer l'alimentation de la base en incluant de nouvelles sources (données du SDIS 83) et en explorant des événements non encore traités (travail de stage).

## 5.2. ECHELLE D'ENDOMMAGEMENT

Afin d'élaborer cette échelle d'endommagement nous nous sommes inspirés de la littérature existante sur le sujet, ainsi que de notre expérience personnelle. Aucune étude existante ne dresse une typologie d'endommagement commune à de multiples catégories d'enjeux. Cependant, des travaux plus nombreux s'intéressent à l'endommagement spécifique de certains types d'enjeux (Tableau 3). Ainsi le tableau en **Annexe 3** reprend, par catégorie, les sources convoquées afin de dresser cette typologie.

**Tableau 3 : Echelles d'endommagement existantes dans la littérature (Saint-Martin, 2016)**

<b>Nom de l'échelle</b>	<b>Auteur</b>	<b>Année</b>
<b>Echelle de gravité des conséquences humaines et matérielles dans la base CATNAT</b>	Ubyrisk Consultants	Mis à jour en 2016
<b>Echelle de gravité des événements dans la base de données du DFO</b>	Dartmouth	Mis à jour en 2016
<b>Système de classification des inondations historiques FloodHyMex</b>	LLasat	2005
<b>Echelle de gravité des dommages dans la base de données de Prim.net</b>	Mission d'Inspection Spécialisée de l'Environnement	1999

Bien que chaque catégorie d'enjeu dispose d'une échelle de gravité propre, il est possible de distinguer une gradation similaire dans les niveaux d'endommagement correspondant à :

- Niveau 1 : arrivée d'eau sur ou dans l'enjeu sans dégât particulier,
- Niveau 2 : dégât mineur sans conséquence sur le fonctionnement normal de l'enjeu,
- Niveau 3 : dégât important engendrant un fonctionnement limité/une utilisation restreinte de l'enjeu,
- Niveau 4 : dégât très important ne permettant qu'un fonctionnement très dégradé de l'enjeu voire un arrêt total de son fonctionnement.

Cette typologie a pour but de simplifier le traitement des données d'endommagement d'une part, et de fournir des critères objectifs d'évaluation du niveau d'endommagement aux futurs contributeurs de la base de données. En effet, il est important de garder en tête que le but de cette base de données est d'être continuellement alimentée afin de caractériser l'impact des crues rapides sur les territoires.

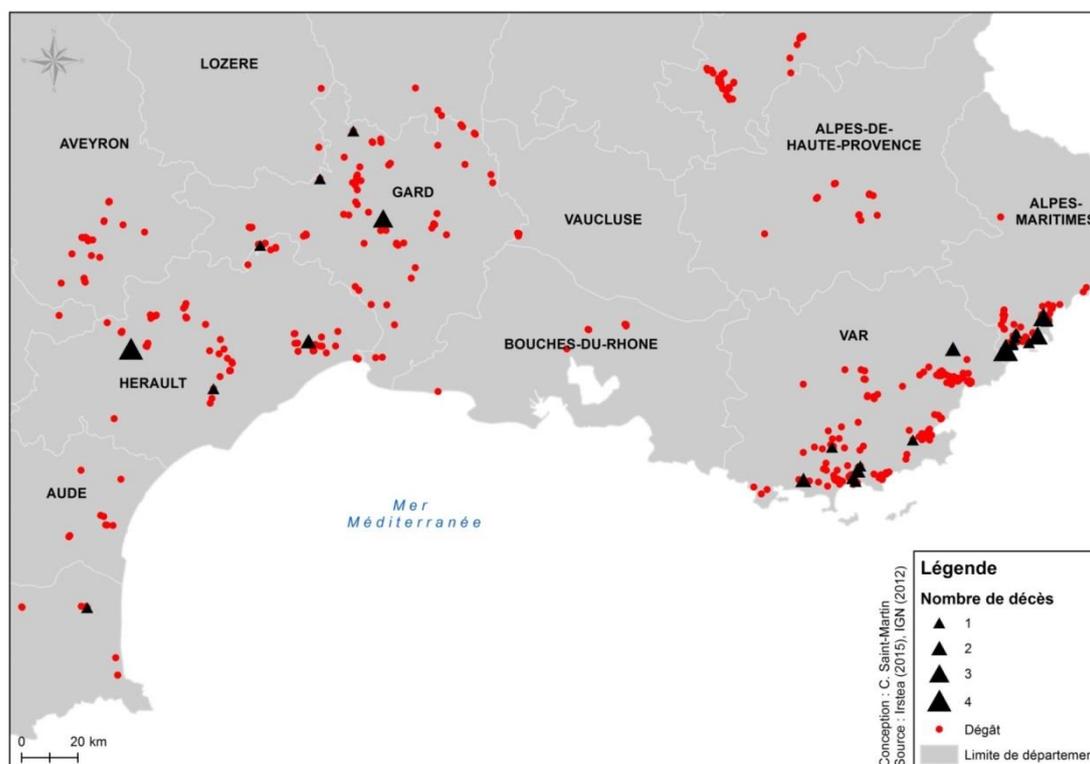
### 5.3. LE CAS PARTICULIER DES VICTIMES

Une autre clef de cette base de données est la prise en compte des « dégâts humains » à savoir les victimes. Un temps intégrées à la table « Dégâts », elles ont été mises à l'écart dans une table spécifique. Cependant le traitement de ces données pose un certain nombre de problèmes, à savoir de confidentialité, de précision des informations (heure du décès...) et de localisation (Vinet, Boissier, & Defossez, 2011). En effet, les individus sont mobiles et le décès d'une personne n'aura pas la même signification que l'endommagement d'un enjeu statique, tant en termes d'exposition que d'intensité de l'aléa. Une table annexe portant sur l'ensemble des victimes des crues rapides a donc été mise en place et prend également en compte les décès hors événement majeur y compris en Corse (Tableau 4).

Au total, le nombre de décès liés aux phénomènes de type crue rapide entre 2011 et 2015 s'élève à 54. De ce nombre nous avons exclu tous les décès dits indirects c'est-à-dire « *les décès qui n'auraient pas eu lieu sans l'occurrence de la catastrophe* » (Boissier, 2013). Une carte de synthèse, reprenant l'ensemble des dégâts et victimes survenus lors de crues rapides montre l'étendue géographique et l'intensité des phénomènes de crues rapides en Méditerranée (Figure 8).

**Tableau 4 : Décès hors événement majeurs depuis 2011 (Saint-Martin, 2016)**

Date	Nombre de décès	Commune et département de décès
24/03/2013	1	Portiragne (Hérault)
04/07/2014	1	Arhansus (Pyrénées Orientales)
19/09/2014	1	Bandol (Var)
16/02/2015	1	Biguglia (Haute-Corse)
17/03/2015	3	Oletta et Biguglia (Haute-Corse)
11/06/2015	1	Saint-Paul-de-Fenouillet (Pyrénées-Orientales)
<b>Total</b>	<b>8</b>	



**Figure 8 : Carte de synthèse des dégâts et victimes liés aux crues rapides depuis 2011 en Méditerranée (Saint-Martin, 2016)**

Cette dernière partie a permis de présenter la méthode d'évaluation de l'exposition et les données disponibles pour la validation. Pour illustrer ces derniers points nous avons choisi une étude de cas portant sur les inondations du 3 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes.

## 6. PREMIERS RESULTATS ET LIMITES

Le 3 octobre 2015, d'intenses précipitations se sont abattues dans le quart sud-est de la France. En l'espace de 2h, les pluviographes de Météo-France ont enregistré des cumuls de pluie allant jusqu'à 156mm à Mandelieu-la-Napoule, et 175mm à Cannes (Figure 9). Ces pluies d'une rare intensité ont provoqué la réaction de plusieurs cours d'eau dans le département des Alpes-Maritimes, se traduisant par des inondations d'une rare ampleur dans les secteurs de Mandelieu-la-Napoule, Cannes, Antibes et Biot.

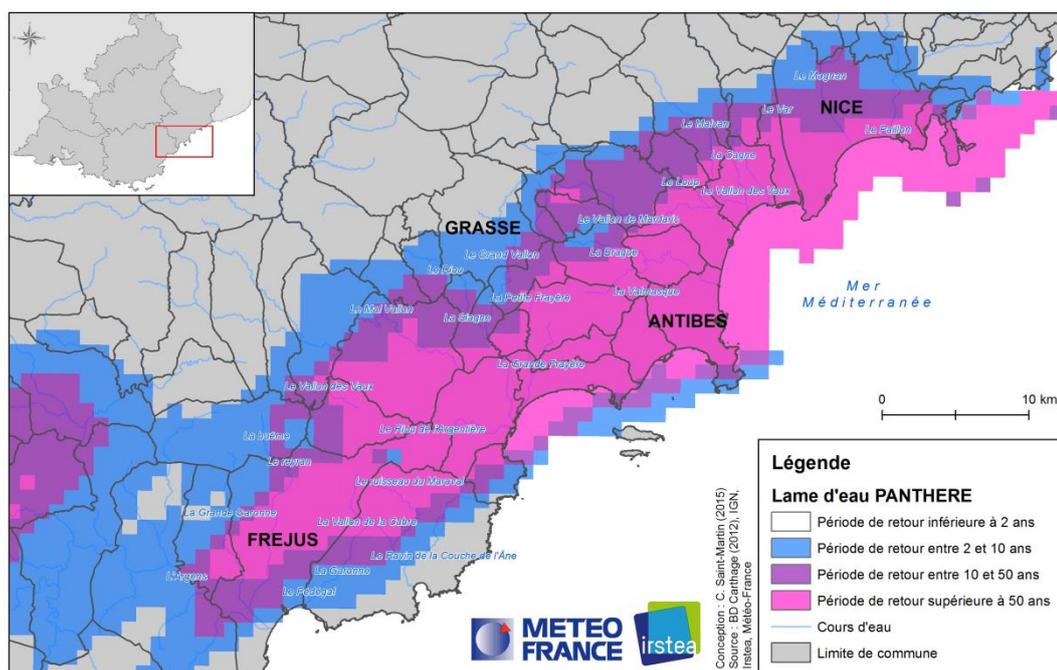
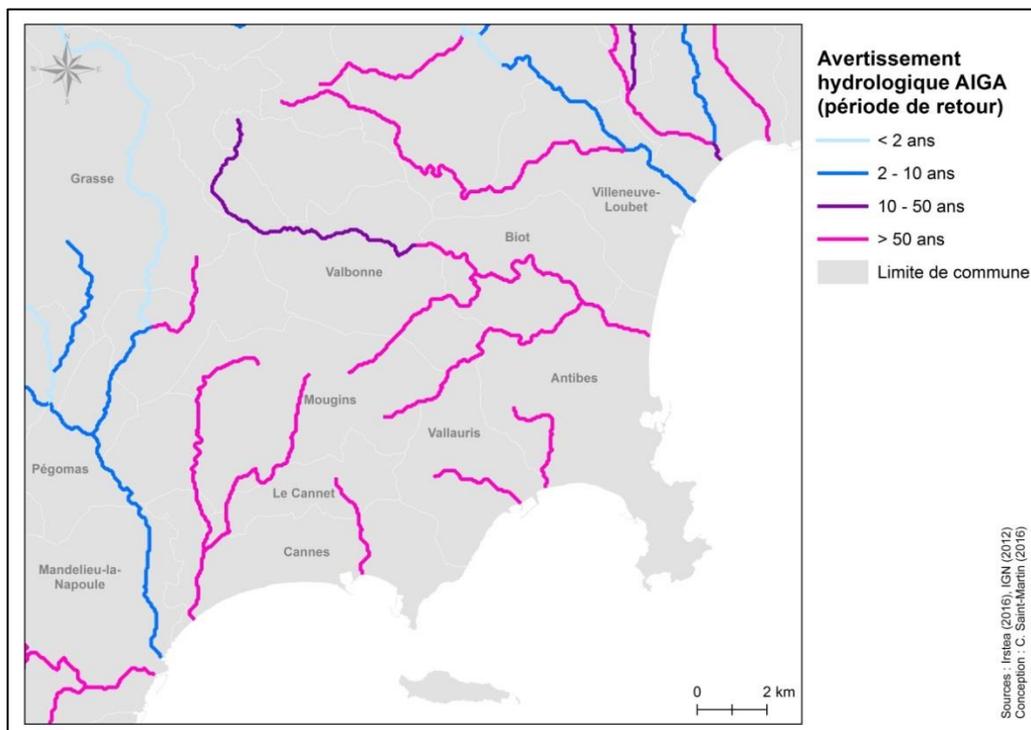


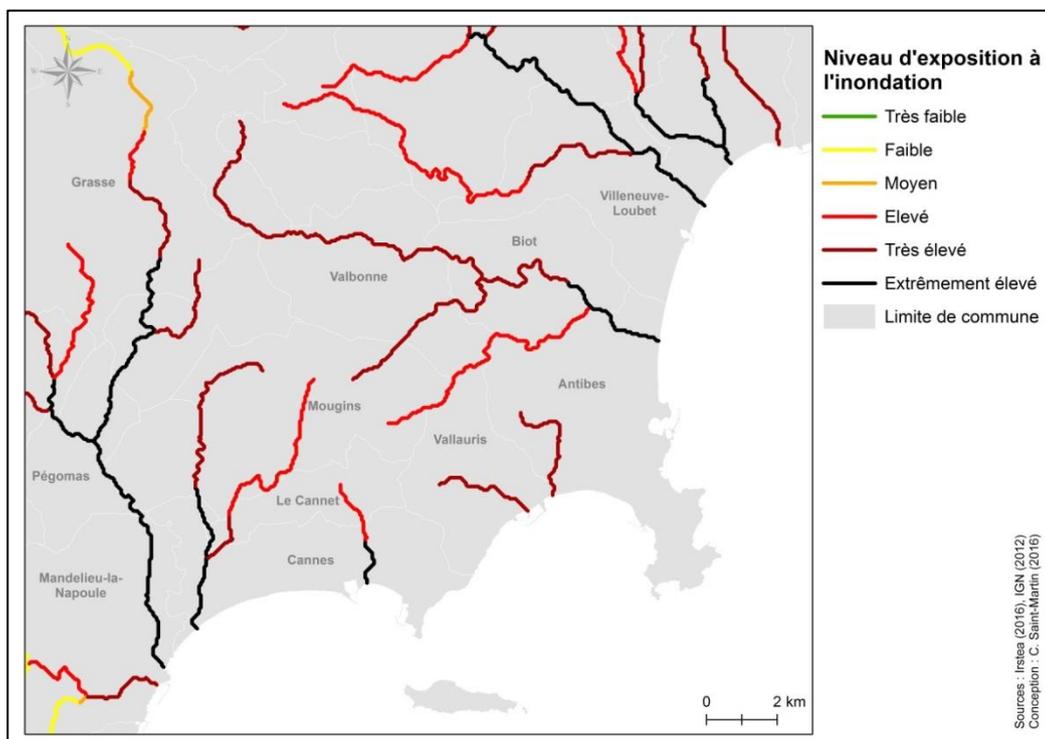
Figure 9 : Qualification des pluies AIGA, maximale pour l'évènement du 3 octobre 2015 (source : Irstea)

Le bilan définitif de ces inondations fait état de 20 morts et de dégâts matériels exceptionnels. La CCR évalue le montant des dommages assurés à 605 millions d'euros (Direction Territoriale Méditerranée du Cerema, 2015), ce qui en fait la quatrième catastrophe jamais connue en France après les événements de Xynthia en 2010, du Rhône en 2003 et du Gard en 2002. Ces montants peuvent être en partie expliqués par la forte urbanisation de la zone impactée ainsi que par la valeur patrimoniale plus importante que sur le reste du territoire national. Ces deux derniers points accentuent le besoin pressant en systèmes d'avertissement pour le risque de crue rapide. Cependant les résultats obtenus par le modèle pluie-débit d'AIGA (Figure 10) ont donné des résultats mitigés. En effet, bien que AIGA montre effectivement l'intense réaction des cours d'eau, le grand nombre de tronçons allumés en période de retour supérieure à 50 ans n'a pas permis d'aiguiller les services de gestion de crise pour leurs interventions. En effet, sans plus d'information, le risque apparaît le même pour tous les tronçons, et une priorisation n'est donc pas possible.



**Figure 10 : Avertissements hydrologiques maximaux donnés par AIGA lors de l'évènement du 3 octobre 2016 (source : Irstea)**

Voilà pourquoi l'évaluation de l'exposition des territoires a semblé nécessaire à la hiérarchisation des territoires à risque. En appliquant notre méthode au territoire des Alpes-Maritimes nous avons obtenu la carte suivante (Figure 11) :



**Figure 11 : Exposition des bassins versants au risque inondation dans les Alpes-Maritimes (Saint-Martin, 2016)**

Sur cette dernière carte (Fig. 12), on peut effectivement distinguer différents niveaux d'exposition, donc avec des territoires plus exposés que d'autres. Si l'on compare les deux cartes précédentes avec les données de dégâts

recensées en post-crue, on peut s'apercevoir qu'effectivement ces derniers sont concentrés au niveau des tronçons les plus exposés (Figure 12), et dont l'avertissement AIGA est supérieur à 50 ans (Figure 13).

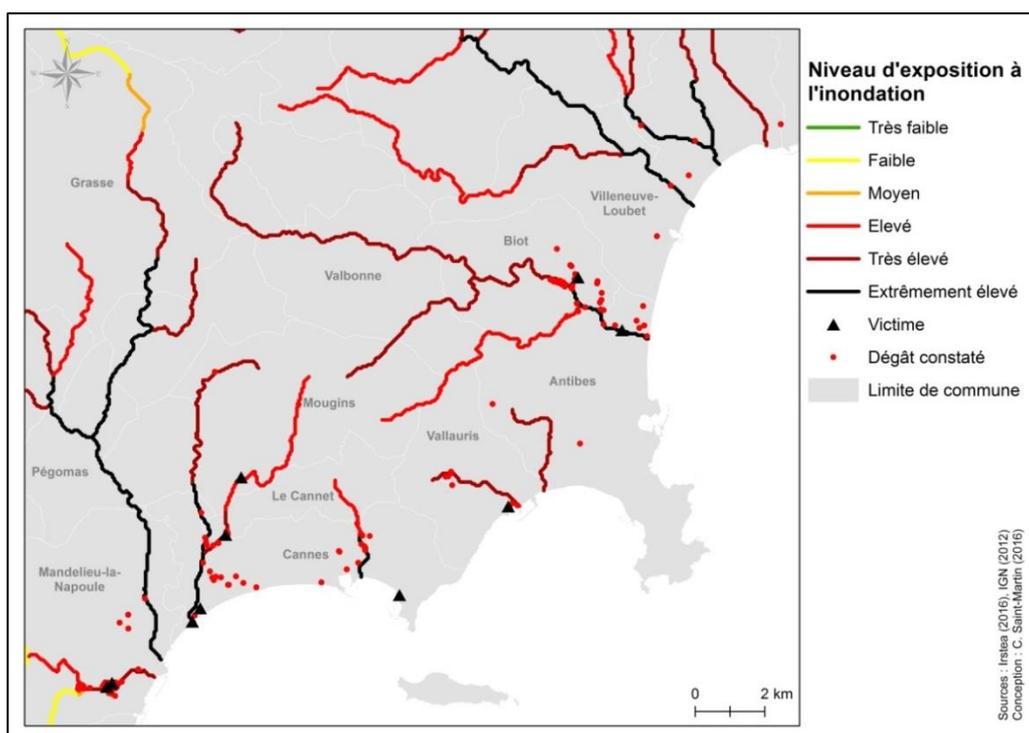


Figure 12 : Etat de l'exposition aux crues dans les Alpes-Maritimes (Saint-Martin, 2016)

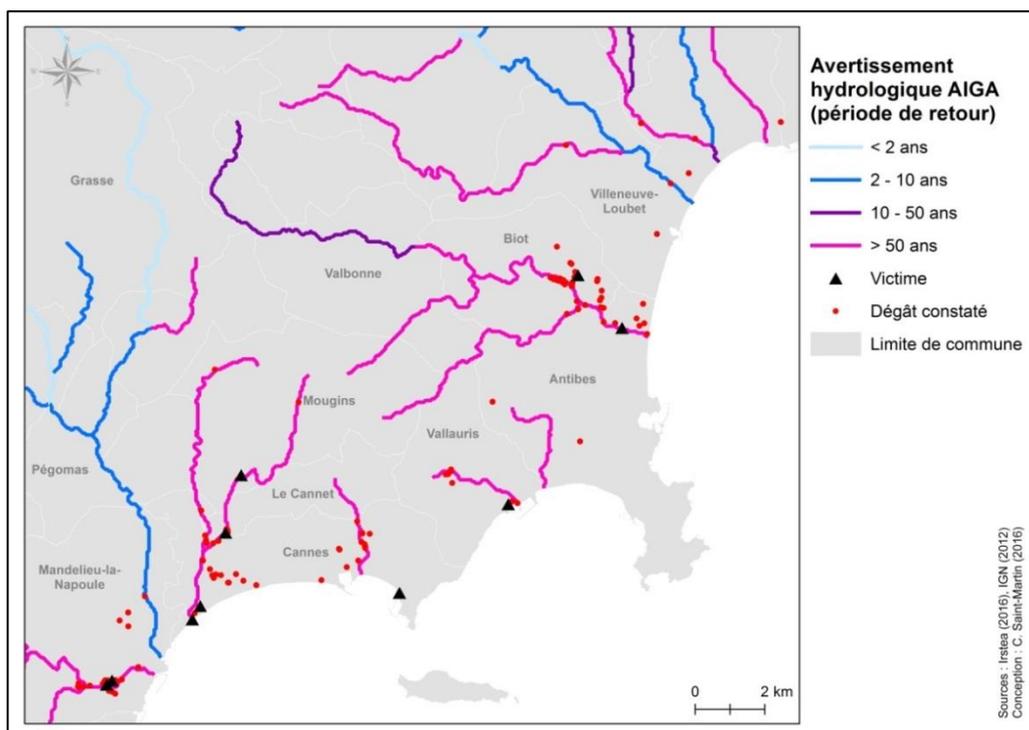
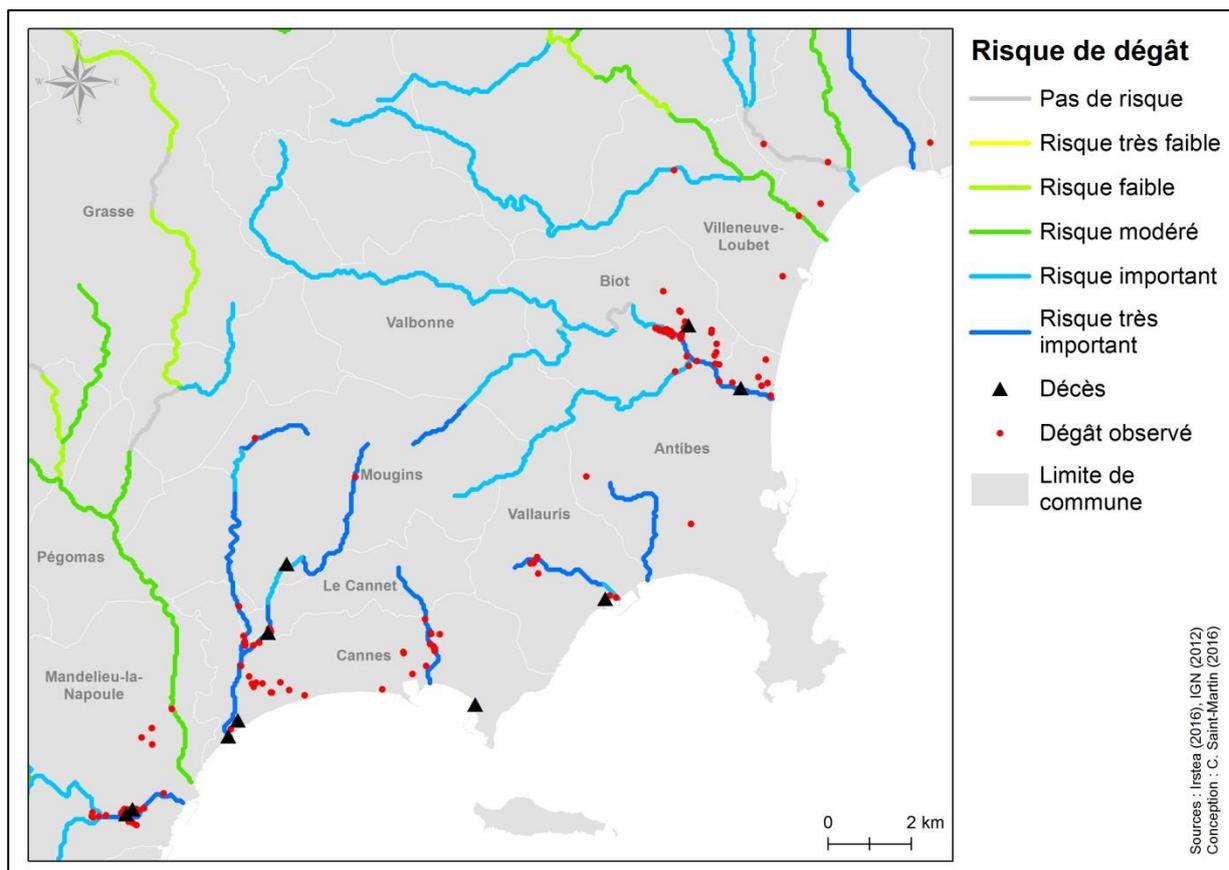


Figure 13 : Avertissements AIGA maximum pour l'évènement du 3 octobre 2015 (source : Irstea)

Afin d'appréhender toute la potentialité d'un avertissement du risque de crue rapide qui combinerait les qualifications hydrologiques de AIGA et l'indicateur d'exposition présenté plus haut, nous avons choisi d'effectuer un premier croisement. Pour cela, nous avons utilisé d'une part les périodes de retour exactes de la

crue (T), et d'autre part les valeurs brutes d'exposition (E), sous la forme :  $\frac{1}{T} \times \frac{1}{E}$ . Les valeurs ainsi obtenues par bassin-versant ont été discrétisées en 6 niveaux de risque allant du risque nul jusqu'au risque très élevé de dégât. Ainsi, en croisant les données d'exposition et d'aléa nous avons obtenu un indice de risque illustré en Figure 14.



**Figure 14 : Risque de dégât maximal estimé pour l'évènement du 3 octobre 2016 (Saint-Martin, 2016)**

Sur la Figure 14, on peut voir que la combinaison exposition-aléa donne de bons résultats quant à l'anticipation de la localisation des dégâts. En effet, on peut constater de manière qualitative que les dégâts recensés sont localisés à proximité de cours d'eau dont le niveau de risque est caractérisé comme « Très important ». Cependant, quelques problèmes peuvent être soulignés à différents niveaux.

Tout d'abord, on peut voir que sur les communes de Cannes et de Biot les dégâts sont localisés le long de linéaires qui correspondent en réalité à des cours d'eau dont les bassins-versants sont de très petite taille (<5km<sup>2</sup>) et donc que la méthode AIGA ne prend pas en compte. Or ces petits bassins versants côtiers, quasiment à sec en temps normal, ont particulièrement réagi aux précipitations lors de l'évènement du 3 octobre.

Le second problème que l'on peut souligner est la présence de dégâts sur un cours d'eau où pourtant notre méthode donne un niveau de risque nul, au-dessus de la commune de Villeneuve-Loubet. Plusieurs paramètres peuvent expliquer ce résultat. Si l'on regarde simultanément les seuls niveaux d'exposition et niveaux AIGA on peut s'apercevoir qu'ils sont tous deux élevés pour ce même cours d'eau. On peut donc penser que le problème vient non pas d'un des indicateurs mais du croisement des deux. Nous chercherons donc à optimiser ce croisement pendant la deuxième année de la thèse. Enfin certains cours d'eau présentent un niveau de risque élevé mais aucun dégât n'est précisé à proximité, cela peut-être lié à plusieurs choses à savoir : l'absence de dégâts répertoriés sur cette zone ou une zone inondable trop importante.

## CONCLUSION

---

Plusieurs avancées ont pu être faites lors de ces 6 premiers mois de thèse. Un important travail bibliographique a été commencé, afin de se positionner par rapport aux terminologies et méthodes existantes. Suite au travail de stage de Master 2, un indice d'exposition a été implémenté et développé afin de caractériser l'occupation du sol à échelle fine sur l'ensemble de la zone Méditerranéenne. Une base de données sur les dégâts liés aux crues rapides a également été mise en place et complétée pour couvrir un maximum d'évènements depuis 2011. Enfin, une première tentative de croisement a été élaborée afin de caractériser le risque de dégâts pour l'évènement du 3 octobre 2015. Ce dernier point, grâce à des résultats concluants, semble souligner toute la potentialité de ce travail de thèse.

Cependant, beaucoup de points restent à aborder et d'autres à améliorer. Voilà pourquoi la fin de cette première année de thèse ainsi que le début de la seconde, seront consacrés à la continuation des travaux déjà démarrés mais également à des actions plus pratiques, dont la principale sera le travail d'enquête auprès des gestionnaires du risque afin de caler notre méthode d'évaluation de l'exposition. Il s'agira également d'entreprendre un travail plus poussé sur les données, aussi bien d'enjeux que de dégâts afin d'obtenir des informations fiables et exhaustives pour caractériser le risque de dégâts à l'échelle locale. L'orientation du sujet vers la gestion de crise fait également que nous restons ouverts à la survenue de nouveaux évènements de crues, qui pourront également influencer la suite de la thèse en termes de zone d'étude comme de méthodologie. En termes de publication, une première version du travail déjà entrepris sera présentée à l'oral lors du colloque Floodrisk en octobre, et un projet d'article est en cours de montage pour la revue Natural Hazards. Le prochain comité de pilotage sera donc l'occasion de faire un point sur le travail réalisé, et les différents points soulignés lors des discussions qui feront suite à cette lecture, que nous espérons enrichissantes.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Adger, W. Neil. (2006). Vulnerability. *Global environmental change*, 16(3), 268-281.
- Alexander, David. (2000). Confronting catastrophe. *New perspectives on natural disasters*.
- Arnaud, Patrick, Aubert, Yoann, Organde, Didier, Cantet, Philippe, Fouchier, Catherine, & Folton, Nathalie. (2014). Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG\* : présentation – performances – bases de données. *La Houille Blanche*(2), 20-26.
- Belmonte, Ana M Camarasa, López-García, María J, & Soriano-García, Julián. (2011). Mapping temporally-variable exposure to flooding in small Mediterranean basins using land-use indicators. *Applied Geography*, 31(1), 136-145.
- Birkmann, J., & Wisner, B. (2006). Measuring the un-measurable. The challenge of vulnerability. Source, No. 5/2006. United Nations University—Institute for Environment and Human Security, Bonn.
- Birkmann, Jörn, Cardona, Omar D., Carreño, Martha Liliana, Barbat, Alex H., Pelling, Mark, Schneiderbauer, Stefan, . . . Welle, Torsten. (2014). Chapter 1 - Theoretical and Conceptual Framework for the Assessment of Vulnerability to Natural Hazards and Climate Change in Europe1: The MOVE Framework. In J. B. K. E. Alexander (Ed.), *Assessment of Vulnerability to Natural Hazards* (pp. 1-19): Elsevier.
- Blanc C., Brémond P., Grelot F. (2010). Projet EVA : "Evaluation de la Vulnérabilité Agricole" (pp. 267): Irstea, G-Eau, UE.
- Bohle, Hans-Georg. (2001). Vulnerability and criticality: perspectives from social geography. *IHDP update*, 2(01), 3-5.
- Boissier, Laurent. (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.
- Bolin, Robert, & Stanford, Lois. (1998). The Northridge Earthquake: Community-based Approaches to Unmet Recovery Needs. *Disasters*, 22(1), 21-38.
- Caisse Centrale de Réassurance. (2016). CCR. Retrieved 06-01-2016, 2016, from <https://www.ccr.fr/>
- Cannon, Terry. (2000). Vulnerability analysis and disasters. *Floods*, 1, 45-55.
- Cardona, Omar D. (2005). Indicators of Disaster Risk and Risk Management: Program for Latin America and the Caribbean: Summary Report: Inter-American Development Bank.
- CEPRI. (2010). CEPRI - Guide du CEPRI : le bâtiment face à l'inondation, diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité (pp. 56): CEPRI.
- Cutter, Susan, Boruff, Bryan J, & Shirley, W Lynn. (2006). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Hazards, Vulnerability, and Environmental Justice*, 115-132.
- Cutter, Susan L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, 20,4, pp. 529-539.
- D'Ercole, R., & Metzger, P. (2009). La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*(Dossiers, Vulnérabilités urbaines au sud). doi: 10.4000/cybergeo.22022
- DGPR, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. (2014). Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation (pp. 24).
- 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 (pp. 37).
- Fouchier, Catherine ; Javelle, Pierre. (2012). Comparaison des avertissements de la méthode AIGA aux dégâts observés - Etude portant sur 23 bassins versants et la période 2007-2011 (pp. 51).
- Geide. (2013). Acteurs économiques : Inondation, Prévenir/Réagir/Rétablir. In ADEME (Ed.).
- Hattemer, Cyriaque. (2010). *Méthodologie d'évaluation de l'endommagement primaire des réseaux d'infrastructures face au risque inondation*.
- Hubert G. , Ledoux B. (1999). *Le coût du risque...L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*.
- Hufschmidt, Gabi. (2011). A comparative analysis of several vulnerability concepts. *Natural Hazards*, 58(2), 621-643.
- Javelle, Pierre, Organde, Didier, Saint-Martin, Clotilde, Demargne, Julie, Saint-Aubin, Céline de, Garandeau, Léa, & Janet, Bruno. (2016). *Setting up a French national flash flood warning system for ungauged*

- catchments based on the AIGA method* Paper presented at the 3rd European Conference on Flood Risk Management, 17th-21st october 2016, Lyon, France.
- Kron, Wolfgang. (2002). Keynote lecture: Flood risk= hazard× exposure× vulnerability. *Proceedings of the Flood Defence*.
- Lavabre, Jacques, & Grégoris, Yves. (2005). AIGA: un dispositif d'alerte des crues sur l'ensemble du réseau hydrographique. *Ingénieries-EAT(44)*, p. 3-p. 12.
- Leone, F., & Deymier, J. (2011). Vulnérabilités des réseaux routiers face aux debris flows dans les Alpes. Quantification des risques et modélisation de l'accessibilité territoriale. Partie 1 : Approche régionale. Vulnérabilités des réseaux routiers et dégradation de l'accessibilité territoriale (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Savoie). Partie 2 : Approche locale. Diagnostic intégré du risque torrentiel et accessibilité routière des secours sur cinq bassins-versants. Moyenne vallée de l'Ubaye (Alpes-de-Haute-Provence) - Rapport WP6, Projet ANR SCAMPEI (Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes), (pp. 135). Montpellier: UMR GRED.
- Lewis, James. (1999). *Development in disaster-prone places : studies of vulnerability. Includes five case studies of vulnerability description and analysis.* (P. Action Ed.). London.
- Martelli, K. (2011). Vulnérabilité des milieux urbanisés face aux impacts physiques des écoulements volcaniques, des lahars et des crues associées : le cas de la ville d'Arequipa (sud du Pérou) (pp. 65). Paris.
- Nicholls, Robert J., & Misdorp, Robbert. (1993). *Synthesis of vulnerability analysis studies*: Ministry of Transport, Public Works and Water Management.
- Pons, Frederic, Delgado, Jose-Luis, Guero, Paul, & Berthier, Emmanuel. EXZECO: A GIS and DEM based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods.
- Renard, F, & Soto, D. (2015). Une représentation du risque à l'intersection de l'aléa et de la vulnérabilité: cartographies des inondations lyonnaises. *Geographica Helvetica*, 70, 333-348.
- Ruin, Isabelle, Creutin, Jean-Dominique, Anquetin, Sandrine, & Lutoff, Céline. (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(1), 199-213.
- Saaty, Thomas L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Saint-Martin, Clotilde. (2014). *Intégration, au système d'avertissement de la méthode AIGA, du facteur d'exposition des territoires au risque inondation.* Université Montpellier III.
- UNISDR. (2009). Terminology on Disaster Risk Reduction (pp. 30 p.).
- Varnes, David J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.*
- Versini P. , Gaume E., Andrieu H. (2010). Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information - test in a flash flood prone area (the Gard region, France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 793-803.
- Veyret, Yvette, & Reghezza, Magali. (2006). *Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité.* Paper presented at the Annales des mines.
- Vinet, F., Boissier, L. , & Defossez, S. . (2011). La mortalité comme expression de la vulnérabilité humaine face aux catastrophes naturelles : deux inondations récentes en France (Xynthia, Var, 2010). *Vertigo*, 11(2), 23.
- Westrelin, Samuel, Mériaux, P, Tabary, P, & Aubert, Y. (2012). *RHYTMME Project: Risk management based on a radar network.* Paper presented at the Proc. European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology.

**Annexe 1 : Valeurs attribuées par type d'enjeu**

Réseau		Infrastructures	
Nature	Rang	Nature	Rang
Autoroute	7	Hôpital	13
LGV	7	Caserne de pompiers	13
Bretelle d'autoroute	6	Préfecture	13
Route à 2 voies	5	Ecole primaire	12
Voie ferrée	5	Service hospitalier	12
Route à 1 voie	4	Prison	12
Chemin	3	Mairie	12
Route pavée	2	Camping	11
Piste cyclable	1	Usine électrique	10
		Aéroport international	9
		Collège/lycée	8
		Usine de traitement de l'eau	8
		Université	8
		Zone industrielle	8
		Usine	7
		Station de pompage	7
		Enceinte militaire	7
		Commissariat	7
		Aéroport national	6
		Gare	6
		Port	6
		Gare routière	6
		Fabrique	5
		Centre administratif	5
		Parking	4
		Village vacances	4
		Aérodrome	4
		Marché	4
		Tribunal	4
		Musée	4
		Lieu de culte	4
		Poste	3
		Thermes	3
		Zoo	3
		Mine	2
		Carrière	2
		Piscine	1
		Hippodrome	1
		Golf	1
		Stade	1

## Annexe 2 : Champs de la table attributaire « Dégât »

- **ID\_degat** : champ texte, identifiant unique du dégât, ex : Deg\_53-23, où 23 correspond à l'identifiant de l'évènement responsable du dégât et 53 à l'identifiant unique du dégât pour chaque évènement ;
- **ID\_evt** : champ texte, identifiant unique de l'évènement, ex : Evt\_23 ;
- **Debut\_evt** : champ date, date de début de l'évènement hydrométéorologique, ex : 12/09/15 ;
- **Fin\_evt** : champ date, date de fin de l'évènement hydrométéorologique, ex : 12/09/15 ;
- **ID\_troncon** : champ texte, identifiant unique du tronçon de bassin-versant où a été localisé le dégât. Cet identifiant correspond à celui de la base nationale des bassins-versants (BNBV), ex : Rhone\_20317 ;
- **Type\_alea** : champ texte, type d'aléa qui a causé le dégât, ex : crue rapide ; ruissellement urbain ; glissement de terrain etc. ;
- **T\_retour** : champ réel double, période de retour estimée pour la crue du cours d'eau responsable du dégât, ex : 10 ;
- **Date\_degat** : champ date, date à laquelle le dégât s'est produit, ex : 12/09/15 ;
- **Heure\_degat** : champ texte, heure à laquelle le dégât s'est produit, elle peut être exacte (ex : 12h15) ou approximative (ex : fin d'après-midi) ;
- **Horodatage** : champ réel double, date et heure précises auxquelles le dégât s'est produit sous le format AAAAMMJJhhmmss, ex : 20151003210000
- **Categorie** : champ texte, catégorie du dégât, ex : réseau, infrastructure, bâtiment, logement, etc.
- **Sous\_categorie** : champ texte, sous-catégorie du dégât, ex : transport, électrique (réseau), public, privé (bâtiment), secondaire, permanent (logement), etc.
- **Niveau\_degat** : champ réel double, niveau de dégât évalué (voir échelle de dégât), gradué de 1 à 4 par catégorie, ex : 4
- **X** : champ réel double, coordonnées de la longitude de la localisation du point de dégât en système Lambert 93, ex : 772232,79
- **Y** : champ réel double, coordonnées de la latitude de la localisation précise du point de dégât en système Lambert 93, ex : 6279375
- **Commune** : champ texte, commune de localisation du dégât, ex : manosque
- **Lieu-dit** : champ texte, lieu-dit de localisation du dégât, ex : la Frugere
- **Source** : champ texte, lien hypertexte vers la source qui a renseigné les informations sur le dégât, ex : [https://twitter.com/\\*\\*\\*\\*\\*](https://twitter.com/*****)
- **Type\_source** : champ texte, type de la source d'information, ex : réseau social ; terrain ; média ; entreprise, etc.
- **Photo** : champ texte, lien hypertexte vers une photo du dégât
- **Video** : champ texte, lien hypertexte vers une photo du dégât
- **Fiche** : champ texte, référence de la fiche RTM qui a renseigné le dégât, ex : 242/FXM
- **Details** : champ texte, détails sur le dégât, ex : renseignements sur l'enjeu, estimation du coût des travaux de remise en état, etc.

### Annexe 3 : Etat de l'art sur l'endommagement lié aux crues par type d'enjeu

Type d'enjeu	Ouvrages
<b>Réseaux</b>	<p>Versini P., Gaume E., Andrieu H. - Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information - test in a flash flood prone area (the Gard region, France) (Versini P. , 2010)</p> <p>C. Hattemer - Méthodologie d'évaluation de l'endommagement primaire des réseaux d'infrastructures face au risque inondation (Hattemer, 2010)</p> <p>Leone F., Deymier J., Jomelli V., Chapelon, L., Bouhet O., Colas A., Vinet F., Cherel J. P., Master 2 GCRN – Vulnérabilités des réseaux routiers face aux debris flows dans les Alpes (Leone &amp; Deymier, 2011)</p>
<b>Domaine agraire</b>	<p>C. Blanc, P. Brémond, F. Grelot - Projet EVA : "Evaluation de la Vulnérabilité Agricole" (Blanc C., 2010)</p>
<b>Commerce</b>	<p>Geide - Acteurs économiques : Inondation, Prévenir/Réagir/Rétablir (Geide, 2013)</p>
<b>Industrie</b>	<p>Geide - Acteurs économiques : Inondation, Prévenir/Réagir/Rétablir (Geide, 2013)</p>
<b>Bâtiment public</b>	<p>CEPRI - Guide du CEPRI : le bâtiment face à l'inondation, diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité (CEPRI, 2010)</p>
<b>Infrastructure publique</b>	<p>Hubert G., Ledoux B. - Le coût du risque...L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations (Hubert G. , 1999)</p>
<b>Logement</b>	<p>CEPRI - Guide du CEPRI : le bâtiment face à l'inondation, diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité (CEPRI, 2010)</p> <p>Martelli K. - Vulnérabilité des milieux urbanisés face aux impacts physiques des écoulements volcaniques, des lahars et des crues associées: le cas de la ville d'Arequipa (sud du Pérou) (Martelli, 2011)</p>