

Développement d'une méthodologie pour la cartographie du risque d'inondation.

Application à la rivière de Cavaillon en Haïti

Thèse présentée par
Gérardson MATHIEU

pour l'obtention du grade de docteur en sciences de l'ingénieur

Janvier 2023

Membres du Jury

Prof. Sandra Soares-Frazão, Université catholique de Louvain, promoteur
Prof. Nyankona Gonomy, Université d'Etat d'Haïti, co-promoteur
Prof. HANERT Emmanuel, Université catholique de Louvain
Dr. Céline Savary, Service Public de Wallonie
Prof. PIERRE Brigode, Université Cote d'Azur (France)
Prof. JOSEPH Adermus, Université d'Etat d'Haïti (Haïti)
Prof. Emérites. Yves Zech, Université catholique de Louvain
Prof. JEANMART Hervé, Université catholique de Louvain, président

Ayiti cheri

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu remercier mon Dieu qui m'a permis de tenir jusqu'à la fin de l'aventure. Un merci spécial à mon épouse qui m'a supporté, encouragé et aidé pendant tout le parcours et ma mère qui a toujours cru en moi.

Je voudrais remercier particulièrement mes promoteurs, les professeurs Sandra SOARES-FRAZAO et Nyankona GONOMY qui m'ont guidé dans l'univers de la modélisation et avec qui j'ai pu explorer une infime partie.

Des remerciements particuliers sont aussi adressés aux professeurs émérites Yves ZECH qui m'accompagnait à chaque instant dans ce voyage vers l'inconnu ; et professeur Adermus JOSEPH qui m'a laissé ses empreintes de pas qui m'ont permis d'aller dans la bonne direction dans ce gigantesque univers.

Un grand merci Dr SAVARY Céline sur qui je pouvais compter à tout moment dans l'amélioration de mes travaux.

Des remerciements à toute l'équipe IMMC, particulièrement pour les matchs de football, les sorties, les ballades qui m'ont permis de respirer un air autre que celui de la modélisation. A mes collègues de l'équipe hydraulique Rotchild LOUIS, Masoumeh EBRAHIMI, Robin MEURICE, Jiangtao YANG un grand merci.

Des remerciements aux membres du jury qui m'ont donné de leur temps pour l'évaluation de mon travail.

Enfin merci à tous ceux et toutes celles qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre dans l'accomplissement de ce travail.

Table des matières

Chapitre 1	Introduction, Mise en Contexte, Objectifs et présentation de la zone d'étude 1	
1.1	Introduction et mise en contexte	1
1.2	Les objectifs	11
1.2.1	Volet technique ou hydraulique	12
1.2.2	Volet sociologique	14
1.2.3	Volet Cartographique	15
1.2.4	Plan de la thèse.....	16
1.3	Présentation de la zone d'étude.	19
1.3.1	Généralités.....	19
1.3.2	Le réseau hydrographique	20
1.3.3	Climat.....	21
1.3.4	Pluviométrie.....	22
1.3.1	Topographie.....	22
1.3.2	Géologie.....	23
1.3.3	Type de sol.....	24
1.3.4	Occupation de sol	24
1.3.5	Les infrastructures hydrauliques importants sur le bassin versant	25
	<i>Education</i>	27
1.3.6	Découpage administratif	28
Chapitre 2	Représentation sociale de l'inondation	31
2.1	Contexte et Objectif.....	31
2.2	Division de l'étude	32
2.3	Méthodologie	34
2.4	Résultats	37
2.4.1	L'inondation.....	38
2.4.2	Utilisation de l'eau de la rivière	47
2.5	Conclusion	53
Chapitre 3	Cartographie du risque inondation - concepts d'analyse du risque ...	55
3.1	Cartographie du risque d'inondation - concepts et analyse du risque	55
3.1.1	L'aléa.....	55
3.1.2	Aléa inondation.....	56
3.1.3	La vulnérabilité	65
	La méthode de Luers	67

II

Le processus Analyse hiérarchique (AHP).....	76
3.2 Cartographie du risque d'inondation	83
3.2.1 L'approche hydrogéomorphologique	83
3.2.2 L'approche télédétection.....	84
3.2.3 L'approche « relevé de terrain ».....	85
3.2.4 L'approche « historique »	85
3.2.5 L'approche « Modélisation Hydraulique ».....	85
3.3 Conclusion	86
Chapitre 4 La modélisation hydraulique en 1D et 2D.....	87
4.1 Introduction.....	87
4.2 Les modèles numériques en hydraulique à surface libre	87
4.2.1 Le Modèle Unidimensionnel (1D)	88
4.2.2 Le Modèle bidimensionnel (2D).....	88
4.2.3 Le modèle tridimensionnel (3D)	89
4.3 Modélisation unidimensionnelle de la rivière de Cavaillon	90
4.3.1 Logiciels utilisés	90
(a) Axeriv	91
(b) SV1D.....	92
(c) HEC-RAS	93
4.3.2 Modélisation d'un tronçon de la rivière de Cavaillon.....	95
(a) Influence de l'aval.....	96
(b) Comparaison avec HEC-RAS.....	100
4.3.3 Influence de l'interpolation des sections transversales en 1D	101
(a) Analyse comparative	102
(b) Cas de la rivière naturelle	104
4.3.4 Conclusion de la modélisation 1D.....	105
4.4 Modélisation bidimensionnelle.....	107
4.4.1 Choix du maillage.....	110
4.4.2 Logiciels utilisés dans cette étude	112
4.4.3 Un cas d'étude (le tronçon 54-65 de la rivière de Cavaillon).....	114
4.4.4 Analyses, comparaisons et discussions.....	118
4.4.5 Carte d'aléa.....	120
4.5 Comparaison 1D et 2D	122
4.5.1 Cas 1.- Canal rectangulaire	123
4.5.2 Cas 2.- Canal rectangulaire avec rétrécissement	125
4.5.3 Cas 3.- Canal avec rétrécissement et méandre	126
4.5.4 Comparaison 1D et 2D de la rivière de Cavaillon.....	128

	III
Chapitre 5 Le cas de la ville de Cavaillon et des zones avoisinantes	139
5.1 Modèle de la ville de Cavaillon et ses environs	140
5.2 Construction de l'hydrogramme à Dory	141
5.2.1 Méthode Hauteur-Débit	142
5.2.2 Hydrogramme à partir de ATHYS	145
5.3 Le Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)	146
5.3.1 Validation des données de Giovanni	147
5.4 ATelier HYdrologique Spatialisé (ATHYS)	149
5.4.1 Fonction de production	150
5.4.2 Fonction de transfert	154
5.5 Construction de l'hydrogramme pour la rivière de Cavaillon	157
5.5.1 Construction d'hydrogrammes pour le sous bassin de Dory	158
5.6 Construction de l'hydrogramme de la partie Nord en amont du modèle	162
5.7 Simulation du modèle de la ville de Cavaillon	162
5.8 Intégration des ravines	165
5.9 Carte de la vulnérabilité	172
5.9.1 Enjeu Humain	174
5.9.2 Enjeu matériel	180
5.9.3 Enjeu culturel	184
Chapitre 6 Conclusion	192
Annexe 1. Rupture de digue à Hunan en Chine (2016)	195
Annexe 2. Rupture de barrage au Sud 'Est du Laos (2018)	195
Annexe 3. Vue globale de la ville de Cavaillon	196
Annexe 4. Couverture des sols	196
Annexe 5. Vue globale de la ville de Cavaillon	197
Annexe 6. Valeur de la capacité de stockage S en fonction de la couverture des sols	198
Bibliographie	203

Chapitre 1

Introduction, Mise en Contexte, Objectifs et présentation de la
zone d'étude

Chapitre 1 Introduction, Mise en Contexte, Objectifs et présentation de la zone d'étude

1.1 Introduction et mise en contexte

De nombreux pays dans le monde sont en proie à des catastrophes liées aux crues et aux inondations. Ces bouleversements deviennent de plus en plus fréquents de nos jours (Ngo, 2014). Selon les données du *Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres* (CRED), la moyenne annuelle est passée de 87 à 165 inondations (Figure 1-1). Dans ce cas précis une inondation est prise en considération, si elle peut causer des dégâts matériels ou des dommages en vie humaine.

Les inondations sont placées au premier rang des désastres naturels avec un bilan annuel de 20 000 morts dans le monde selon les données des enquêtes du *ministère de l'écologie et du développement durable de la France*. En dehors de ces moyennes on peut citer l'inondation exceptionnelle du fleuve YANG TSE YANG en Chine, en 1931 qui a recouvert plus de 100 000 km² (plus de 3 fois la Belgique) et a causé plus d'un million de mort (Dudgeon, 1995).

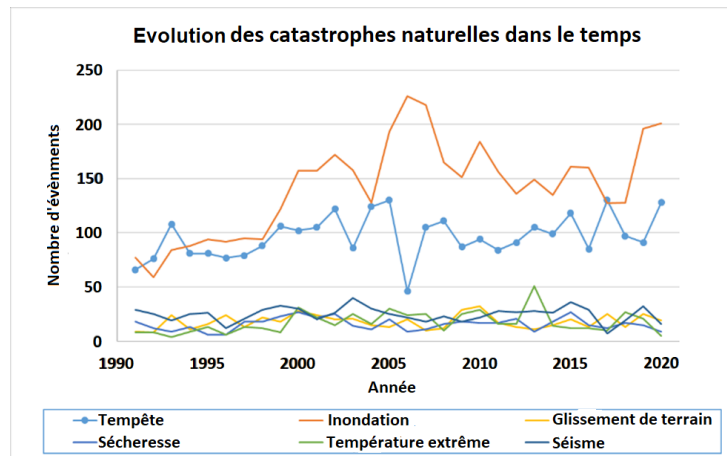


Figure 1-1. - Evolution des catastrophes naturelles dans le monde

Source : The Emergency Events Database (EM-DAT) - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir - www.emdat.be, Brussels, Belgium

Les inondations causent des pertes en vie humaine mais aussi beaucoup de dégâts qui se chiffrent généralement en des millions de dollars américains (Figure 1-2). Elles fragilisent les conditions socio-économiques de vie des populations. Les pays les plus

affectés sont ceux à forte densité de population tels que la Chine, l'Inde et les pays tropicaux du Sud y compris Haïti.

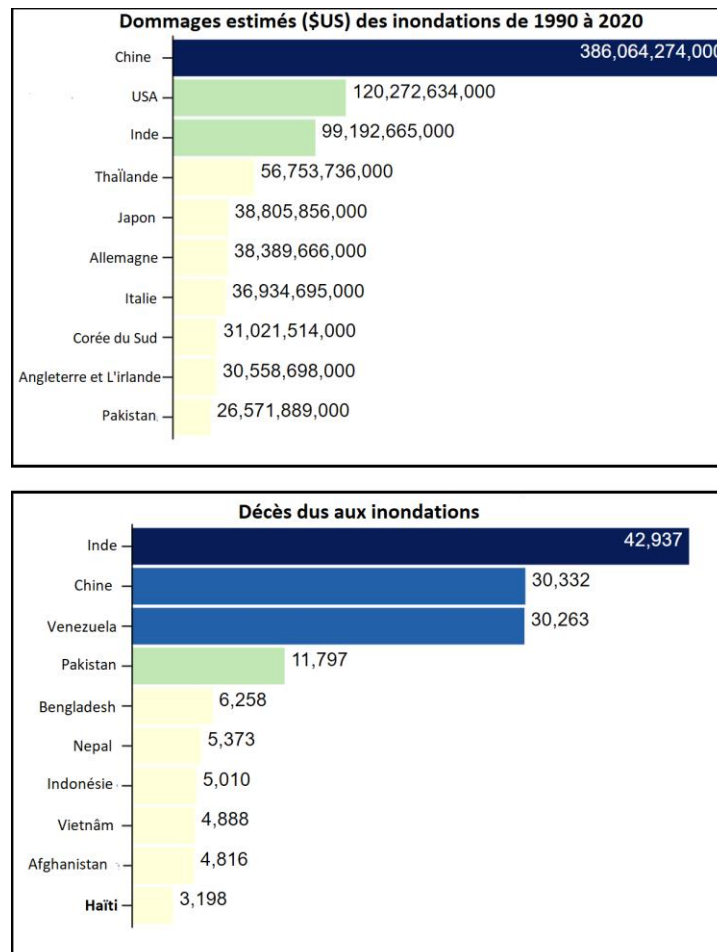


Figure 1-2 : Dégâts matériels et perte en vie humaine dus aux inondations

Source : The Emergency Events Database (EM-DAT) - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir - www.emdat.be, Brussels, Belgium

Les inondations constituent la principale problématique abordée dans cette étude. Il faut néanmoins préciser que l'augmentation de l'aléa d'inondation au cours de ces dernières années est la conséquence directe d'autres phénomènes comme les changements climatiques.

Les inondations par débordement de crue, qui sont les plus fréquentes, peuvent avoir deux principales causes, dépendamment de la région où on se trouve sur le globe terrestre. Dans les zones tropicales et subtropicales elles sont en général causées par les précipitations apportées par les intempéries comme les cyclones et les ouragans (Figure 1-3). Dans les zones tempérées qui sont pour la plupart protégées des cyclones, les causes sont les précipitations, la fonte rapide des neiges et des glaces.

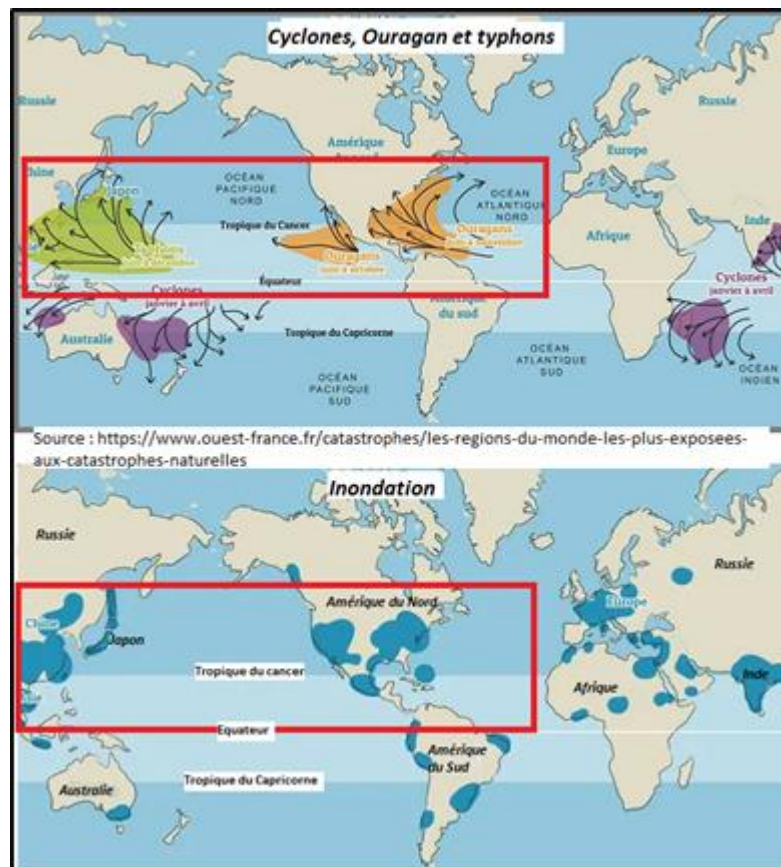


Figure 1-3- Intempéries et inondations dans le monde

Toutes les causes des inondations citées plus haut sont aggravées par l'augmentation de la température. Ce qui a été démontré dans les rapports de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

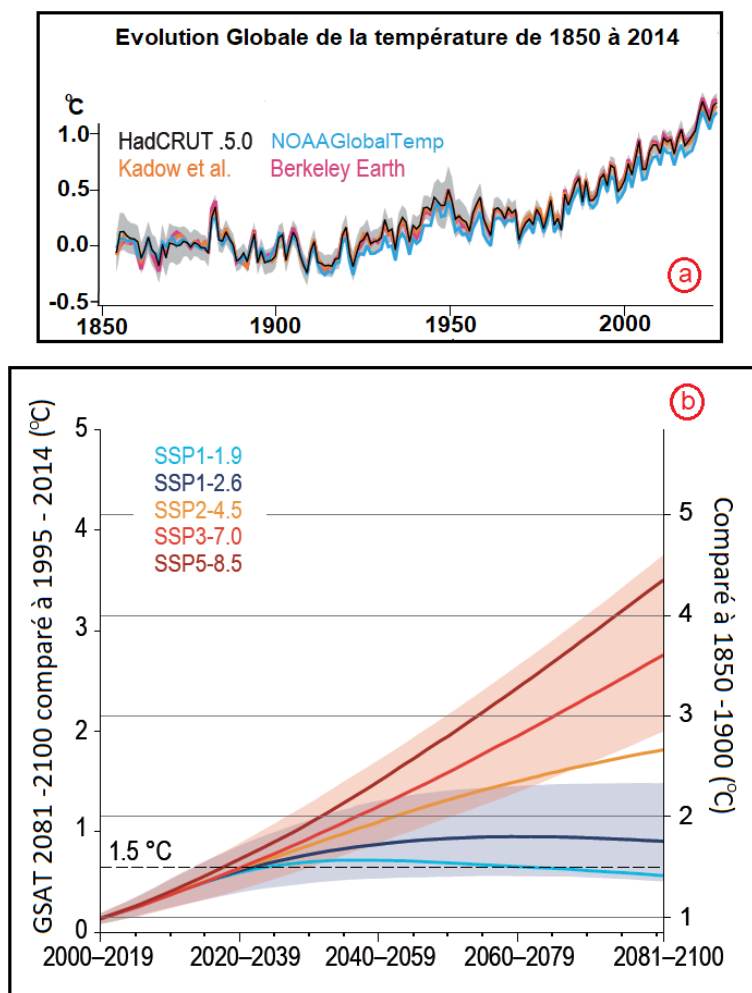


Figure 1-4 - Evolution de la température et projection (IPCC, 2021)

La variation de la température a été obtenue avec les données directement collectées selon le dernier rapport de l'IPCC (IPCC, 2021). Deux grandes périodes ont été considérées : De 1850 à 1900, cette variation était relativement limitée (0.85°C) mais à partir de la révolution industrielle jusqu'en 2014 la température globale de la surface a connu une augmentation de 1.5°C et continue à augmenter (Figure 1-4a).

Plusieurs Scénarii ont été réalisés à partir de ces jeux de données pour prévoir les températures dans les années à venir. Les résultats présentés dans la Figure 1-4 (b), montrent que la température va continuer à augmenter.

Des prédictions sont aussi réalisées sur d'autres phénomènes comme les intempéries et les inondations sur base d'événements passés et l'évolution de la température dans le temps. Malheureusement les données collectées dans la Caraïbe ne sont pas suffisantes pour avoir des prédictions fiables. Néanmoins, le rapport de l'IPPC prévoit une augmentation dans la fréquence et la force des intempéries avec une prévalence des cyclones de classe 4 et 5.

Par rapport à toutes ces considérations, des décisions doivent être prises pour freiner cette course vers l'anéantissement de la planète. Malheureusement ces décisions tardent à venir, il faut essayer de trouver des solutions à court terme pour lutter contre les conséquences du changement climatique.

Certains pays du Nord sont déjà très avancés dans cette lutte contre les inondations. Les moyens de luttas sont assez diversifiés en commençant par des solutions structurelles (construction de digues, de barrages, reprofilage des rivières), pour arriver à des politiques de gestion par l'instauration de la culture du risque. De cette dernière approche vont apparaître des éléments comme la cartographie de l'inondation et les assurances inondations, car une gestion efficace des crues implique une responsabilisation des acteurs principaux qui sont les populations concernées.

D'autres pays, généralement les pays tropicaux du Sud, à faibles revenus ont beaucoup de difficultés à gérer ces catastrophes pour plusieurs raisons. D'un côté, la population n'est pas convenablement prévenue ni préparée car les outils nécessaires à la prévention ne sont pas suffisamment élaborés pour servir d'aide à la décision. D'un autre côté, la dégradation de l'environnement observée bouleverse le régime hydrologique des rivières avec une prévalence de crues extrêmes. Ces crues engendrent de grandes vitesses d'écoulement et donnent lieu à des affouillements importants de berges et emportent une partie des terres arables, des maisons, des vies et des biens. Les crues sont généralement la cause des inondations entraînant de pertes énormes de récoltes parce que la majeure partie des terres cultivables se trouvent au niveau des plaines qui sont situées le long des rivières.

Haïti, de par sa position dans les Caraïbes (Figure 1-5), fera toujours face aux intempéries qui diminuent de jour en jour sa capacité de résilience face à ces phénomènes. Selon *l'Indice mondial des Risques Climatique* (IRC) qui est une analyse basée sur une série de données de conditions météorologiques extrêmes et de données socio-économiques, Haïti occupe la troisième place dans le classement des 10 pays les plus touchés par les événements météorologiques extrêmes entre 1999 et 2018 (Tableau 1-1).

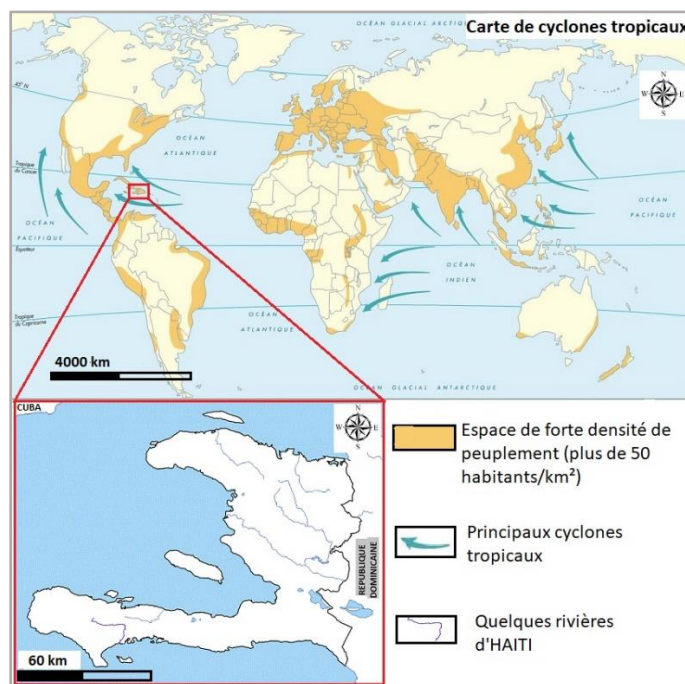


Figure 1-5 - Haïti sur la carte du monde

D'après la base de données *EM- DAT de l'OFDA/CRED*, Haïti est le pays qui subit le plus grand nombre de catastrophes par kilomètre carré de tous les pays de la Caraïbe. Selon le rapport sur *"la gestion intégrée des risques et désastres en Haïti"* de *"Haïti Priorise"*, le pays a connu ces 21 dernières années 40 cyclones, tempêtes et fortes pluies, ce qui fait une moyenne de 2 événements par an. Ces événements provoquent des inondations et des glissements de terrain avec des conséquences graves pour la population et moyens de subsistance. Selon cette même source, ces catastrophes ont tendance à toucher en plus grand nombre les populations pauvres, installées dans les zones inondables et sur les côtes.

Tableau 1-1 - Pays les plus touchés par les événements climatiques extrêmes

IRC (1999- 2018)	Pays	Valeur IRC	Nombre de décès	Décès par 100 000 habitants	Dommages en million de dollars	Dommages par entité de PIB en %	Nombre d'évènements
1	Porto-Rico	6.67	149	4.09	4657.06	3.76	25
2	Myanmar	10.33	7052	14.29	1630.06	0.83	55
3	Haïti	13.83	274	2.81	388.93	2.38	78
4	Philippines	17.67	869	0.96	3118.68	0.57	317
5	Pakistan	28.83	499	0.30	3792.52	0.53	152

Source : Indice mondial des risques (IRC) climatiques extrêmes (Germanwatch, 2016)

Dans presque tous les cas, les dommages et les pertes se font surtout sentir dans le milieu agricole. Haïti est un pays montagneux à 80%, les 20% restants constituent les plaines où se font la majeure partie des pratiques agricoles et se situent pour la plupart dans les lits majeurs des rivières. Ce pays était considéré comme essentiellement agricole ce qui veut dire que son économie se reposait majoritairement sur l'agriculture. En effet, l'ancienne colonie française de 1791 était considérée comme le premier producteur de sucre et la colonie la plus riche grâce à l'agriculture avec une exportation de 30 000 tonnes de café en 1791 et 793 sucreries qui représentaient plus de la moitié de l'exportation de la colonie en 1789. Après son indépendance, rudement acquise sur l'armée napoléonienne de l'époque, le nouvel état libre s'est retrouvé isolé du reste du monde de peur que son hostilité ne devienne pas un cri d'alarme pour les autres esclaves noirs du monde. Ce qui a eu pour conséquence l'affaiblissement de son économie, celle-ci chutera encore plus après le versement de la dette de l'indépendance réclamée par la France. Cette situation s'empira avec une période d'augmentation de risques climatiques (Foucault, 2020). En 2010 le secteur agricole représentait 60% de la population active produisant 45% de la consommation alimentaire du pays (MARNDP, 2010). La situation s'est vite aggravée par le séisme de 12 janvier 2010, l'arrivée l'ouragan Sandy en 2012 (Figure 1-6), la sécheresse en 2015, et l'ouragan Matthew en octobre 2016 (Figure 1-7). Ces catastrophes naturelles ont eu un impact considérable sur les ménages et ont provoqué une forte insécurité alimentaire (FAO, 2016).

L'exemple de l'ouragan Matthew en 2016, le plus puissant ouragan depuis Félix en 2007, selon le *centre américain de surveillance des ouragans* (NHS), permet de constater ces différents changements et les dégâts causés par ce dernier (Figure 1-6). Ces changements ont causé des pertes énormes de terres cultivables dans un contexte d'accroissement démographique poussé dans le pays et avec deux tiers de la population qui dépendent de l'agriculture, la pêche et l'élevage, ce qui fragilise un peu plus la sécurité alimentaire. A côté d'une sécurité alimentaire précaire s'ajoutent de faibles dispositions face au risque d'inondation. Aujourd'hui en Haïti, on ne peut pas dire avec certitude, après autant d'événements extrêmes quels endroits peuvent être considérés comme sûrs pour placer les abris provisoires en cas d'inondation. Cette situation demeure une source de préoccupation majeure des populations d'où la nécessité de réfléchir sur la nature des solutions à proposer en tenant compte du contexte socio-économique du site.



Figure 1-6- Inondation de Port-au-Prince après le passage de l'ouragan Sandy (Octobre 2012)



Figure 1-7- Inondation de la ville de Cavaillon après le passage de l'ouragan Matthew (Octobre 2016)

Les inondations en Haïti sont principalement provoquées par les cyclones qui sont généralement accompagnés de pluies diluviennes, néanmoins des précipitations importantes en dehors des cyclones peuvent aussi en être la cause (Tableau 1-2). Dans cette catégorie d'inondation hors cyclone, toutes les zones côtières et basses sont soumises à des risques élevés d'inondations (Figure 1-8).

Tableau 1-2 - Inondations hors cyclones (1963-2014)

Date	Région touchée	Décès ou Disparus	Sans abris ou Sinistrés	Maisons inondés ou détruites
14/11/1963	Grande Rivière du Nord	500		
20/05/1972	Les Cayes	20		
10/06/1986	Port-de-Paix			
01/06/1986	Les Cayes			> 1000
23/10/1986	Îles de la Gonâve	31	906	> 380
27/04/1987	Port-de-Paix			
08/05/1987	Thiotte (Sud-Est), Port-au-Prince	3	<100	
27/01/1988	Nord-Ouest	>15	1000	
20/06/1988	L'Estère (Département de l'Artibonite)			
08/10/1988	Plaine de Léogane			
23/02/1989	Îles de la Gonâve			3167
24-27/05/2002	Sud: Camp Perrin, Azile, Anse à Veau	45	7000	
23-24/05/2004	Sud-Est	2675	31130	
04/10/2005	Ouest			
22-23/11/2006	Grande Anse Nippe, Nord-Ouest			
08-09/05/2007	Nord, Nord-Est, Sud			
20/10/2009	Port-au-Prince	5		
27/02/2010	Sud, Ouest, Centre, les Cayes	10		
30/09/2010	Sud, Nippes	14		
08/09/2012	Nord	11		880
02-04/11/2014	Nord	9		>1000
Source: www.Haiti-reference.com				

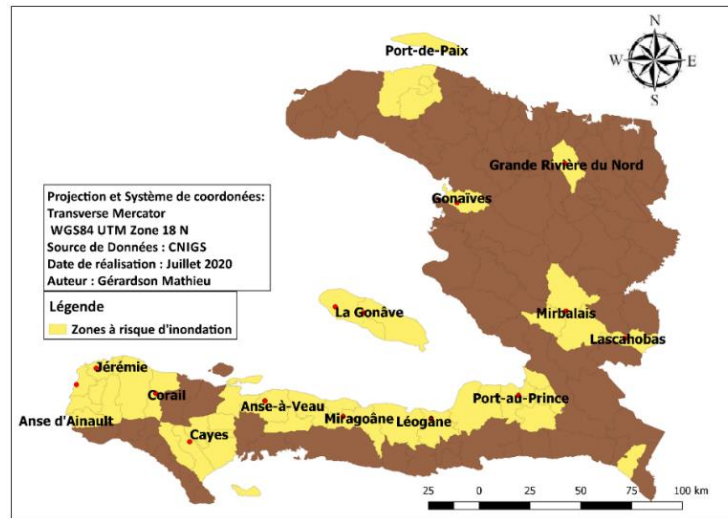


Figure 1-8– Zones d'inondations hors cyclones

Après une catastrophe, rétablir les lieux dans leur état initial consisterait à se laisser exposer à de nouveaux désastres (Ledoux, 2006). Dès lors, la première étape pour diminuer ce niveau de vulnérabilité serait de prévoir ces phénomènes et les dégâts qu'ils peuvent occasionner. C'est dans cette perspective que s'inscrit ce projet de thèse qui s'articule autour du thème : « *Développement d'une méthodologie pour la cartographie du risque d'inondation* ».

La présente recherche s'inscrit dans la ligne de deux recherches doctorales antérieures réalisées à l'UCLouvain dans le cadre d'un projet *ARES-CCD* visant la caractérisation des crues et de la charge sédimentaire des rivières haïtiennes (Carlier, 2018 et Joseph, 2019).

Ces travaux ont permis de développer des modèles hydrauliques en les appliquant à un bassin versant pilote, celui de la rivière de Cavaillon située dans le département du Sud d'Haïti. Ainsi, un modèle numérique de terrain (MNT) a été créé à partir de mesures réalisées au moyen d'un drone muni d'une caméra, en utilisant la photogrammétrie (Macq, 2016). En outre, un premier modèle 1D d'une portion de la rivière de Cavaillon a été établi (Joseph et al, 2017) et les résultats ont pu être comparés aux laisses de crues suite au passage de l'ouragan Matthew en 2016 (Joseph, 2019). Ce modèle a permis d'appréhender avec une bonne résolution l'évolution du niveau d'eau de la rivière au moment des crues et d'apprécier dans une certaine mesure le niveau de risque uniquement à partir de la profondeur d'eau. Cette appréciation semble cependant être

biaisée, car le niveau de risque, dans le cas d'une inondation par débordement de crue, dépend non seulement des profondeurs d'eau mais aussi des vitesses locales d'écoulement or, le modèle 1D ne donne qu'une vitesse moyenne et ne permet pas d'avoir une estimation de la vitesse locale. Une meilleure compréhension de l'écoulement de crue à travers une modélisation bidimensionnelle qui permet d'avoir une meilleure estimation des vitesses (modèle 2D) et une analyse des connaissances locales des populations associées à la gestion du risque d'inondation en milieu rural permettraient de mieux appréhender la problématique du risque d'inondation dans toute sa complexité. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les principaux axes de la présente recherche.

Ces travaux ont aussi permis d'obtenir certaines données sur certains coefficients dont le coefficient de Manning-Strickler qui a été établi suivant la méthode Pebble count. Ce coefficient sera utilisé dans le présent travail.

1.2 Les objectifs

L'objectif principal de ce travail est de développer une méthodologie d'aide à la décision pertinente dans le contexte haïtien afin de pouvoir accompagner les populations dans la recherche des solutions adaptées à leur situation et à leurs besoins.

De manière spécifique, ce travail de recherche s'articule autour de trois volets :

- 1.- Un volet technique de simulations hydrauliques unidimensionnelles et bidimensionnelles visant à évaluer la pertinence de ces outils pour la création de cartes d'aléa basées sur les caractéristiques des écoulements.
- 2.- Un volet anthropologique visant, quant à lui, à comprendre le processus de gestion du milieu fluvial par la population riveraine pour déterminer de manière adaptée la vulnérabilité des territoires, les besoins et les attentes des populations.
- 3.- Un volet cartographique qui intègre la technique et le social pour la production de cartes de risque d'inondation qui devraient permettre aux décideurs d'entreprendre les actions de protections appropriées, ou de déterminer la localisation des zones refuges.

Les résultats obtenus dans le cadre des recherches précédentes sur la modélisation hydraulique d'une rivière haïtienne ont mis en lumière des lacunes de connaissances scientifiques ou de méthodologie, souvent liées au contexte difficile du pays, lacunes que la présente recherche vise à combler, en s'articulant autour de deux disciplines : d'une part, une partie hydraulique qui vise l'amélioration et l'adaptation des modèles d'écoulement à des conditions extrêmes ; d'autre part, une partie anthropologique

faisant le pont entre l'évaluation scientifique du risque et l'éducation au risque d'une population non préparée à ce type d'approche. L'intégration des résultats de ces deux parties permettra la mise au point d'une méthodologie adaptée au contexte local face au risque d'inondation.

1.2.1 Volet technique ou hydraulique

Le volet hydraulique concerne précisément la modélisation des écoulements en une dimension ou en deux dimensions.

Modélisation unidimensionnelle

Les modélisations en une dimension (1D) sont largement utilisées dans la pratique car elles nécessitent moins de temps de calcul et moins de données. Les outils pour les réaliser sont nombreux, outils commerciaux et de recherche (e.g. Petaccia et al. 2013, Franzini et Soares-Frazão, 2016). Elles sont utilisées également dans les rivières très larges, en posant alors des hypothèses pour la simplification des méandres en combinant les lits mineur et majeur. Cependant, dans ce cas, la représentation des plaines inondables peut s'avérer imprécise (Merwade et al. 2008). Certaines méthodes comme l'EDM (Bousmar et Zech, 1999) permettent de représenter les échanges entre lit mineur et lit majeur mais cela n'est valable que si les plaines d'inondation participent réellement à l'écoulement. Or, cela n'est vrai que jusqu'à une certaine distance du lit principal. Souvent, une partie du lit majeur agit juste comme un élément de stockage passif, bien modélisé par des méthodes comme celle des casiers (Erlach et al, 2012). La difficulté est donc de définir, à priori, quelles parties du lit majeur seront actives et quelles parties seront passives. Un autre problème des modèles 1D est qu'ils ne représentent pas bien les vitesses locales. L'établissement de ces modèles se fait par la mise en place à des intervalles réguliers ou pas de sections transversales. Ces sections transversales peuvent être obtenues manuellement par des relevés dans la rivière incluant lit mineur et lit majeur (Carlier 2018 ; Joseph, 2019) ou directement à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Qu'on choisisse de travailler avec les sections obtenues manuellement ou les sections qui proviennent des MNT, certaines recommandations sont utiles pour leur localisation. Dans le modèle à mettre en place, des sections transversales doivent se trouver aux conditions limites amont et aval ; de part et d'autre d'une condition limite interne (barrage, pont) ou certaines modifications brusques de la rivière (rétrécissement, élargissement, affluent) ; en toute section où se trouvent des structures de mesures hydrauliques – niveau d'eau – vitesse d'écoulement – débit (Carlier, 2018).

Modélisation bidimensionnelle

Les modèles bidimensionnels (2D) se basent généralement sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ces modèles sont assez faciles à construire pour les plaines d'inondations sur base de données topographiques acquises par exemple à partir d'un

laser aéroporté ou d'un drone (Macq, 2016). Leurs conceptions deviennent plus difficiles à établir dans le lit mineur où l'écoulement peut être en permanence (Wang et Philipot, 2007). Pour de grands cours d'eau navigables, on peut obtenir la bathymétrie du lit mineur au moyen d'échosondeurs sur bateaux mais pour de plus petits cours d'eau non navigables, il est difficile de mesurer la bathymétrie de manière systématique. Il est surtout difficile de combiner bathymétrie par relevé manuel et MNT. La difficulté se trouve généralement dans les MNT qui sont le produit des photos aériennes. Lors des prises, il y a toujours une certaine quantité d'eau dans la rivière qui ne permet pas d'avoir le vrai thalweg. Dans ces cas-là, on se contente du MNT. Une autre piste serait de relever des sections transversales à intervalles réguliers. Pour représenter la bathymétrie du lit mineur en 2D, il faut donc interpoler entre les sections mesurées, et ensuite combiner ces données avec le MNT des plaines d'inondations, dont la résolution est très différente. La plupart des modèles existants utilisent des techniques d'interpolation rudimentaires sans vérifier la cohérence entre débitance des sections d'origine et débitance des sections interpolées.

D'autre part, les modèles 2D récents utilisent généralement des maillages non structurés (Gros, 2018) qui permettent de bien suivre les limites réelles des zones d'écoulement, par exemple, la limite entre lit mineur et lit majeur. Par contre, il est plus délicat d'anticiper les limites d'inondation et donc de conformer le maillage au résultat attendu, si bien que le calcul peut indiquer des mailles entièrement inondées ou entièrement sèches alors qu'elles ne seraient qu'en partie sous eau, ce qui peut induire des erreurs au moment de traduire les résultats de simulation en limite de zone inondée.

Cette partie du travail vise à développer un modèle bidimensionnel pour la simulation d'écoulements dans la rivière, qui permettra d'établir des cartes d'aléa d'inondation, tout en optimisant le dialogue entre modèles d'écoulement 1D, économes en données et en temps de calcul et modèles 2D plus appropriés pour prédire les effets des crues débordantes.

Derrière l'enjeu du modèle hydraulique, se retrouvent donc un certain nombre de défis scientifiques et méthodologiques :

- Comment combiner le Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2D obtenu, par exemple, à partir de drones pour le lit majeur avec une représentation réaliste 2D du lit mineur qui doit être interpolée à partir de profils en travers forcément éloignés les uns des autres ?
- Comment optimiser le MNT et le maillage de calcul pour assurer une représentation correcte des dépressions locales et des discontinuités topographiques du terrain et un temps de calcul raisonnable ? Sachant que la résolution du maillage 2D peut avoir un impact important sur les résultats

Pour répondre à ces défis, le travail sera réalisé suivant deux axes qui se répartissent comme suit :

- Axe 1 : Modélisation 1D
 - a) Création d'un modèle hydraulique de la rivière avec plaines d'inondations ;
 - b) Représentation de zones inondées à partir du modèle 1D (extrapolation optimale de la surface d'eau);
 - c) Influence de la discrétisation et Interpolation entre sections : techniques existantes et propositions d'amélioration.
- Axe 2 : Modélisation 2D
 - a) Maillage optimal à partir d'un Modèle Numérique de Terrain ;
 - b) Visualisation des zones inondées et détermination précise de leurs limites ;
 - c) Impact sur les résultats en négligeant la bathymétrie de la rivière ;
 - d) Comparaison avec les résultats 1D.

1.2.2 Volet sociologique

Le volet sociologique vise, quant à lui, à comprendre le processus de gestion du milieu fluvial par la population riveraine. Cette partie permettra entre autres un dialogue entre l'approche basée sur la culture ancestrale locale et l'apport des connaissances scientifiques. Il est dès lors lié à la démarche scientifique de détermination de la vulnérabilité des territoires qui, croisée avec l'intensité des aléas, permet de cartographier les risques. L'enjeu est donc à la frontière entre sciences exactes, anthropologie et sociologie.

L'un des objectifs spécifiques de l'étude est de comprendre l'utilisation de l'eau de la rivière et la relation à celle-ci lorsque ses apports sont bénéfiques et lorsqu'ils sont néfastes. Cet objectif permettra d'évaluer l'impact des crues et des changements morphologiques qui s'ensuivent sur ceux-ci. La compréhension de la capacité d'analyse du terroir des riverains permettra d'intégrer ces compétences à la méthodologie d'aide à la décision développée autour des questions du milieu fluvial. Un troisième axe de recherche relatif au volet anthropologique en se basant sur les théories existantes et sur les enquêtes de terrain cherche à mieux cerner les aspects liés surtout aux :

- Comportements des populations quant à l'utilisation d'un bien commun que constitue la rivière ;
- Acquis, savoirs des populations pour juguler et surmonter les difficultés auxquelles les populations font face au moment des inondations ;

- Systèmes de résilience développés par les populations après les catastrophes et désastres liés aux inondations par les crues de la rivière.
- Dialogues entre scientifiques – décideurs – populations pour mieux comprendre le mode de transmission des messages.

1.2.3 Volet Cartographique

En ce qui concerne l'établissement de cartes de risque d'inondation, la méthode généralement utilisée est de croiser en tout point la vulnérabilité (le dommage qui peut être subi) avec l'aléa (la profondeur et la vitesse de l'eau). Pour quantifier la vulnérabilité d'un territoire, la méthode Multicritère Hiérarchique (AHP), proposée par Saaty (1980) est considérée comme une des plus efficaces : elle compare entre eux différents critères (par exemple le critère d'atteinte aux personnes comparé au critère d'atteinte aux biens) en les soumettant à un panel de décideurs et d'utilisateurs. Cette méthode, éprouvée en milieu développé (par exemple pour la ville de Lyon), doit trouver ses marques dans un contexte comme celui d'Haïti.

En effet, pour être réellement utiles sur le terrain, de telles cartes de vulnérabilité et de risque d'inondation doivent non seulement pouvoir être comprises et utilisées par les décideurs mais également par les populations à divers niveaux car la meilleure façon d'éviter de nouvelles tragédies face à un problème donné est de renforcer la capacité des acteurs concernés (Ostrom, 2010). Il est donc capital d'assortir la création de telles cartes d'un volet d'étude sociologique pour mieux comprendre les liens qui existent entre la population et l'eau sachant que les riverains des cours d'eau sont des acteurs clés dans la gestion des risques dans des conditions très variables d'un bassin versant à l'autre et avec des fortunes diverses (Ledoux, 2006). Les discussions sur les enjeux doivent être menées avec méthode et doigtées pour éviter d'imposer un point de vue purement technocratique en contradiction avec le ressenti des populations. A l'autre bout du processus, la population doit être à même de comprendre les aléas, d'accepter leur évaluation qui ne correspond pas toujours à leur expérience, d'intégrer la notion de risque et d'interpréter correctement les cartes de risque.

Pour répondre à l'objectif de cette recherche qui est le développement d'une méthodologie pour la création de cartes d'inondations adaptées à un contexte de rareté de données et d'organes publics démunis face aux catastrophes naturelles, il sera essentiel d'intégrer les résultats issus des volets sociologique et cartographique de manière continue. Les deux volets devront être traités en parallèle et se nourrir mutuellement. Cette intégration se traduit dans le quatrième axe de recherche :

- Axe 4 : Evaluation spatiale des risques
 - a) Combinaison des travaux sociologiques qui auront mené à une meilleure définition de la vulnérabilité avec les résultats des simulations 2D
 - b) Cartes de risque à soumettre aux décideurs et à la population et suivi des réactions de celle-ci.

Pour réaliser ces travaux plusieurs éléments ont été nécessaires. Parmi ces éléments on peut retrouver :

1. Les instruments de mesure : Le courantomètre mobile pour la mesure de débit en n'importe quelle section dans la rivière ; deux stations de mesure à Dory et Grand-Place (Figure 1-9), composées d'un pluviographe et d'une sonde limnimétrique, avec la possibilité de compléter les observations et les mesures topographiques à l'aide d'un drone.
2. Des logiciels qui peuvent se diviser en des logiciels de calcul ou de simulation comme SV1D, Axeriv et Hec-Ras1D pour les modèles unidimensionnels ; SV2D, Hec-Ras2D pour les modèles hydrauliques bidimensionnels. Photoscan pour la création des modèles numériques de terrain à partir des données collectées avec le drone ; QGIS pour l'interprétation et la présentation des résultats. GMSH pour la création de maillages.

1.2.4 Plan de la thèse

Ce présent document de thèse contient une mise en contexte, des objectifs et la présentation de la zone d'étude qui font l'objet du premier chapitre. Le deuxième chapitre met l'accent sur les liens qui existent entre la population et l'eau. Le niveau de connaissance de la population par rapport à l'aléa, les acquis, les savoirs de la population par rapport à l'inondation. Les différents moyens de protection développés par la population pour lutter contre l'aléa. Le niveau de résilience de la population par rapport au risque d'inondation. Cette partie vise à intégrer les riverains, qui sont les premiers acteurs (décideurs et le reste de la population), dans la recherche de solutions adaptées à leur situation. Ce travail, une fois réalisée, a donné des pistes de solutions adaptées au contexte haïtien. Ces pistes ont conduit à la cartographie de l'aléa et du risque inondation. Il existe plusieurs méthodes de cartographier ces deux éléments et c'est ce qui fait l'objet du troisième chapitre où l'inventaire de plusieurs méthodes a été réalisé. Ce chapitre est aussi axé sur les normes et les critères qui existent. Le classement des niveaux de risque, les variables à représenter, la profondeur d'eau, les vitesses d'écoulement ou une combinaison des deux, pour la cartographie du risque d'inondation. Parmi toutes les méthodes présentées, la modélisation semble être la seule qui arrive à caractériser l'aléa inondation qui selon Ledoux (2009) est de donner de manière plus moins correcte les profondeurs d'eau, les vitesses d'écoulement et la durée

de submersion. Ainsi, la recherche a été orientée vers la modélisation hydraulique. Le chapitre 4 traite respectivement des modélisations unidimensionnelle et bidimensionnelle. Des comparaisons sont aussi réalisées entre les différents résultats des modélisations 1D et 2D et aussi avec d'autres logiciels connus. Cette partie a permis la création des cartes d'aléas de la zone d'étude.

Le chapitre 5 fait une application dans la ville de Cavaillon et ses environs de toutes les considérations, les méthodes qui ont été retenues dans les chapitres précédents chapitres. C'est la région du bassin versant qui a été le plus sévèrement touchées par les inondations de 2016. La création de plusieurs cartes a été réalisée. Les cartes qui caractérisent l'aléa inondation, les cartes qui renseignent sur la propension des différents éléments de la région à subir des dégâts. Les cartes donnent le niveau de risque de la population par rapport à l'aléa inondation.

Enfin, les résultats de ce travail seront communiqués aux décideurs et au reste de la population avec qui des entretiens étaient réalisés dans le but de connaître leurs besoins par rapport à ce problème. Ils seront des outils d'aide à la décision dans la lutte contre le risque inondation. Ces résultats aideront à la construction d'un plan de prévention efficace et adapté au contexte de l'étude. Cette méthodologie une fois établie pourrait être répliquée dans les autres bassins versant du pays. Ce qui permettra d'avoir un document pour tout le territoire concernant ce risque.

1.3 Présentation de la zone d'étude.

1.3.1 Généralités

Le présent travail est réalisé dans le bassin versant de la rivière de Cavaillon qui se situe dans le département du Sud d'Haïti. Haïti se trouve sur une île, dans les Caraïbes, qu'elle partage avec la République Dominicaine (Figure 1-5).

Le bassin versant de la rivière de Cavaillon, étant une unité hydrographique, est formé par la réunion de plusieurs communes (qui sont des unités administratives du pays). En effet, Il est inclus dans un espace territorial formé par les communes de Pestel, Baradères L'Asile, Camp-Perrin, Maniche, Les Cayes et Cavaillon (Figure 1-9).

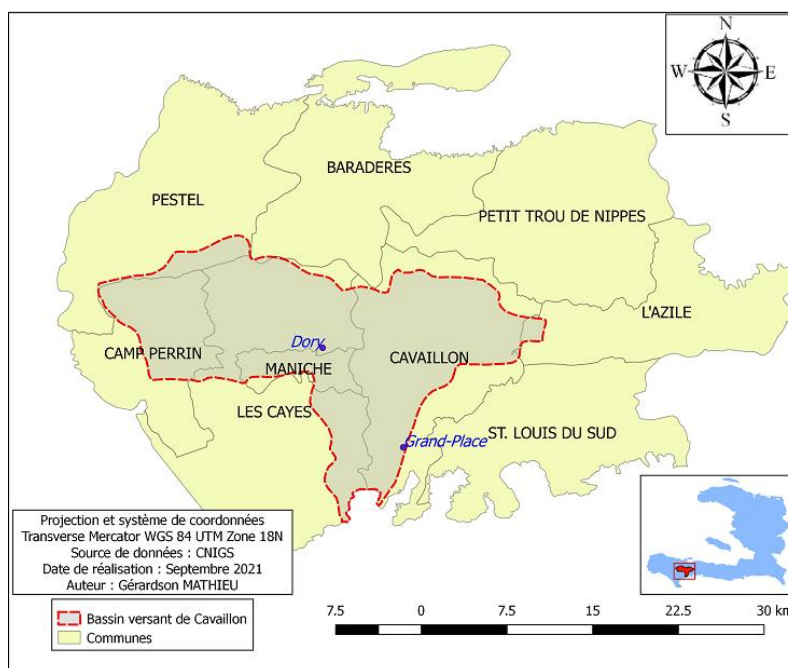


Figure 1-9- Localisation administrative du Bassin versant de Cavaillon

La rivière de Cavaillon a un long bras Ouest-Est qui se dirige depuis Saut-Mathurine à l'Ouest vers Maniche, de Dory jusqu'à Rousseau à l'Est et un bras Nord-Sud dans lequel se jette la rivière Boulmier, peu avant l'embouchure dans la baie de Cavaillon (Figure 1-9). Le bassin versant fait une superficie d'environ 399.86 km². De par sa situation géographique, il est compris entre les parallèles 18°12' et 18°26' de latitude Nord et 73°32' 73°54' de longitude Ouest du méridien de Greenwich. Le travail s'est réalisé sur une partie de la rivière, environ 23 kilomètres, qui part de Dory pour arriver à Grand Place (Figure 1-11).

1.3.2 Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin versant est formé par la rivière de Cavaillon qui est la rivière principale et ses quatre principaux affluents. Dans sa partie amont, on retrouve les rivières Bœuf et Opaque et dans sa partie aval, on retrouve les rivières Pradine et Gros marin (Figure 1-11). La rivière de Cavaillon fait 52 kilomètres de longueur en partant de sa source à Saut-Mathurine jusqu'à l'embouchure (Figure 1-11). Elle a une pente variable, depuis sa source jusqu'à sa rencontre avec la rivière Opaque, elle a une pente de 2%. De la jonction avec la rivière Opaque jusqu'à l'embouchure, elle a une pente qui varie entre 0.1% à 0.6%. Elle a à la fois certaines caractéristiques d'un torrent de montagne dans sa partie amont et d'une rivière de plaine dans sa partie aval. La rivière de Cavaillon a un débit moyen de 9 m³/s mais ce débit peut diminuer considérablement en période d'étiage et arriver à la valeur minimale de 0.7 m³/s. En période de crue, le débit peut atteindre 1035 m³/s (USACE, 1999). Il existe aussi dans le bassin de Cavaillon de nombreuses ravines qui peuvent être considérées comme des cours d'eau non permanents. Elles sont formées lors d'épisode de ruissellement intense et drainent les eaux vers le cours d'eau principal. Dans la majorité des cas elles peuvent parcourir une longue distance avant de se jeter dans le cours d'eau principal, traversant ainsi des villes, et des plaines cultivables. Les plus importantes sont la ravine Roche, la ravine Blanche à Dory et la ravine Bouillette à proximité de la ville de Cavaillon. Ces ravines jouent un rôle très important dans le drainage des eaux de montagne lors de grands épisodes pluvieux. Elles se jettent toutes dans la rivière de Cavaillon. La rivière de Cavaillon ne fait pas qu'embellir le paysage (Figure 1-10), elle peut aussi être dévastatrice lors des saisons cycloniques et lors des grands épisodes pluvieux hors cyclones. Citons à titre d'exemple les inondations à Grand-Place du 21 mai 1972 (Foucault, 2020), les inondations causées par les ouragans Hannah et Ike respectivement en août et septembre 2008 détruisant une partie des infrastructures d'irrigation, des maisons et les inondations causées par l'ouragan Matthew en 2016.



Figure 1-10 - La rivière de Cavaillon

Les affluents Bœuf et Opaque font respectivement 11 et 10 kilomètres de longueur. Les affluents Pradine et Gros-marin plus en aval de la rivière principale font respectivement 7 et 15 kilomètres. Ces affluents en temps normal ont un débit moyen inférieur à 2 m³/s (Joseph, 2019).

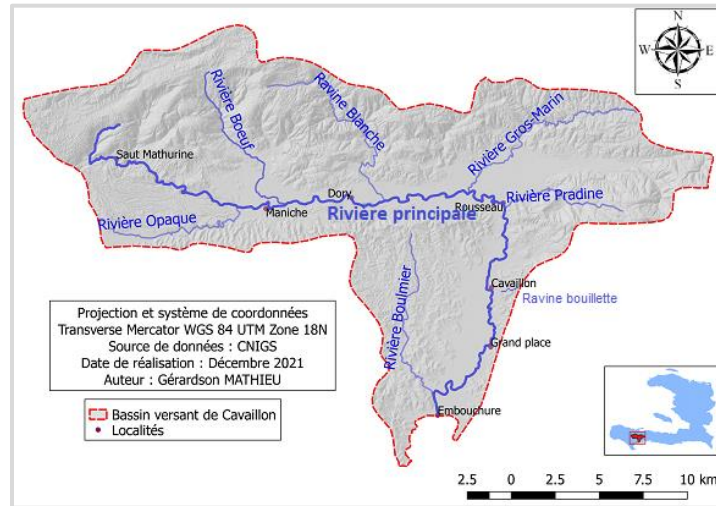


Figure 1-11 - La rivière de Cavaillon et ses affluents

1.3.3 Climat

De part de sa position dans la presqu'île du Sud, le bassin hydrographique de Cavaillon jouit d'un climat tropical humide avec un régime de pluies orageuses par endroit et d'une intensité généralement élevée.

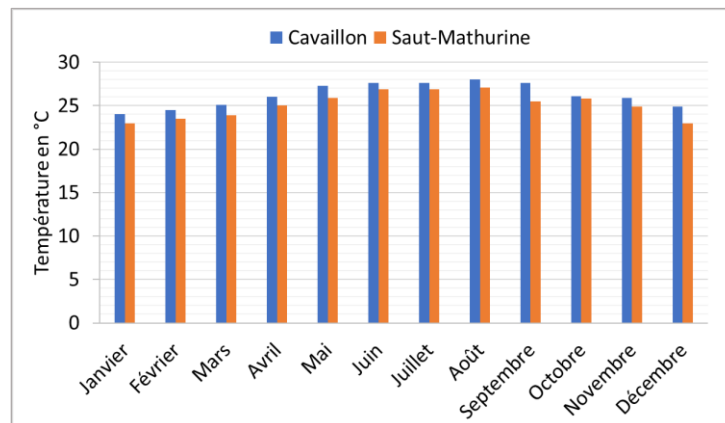


Figure 1-12 - Température dans le bassin versant (Azar, 2010)

Dans la partie Ouest du bassin la température moyenne annuelle est de l'ordre de 23.9°C. Elle augmente en allant vers l'Est en descendant vers la mer pour atteindre une valeur de l'ordre de 26.2°C (Figure 1-12).

1.3.4 Pluviométrie

Dans la partie Ouest du bassin versant (BV), les cumuls de précipitations sur la chaîne du massif montagneux en amont sont équivalents à une valeur moyenne annuelle de l'ordre de 3 000 millimètres avec une saison pluvieuse très longue s'étendant d'avril à novembre, avec une récession en juillet (Figure 1-13). La pluviométrie décroît en allant vers l'Est et en descendant vers la mer est à environ 1800 millimètres à Cavaillon avec une saison pluvieuse commençant généralement fin avril - début mai et se terminant fin octobre. Au cours de cette période, on enregistre la quasi-totalité des précipitations, plus de 75%, très souvent mal réparties. Cette mauvaise répartition est compensée par les réseaux d'irrigation de la région : Le réseau d'irrigation de Dory et le réseau d'irrigation de Desrodières.

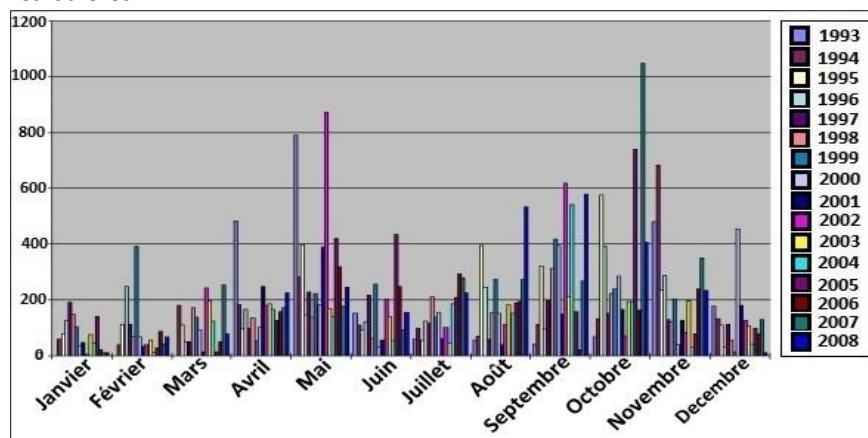


Figure 1-13 - Pluviométrie (mm) 1993 – 2008 ORE Camp-Perin, Cayes, Haïti

1.3.1 Topographie

Le bassin hydrographique de Cavaillon est délimité par une chaîne de montagnes d'altitude relativement élevée, mais près de la moitié de la superficie totale de ce bassin occupe des pentes entre 12% à 30%, soit 42 % de la superficie totale. En effet, les mornes de Saut-Mathurine, Dory, Maniche, Gros Marin possèdent une pente comprise entre 30 et 60% qui représentent 25% du bassin versant. Certains sommets des mornes, situés dans la partie Nord du BV ont une pente supérieure à 65% (Figure 1-14). A Cavaillon, Grand-Place jusqu'à l'embouchure (exutoire du BV), sont constitués, en grande partie de pente très faible bien que cet exutoire soit entouré de mornes à pente moyenne, 5-12% et 2-5%.

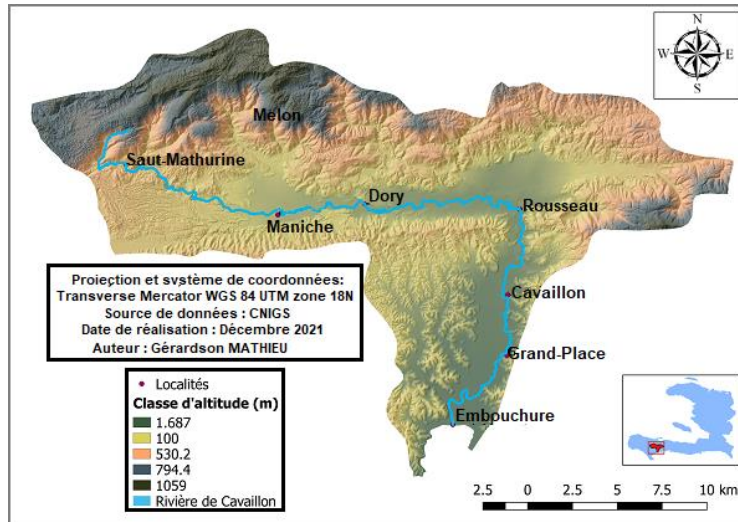


Figure 1-14 - Classe d'altitude du Bassin Versant

1.3.2 Géologie

Selon les études menées par Azar et al. (2010), les caractéristiques géologiques du bassin versant (BV) de Cavaillon se divisent en trois groupes (Figure 1-15): les matériaux alluvionnaires et les matériaux détritiques qui se situent autour de l'axe de la rivière font 25% de la superficie totale du bassin.

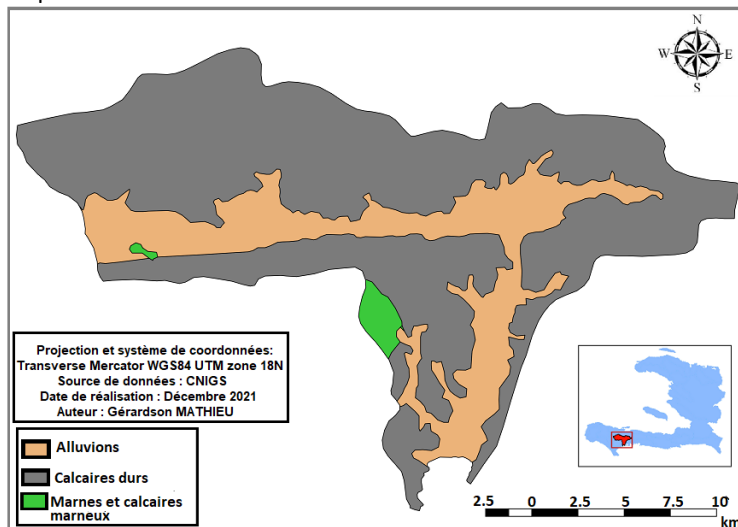


Figure 1-15 - Géologie du Bassin Versant (Azar et al., 2010)

On retrouve, par contre, les calcaires de type marne au niveau de Champloies (Camp-Perrin) qui représentent 1% du bassin soit 597.949 ha. Les calcaires durs sont les plus représentés du bassin, ils font 74% de la surface total. La morphologie karstique des calcaires massifs se retrouve au Nord du bassin.

On retrouve également une partie d'origine détritique vers Camp Perrin. On observe des séries de roches sédimentaires un peu partout au niveau du BV qui se localisent comme suit :

- Eocène, série compressive de la presqu'île du Sud (collines à l'Ouest et à l'Est de la rivière de Cavaillon dans sa partie d'axe Nord-Sud) ;
- Miocène, faciès continentaux à lignite de la Presqu'île du Sud (petite zone à l'Ouest de Maniche vers Camp-Perrin) ;
- Quaternaire, éboulis, brèches de pente et alluvions (dans la vallée).

1.3.3 Type de sol

En se basant sur l'origine des roches mères, les sols du BV de Cavaillon ont été catégorisés en sept groupes (Azar et al, 2010) qui sont :

Groupe I : Sols alluviaux ;

Groupe II : Les podosols, jeunes au niveau de certains sommets (Saut-Mathurine) avec une profondeur moyenne et de valeur agronomique très limitée ;

Groupe III : Les entisols qui sont caractérisés par des sols peu profonds de couleur noire cendreuse, avec une fertilité moyenne et de valeurs agronomique très limitées. On les retrouve au niveau de certains sommets ;

Groupe IV : Les alfisols qui sont caractérisés par des sols noirs cendres avec une profondeur variable. On les retrouve au niveau de certains secteurs du BV ;

Groupe V : Les vertisols qui sont des sols noirs, profonds avec une fertilité moyenne. On retrouve ces sols dans les fonds des talwegs et au niveau de certains versants ;

Groupe VI : Les sols rouges tropicaux avec une texture limono-argileuse et limono-sableuse, profonds, avec une fertilité faible. On les retrouve au niveau de certaines dépressions ;

Groupe VII : Les gleys et pseudogleys sont des sols noirs, profonds, avec une fertilité moyenne. On retrouve ces sols au niveau des hauts plateaux.

1.3.4 Occupation de sol

Selon les données du *Centre National d'information Géospatiale haïtien* (CNIGS) en 2010, les sols sont peu adaptés à l'agriculture mais le bassin versant est dominé par des zones cultivées environ 86 %. Ces cultures peuvent être moyennement denses (47%),

denses (28%) ou un système d'agroforesterie dense (11%). Les cultures sont ou varient entre moyennement denses à denses. Les mangroves et les forêts sont très peu représentés (Azar et al., 2010). Les pratiques culturales sont de deux types : les cultures dans les montagnes avec des espèces résistant à la sécheresse et les cultures irriguées qui se font surtout dans les plaines en bordures de la rivière principale (Figure 1-11).

1.3.5 Les infrastructures hydrauliques importants sur le bassin versant

Les aménagements hydrauliques que l'on retrouve sur le bassin versant sont de plusieurs natures. De par leur importance, on retrouve les infrastructures d'irrigation et d'hydroélectricité dont le barrage de Dory pour l'irrigation et le barrage hydro-électrique de Saut-Mathurine. Le barrage de Dory est utilisé pour la dérivation de l'eau qui sert à alimenter les systèmes d'irrigation de Dory et de Desrodières.

Le Système d'irrigation de Dory

Le réseau d'irrigation existe depuis 1976 après son inauguration selon Pierre Jean Claude DESIR, Vannier depuis l'inauguration, riverain interviewé lors des visites de terrain. Il a connu de nombreux dégâts causés par les divers cyclones dont les principaux Hanna et Ike durant la saison cyclonique de 2008. Le réseau est constitué d'une prise (Figure 1-16) d'un canal primaire et des canaux secondaires qui desservent directement les parcelles cultivées. Le périmètre irrigué de Dory a bénéficié, conformément aux politiques de l'État pour la relance de la production nationale par le développement de l'agriculture irriguée, des travaux de mise en place d'infrastructures hydro-agricoles. En appui au *Ministère d'Agriculture des Ressources Naturelles et du développement Rural* (MARNDR), des Organisations non-gouvernementales (ONG) font souvent des interventions sur les périmètres irrigués en vue d'améliorer les résultats techniques.



Figure 1-16 - Le deversoir et la prise d'eau à Dory (Carlier, 2018)

Ces interventions peuvent se porter sur les infrastructures physiques, la gestion sociale, le bassin versant ou sur le système de production. C'est ainsi qu'en 2008 après la saison cyclonique le *Comité Protos Haïti* (CPH) a fait une intervention à Dory-Cavaillon en réhabilitant certains ouvrages d'irrigation pour améliorer la desserte en eau de ce

périmètre. Le système d'irrigation de Dory se trouve à l'intérieur de la zone d'étude et sera traité dans un autre chapitre.

Le système d'irrigation de Desrodières

Le système d'irrigation de Desrodières (Figure 1-17) est situé en aval de la centrale hydro-électrique de Saut Mathurine. Il est alimenté par une prise sur la rivière Cavaillon qui se déverse dans un canal tête morte d'une longueur d'environ 1 km revêtu en maçonnerie. Le réseau de distribution comprend ensuite le canal primaire qui fait environ 2.6 km sur lequel sont branchés les canaux secondaires qui totalisent environ 8 kilomètres. Les canaux secondaires alimentent directement les parcelles en passant par les arroseurs. La superficie irriguée est de 115 hectares. Les enquêtes réalisées par la firme LGL SA ont recensées 195 usagers dont 177 hommes et 18 femmes sur un total de 286 parcelles.



Figure 1-17.- Le périmètre irrigué de Desrodières

La centrale hydro-électrique de Saut-Mathurine

La Centrale hydro-électrique de Saut-Mathurine (Figure 1-18) se trouve dans la commune de Camp-Perin. Cette centrale a une capacité de 1.6 MW en saison pluvieuse et moins, environ 700 kW en saison sèche. Elle a été inaugurée en 1983 et se trouve dans le sous bassin de Mahot et alimente trois turbines hydroélectriques permettant ainsi de desservir 7 communes du département du Sud.



Figure 1-18.- La centrale Hydro-électrique de Saut-Mathurine

Cette partie a fait la représentation physique de la zone étudiée. L'image de la société est aussi représentée dans le chapitre suivant. Il faut néanmoins préciser que la majeure partie des infrastructures citées précédemment subissent constamment les effets des inondations.

Education

Selon l'enquête réalisée par l'Institut Haïtien de Statistique et d'Informatique (ISHI), il y a 93 établissements scolaires dans la commune de Cavaillon. De ce nombre, on comptait un (1) établissement de niveau préscolaire, soixante-onze (71) de niveau primaire et vingt et un (21) de niveau secondaire. Plus de 82,0% des établissements scolaires répertoriés sont privés. Trois (3) centres d'alphabétisation, cinq (5) institutions techniques et professionnelles, une (1) école supérieure ont été également inventoriés dans la commune.

1.3.6 Découpage administratif

Dans cette partie de l'étude, il est nécessaire de présenter le découpage administratif de la zone étudiée car il permettra une meilleure compréhension des divers liens qui existent entre divers groupes de la population et aussi entre la population et le bien commun.

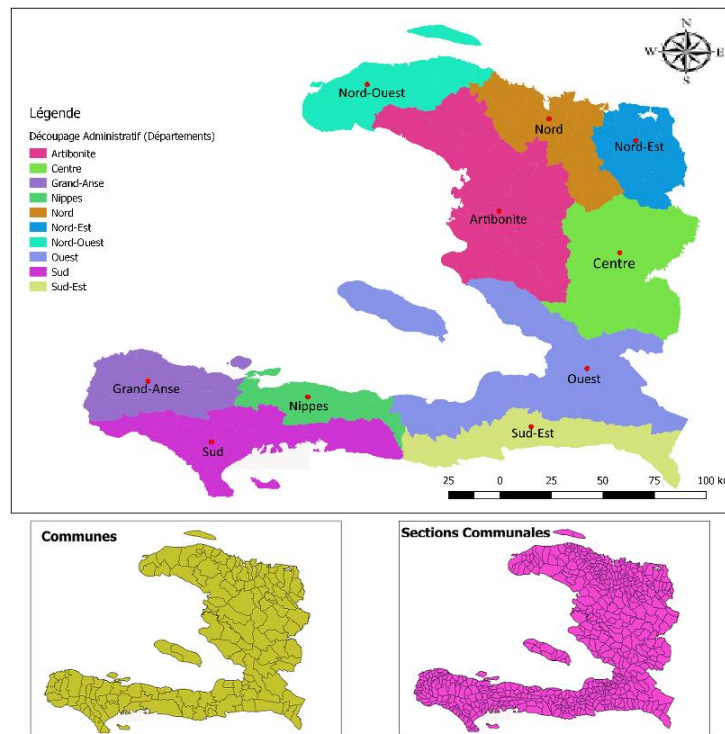


Figure 1-19- Découpage administratif

Selon l'Institut Haïtien de Statistique et d'informatique (IHSI), Haïti est répartie en 10 départements géographiques (Figure 1-19), 42 arrondissements, 140 communes, 64 quartiers et 570 sections communales.

La section communale est le plus bas niveau de la hiérarchie dans la disposition administrative du pays. Il existe néanmoins d'autres subdivisions à l'intérieur d'une section communale qui sont les habitations et les localités.

La zone concernée par l'étude est formée par la réunion de 4 sections communales dont deux dans la commune de Maniche en amont, Dory et Maniche, et deux dans la commune de Cavaillon en aval, Boileau et Martineau (Figure 1-20).

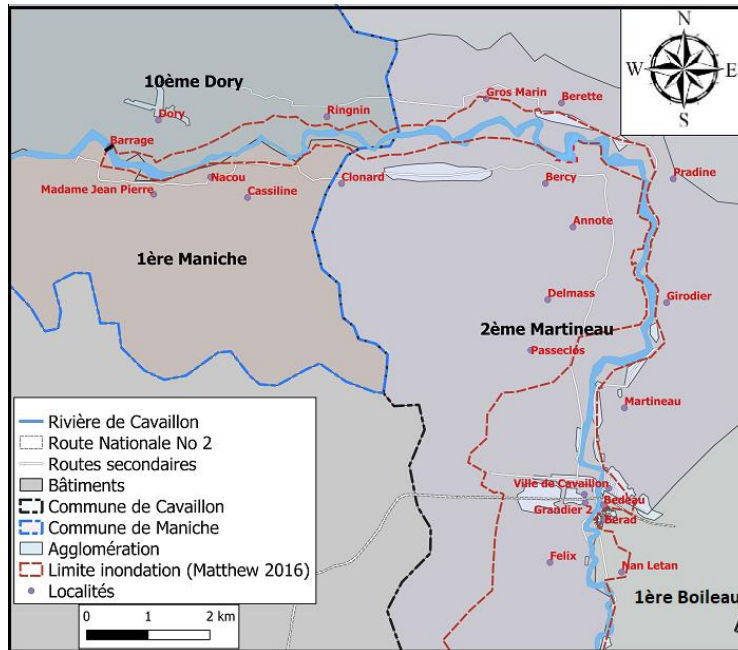


Figure 1-20- Communes et sections communales de la zone d'étude

Les sections communales, comme précisé précédemment, sont subdivisées en un ensemble de localités situées sur les rives droite et gauche de la rivière de Cavaillon. Les localités sont des petites agglomérations formées par l'union de plusieurs habitations qui sont elles-mêmes constituées de domaines familiaux. Ces domaines familiaux sont généralement composés de plusieurs familles différentes mais de la même lignée. Cette technique de domaine familial est une des solutions contre le morcellement des terres lors de la transmission des héritages fonciers. Les localités de Cavaillon sont reliées entre elles et à la route nationale # 2 au moyen de deux routes en terre battue situées de chaque côté de la rivière (Figure 1-20). Les maisons des riverains sont construites généralement à proximité des routes. Ces routes en terre battue sont difficilement carrossables en saison pluvieuse.

Dans la majorité des cas, les riverains aménagent à l'intérieur des localités, des espaces pour des activités communes. Citons en exemple les gaguères (là où on organise des combats de coqs), les petites places publiques où ils se réunissent après le travail pour jouer aux dominos, écouter de la musique, boire de la bière. Ce sont en d'autres termes des endroits de discussion et de défolement. En rive droite les localités sont traversées par un canal d'irrigation du réseau d'irrigation de Dory qui a été présenté un peu plus tôt dans le document.

Chapitre 2

Représentation sociale de l'inondation

Chapitre 2 Représentation sociale de l'inondation

2.1 Contexte et Objectif

L'inondation, comme tout autre risque naturel, est un phénomène assez compliqué et la recherche de solution n'en demeure pas moins. En général, les solutions adaptées pour lutter contre un phénomène naturel dévastateur n'ont pas un caractère définitif. Dans ces cas, on parle plutôt de moyen de prévention ou de gestion du phénomène. Selon l'approche technique, dans le cas du risque d'inondation, sa gestion passe par la connaissance et la compréhension des paramètres hydrologiques et hydrauliques caractérisant l'aléa ainsi que par d'autres paramètres environnementaux et sociétaux qui décrivent la vulnérabilité. Cette approche reflète bien la définition technique du risque qui est le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité. Une définition toutefois trop réductrice (Ledoux, 2006) car elle ne fait pas intervenir l'aspect social du risque. Avec cette approche purement technique du risque, les modes de gestion se simplifient en plusieurs méthodes de protection. D'abord, une méthode structurelle qui vise la construction de digues, de barrages et le reprofilage des rivières. Cette méthode agit directement sur l'aléa en donnant une fausse impression de sécurité. Cette fausse impression s'explique par la tendance des populations à s'installer dans les zones inondables après la construction d'un ouvrage de protection, une digue par exemple, en négligeant la probabilité que la capacité de l'ouvrage puisse être dépassée, ce qui peut causer encore plus de dégâts. C'est ce qui s'est passé après la rupture d'une digue à Hunan en Chine en 2016 (Image en annexe), une rupture de barrage dans la province d'Attapeu au Sud-Est du Laos en 2018 (Image en annexe). Ensuite une seconde méthode qui se traduit par des politiques d'aménagement qui visent à réduire la vulnérabilité. Enfin, une dernière méthode qui consiste en l'amélioration des systèmes de prévention et de renforcement des capacités à faire face en instaurant la culture du risque. Ces concepts, aussi bons qu'ils puissent paraître, sont pour la plupart les produits des recherches occidentales par des personnes qui sont elles-mêmes considérées comme des acteurs externes lorsqu'il s'agit des pays du Sud. Également, il est possible de remarquer un écart assez considérable entre la manière dont les scientifiques abordent un problème technique et la manière dont les populations qui sont censées être les bénéficiaires finaux reçoivent cela. En effet ces techniques ou concepts s'emboîtent assez difficilement avec les pratiques locales de lutte contre les aléas.

En ne s'arrêtant pas sur le simple croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité pour la définition du risque, il est possible de constater que le concept « *risque* » est difficile à

définir car il représente aussi une construction sociale où s'intriquent étroitement le naturel, le technique, le politique. Le risque est un concept délicat à cerner car il renvoie aux représentations et aux vécus de chacun (Ledoux, 2006). De façon plus globale, le risque peut être perçu comme le résultat de la conjonction d'un événement naturel et d'une situation particulière avec l'ensemble des perceptions, des attitudes, des structures et des normes édifiées par la communauté qui doit faire face à la menace considérée. Dans la pratique courante, la composante sociale est souvent négligée, car les méthodes d'analyses de la dimension humaine du risque sont moins opérationnelles que celles de l'hydrologie et de l'hydraulique. En d'autres termes, la composante humaine est nettement plus complexe à étudier. Ce que les individus d'une communauté ressentent à propos d'une perturbation ne peut être mesuré simplement à l'aune des hachures tracées sur la carte de la région qu'ils habitent.

Cette partie du travail, orientée entre autres vers les sciences humaines, essaie de poser les fondations d'un pont qui va relier la technique et le social. Plus particulièrement, elle cherche à comprendre les divers liens qui existent entre la population et la rivière, les diverses utilisations de celle-ci, le mode de partage de ce bien commun qu'est la rivière, car le modèle de partage d'une ressource peut reproduire l'image de la société en question (Ostrom, 2010). La compréhension de ce système de partage aidera à connaître les impacts sur la population des divers changements de la ressource en question. De cette compréhension, nous essayerons de dégager la logique de la cohabitation avec la rivière malgré les différentes contraintes car selon *De Vanssay* (2001), les individus qui se trouvent confrontés à des aléas, dans notre cas les inondations, doivent construire une représentation acceptable pour pouvoir continuer à vivre avec ce risque. Cette partie aura aussi pour objectif l'exploration des méthodes locales de lutte contre les inondations, la détermination du niveau de connaissance de la population par rapport à l'aléa cyclone qui est en grande partie la cause des inondations et aussi la connaissance sur l'aléa inondation. Enfin, cette partie essaie de comprendre la perception du risque par les individus dans une même communauté, mais aussi dans deux communautés différentes car selon *Ledoux (2006)* le risque n'est jamais perçu de la même manière ni dans le temps, ni dans l'espace et encore moins par l'ensemble des individus.

Cette quête vers la compréhension et la connaissance de divers aspects de la vie des communautés entre les localités de Dory et de Grand-Place (Figure 1-11) place en longeant la rivière de Cavaillon passe par des enquêtes de terrain et des entretiens avec la population qui seront présentés dans les paragraphes suivants.

2.2 Division de l'étude

La gestion du risque d'inondation par une communauté, l'utilisation de l'eau d'une rivière pour différents usages aussi bien que la gestion d'un réseau d'irrigation ont toutes

un dénominateur commun qui est «*la ressource eau* ». Toutes ces situations peuvent être considérées comme des facteurs de crise bien que les thématiques soient complètement différentes. Les crues et les inondations peuvent avoir un effet perturbateur sur les différentes utilisations par les riverains de la rivière comme ressource commune. La connaissance de ces différentes utilisations de la rivière aiderait peut-être à comprendre cet impact. Or, Il faut aussi essayer de comprendre le comportement, les ressentis de la population par rapport aux crues et aux inondations avant pendant et après l'évènement. Il est évident qu'il s'agit de deux thématiques complètement indépendantes qu'on ne saurait analyser en même temps. La première fait partie de la vie commune contrairement à la seconde qui se trouve à un point précis dans le temps. Ces différences les rendent difficile à étudier ensemble. Pour une analyse objective de ces deux composantes, qui sont d'ailleurs très complexes, il est donc nécessaire de les traiter de manière séparée ou plus précisément, chacune à leur manière, sous des angles différents.

Pour répondre aux objectifs cités précédemment, plusieurs variables ont été retenues au cours des enquêtes réalisées.

Sur la gestion de l'inondation :

1. Les caractéristiques du ou des enquêté(s) : Ces variables jouent un rôle important dans la compréhension des différentes façons de penser et de réfléchir de la population. Elle renseigne sur la durée du temps d'habitation dans une maison potentiellement inondable, l'âge de la personne, la profession exercée, le nombre d'inondations connues dans la région, le niveau d'éducation ;
2. La connaissance des personnes interrogées sur les phénomènes cyclones et inondation : Les cyclones ont été pris comme base dans cette étude car dans la majorité des cas, les crues et les inondations sont causées par les fortes pluies amenées par les cyclones. La catégorisation d'un cyclone peut donner en préalable une idée sur les dommages que celui-ci peut occasionner ;
3. Le comportement avant, pendant et après une inondation, les moyens de protection utilisés pendant ces trois temps ;
4. L'évacuation : cette partie prend surtout en compte les méthodes utilisées, les personnes ciblées, le déclencheur de l'évacuation.

Sur le partage de la ressource :

1. Différentes utilisations de la ressource, les sources et les types de conflits, la gestion des conflits ;
2. Impact sur la population lors de l'indisponibilité de la ressource.

Limitations

Généralement dans le contexte haïtien, après une catastrophe, l'Etat ou les organisations internationales réalisent des enquêtes de terrain pour dresser un bilan de la situation et aussi pour la distribution d'aide. Les résidents ont d'abord pensé qu'il s'agissait de ce type d'enquête. Après avoir défini les objectifs de l'enquête, certaines personnes ont montré un total désintérêt, d'autres ont choisi de ne pas participer.

2.3 Méthodologie

Dans le but de la production des données, l'approche méthodologique qui a été adoptée est divisée en plusieurs parties : des enquêtes exploratoires sur toute la zone d'étude adoptée, l'établissement d'une fiche d'enquête, la réalisation des enquêtes proprement dites.

Des enquêtes exploratoires

Généralement, les enquêtes exploratoires permettent à l'enquêteur de se familiariser avec le terrain, de connaître les diverses activités qui se font dans la zone d'étude, les différents acteurs et leur disponibilité. Elles permettent d'avoir une vue globale sur toute la zone d'étude, d'avoir une première impression sur les modes de vie et elles permettent de se fixer sur l'approche à adopter pour la collecte des données. Une première enquête exploratoire a été réalisée en août 2015 et ciblait principalement les ouvrages d'irrigation, les différentes utilisations des canaux d'irrigation. Cette première enquête a été réalisée dans un contexte de pénurie d'eau où le prélèvement d'eau dans la rivière par le barrage à Dory n'arrivait pas à desservir toute la zone potentiellement irrigable. Une deuxième enquête exploratoire a été réalisée de manière informelle en novembre 2016 après l'inondation causée par l'ouragan Matthew dans le but de constater les dégâts causés par l'ouragan et une autre enquête en avril 2017 après soit 6 mois après les inondations de Matthew. Ce dernier travail a permis de délimiter dans la zone d'étude la zone qui a été réellement inondée par les précipitations qui accompagnaient l'ouragan en utilisant un GPS Garmin (Figure 1-20). L'accompagnement de la population comme guide et les laisses de crues comme indicateurs ont été de grands atouts pour la réussite de cette activité.

L'élaboration de la fiche d'enquête

Dans une situation où les approches sont très différentes pour les deux thématiques sous étude à savoir la gestion des inondations, et partage du bien commun, les outils pour les aborder doivent aussi être différents. Dans ce sens, deux fiches d'enquêtes ont été élaborées pour la collecte des données de terrain. Une fiche pour collecter les informations relatives aux risques d'inondation, aux comportements des populations avant, pendant et après une inondation et au système de résilience. L'autre fiche concerne plutôt le partage des biens communs dans la zone d'étude à savoir la rivière de Cavaillon et le réseau d'irrigation de Dory. Ces fiches d'enquêtes sont élaborées avec les

données des différentes enquêtes exploratoires et sont adaptées à l'Outil d'Analyse de la Résilience Communautaire aux Désastres (ou ARC-D Toolkit). C'est un outil qui aide à mesurer le niveau de résilience aux désastres au niveau communautaire, à travers une enquête reposant sur une discussion (fiches d'enquête en annexe) de groupe et couvrant 30 composantes de la résilience aux désastres. Les différentes composantes de l'outil seront présentées ultérieurement.

La réalisation des enquêtes

La collecte des données sur l'inondation a été réalisée dans les différentes localités en se référant aux cartes préétablies sur la zone (Figure 1-20). Ces cartes qui délimitent les zones inondées, ont été élaborées six (6) mois après les inondations occasionnées par le passage de l'ouragan Matthew dans la région. Cet événement est considéré par toute la population comme étant le phénomène le plus dévastateur jamais connu. Les questions font beaucoup référence aux cyclones car en Haïti, ce sont les principales causes des inondations.

En ce qui concerne le partage des biens communs, la ressource commune est la rivière de Cavaillon. Cette collecte d'informations a été réalisée en deux phases. Une première phase a consisté à identifier les différentes utilisations de la ressource. Cette identification est faite dans les enquêtes exploratoires. La deuxième phase a consisté à la collecte des données relatives aux utilisations de la rivière. Dans les deux cas, la présence de la fiche d'enquête ne renvoie pas forcément à un simple questionnaire mais c'est plutôt une conversation, un dialogue interactif.

Une dernière enquête a été réalisée dans le but de collecter des données sur les différents enjeux présents dans la zone potentiellement inondable dans le but de calculer la vulnérabilité.

Catégorisation

Pour les besoins de l'enquête une catégorisation a été faite sur les résidents de la zone d'étude. Dans la collecte de données par rapport à la gestion des crues et des inondations, quatre catégories de personnes ont été considérées. Ainsi les entretiens ont été divisés en deux types regroupant quatre catégories appelées dans le cas de l'étude « *Unité de type 'x'* » (Tableau 2-1).

Les entretiens individuels ont été réalisés avec les autorités locales de la région qui ont exigé que cela soit fait ainsi. Ces sont les premiers sujets de l'enquête et constituent la première catégorie appelée « *unité de type 0* ». D'autres entretiens individuels ont aussi été réalisés avec des personnalités importantes de la région. Ces personnes peuvent être des personnes très âgées qui constituent, selon la population, la mémoire de la communauté, des anciens représentants politique, et d'autres personnes qui sont respectées grâce à leur niveau d'étude (médecin, ingénieur). Le respect de ces

personnalités exigeait, selon eux, que l'entretien devrait se faire en privé, c'est la quatrième catégorie (Unité de type 3).

Des entretiens en groupe directement dans les résidences des riverains et dans les points de rassemblement. Les entretiens réalisés directement dans les maisons sont appelés des *unités de type 1*. Dans cette unité toutes les personnes présentes au moment de l'entretien peuvent donner leur avis, leur réflexion, leur perception, leur analyse de la situation, c'est considéré comme un entretien de groupe. Les entretiens dans les points de rassemblement sont considérés comme des *unités de type 2*. Les entretiens de groupe ont tendance à être plus long mais les informations obtenues sont d'une grande valeur.

Tableau 2-1- Répartition des entretiens

Type d'entretien	Type d'unité	Personnes	Nombre de groupes	Nombre de personnes
Entretiens individuels	0	Autorités locales	-	20
	3	Personnalités importantes	-	17
Entretiens de Groupes	1	Maisons	271	1205
	2	Points de rassemblement	26	384
Total			297	1626

Dans les entretiens pour le mode de gestion de la ressource, les différentes utilisations de la rivière ont été clairement identifiées. Les entretiens ont été réalisés sur chaque type d'utilisation séparément.

2.4 Résultats

Les différents résultats concernant le risque d'inondation renseignent sur les connaissances des personnes par rapport aux aléas cyclone et inondation. Ils renseignent aussi sur la connaissance de l'inondabilité de la région par les riverains et les différentes méthodes de lutte développée aux cours des dernières années. Les résultats se présentent aussi sous forme de témoignages indiquant les ressentis, la perception des riverains par rapport à la menace.

Les résultats présentent les différentes utilisations du bien commun qui est la rivière de Cavaillon, en essayant de comprendre cet attachement à ce bien, le choix de la proximité à ce bien même dans les moments difficiles.

Les entretiens ont été réalisés avec 1626 personnes dans 24 localités des 4 sections communales qui bordent la rivière de Cavaillon principalement à l'intérieur des frontières de la zone d'étude (Figure 1-20).

Les 1626 personnes se répartissent en 1205 personnes pour 271 maisons ce qui fait en moyenne 4 personnes par maison, et 421 personnes pour 26 groupes et entretiens individuels. Cinq localités, Dory, Clonard, Reingnein et Cavaillon (Figure 1-20) représentent plus de 40% des entretiens. Cela est dû à la densité des agglomérations dans ces localités. Comme il fallait s'y attendre, l'unité de type 1 qui représente les entretiens directement réalisés dans les maisons avec les personnes présentes est surtout représentée par les femmes, les enfants et les personnes âgées. L'unité de type 2 qui est surtout les points de rassemblement pour les jeux et autres activités est principalement représentée par les hommes et sont minoritaire avec 14%. Les adultes entre 27 et 59 ans représentent 55% des entretiens et les jeunes 15%. Ces derniers interviennent très peu dans les conversations car dans ces sociétés il est toujours interdit aux jeunes d'intervenir dans la conversation des adultes malgré l'insistance de l'enquêteur à vouloir les intégrer. 60% des personnes enquêtées ont fréquenté l'école primaire dont la majorité se trouve dans les zones urbaines et périurbaines. 26 % qui sont généralement des personnes âgées ont affirmé qu'elles ne savent ni lire ni écrire mais savent quand comment compter, particulièrement l'argent. 61% des répondants déclarent qu'ils sont catholiques, certains avec un lien de près ou de loin avec le Vodou qui est la religion ancestrale. 20% affirment être protestant avec différentes dénominations (Baptiste, pentecôtiste, Eglise de Dieu) et il y a les adeptes du Vodou qui représentent les 19 % restants.

Dans les localités urbaines et périurbaines, Cavaillon et les zones avoisinantes, l'activité principale est le commerce mais 95% de personnes dans ces localités pratiquent quand même une activité agricole. Les localités Félix et Christine ont très peu de maisons et sont majoritairement représentées par des cultures, les autres localités présentent les deux types d'activités dans des proportions plus ou moins égales. 37% affirment être propriétaires et s'adonnent aux activités agricoles sur leur terre et sur d'autres terres (Loyer).

Contexte de la famille

Généralement les hommes, exception faite aux personnes âgées, restent peu à la maison. Ils sont déjà dans les champs très tôt le matin et quand le soleil atteint son zénith, il fait trop chaud pour rester dans les champs pour la plupart. Ils se réunissent alors autour des points de rassemblement qui peuvent être à l'ombre d'un grand arbre ou une boutique près des champs. Ces points de rencontre peuvent aussi représenter l'endroit où ils dégustent les plats apportés par leurs femmes ou leurs enfants. Les femmes sont communément présentes dans les maisons, exception faite des jours de marché. Leurs principales tâches sont : préparer très tôt le café, apprêter les enfants pour aller à l'école et ensuite préparer le dîner. Généralement, ce sont les femmes qui s'occupent de la comptabilité de la maison, tout ce qui a rapport aux achats et dépenses passe par les femmes et ce sont elles qui donnent généralement l'argent de poche aux hommes. On peut même dire que tu n'es pas vraiment un homme si tu commences à t'intéresser à la comptabilité, « *sa se bagay fanm* » répète souvent Alain 47 ans, riverain de Dory pour dire que « *c'est le truc des femmes* ». Le jour du marché, les hommes aident les femmes à transporter leurs produits au marché car généralement toutes les tâches ardues sont destinées aux hommes. Il est facile d'entendre les femmes répéter « *ou pa gason ou menm siw pa ka leve ti sa a* » pour dire que « *tu n'es pas un homme si tu n'arrives pas à soulever un poids quelconque* ».

Les familles sont généralement formées des parents, des enfants et dans certains cas de grands parents qui ne peuvent pas rester seuls dans leurs maisons à eux. Le nombre d'enfants est de quatre (4) en moyenne et les tâches de l'ainé(e) sont souvent compliquées par rapport aux autres. L'ainé(e) dès son plus jeune âge (10-12 ans) doit s'approprier des tâches des deux parents, travailler au champ, faire les tâches ménagères et la comptabilité de la maison. Ce principe s'établit dans le but de pouvoir les remplacer en cas de soucis. Si la mère est au marché, dès sa rentrée de l'école, il/elle doit préparer la nourriture pour apporter au père dans les champs et à la mère au marché. De même si le père est malade il ou elle doit être capable de s'occuper des champs. Enfin, il/elle est aussi responsable des autres enfants de la famille.

2.4.1 L'inondation

Les données recueillies, par rapport à l'aléa inondation, sont dans la majorité des cas dirigées vers l'ouragan Matthew en 2016. Involontairement, les personnes enquêtées se réfèrent à cet événement car il est considéré par beaucoup comme l'événement le plus dévastateur jamais connu. Cela peut être considéré comme une bonne et une mauvaise chose en même temps : Une bonne chose car les questions relatives à l'outil ARC-D Toolkit pour le calcul de la résilience ne prend en compte qu'un seul événement, une mauvaise chose car il devient difficile d'aller un peu plus loin dans l'histoire afin de recenser d'autres événements similaires. Cet aspect négatif est redressé par les

personnes âgées qui ont surtout une bonne mémoire des expériences passées avec les cyclones et les inondations.

Connaissances sur les aléas cyclone et inondation

150 personnes sur les 1626 personnes enquêtées connaissent les catégories de cyclones et les dégâts que chaque catégorie peut causer. Des 150 habitants, les zones urbaines et périurbaines représentent 69%. Cette réalité traduit selon Marjorie Pierre 28 ans, éducatrice et formatrice, d'une part la faiblesse de l'Etat à mettre en place des programmes réguliers visant à informer et à former la population, d'autre part, la négligence de la population à participer dans ces dites formations quand elles sont organisées. C'est la principale cause, toujours selon Marjorie, de la quantité de dégâts causés par les intempéries car les gens ne savent pas réellement à quoi s'attendre quand il s'agit d'une onde tropicale ou d'un ouragan comme Matthew. Dans cette région il n'y a pas vraiment de catégorisation des intempéries le terme « *mauvais temps* » est utilisé dans tous les cas.

Contrairement aux intempéries, les crues et les inondations sont facilement identifiées et connues par tout le monde dans la région et sont généralement liées par les riverains avec les mauvais temps (cyclones). Jacques Adrien, 45 ans, cultivateurs : « *Depi w tanden gen "move tan" dlo a toujou desann e anvayi jandenn* ». Pour dire que : « *les intempéries sont toujours accompagnées de crues et d'inondation et l'eau envahit toujours nos champs* ».

Connaissance par rapport à l'inondabilité de la zone habitée

Sur les 271 maisons enquêtées, 36% se trouvent à l'intérieur de la zone inondée par les précipitations amenées par l'ouragan Matthew. Ces maisons se trouvent majoritairement dans la ville de Cavaillon et dans les localités avoisinantes (Figure 2-1). Tous les bâtiments de ces localités ont été interviewés. Une grande partie des résidents de la localité de *Grandier_1* reconnaît que la localité est potentiellement inondable. Selon eux, l'inondabilité de la région est due au fait qu'elle soit topographiquement plus basse que la route nationale no2. Généralement lors des grandes crues, de l'eau et beaucoup de sédiments très grossiers, des troncs d'arbres, créent des embâcles dans les canaux de drainage (Figure 2-1) qui servent à évacuer l'excès d'eau et l'inondation se produit.

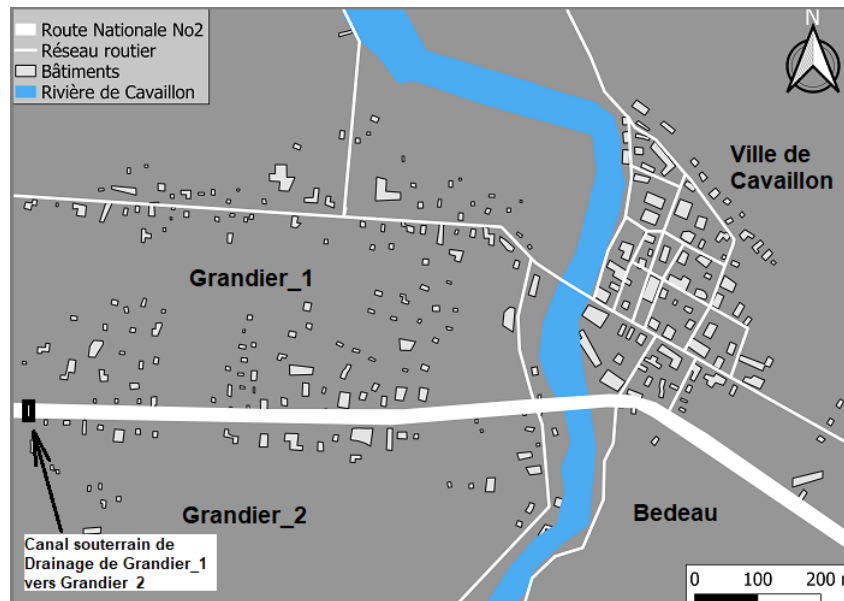


Figure 2-1- Ville de Cavaillon et les localités avoisinantes

Les résidents de la localité de *Grandier_2* sont des anciens résidents de *Grandier_1* qui fuyaient l'inondation. Ils ont déclaré avoir connu un bon moment de répit avant l'épisode de l'ouragan Matthew car la région a connu une longue période de sécheresse (4 ans). En effet lors de l'ouragan, ce qui ne s'était jamais passé auparavant, selon les résidents de *Grandier-2* : les eaux ont traversé la route nationale et ont inondé la localité de *Grandier-2* qui se trouve juste en face (Figure 2-1).

Dans la ville de Cavaillon, en rive gauche de la rivière, les résidents ont admis être bien conscients de l'inondabilité de la région mais selon eux, la véritable cause des inondations de la ville et ses environs est la ravine Bouillette qui se trouve à proximité de celle-ci.

Les résidents de la localité de Dory ne se trouvent pas dans la limite d'inondation tracée après l'épisode de l'ouragan Matthew. Ils pensent aussi qu'ils ne se trouvent pas en zone potentiellement inondable. Leur grand souci est qu'en période d'intempérie, ils se trouvent enclavés par la rivière de Cavaillon, par la ravine Blanche et par une chaîne de montagne. Ce qui peut considérablement limiter leurs déplacements en cas d'urgence.

Inondabilité des sols cultivés

Généralement les pratiques culturales se font en bordure de rivière, comme c'est le cas pour certaines localités comme Dory, Rousseau (Figure 1-11). Dans ces cas, la rivière

sert de drain naturel pour les sols qui sont irrigués. Dans certaines localités, le niveau des sols est nettement plus haut placé que le fond de la rivière (environ 5 à 10 mètres de différence), ce qui rend ces localités hors d'atteinte par les inondations. Comme le dit Mathias, 43 ans, cultivateur : « *kilti nou pa inonde bo isit menm si gen gran tan, mimajinem si nou ta inonde bo isit seke anba pa gen lavi anko* » pour dire que « *Nos cultures ne sont pas inondées même dans les grands épisodes de pluie ou de cyclone, j'imagine que si on est inondé ici en amont cela voudrait dire que qu'il ne reste plus personne dans les localités plus en aval* ».

Les pratiques culturelles de *Grandier-1* (Figure 2-3) sont un peu différentes des autres localités. C'est l'une des rares localités à cultiver des céréales particulièrement le riz. C'est une vaste plaine marécageuse où les cultivateurs apprécient quand il y a des inondations de temps en temps : ça leur évite de pouvoir irriguer tout le temps. Ils se plaignent quand même des grandes crues qui apportent non seulement des eaux mais une quantité importante de sédiments qui peuvent recouvrir totalement leurs cultures.

Comportement avant, pendant et après un cyclone ou une inondation

La gestion du risque cyclonique repose en grande partie sur la surveillance météorologique et sur une mise en alerte progressive de la population exposée. Un autre élément important est la conduite à tenir avant, pendant et après le passage du cyclone. Ces dispositions peuvent permettre de faire chuter considérablement le nombre de victimes et l'ampleur des dégâts à déplorer (Aubriot, 2004).

Avant le cyclone

Généralement, avant un cyclone qui peut causer ou pas des inondations, la meilleure façon de se protéger est de s'y préparer, de prendre des précautions toutes simples qui peuvent éviter des pertes en vie humaine et des dégâts matériels. La population doit pour cela avoir accès aux informations qui lui permettront de faire face à l'aléa. Malheureusement, dans les provinces d'Haïti, il est souvent difficile de toucher toute la population car les outils médiatiques nécessaires pour acheminer les informations comme la radio ou la télévision n'existent pas partout. Par ailleurs, toute la population n'a pas accès à l'électricité. Pour pallier ce manque, les collectivités territoriales font appels à des agents de protection civile qui, sur une motocyclette ou à pied, vont dans les endroits les plus éloignés pour véhiculer l'information.

Selon Porfiné Adlin, 32 ans : « *Yo toujou anonse nou lè ap gen move tan meri konn pran anpil dispozisyon pou fè mesaj la pase pou nou ka sansibilize moun pa rapo ak menas la* ». « *Un cyclone est toujours annoncé avant sa venue, des dispositions sont prises par la mairie de mettre en place toute une série d'activités visant à sensibiliser les gens par rapport à la menace* ».

Les personnes responsables des annonces avec un microphone sur une motocyclette ou à pied sont des agents de protection civile et *Porfiné* en est un. Etant aussi responsable d'une organisation qui vient en aide aux enfants démunis, il essaie aussi dans la mesure du possible de les former par rapport à n'importe quels aléas.

D'autres moyens sont aussi utilisés pour faire passer l'information, Emile Madeline 27 ans, « *Konpayi telefon yo toujou avèti nou lè pral gen move tan pou nou pran anpil prekosyon men sa se pou moun ki gen selilè menm si alèkile li ra pouw pa jwenn yon moun gon bout potab nan menl epi nou gen radio vega ki nan klona ki toujou aveti nou.* » « *Les compagnies de téléphonie mobile nous avertissent toujours et nous invitent à prendre des précautions, ceci est valable pour les personnes qui ont un téléphone portable mais je crois qu'en ces jours il est rare de ne pas trouver de téléphone dans une maison, et on a aussi l'information à la radio. Etant assez éloigné on ne reçoit pas beaucoup de station de radio mais les stations de radio diffusent l'information. Il y a même un poste de radio à Clonard qui s'appelle Radio Vegard de Clonard* »

La population de la zone d'étude ayant l'habitude des cyclones et des inondations sait déjà comment se protéger contre l'aléa. Dans un groupe de 15 personnes environ, on a essayé de voir quelles sont les recommandations qui sont divulguées avant la venue d'un cyclone. Et les réponses sont présentées en dessous :

1.- Consolider la maison au niveau des issues (portes et fenêtres), consolider la toiture; 2.- Enlever tout autour de la maison des objets qui peuvent être emportés par le vent ou par l'eau d'inondation; 3.- Elaguer les arbres proches de la maison; 4.- Prévoir un poste de radio portatif à pile avec réserve en piles; 5.- Se déplacer au cas où on habite trop près de la rivière; 6.- Couper obligatoirement les branches d'arbre qui sont trop près du toit de la maison; 7.- Ne pas laissez d'animaux en pâture près de la rivière; 8.- Protéger les documents importants comme actes de naissance, actes de mariage, document d'identité, titre de propriété, de mettre tous ses documents dans un endroit sûr; 9.- Ne pas traverser la rivière pendant toute la période cyclonique ou quand elle est en crue; 10.- Constituez et stockez des réserves alimentaires; 11.- Aller dans les abris provisoires au cas où la maison serait inondée; 12.- Prévoir des moyens d'éclairages de secours (lampes électriques, bougies); 13.- Ne pas laisser les enfants sans surveillance ; 14.- Disposez d'une trousse de premier secours.

Comme il est possible de le constater, la population a toutes les informations concernant une intempérie pour agir en conséquence.

Vilarsa Popot, 52 ans, affirme qu'elle connaît déjà toutes les mesures mais se demande comment se préparer quand on ne sait pas vraiment contre quoi se préparer. On nous parle d'un cyclone de catégorie 5, on ne sait même pas de quoi il s'agit.

Darline Cadet, 25 ans : « *Yo ka menm di kategori 100 m pap konn sal ye paske m pa konn de kisa yap pale a kounya si yo pran yon ti tan eksplike nou chak nivo move tan epi yo di nou men kisa dega li ka fè nap rive konnen kijan poun pwoteje tèt nou bon menm ajan pwoteksyon sivil yo pa konn de kisa wap pale a* ». Pour dire : « *On peut même me dire de catégorie 100 je ne saurai pas de quoi on parle, je ne connais pas les catégories de cyclone. On doit nous expliquer d'abord les catégories des cyclones les dégâts qu'ils peuvent occasionner ainsi on arrivera à bien se protéger par rapport à la menace. Je pense que même les agents de protection civile ne connaissent pas les catégories de cyclones.* »

En cas d'inondation, les autorités locales demandent à la population de quitter les maisons susceptibles d'être inondées, d'aller se réfugier dans les abris provisoires. Ces abris provisoires sont en général des écoles, des églises, ou tout autre bâtiment ayant la capacité d'accueillir des personnes pendant les intempéries. Cependant, ces bâtiments se situent généralement dans les zones potentiellement inondables.

Jacques Adrien : « *Bon pi gwo pwoblèm nan se lè yo di nou ale nan abri pwovizwa moun yo genlè pa menm konn sa yap di yo di nou si dlo a monte al nan legliz sa a, abri a inonde lakay mwen pat gen twop dega* ». Pour dire : « *Un autre problème, c'est qu'on nous conseille d'aller dans un abri provisoire tout près, cet abri est une église, mais au moment de la catastrophe l'église a été complètement inondée tandis que chez moi il n'y avait pas beaucoup de problème. C'est le vent qui a emporté quelques tôles avec lui à son passage mais il n'y a pas eu d'inondation contrairement à l'abri, je peux dire même que ces gens ne savent pas vraiment ce qu'ils disent* ».

Jean Louis Villard 69 ans : « *Monchè, agro mwen viv yon paket siklòn pa bo isit tankou Sandy, Nikol, Inès, men bagay sa, bagay Matthew sa se premye fwa m wèl epi abri yo pa bon non agro. Premyèman se yo ki inonde anvan epi yo pa gen ankenn bagay premye nesese ladan yo m panse se la leta dwe komanse travay* ». Pour dire : « *Moi, j'ai vécu beaucoup de cyclones dans la région, comme Sandy, Nicole, Inès mais Matthew a été le plus dévastateur et je commence à comprendre que la catégorie 5 est très dangereuse. Avec l'expérience, je sais maintenant que les abris qu'on nous conseille ne sont pas vraiment des abris pour plusieurs raisons : souvent ils sont inondés, il n'y a pas de matériels de soins pour les personnes dans le besoin, il n'y a pas de réserve de nourriture même pour les enfants pour ne citer que ceux-là. Je pense aussi que les agents de protection civile ne savent pas vraiment les endroits qui seront inondés et les endroits qui ne le seront pas, l'Etat doit agir plus dans ce sens-là* ».

Pendant le cyclone

Généralement pendant un cyclone, il est toujours conseillé par les autorités locales et les agents de protection civile de rester chez soi et de toujours se renseigner sur l'évolution du cyclone. A Cavaillon, les gens suivent les consignes et restent chez eux. Il

n'y a pas de moyens de communication, les antennes relais des téléphones portables sont généralement endommagés ou ne peuvent pas transmettre en temps cyclonique. Certaines personnes qui habitent non loin des berges, évacuent seulement quand leurs maisons sont sur le point d'être inondées malgré les recommandations. D'autres, au contraire, décident de rester chez eux peu importe les circonstances, ils gardent leur confiance en Dieu et restent sous la protection divine.

Ketlene Bedard : « Kote pam agro, mabitye ak move tan m konn tout sa poum fè lè se bagay sa men m pat panse bagay sa tap konsa. Nan lot move tan yo agro ou jis we rivyè a fon ti deplase li anvayi kek kote men la ou pa ta di dlo a nève, move tan nikol pat fè tout dega sa yo. Mwen m ret lakay mwen malgre m we dlo komanse monte nan je pye m apre yon ti tan m we yon vwazen vin jwenn mwen ak tout fanmil paske kay li inonde, o o apre sa se nou menm ki oblije al kay yon lot vwazen paske kay la te fin anvayi men depasman an te difisil paske gen gwo van ou pa we vreman kote pouw ale epi ou pè pou pyebwa pa tonbe sou ou ».

« Pour ma part, j'avais déjà vécu des cyclones dans la région, généralement on fait tout ce qu'on nous conseille puis au moment venu, on reste dans la maison à attendre car on ne peut pas faire autrement mais je ne savais pas que ça allait être ainsi. Dans les grands événements antérieurs, la rivière avait l'habitude de laisser son lit, comme avec le cyclone Nicole, mais ne causait pas autant de dégâts. On dirait que la rivière était en colère cette fois. Je suis resté un peu dans la maison et j'ai vu que l'eau commençait à m'arriver à la cheville et après quelque instant, un voisin est venu chez moi avec toute sa famille parce que leur maison était déjà inondée. Après quelques minutes, on a dû laisser ma maison pour aller chez un autre voisin. Avec le vent, les branches on ne savait pas aller très loin de peur qu'un arbre ne nous tombe dessus ou quelque chose d'autre nous arrive ».

Il est aussi possible de constater que certaines personnes, malgré le danger, ne veulent pas abandonner leur maison. La personne peut avoir un grand sentiment d'appartenance à la maison, qui est l'héritage de la famille depuis des générations, ce qui les empêche de partir. Dans ce cas les personnes développent un certain sentiment à protéger la maison contre la menace que d'essayer de se sauver elle-même.

Un autre point assez intéressant est qu'un cyclone est un système évolutif dans le temps, il peut soit augmenter soit diminuer sa force. Dans la majorité de cas antérieurs, par chance, les cyclones n'atteignent pas les régions avec l'ampleur qu'on avait prédite. Ce qui a créé un comportement sceptique au sein de la population qui s'explique par la tendance à ne plus croire à l'avenir. C'est pour cette raison que la population doit rester attentive aux prévisions.

Selon Asile Jean 65 ans : *« Moun yo pa gen tandè zorèy non leta entèdi tout sikilasyon m te wè plen machin sou wout la wi agro e dlo a pa manke ale ak yo non mwen m tandè moun kap rele men podyab agwo m pa ka fè anyen yo toujou di se politik kap fèt »*

« L'état avait interdit toute circulation mais personne n'écoute, certaines personnes racontent même que c'est une affaire de la politique, sur la route nationale l'eau a emporté des voitures et j'ai même entendu des gens crier mais je ne pouvais rien faire ».

Après le cyclone

Après un cyclone ou une inondation, il y a une prise de conscience collective, des sentiments d'impuissance, de découragement, de colère. A Cavaillon les gens ont l'habitude des cyclones et des inondations. Certaines fois, c'est une profonde tristesse par rapport à la mort d'une personne, une maison détruite, d'autre fois c'est une grande joie de retrouver ceux qui ont survécu. Les gens apportent leur aide à ceux qui en ont besoin. Ils construisent des maisons provisoires, des tentes en attendant qu'ils trouvent d'autres moyens ou l'aide de l'Etat.

Adrien Valnor, 35 ans cultivateur « *Nou tou viv menm bagay la agwo apre sa nou jis ap konsatate dega yo, nou ede youn lot, epi sak kapab komanse fè ti kay pwovizwa an atandan nou rekonstwi se BonDye kap ede nou swa pase pa yon moun oubyen l pase pa gouveman an* »

« On a tous vécu la même chose, après on se serre les coudes, on essaie de trouver nos amis nos familles qui sont un peu loin. On cherche les moyens pour se relever et Dieu nous vient toujours en aide soit par une autre personne soit par les autorités gouvernementales ».

L'évacuation

L'évacuation se fait généralement en deux temps, dans un premier temps les personnes qui habitent tout près des rivières laissent leurs habitations quelques heures avant les premières pluies. Dans ces cas-là, il est possible d'emporter tous les éléments nécessaires, les documents jugés importants. Dans le cas de Cavaillon à cause de la tendance sceptique de la majorité de la population par rapport à l'annonce d'un cyclone, seulement certaines personnes ont laissé leur domicile avant l'inondation, et la plupart ont dû quitter dans l'urgence.

Martina Jean Claude 43 ans, « *Sa fè 4 lane yap di nou ap gen move tan men nou pa janm wè anyen ti kal lapli tou piti epi nou sot fè dezan san anyen nou panse nou bon donk nou vin pa pè move tan men nou pat janm panse ke fwa sa a sa tap konsa.* »

« Ça fait déjà 4 ans qu'on annonce des cyclones mais généralement on ne voit qu'une petite pluie pendant deux ou trois jours. On pensait que ça n'allait pas être différent mais cette fois c'était une catastrophe. »

Dans un second temps, les personnes évacuent après un signal d'alarme dans la région ou quand elles remarquent que la maison va subir le choc de l'inondation. Dans la ville de Cavaillon, il y a un système d'alerte de crue et d'inondation mais celui-ci ne fonctionne plus à cause de la disparition des panneaux solaires qui l'alimentent. Les

personnes n'évacuent que quand elles se sentent en danger et certaines fois il est déjà trop tard.

Pour la zone d'étude il n'y a pas de méthode prédéfinie pour évacuer. Les personnes évacuent elles-mêmes les zones qui sont susceptibles d'être inondées. Les personnes qui ont besoin d'assistance comme les personnes âgées ou qui ont un handicap se font aider par tout le monde et aussi par les agents de protection civile quand ils sont présents.

Moyen de lutte contre les inondations

Après avoir vécu avec les cyclones et les inondations, les populations développent elles-mêmes des méthodes, des moyens de lutte contre ces aléas. Ces moyens peuvent être juste pour se protéger d'un événement ponctuel ou de se protéger contre tous les événements similaires à venir. Certains résidents, qui ont subi ou pas des traumatismes à cause de l'inondation, ont opté pour construire ou reconstruire dans les montagnes pour se protéger contre les inondations, mais selon eux ce qui a un avantage est toujours accompagné de son inconvénient. Construire dans les montagnes peut davantage exposer sa maison aux vents qui accompagnent les cyclones. Les toitures qui ne sont généralement pas solides s'envolent dès que le vent comment à souffler un peu plus fort. Un autre inconvénient, c'est que cela vous enlève votre proximité avec l'eau. La rivière est considérée comme la source d'eau la plus sûre. En période de sécheresse, c'est le seul endroit où il y a toujours de l'eau.



Figure 2-2- Construction particulière pour lutter contre l'inondation

D'autres personnes ont par contre préféré rester dans les zones potentiellement inondables moyennant quelques changements dans leurs constructions (Figure 2-2). Avec le temps, les maisons majoritairement en tuf se sont transformées en maisons en blocs. Le tuf est un mélange de bois et terre qui résiste moins aux crues et aux inondations. Particulièrement dans ces zones, les maisons ont des fondations surélevées. D'autres ont aussi amélioré leur toiture en passant des toitures en tôle vers des toitures en béton armé. La proximité avec la rivière est toujours la cause principale des riverains

de vouloir rester dans les zones inondables. La logique est qu'il considère la rivière dangereuse une ou deux fois par an mais le reste du temps elle est bénéfique.

Antoine Michelet, 43 ans : « *Agwo, lèm fon analiz m toujou benyen nan rivyè a, madanm mwen moun lakay mwen toujou vin lave nan rivyè a, lè nou bezwen pran lèz ko nou se la nou vini, e lè gen rate dlo rivyè a pa janm manke dlo pou tout rezon sa moblije rete la malgre m konnen kay la ka inonde men inonde sa tou se de ou twa fwa chak ane se pa chak jou nou inonde donk nou fè chwa rete pito* »

« J'ai essayé d'analyser la situation, généralement je me baigne dans la rivière, mon épouse fait sa lessive dans la rivière, en période sèche où il n'y a pas d'eau dans les pompes, il y a toujours de l'eau dans la rivière, j'ai choisi de rester ici connaissant les risques, mais ce risque aussi n'est prévu que deux ou trois fois par an et certaines fois il n'y a rien, je me suis dit que c'était mieux de rester ici »

Des résidents utilisent d'autres moyens de protection juste avant le cyclone en construisant des murs de pierre autour de la maison. Certaines personnes utilisent d'autres procédés pour se protéger des inondations au moment même de l'inondation.

Julien Resinor 37 ans : « *Agro lèm wè dlo a anvayim m te ak tout fanmim, premye idem se te al kache nan galata a men m fè tèt mwen travay m di si m bay dlo a chimenl, li pap monte nè nè donk m pete yon trou nan mi kay la m bay dlo a ale epi dlo koule lale epi nou rete atè* »

« J'étais en train de constater l'inondation de ma maison pendant que j'étais encore à l'intérieur avec ma famille et il n'y avait pas beaucoup d'options à envisager, j'ai d'abord voulu m'installer dans le grenier ensuite je me suis mis à réfléchir très vite et je me suis dit que si je laissais l'eau s'écouler peut-être le niveau ne va plus monter. Ainsi j'ai fait un trou dans le mur pour donner accès à l'écoulement et comme ça on a pu rester au plancher »

Généralement les cyclones et les inondations emportent une partie des terres arables, ou apportent d'autres couches qui ne sont pas assez fertiles. Pour lutter contre ce phénomène, certaines personnes plantent du bambou sur les rives. D'après eux le bambou grandit rapidement et empêche l'eau des inondations d'envahir leur terre.

2.4.2 Utilisation de l'eau de la rivière

La rivière de Cavaillon, quand elle n'envahit pas les maisons, est considérée comme un élément incontournable et bénéfique par les différentes communautés qu'elle traverse. Elle peut être prise pour un espace de jeu pour les enfants, un espace de rencontre pour les adolescents et les adultes. C'est un lieu où plusieurs générations peuvent se rencontrer et s'entendre facilement, en passant par l'enfant de 8 ans qui vient prendre son bain et l'adulte de 49 ans qui vient étancher la soif de son bétail. Parmi ces

différentes utilisations on peut citer : l'irrigation, la lessive, le bain, eau de boisson dans certaines localités pour les résidents et aussi pour les animaux.

Utilisation de l'eau de la rivière pour la lessive, le bain, la cuisine et la boisson

En général, toutes les localités situées à proximité de la rivière utilisent son eau pour la lessive (Figure 2-3). En ce sens la rivière peut être vu comme un lieu de rencontre de plusieurs voisins, un lieu de débat de tout ce qui se passe dans une localité. Certaines localités, qui ont des caractéristiques urbaines et périurbaines, utilisent très peu l'eau de la rivière dans les ménages ou comme eau de boisson car il y a des pompes qui permettent d'avoir une eau de meilleure qualité, que celle de la rivière.



Figure 2-3- Utilisation de l'eau de la rivière pour la lessive

Certaines localités, comme Reingnein, Madanm-Jean-Pierre (Figure 2-3), utilisent exclusivement l'eau de la rivière pour toutes les activités. Dans d'autres localités qui sont traversées par les canaux d'irrigation, les résidents utilisent directement l'eau des canaux. Dans des localités comme Martineau et Girodier, les résidents utilisent directement l'eau de différentes sources qui sont captées pour leurs ménages et comme eau de boisson.

En résumé, dans la zone d'étude, la majorité des gens utilise l'eau de la rivière pour faire la lessive. Certains vont directement à la rivière tandis que ceux qui se trouvent à proximité du canal d'irrigation, utilisent de préférence l'eau dans le canal qui provient aussi de la rivière. Les autres personnes utilisent l'eau des pompes pour faire la lessive. Dans cette dernière catégorie on retrouve les personnes âgées et les personnes qui ont une activité économique à la maison (un petit commerce par exemple), donc n'ont pas assez de temps pour aller à la rivière.

La rivière est aussi considérée comme un lieu de rencontre, de divertissement et d'épanouissement. En faisant la lessive, les personnes, en particulier, les femmes discutent entre elles. Tout comme pour la lessive, les gens utilisent l'eau de la rivière soit directement dans le lit de la rivière soit dans le canal d'irrigation pour se baigner. Le choix est fonction de la distance à parcourir pour arriver à la rivière ou au canal d'irrigation. Après la lessive, les femmes, avant de rentrer prennent leur bain dans la rivière. Elle est aussi utilisée pour le lavage des automobiles, des motos et pour l'abreuvement des animaux.

Utilisation de l'eau de la rivière pour l'irrigation

Parmi toutes les autres utilisations, l'irrigation prend la plus grosse part et peut être exclusive dans certaines localités en période sèche, comme par exemple à Dory, au niveau de la prise, en saison sèche, toute l'eau de la rivière est redirigée dans le canal d'irrigation.

Le réseau est formé d'un barrage où est aménagé une prise d'eau (Figure 2-5), d'un long canal primaire, des canaux secondaires et tertiaires (Figure 2-4). Le canal primaire fait environ 20 kilomètres de la prise jusqu'au dernier secondaire situé dans la localité de Christine. On peut y distinguer deux grandes parties : la partie en amont de la route nationale no2 jusqu'à la ville de Cavaillon est complètement en maçonnerie, et la partie en aval de Félix à Christine qui n'est revêtue que sur 500 mètres. Le long canal primaire traverse les différentes localités de la zone d'étude et il se présente soit sous la forme trapézoïdale ou sous la forme rectangulaire quand il est traversé par une route. Cette forme rectangulaire est plus adaptée pour la construction des dalots.

Le canal primaire se déverse dans 24 canaux secondaires et dans 6 autres canaux considérés par la population comme de simples prises car ceux-ci n'irriguent qu'une petite portion de terre. De manière théorique, ce sont aussi des canaux secondaires. Les canaux secondaires parcourent généralement une petite distance pour déboucher dans deux ou trois canaux tertiaires.

Ces canaux sont généralement en mauvais état, les vannes ne fonctionnent plus, restent généralement ouvertes et sans contrôle. Généralement, un canal secondaire se termine par deux canaux tertiaires mais exceptionnellement, il est possible de trouver 3 canaux tertiaires.

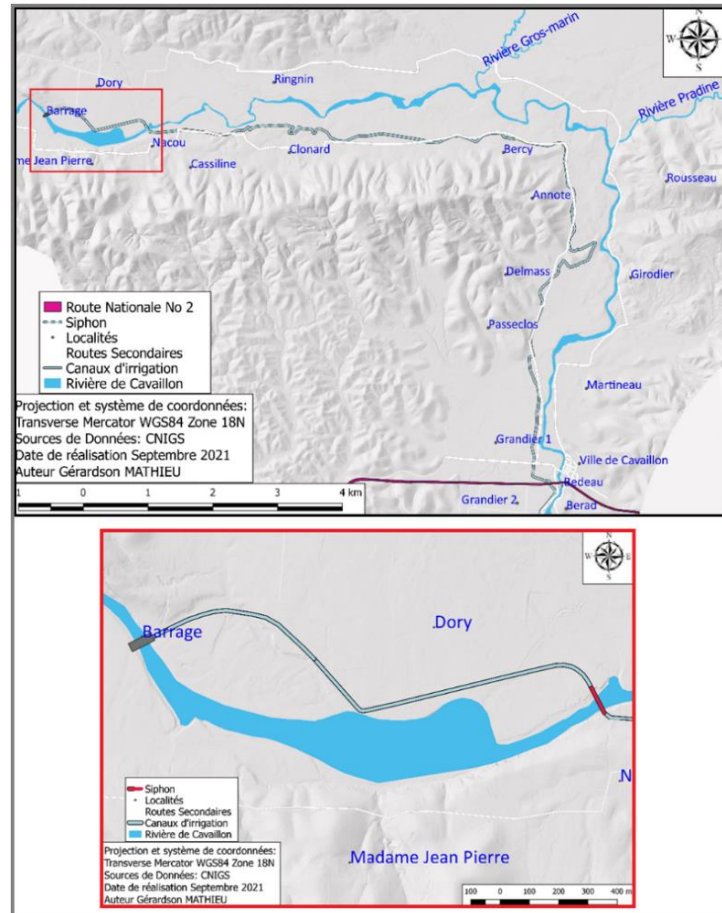


Figure 2-4 - Présentation du réseau d'irrigation de Dory



Figure 2-5 Barrage à Dory (Carlier, 2018)

Il y a une seule route en terre battue qui va directement vers la prise en traversant la rivière Cavaillon; les autres pistes ne sont pas carrossables.

Système de Gestion

Le réseau d'irrigation est géré par un comité central et des comités des canaux secondaires. Le comité central est normalement formé de 11 personnes (un président, deux secrétaires, trois conseillers, un trésorier, trois responsables de surveillance et un vannier). Malheureusement au moment de l'enquête ce comité ne comptait que 10 personnes à cause de la mort du vannier.

Les différents membres du comité central doivent appartenir à un comité de canal secondaire. Les comités des canaux secondaires sont formés de trois personnes (Président, secrétaire, trésorier). Le comité central tout comme les comités des canaux sont élus pour trois ans. Le comité central gère les grands travaux qui se font sur le réseau par les différentes Organisations Non-gouvernementales (ONG) ou par l'Etat. Ces travaux peuvent être des travaux de curages ou de réhabilitation de tronçons endommagés. Ce comité central joue aussi le rôle de juge dans les différents conflits qui ont trait à l'utilisation du réseau d'irrigation.

Les comités des canaux secondaires effectuent des travaux locaux dans leurs canaux secondaires. Ils identifient tous les usagers, relèvent les différents problèmes des canaux secondaires, gèrent les conflits locaux, procède à la distribution des semences.

Il peut exister différents types de conflits, sur le réseau : des conflits à l'intérieur même de l'organisme de Gestion du périmètre et des conflits sur le partage de l'eau sur le périmètre.

Les conflits à l'intérieur du comité de gestion

1. L'enquête a été réalisée au moment où il y avait une crise au sein de la structure de gestion du périmètre. En effet, le mandat du comité central en place était arrivé à terme. On aurait dû en toute transparence organiser des élections pour renouveler ou reconduire la structure en place. Durant toute la période de l'enquête, ces élections n'ont pas eu lieu du fait que, selon les dires de certains membres du comité, le président du comité central aurait utilisé les matériels à ses fins personnelles et il était incapable de présenter un rapport aux autres membres du comité et à l'assemblée générale avant la tenue des élections.

2. Aujourd'hui, on constate que dans la majorité des cas en Haïti, les structures de gestion existent mais elles ne sont pas opérationnelles. Dans certains cas, ces structures autonomes sont en conflit permanent avec les autorités publiques locales. A titre d'exemple, on peut citer les grands problèmes qui existent entre la structure de gestion du périmètre de Dory et les élus locaux. Ces derniers veulent imposer des horaires de

distribution et des modes de fonctionnement au comité de gestion de manière à irriguer en priorité leurs parcelles.

Pierre Nesly (secrétaire de canal secondaire 5) : « Nous avons l'habitude de nous organiser pour curer le canal, même quand on ne nous rémunère pas ; maintenant qu'une organisation veut nous donner une sorte de gratification, le maire veut intervenir pour choisir les personnes qui ont voté pour lui dans les récentes élections ».

Les conflits de partage de l'eau

1.- Généralement en période sèche, l'eau dans le canal n'est pas en quantité suffisante pour irriguer tout le périmètre, les terres en amont reçoivent de l'eau contrairement aux terres en aval ce qui crée des tensions entre les différentes localités. Le comité central tente parfois de résoudre ces conflits en organisant des tours d'eau mais les gens des localités placées en amont utilisent toujours l'eau sans le respect des règles établies par le comité central et les conflits demeurent toujours.

2.- Les canaux tertiaires qui arrivent directement dans les parcelles à irriguer sont en terre. Certaines personnes utilisent des moyens simples pour ouvrir une brèche et arroser à la place d'un autre. Ce type de conflit est résolu par les comités des canaux secondaires, on les appelle des conflits mineurs entre voisins.

2.5 Conclusion

L'ensemble de la population et les décideurs ont une forte volonté de lutter contre le risque d'inondation. Cette volonté est manifestée dans un premier temps par la migration de la population de *Grandier_1* qui vers *Grandier_2* de l'autre côté de la route nationale no 2. Dans un second temps elle est retrouvée aussi du côté des décideurs (responsables de donner les alertes) de la région qui invitent la population à se rendre dans certaines églises qu'ils jugent sans danger tandis que ces bâtiments se trouvent en plein dans la zone potentiellement inondable. Après plusieurs tentatives, ils concluent que la volonté ne suffit pas, il faut un peu plus de connaissances et de moyens adéquats pour lutter contre l'aléa inondation.

En effet, les différents acteurs sont unanimes à penser qu'il faut plus que des expériences du passé pour arriver à faire face à ce risque. Les décideurs penchent pour une solution qui va leur permettre de connaître à l'avance les zones qui sont susceptibles d'être touchées par la menace. Cette connaissance leur permettra de limiter la construction dans ces zones ou de se fixer sur le mode d'aménagement qui peut être réalisé dans ces zones-là. Cette solution peut aussi aider à renforcer les infrastructures et les maisons qui ont une forte propension à subir des dégâts. Les agents de protection et la population demandent plutôt des informations concernant le risque et les endroits à secourir en priorité.

Cette partie de l'étude a aussi permis de s'apercevoir que la population n'a pas une connaissance assez étendue sur les intempéries et est dans la plupart du temps incapable de s'y préparer correctement. Elle a permis aussi de comprendre que la population a aussi développé un comportement sceptique par rapport aux intempéries à cause de leur caractère évolutif. Cela a comme conséquence l'augmentation de la vulnérabilité par rapport à ce phénomène, ce qui explique entre autres les dégâts causés par l'ouragan Matthew.

La ressource commune de l'étude est la rivière de Cavaillon, cette rivière est utilisée principalement pour l'irrigation des terres par une déviation réalisée grâce au barrage au niveau de Dory. En période sèche, au niveau de Dory, la prise d'irrigation dévie toute l'eau de la rivière. Plus en aval, la rivière est alimentée par ses affluents, les plus importants sont Gros-marin et Pradine.

Le périmètre irrigué est composé d'un long canal primaire qui s'étend de Dory à Christine en passant par plusieurs localités. Chaque localité peut avoir un ou plusieurs canaux secondaires qui sont gérés par les personnes de ladite localité. Le plus grand problème du système, c'est l'ingérence de la politique locale dans la gestion interne par les comités élus. Les autres problèmes concernent le partage de l'eau et sont de deux types : les conflits entre voisins qui sont résolus par les comités locaux des secondaires et les conflits entre localités en saison sèche, qui sont du ressort du comité central.

La population utilise l'eau de la rivière et des canaux d'irrigation pour ses besoins primaires comme la lessive, le bain, dans la cuisine. Le choix des canaux ou de la rivière va dépendre de la proximité de l'un des deux.

La rivière est une ressource incontournable pour la population comme précisé plus haut. Elle peut aussi être un danger dans le cas des intempéries qui provoquent des crues et des inondations. La solution à adopter face aux problématiques de crues et des inondations ne doit en aucun cas limiter l'accès à la rivière quand elle ne constitue pas un danger. Les différentes demandes de la population, des agents de protection civile et des décideurs politiques font toutes références à des cartes : des cartes qui peuvent aider dans les nouvelles constructions (infrastructures ou maisons) ainsi que dans la réhabilitation des anciennes constructions et peuvent être considérées comme des cartes d'aléas qui identifient les zones où l'aléa peut être plus important. D'autres cartes qui peuvent renseigner sur le niveau de risque dans toute la zone d'étude sont souhaitées par les services de secours, il s'agit donc ici plutôt de cartes de risque. L'étude a donc été orientée dans cette direction pour la création de carte d'aléa et de carte de risque. Le chapitre suivant va faire le point sur les différentes méthodes pour obtenir de telles cartes.

Chapitre 3 Cartographie du risque inondation - concepts d'analyse du risque

3.1 Cartographie du risque d'inondation - concepts et analyse du risque

Cette partie de l'étude va, dans un premier temps mettre l'emphasis sur les différents concepts, d'aléa et de vulnérabilité ainsi que les différentes méthodes de calcul pour chacun des éléments. Dans un second temps faire l'inventaire de toutes les méthodes qui permettent de représenter les différents éléments (aléa, vulnérabilité et risque).

3.1.1 L'aléa

L'aléa, comme précisé précédemment, peut représenter la partie naturelle du risque qui est difficile et même impossible à éviter. Jusqu'à date, on ne sait pas comment éviter un cyclone ou un séisme produisant un grand tremblement de terre ou un tsunami. Dans un autre sens, il peut être défini comme un phénomène ou événement, naturel ou humain potentiellement dommageable en termes de pertes en vie humaine, en matériel susceptible d'interrompre ou de perturber les activités économiques et socio-culturelles et de détruire l'environnement et les biens (Morin, 2008). Suivant le mode d'apparition, un aléa peut être soudain comme un séisme ou progressif comme une érosion.

Les aléas présentent certaines caractéristiques qui permettent de comprendre la nature du phénomène. Ces caractéristiques sont : sa probabilité d'occurrence, son intensité, sa localisation spatiale. Certaines fois, l'origine de l'aléa est aussi prise en considération et peut s'avérer comme un facteur clé dans la lutte contre les dangers que peuvent provoquer cet aléa. La probabilité d'occurrence d'un aléa n'est pas toujours facile à déterminer quel que soit l'aléa en question. Dans le cas d'un séisme, il est très aisé de dire que l'évènement peut se produire mais il devient plus délicat de préciser le moment ou la fourchette de temps où il est susceptible de se produire. Dans le cas des inondations, cela dépend du type et de la cause de l'inondation. Une inondation causée par la fonte de neige ou par la remontée de la nappe ne peut avoir une probabilité d'occurrence plus ou moins définie avec une possibilité d'alerte progressive alors que ce n'est pas toujours le cas pour une inondation causée par débordement de crue. La première (inondation par fonte de neige) peut être facilement localisée dans le temps en regardant seulement les saisons, plus précisément l'été. La seconde, par contre, est plus difficile à cerner à cause de son caractère incertain comme par exemple une forte pluie amenée par un cyclone. L'intensité de l'aléa est une caractéristique intrinsèque à chaque aléa donné. L'intensité d'un séisme ne peut en aucun cas être comparée à l'intensité d'une inondation. Certains aléas sont définis à partir d'une échelle établie pour définir

leur intensité comme l'échelle de Richter pour les séismes. D'autres, par contre, font référence à certains paramètres qui définissent l'aléa, comme la hauteur de submersion et les vitesses d'écoulement lors des crues et des inondations.

De nos jours, de nombreux outils sont développés et permettent de connaître de manière plus ou moins précise la localisation d'un événement catastrophique. Dans certains cas, cette localisation peut être grossière dans la mesure où un périmètre est défini selon le rayon d'impact d'un phénomène, dans le cas d'une faille par exemple mais cette localisation est fiable et déterminée en prenant compte le cas le plus défavorable. Dans le cas d'une inondation, la localisation d'événements futurs peut être déterminée suivant plusieurs approches qui se complètent. L'approche historique est souvent utilisée et prend en compte différents événements similaires qui ont eu lieu dans le passé. Dans certains cas, les archives n'existent pas. L'approche hydrogéomorphologique prend la relève et utilise les limites externes du lit majeur d'un cours d'eau qui constituent, en quelque sorte, la courbe enveloppe des crues passées.

3.1.2 Aléa inondation

Par définition, une inondation est une submersion plus ou moins rapide d'une zone habituellement hors d'eau. L'inondation peut être la conséquence de plusieurs composantes : le débordement d'une rivière en crue, l'apparition soudaine de l'eau par remontée de nappes phréatiques, la concentration du ruissellement.

Origine des inondations

Les inondations peuvent avoir plusieurs origines. Il y a lieu de distinguer dans un premier temps les inondations par remontée de la nappe phréatique comme cité plus haut, celles provoquées par la fonte des neiges et les inondations par débordement de crue d'une rivière suite à des précipitations plus ou moins importantes. Les deux premiers exemples d'inondation sont donnés dans ce document à titre informatif car étant dans un climat tropical il est très peu probable d'avoir de la neige et en Haïti, et les remontées phréatiques donnent rarement lieu à des inondations.

Les nappes sont des réserves d'eau souterraine situées à différentes profondeurs et se remplissent par infiltration d'eau de pluie. Ce sont ces réserves que nous consommons généralement. Le niveau de la nappe peut s'élever rapidement puisque dans certains cas elle absorbe plus d'eau que n'en rejette (que nous puisons). Dans ces cas-ci, la nappe phréatique peut atteindre le niveau du sol et provoquer des inondations. C'est un phénomène très lent certaines fois mais s'il n'y a pas d'écoulement, elle peut atteindre plusieurs mètres et causer beaucoup de dégâts dans les infrastructures. Ce phénomène est surtout observé dans une région où la géologie dominante est de type karstique.

Les inondations provoquées par la fonte des neiges ou de glaces sont surtout remarquées dans les pays tempérés. Ce phénomène est caractérisé par épisode neigeux exceptionnel suivi d'une fonte brutale. Cette fonte peut causer des inondations ainsi que des crues dans les rivières avoisinantes. C'est ce qui s'est passé en Île de France à la fin de l'année 2010, des inondations et une crue soudaine des rivières et des fleuves dans le bassin parisien. Bien que ces phénomènes puissent engendrer des crues dans les rivières mais elles ne sont pas prises en compte dans ce document car on ne saura pas trouver cette origine dans un pays tropical.

Les inondations par débordement de crues provoquées par des précipitations plus ou moins intense sont celles qui vont être abordées dans ce document. Ce sont les inondations les plus courantes.

Caractérisation d'une crue

Une crue se définit par l'augmentation plus ou moins rapide du débit et par conséquent du niveau d'un cours d'eau. Elle est caractérisée par la partie montante de son hydrogramme, la partie descendante est appelée décrue. L'hydrogramme est par définition la variation de débit en un point en fonction du temps. En général on distingue deux types de crues, les crues fluviales et les crues torrentielles. Les crues fluviales affectent les cours d'eau importants et en général la montée des eaux est lente. Les crues torrentielles sont rapides, subites, brutales, et quelques fois qualifiées de crues éclair. Les crues torrentielles sont souvent causées par des pluies convectives violentes et localisées. Elles sont caractérisées par une évolution très rapide. Une crue se définit aussi par différents critères : sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe, son volume.

Les crues regroupent trois grandes classes en considérant la cause de leur formation. Les crues de fontes de neige, les crues d'embâcles ou de débâcles de glace et les crues dues aux averses. Dans la majorité des cas, les crues ont pour origine des averses exceptionnelles.

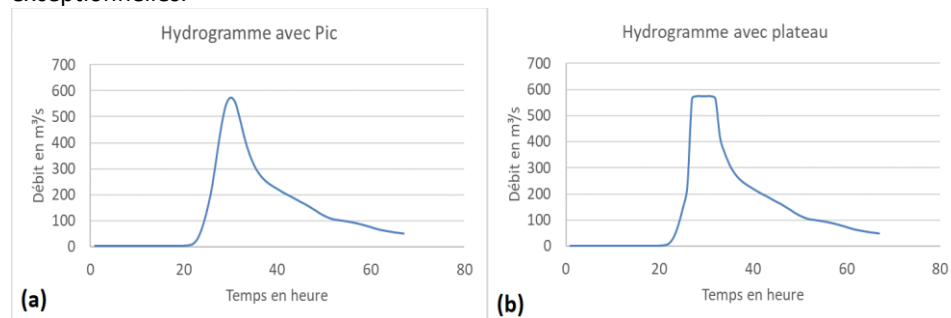


Figure 3-1. (a) Hydrogramme avec un pic (b) Hydrogramme avec un plateau (exemple inventé)

La durée d'une crue dépend de la quantité de précipitation tombée ainsi que la réponse du bassin versant. Pour une crue donnée, sa fréquence est la probabilité que cet événement arrive au cours d'une année. C'est dans ce même contexte qu'on parle de crue décennale, centennale. Ce sont des crues qui ont respectivement 1 chance sur 10, 1 chance sur 100 de se produire au cours de l'année.

Le débit de pointe d'une crue est le débit maximal instantané. Pour certains hydrogrammes, ce débit peut être un point c'est-à-dire ne dure pas longtemps mais pour d'autre c'est un plateau donc qui est plus étalé dans le temps (Figure 3-1).

Types d'inondation

En considérant les inondations causées uniquement par les crues, on peut distinguer trois types : les inondations des plaines, les inondations par crues torrentielles, les inondations par ruissellement en milieu urbain.

1.- Inondation des plaines

Ce sont des inondations qui arrivent à la suite d'épisodes pluvieux plus ou moins longs mais d'intensités modérées s'abattant sur des sols où le ruissellement est long à déclencher. Ces inondations sont surtout rencontrées sur des bassins versants moyens à grands (supérieur à 500 km²). Dans tous les cas, le cours d'eau sort de son lit ordinaire pour occuper son lit majeur et l'inondation est caractérisée par une montée lente des eaux (supérieure à 24h). La durée de submersion peut atteindre plusieurs jours à quelques semaines dépendamment de la topographie du terrain. La morphologie du lit majeur et d'autres caractéristiques topographiques sont déterminantes dans ce type d'inondation. Ceci a pour conséquence que les inondations de plaines peuvent être très différentes d'une rivière à une autre. Dans ces types d'inondations, ce sont la hauteur de submersion et la durée de submersion qui provoquent les différents dommages (soulèvement du bâtiment, enfoncement des sols).

L'inondation de la ville des Gonaïves (2004)

La ville des Gonaïves est située en bord de mer (Figure 3.2.a) dans une cuvette entourée de mornes. La ville est construite dans la plaine, l'altitude moyenne est de 1 mètre au-dessus du niveau de la mer. La ville des Gonaïves se trouve enclavée entre trois courants d'eau : L'océan Atlantique à l'Ouest, à l'Est par la rivière LaQuinte et au Nord par le bassin Manyan. L'inondation de 2004 était surtout causée par le passage du cyclone Jeanne, la dixième tempête tropicale de l'année, dans la Caraïbe. Le cyclone a traversé le territoire haïtien les 17 et 18 septembre avec beaucoup de précipitations. Les précipitations enregistrées dans la station d'Ennery totalisent 261 mm le matin du 19 septembre comparées à une moyenne annuelle de 550 mm, ce qui représente la moitié de la précipitation annuelle

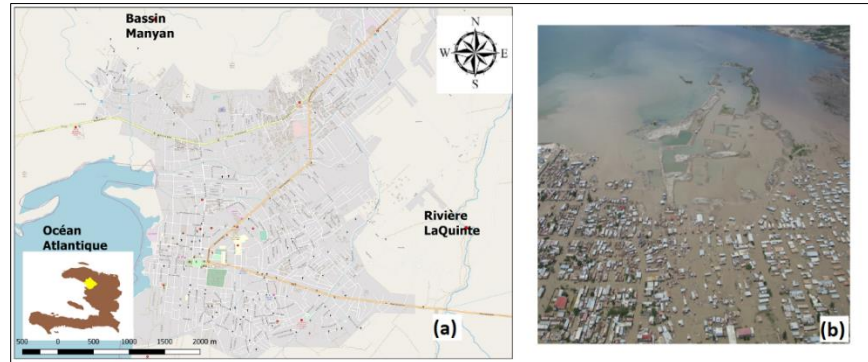


Figure 3-2 - (a) la plaine des Gonaïves (b) inondation lors du passage du cyclone Jeanne (Source : Esri i-cube USDA USGS GeoEye)

. L'arrivée de l'eau a été plus ou moins rapide pour une inondation de plaine : cette rapidité est surtout causée par la dégradation de l'environnement. En effet, les principaux bassins versants de la plaine des Gonaïves sont complètement déboisés. D'autre part une augmentation du niveau de la mer pendant l'ouragan a changé l'axe de déversement habituel dans l'embouchure du bassin de Manyan et les eaux ont envahi la plaine. Les eaux sont restées pendant plusieurs jours car la plaine d'inondation avait la configuration d'une cuvette.

2 - Les inondations par crues torrentielles.

Ce sont des phénomènes brusques et violents résultants d'épisodes pluvieux intenses et localisés, du type orages convectifs (cyclone). Dans ces types d'inondation, la vitesse de montée des eaux est extrêmement rapide, la décrue l'est également dans certains cas. La dénomination de crue éclair est aussi utilisée pour désigner des crues torrentielles survenant sur de très petits bassins versants et se formant en quelques heures. De manière conventionnelle, on parle de crue torrentielle lorsque la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombant sur le point hydrologiquement le plus éloigné atteignant l'exutoire est inférieure à 12h (24h pour certains auteurs). Ces crues touchent principalement les zones montagneuses. Les bassins versants qui peuvent être affectés par ces phénomènes sont de petite à moyenne importance (quelques dizaines à centaines de km²) et à moyennes ou fortes pentes. Ces crues ont des vitesses d'écoulement importantes même dans la plaine d'inondation.

Les spécialistes retiennent cinq critères pour définir une crue torrentielle : La rapidité de la réponse du cours d'eau, sa pente, le nombre de Froude, le transport solide, les effets de ces crues (Ledoux, 2006).

Les crues rapides se distinguent également des crues lentes en ce qu'elles sont plus difficiles à caractériser en termes de période de retour. Cette particularité est liée à une

lacune de données hydrologiques qui caractérise la plupart des cours d'eau à crue violente. En effet, ces rivières ou petits fleuves sont moins souvent étudiés ou depuis moins longtemps que les crues lentes. Les dommages imputables à ces phénomènes sont avant tout liés à la vitesse du courant, renforcée par les matériaux que peuvent charrier les rivières générant de telles crues.

3- Les inondations par ruissellement en secteur urbain.

Les inondations par ruissellement recouvrent des phénomènes physiques différents selon qu'elles se produisent en milieu rural, périurbain ou urbain. Le caractère soudain et la courte durée sont les principales caractéristiques de ces types d'inondations. Ces phénomènes surviennent le plus souvent dans des petits bassins versants et ont dans la majorité des cas un caractère très local. Les inondations par ruissellement concernent principalement les milieux urbanisés. Les eaux qui ne peuvent ni s'infiltrer à cause de l'imperméabilisation artificielle des sols ni s'évacuer par les réseaux artificiels qui peuvent être obstrués sont les principales causes de ces inondations. Le ruissellement pluvial urbain peut aussi provoquer d'importantes inondations lorsque les chenaux d'écoulement en site urbain sont devenus insuffisamment dimensionnés. Le ruissellement pluvial peut également se produire en zone rurale. Ce ruissellement érosif entraîne une réactivation de ruisseaux secs. Il est souvent accompagné de coulées de boues.

Inondation de la ville Léogane par l'ouragan Sandy 2012

La ville de Léogane est située au Sud-Ouest du département de l'Ouest d'Haïti à environ 33 km de Port-au-Prince, la capitale. Elle est bornée au Nord par la mer des Caraïbes, au Sud et à l'Ouest par la rivière Rouyonne et une peu loin à l'Est par la rivière Momance.

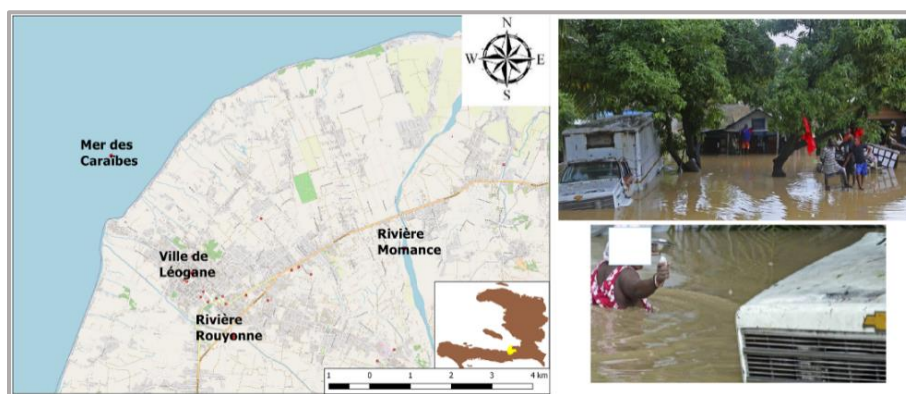


Figure 3-3. L'inondation de Léogane (2012)

À chaque saison des pluies, la rivière Rouyonne cause des dégâts et pertes considérables en vies humaines et animales ainsi qu'en destruction de maisons, des bâtiments et des récoltes (PNUD, 2011). Le tremblement de terre de 12 janvier 2010 dont l'épicentre se trouvait à Léogâne a vraiment été une tragédie avec des milliers de morts et pertes qui s'estimaient à des millions de Dollars.

L'ouragan Sandy en 2012 était caractérisé par de fortes pluies et des rafales de vent, la quantité de pluie enregistrée s'élevait à 500 millimètres. Il y eu beaucoup de dégâts dans 7 des 10 départements du pays mais les dégâts s'étaient plus fait sentir à Léogâne qui avait eu le séisme du 12 janvier 2010. Le séisme avait provoqué des dégâts dans les canalisations dont la plupart étaient obstruées par les décombres. L'eau de ruissellement qui ne pouvait transiter dans les canalisations envahit rapidement les rues, les maisons et toutes les autres infrastructures (Figure 3-3).

Facteurs aggravant de l'aléa inondation

Les inondations ont toujours existé dans le temps. De nos jours, leur nombre et leur capacité destructrice ont augmenté. Plusieurs phénomènes liés à l'activité humaine contribuent à aggraver l'aléa qui lui-même est naturel. Ces phénomènes sont : la dégradation de l'environnement, les aménagements du lit mineur, la réduction des champs d'expansion de crue, le mode d'occupation et d'utilisation de sol. Cette liste non exhaustive regroupe les phénomènes les plus récurrents.

La dégradation de l'environnement fait surtout référence à la coupe prononcée des arbres dans certains pays. La végétation, qu'elle soit constituée d'herbes (prairie) ou de grands arbres (forêt), a un rôle réducteur sur les débits de pointe et ceci se fait par plusieurs moyens. Les feuilles des arbres interceptent la pluie réduisant ainsi la quantité d'eau qui tombe directement sur le sol et le choc des gouttes de pluie. Les racines stabilisent le sol et forment des conduits qui améliorent l'infiltration. Dans le cas contraire, lorsque trop d'arbres sont abattus le régime de pluie diminue, le ruissellement augmente et l'érosion des sols s'accélère car la terre n'est plus retenue par les racines, ce qui augmentent les inondations. Cette dégradation joue aussi un rôle important dans le temps de concentration d'un bassin versant. Ce temps correspond pour un bassin versant donné, à la durée pour qu'une goutte qui tombe dans l'endroit le plus éloigné de l'exutoire arrive à l'exutoire. Plus ce temps est long, moins il y a de risque d'inondation de type « crues éclairs » mais beaucoup de facteurs diminuent ce temps. Outre la coupe des arbres qui ne retiennent plus l'eau, la mise en culture des territoires qui étaient jadis des prairies ou des forêts participe à la diminution de ce temps de réponse. Le facteur qui diminue considérablement ce temps de réponse est l'urbanisation avec l'accroissement des surfaces imperméabilisées.

La propagation des crues dans les champs d'expansion a pour effet de diminuer leur vitesse et leur puissance. Dans ces cas, les zones inondables se remplissent lors des crues

et contiennent un volume aussi important qu'elles sont vastes. Ces remplissages permettent en quelque sorte la diminution en aval de la vitesse d'écoulement et un ralentissement de la propagation de crue en aval. Cette expansion a aussi pour objectif la recharge de la nappe phréatique. Au fil du temps, ces zones d'expansion sont malheureusement remplacées par toutes sortes d'infrastructures et par des villes.

Caractéristiques de l'aléa inondation

Dans le cas d'une inondation, trois paramètres sont essentiels à déterminer pour arriver à la caractériser. Ces paramètres sont pour un endroit donné : la hauteur de submersion, la vitesse de l'écoulement, la durée de submersion. Ces paramètres permettent de déterminer l'intensité de l'aléa (inondation). En ce qui concerne l'établissement des cartes d'inondation ou des plans de prévention du risque inondation, un autre paramètre à prendre en compte est la fréquence de survenance.

1.- La fréquence de survenance

Pour une intensité donnée d'une inondation, la fréquence de survenance correspond à la probabilité que cet événement arrive au cours de l'année. Cette probabilité est représentée dans la majorité des cas par une période de retour qui est l'inverse même de la probabilité. Pour définir cette probabilité, il faut disposer de beaucoup de données. Quand les données sont insuffisantes pour un calcul statistique, on se réfère à une crue historique. Dans l'établissement des cartes d'inondation un seul événement peut être considéré, l'événement de référence. Dans le cas où l'inondation est causée par une crue on parle de crue de référence. Dans certains cas, l'événement centennal est directement choisi ou un événement supérieur à la crue centennale selon l'histoire de la région donnée. Ce choix ne prend en compte que le niveau maximal d'un aléa donné qui doit être étroitement justifié au regard des risques humains (Ledoux, 2006) car en aucun cas il ne peut être fixé à un niveau où la vie humaine serait directement exposée, bien qu'il soit quasi-impossible de fixer un niveau où aucun être humain ne serait menacé. En se basant sur ces considérations, une crue de référence doit répondre à la volonté de se référer à des événements qui se sont déjà produits, qui sont susceptibles de se reproduire, dont les plus récents sont dans les mémoires. Ce choix devra aussi privilégier la mise en sécurité de la population en retenant des crues de fréquences rares ou exceptionnelles.

2.- La hauteur de submersion et les vitesses d'écoulement

La hauteur de submersion qui est une caractéristique de l'aléa est étalonnée en fonction des éléments présents dans la zone inondable qui eux-mêmes donnent des informations sur la vulnérabilité. Dans la majorité des cas, on se réfère à la mobilité de chaque personne (enfant, adulte en bonne santé, adulte ayant un handicap et personne

âgée). Elle fait aussi référence à la profondeur d'eau suivant laquelle une personne arrive quand même à se protéger. La considération est aussi faite dans certains cas pour les niveaux d'eau où les véhicules de secours ne sont pas encore limités dans leur déplacement. De manière concrète, la valeur d'un (1) mètre est considérée comme le seuil de mobilité très réduite pour un adulte en bonne santé et impossible pour un enfant. Pour une valeur dépassant 1 mètre, les véhicules commencent déjà à flotter et peuvent être déplacés même par un courant très faible et créer des dangers. Les véhicules de secours terrestres ne peuvent se déplacer aisément quand l'eau commence à atteindre 0.6 à 0.7 mètre de hauteur.

Pour traduire la mise en danger d'un adulte, une fourchette est identifiée (0.5 mètre – 1 mètre) car à ce niveau le relief a totalement disparu ce qui peut créer facilement un déséquilibre et le niveau de stress créé par la situation (tableau 3.1)

Tableau 3-1 - Représentation du risque en fonction la hauteur de submersion (Ledoux,2006)

	Crue lente	Crue semi rapide	Crue torrentielle
Hauteur d'eau < 0.5	Modéré	Modéré	Modéré à Fort
0.5<Hauteur d'eau <1	Modéré	Fort	Fort
Hauteur d'eau > 1	Fort	Fort	Fort

La vitesse d'écoulement d'un fluide est la rapidité avec laquelle une masse ou un volume de ce fluide passe d'un point à un autre. Ce paramètre est important car couplé avec la profondeur d'eau, la vitesse d'écoulement détermine la mobilité des éléments présent dans les écoulements. Dans l'établissement des plans de prévention du risque inondation par débordement de crue, elle est toujours accompagnée de la profondeur d'eau. (Tableau 3-2 ; Figure 3-4).

Les différentes combinaisons (profondeur d'eau et vitesse d'écoulement) sont généralement basées sur les expérimentations. Ainsi, un adulte en bonne santé qui se trouve dans un écoulement où la profondeur d'eau est inférieure à 0.25m et la vitesse moyenne est inférieure à 0.5 m/s ne se trouve pas en danger dans le cas d'une inondation. Dans cette catégorie l'aléa est considéré comme faible. Pour cette même profondeur d'eau le risque de chute pour un adulte en bonne santé tend à augmenter avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement mais reste un danger moyen. Le danger tend à augmenter lorsque les deux variables (profondeur d'eau et vitesse d'écoulement) augmentent pour passer d'un aléa faible à un aléa fort et très fort (Tableau 3-2, Figure 3-4).

Tableau 3-2 Croisement de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement

Aléa Inondation		Vitesse (m/s)		
		V<0.5	0.5<V<1	V>1
Profondeur (m)	H<0.25	Faible	Moyen	Moyen
	0.25<H<0.5	Moyen	Fort	Fort
	0.5<H<1	Fort	Très fort	Très fort
	H>1	Fort	Très fort	Très fort

Ce croisement entre les profondeurs d'eau et les vitesses d'écoulement n'est pas automatique mais elle est issue d'expérimentations. D'après les expérimentation une profondeur d'eau inférieure à 25 cm n'est dangereux que dans des cas de vitesse élevée pour les humains. Cet écoulement peut provoquer des déséquilibres et des chutes pour un adulte. Les dégâts provoqués par ce type d'écoulement ne sont que moyens. Au-delà de 25 centimètres pour des vitesses d'écoulement élevée l'écoulement devient dangereux.

Ces valeurs ont remplacé les appréciations qualitatives pour être utilisé plus tard dans le document.

Aléa Inondation		Vitesse (m/s)		
		0.45	0.95	1.00
Profondeur (m)	0.24	0.11	0.23	0.24
	0.45	0.20	0.43	0.45
	0.95	0.43	0.90	0.95
	1.00	0.45	0.95	1.00

Ce tableau issu de croisement de profondeurs d'eau et de vitesses d'écoulement a utilisé les valeurs à la limite supérieure de l'intervalle donné pour chaque plage.

La Durée de submersion

Généralement dans une inondation causée par des crues, une fois que la cause s'est estompée, l'eau ne prend pas beaucoup de temps pour retourner dans le lit mineur.

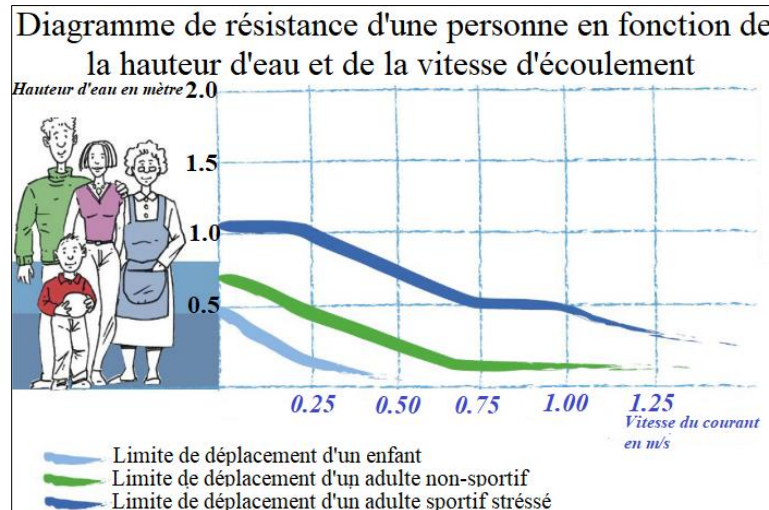


Figure 3-4. Diagramme de résistance d'une personne en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement. Source : DDE Vaucluse CEPRI

Dans certains cas, la durée de submersion peut prendre beaucoup plus de temps et une des causes est la topographie ou la présence de digues de protection qui empêchent le retour de l'eau vers le cours d'eau. Cet élément est important car elle a une influence non négligeable dans les fondations de bâtiments et dans les plaines cultivables.

3.1.3 La vulnérabilité

La vulnérabilité est un terme qui est encore au centre des débats. Il n'existe pas encore une définition qui soit acceptée par tous. Dans le cas des inondations, la vulnérabilité fait directement référence aux enjeux qui représentent l'ensemble des biens (habitat, réseaux, entreprises), des personnes (enjeu humain), et les activités économiques (marchés) qui se trouvent dans des zones potentiellement inondables. Le risque en lui-même est défini comme le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité ce qui revenait à dire que la vulnérabilité correspond aux enjeux. Ce qui peut aussi porter à croire que plus les enjeux sont nombreux plus la vulnérabilité est grande. Cependant la présence d'enjeux en zone inondable, par exemple, n'implique pas forcément de potentielles catastrophes (Ledoux, 2006). C'est qu'en réalité enjeux et vulnérabilité sont deux concepts différents. La vulnérabilité de manière plus concrète serait en fait la propension de bien à subir des dommages et/ou de vie à subir des préjudices ou encore elle peut être définie comme le potentiel de perte (Mitchell et al., 1989). Une autre école de pensée considère que la vulnérabilité peut être considérée comme une mesure des enjeux ou une caractérisation de l'occupation de sol (Turner et al., 2003a). Ledoux

(2006), par contre, la considère comme le degré d'endommagement que subiraient les enjeux exposés dans l'hypothèse de la survenance du phénomène considéré. Bien que les définitions divergent parmi les auteurs, ils s'accordent à dire que la vulnérabilité dépend des enjeux présents dans une région susceptible d'être frappée par un aléa. La connaissance de la vulnérabilité permet non seulement de comparer plusieurs régions par rapport à un aléa mais aussi de comprendre pourquoi une région est plus à risque qu'une autre (Luers et al., 2003).

Enjeux

Le terme enjeu représente tout ce qui se trouve dans une région potentiellement inondable et qui peut subir des dommages (Demoraes et al. 2004). Pour un site donné, l'environnement naturel est sensé s'adapter à l'inondabilité d'où l'exclusion des enjeux environnementaux. Il serait mieux de dire que les enjeux représentent en réalité tout ce qui a été implanté par l'homme. La connaissance des enjeux conduit à l'évaluation du risque en se basant sur la définition du risque lui-même. Cette connaissance qui s'obtient par recensement et quantification des biens des activités en zone inondable et de la population peut aussi permettre de disposer des informations nécessaires au calcul des dommages potentiels.

Cette connaissance peut s'acquérir de deux manières différentes : soit par l'approche zonale, soit par l'approche par entité. L'approche zonale se base sur le type d'occupation des sols de manière à attribuer une densité moyenne de biens à chaque zone homogène. L'approche par entité, par contre, consiste à recenser chaque enjeu. L'utilisation de l'une des deux approches fait intervenir une typologie dans les enjeux qui sont différents les uns des autres pour un site donné. Les enjeux peuvent être selon la typologie la plus courante : des enjeux humains (travailleurs ou résidents), l'habitat (l'immobilier et le mobilier), les enjeux agricoles, les activités économiques (marchés, entreprises), les infrastructures (réseaux d'équipement publics).

Méthode de calcul de la vulnérabilité

Dans l'approche où le risque est le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité, il est nécessaire de mesurer la vulnérabilité afin d'en faire sortir une valeur pour rendre possible ce croisement. Cette quantification ne peut se baser que sur des critères bien précis. La définition même de ces critères peut s'avérer difficile car la vulnérabilité elle-même n'est pas un phénomène directement observable (Downing et al., 2001). Il est toujours plus facile d'effectuer des calculs post-aléa sur la quantité de dégâts et ainsi évaluer la vulnérabilité. Cette approche paraît plus ou moins aisée mais elle n'est pas envisageable dans un projet de prévention de risque. De plus, c'est une approche qui n'est pas facilement applicable à une plus grande variété de facteurs de stress et de

variables de résultats, dans le cas par exemple ou bien-être ne se limite pas à la vie ou à la mort (Luers, 2003). Malgré les nombreuses difficultés qui existent pour quantifier la vulnérabilité, plusieurs approches ont été développées et permettent ainsi de la quantifier. Parmi ces approches, on peut citer le processus d'analyse hiérarchique développé par Saaty (1980), qui a aussi été utilisé comme une méthode de calcul de la vulnérabilité, la méthode de calcul développée par Luers et al., (2003) et le calcul de la vulnérabilité sur base d'indice développé par Balica et al. (2009). Dans cette étude la méthode de Luers et la méthode basée sur les indicateurs pour le calcul de la vulnérabilité sont données à titre indicatif. Le calcul de la vulnérabilité est réalisé avec la méthode multicritère de Saaty (AHP) adaptée pour l'évaluation de la vulnérabilité.

La méthode de Luers

Cette méthode, qui a été développée par Luers et al. (2003), essaie de donner une nouvelle perception de la vulnérabilité. Dans un premier temps, la méthode essaie de remettre en question le concept de multi-vulnérabilité. Cette tendance qui nous porte à croire qu'un enjeu en mauvais état ou en état moyen à vue d'œil est vulnérable à tous les aléas. Par exemple, une maison en état moyen vulnérable au séisme, selon les normes de construction parasismique, n'est pas forcément vulnérable au risque d'inondation. Dans un second temps, la méthode enlève une partie de la subjectivité retrouvée dans les autres méthodes de calcul de la vulnérabilité. En effet, dans la méthode de Luers, la vulnérabilité est définie comme une expression mathématique où elle est une fonction de la sensibilité par rapport à un seuil de dommage et de l'exposition. La méthode définit d'abord un seuil de dommage, puis mesure la sensibilité en termes de sensibilité et d'exposition du système aux facteurs de stress. Ce seuil de dommage peut-être généralement obtenu expérimentalement ou avec les propriétés de l'enjeu en question. Ce seuil de dommage permet aussi de se démarquer de la notion qui porte à croire que la vulnérabilité augmente avec le nombre ou la quantité d'enjeux exposés. Une catégorisation a déjà été réalisée pour l'enjeu humain qui permet de différencier les personnes vulnérables suivant l'âge ou même la condition physique de la personne. La méthode propose aussi un cadre pour estimer la capacité d'un système à modifier ses conditions de vulnérabilité en s'adaptant aux circonstances changeantes et en y répondant. Cette partie sera moins abordée dans ce chapitre car elle relève plutôt de la résilience d'un système. Une présentation de la méthode est réalisée dans les paragraphes suivants. Cette méthode a été décrite et utilisée en 2003 dans un article de Luers et al. intitulé « *A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico* », et en 2005 par Luers dans un autre article intitulé

« *The surface of vulnerability: An analytical framework for examining environmental change* ».

Cette vulnérabilité se traduit par la formule

$$V = \int \frac{|\partial w / \partial x|}{w / w_0} \cdot P_x(x) dx \quad (3.1)$$

Avec la première partie de l'intégrale, en gras, qui exprime la sensibilité par rapport à un certain seuil, et la deuxième partie qui représente l'exposition à l'aléa en fonction d'une variable x qui dépend du contexte (par exemple une quantité de précipitations).

Sensibilité et seuil

Comme précisé précédemment la vulnérabilité d'un système est calculée dans un premier temps par rapport à un certain seuil, il s'agit bien de la première partie de la formule. Il faut d'abord comprendre la sensibilité du système à différents facteurs de stress et identifier un seuil auquel le système serait « endommagé ». La vulnérabilité d'un système, à de petits changements dans les forçages, est fonction de la sensibilité du système à une perturbation donnée et de la proximité relative du système à son seuil d'endommagement (Figure 3-5a):

$$S = f\{\text{sensibilité / état par rapport à un certain seuil}\} \quad (3.2)$$

$$S = \frac{|\partial w / \partial x|}{w / w_0} \quad (3.3)$$

Où w_0 représente une valeur seuil de bien-être en dessous de laquelle le système serait endommagé.

Prenons l'exemple de la sensibilité des cultures par rapport à l'apport d'eau sur une période donnée. Dans ce cas w représente la quantité récoltée qui est le « bien-être » sur une période donnée (par exemple une année ou une saison) et x l'apport en eau qui est le « facteur de stress » sur la même période. La sensibilité est représentée comme la valeur absolue de la dérivée du bien-être par rapport au facteur de stress. En effet, dans ce cas bien précis, le stress est représenté par la quantité d'eau accumulée sur la parcelle. Lorsque cette quantité d'eau diminue considérablement, les espèces végétales subissent ce qu'on appelle un stress hydrique et peuvent dépérir et mourir. Dans le cas contraire, lorsqu'il y a trop d'eau sur une parcelle amenée par les inondations, les racines des plantes cultivées sont asphyxiées, pourrissent et meurent (Figure 3-5a). Ce qui explique la forme de la courbe de bien-être.

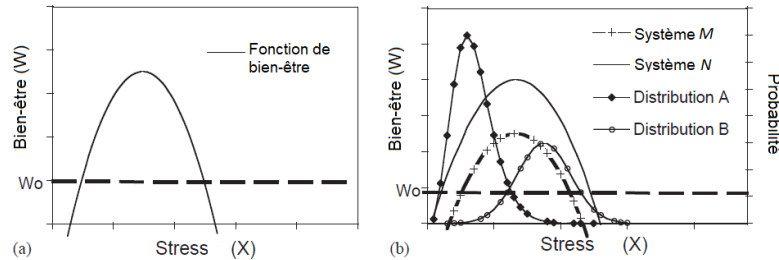


Figure 3-5 - (a) Une fonction hypothétique de bien-être pour un système idéalisé. (b) Des expositions différentes (A ou B) peuvent entraîner des vulnérabilités différentes.

Cette courbe (Figure 3-5a) serait très différente dans le cas des enjeux humains ou matériels (Figure 3-6) car ces systèmes dans le contexte de l'inondation seront menacés par un excès d'eau et non par un manque d'eau.

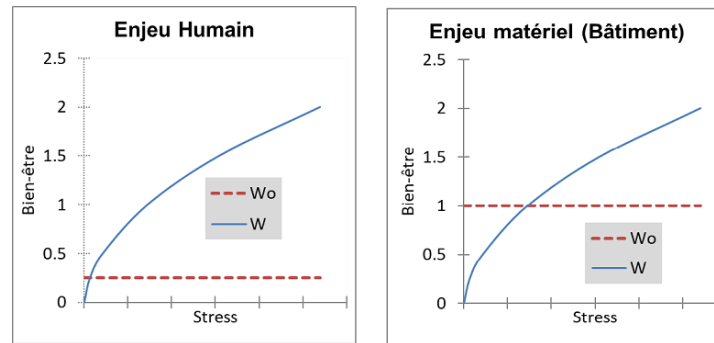


Figure 3-6- Courbe de bien-être pour les enjeux humain et matériels

Dans ces courbes-ci (Figure 3-6), le stress est encore représenté par la quantité d'eau, et w représente le niveau de « mal-être », l'inverse du « bien-être », par exemple la profondeur d'eau atteinte par l'inondation. Contrairement aux courbes précédentes le bien-être se trouve en dessous du seuil (W_0). Donc W_0 représente la valeur du seuil de mal-être au-dessus de laquelle le système serait endommagé. Le risque d'endommagement est considéré pour l'humain avec un seuil de 25 cm de profondeur d'eau et pour les bâtiments un seuil de 1 mètre est choisi. Le calcul de 1 mètre pour les bâtiments, confirmé par des expérimentations, indique qu'un mur maçonné, peu ou non chargé verticalement, est susceptible de s'effondrer dès lors que la différence de hauteur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur atteint un mètre (Valencia N., 2006). Cette « règle » est à l'origine de la recommandation de limiter les batardeaux à une hauteur d'un mètre à partir du sol.

Pour ces enjeux, comme précisé plus haut, au-delà de 25 cm pour l'humain et 100 cm pour les bâtiments, on quitte la zone de bien-être. Il faut aussi préciser que des considérations ne tiennent pas compte de l'état du bâtiment. Il est clair qu'un bâtiment en bon état résistera plus qu'un autre en mauvais. Ces considérations dépendent aussi des matériaux de construction on peut trouver des murs en bloc, en terre, en tuf qui est un mélange de terre et de bois retrouvé fréquemment dans les zones rurales en Haïti.

Exposition au stress

La deuxième partie de la formule (3.1) fait référence à l'exposition. Dans un premier temps cette partie de la méthode présente le problème dans un système qui n'est pas exposé malgré la présence de l'élément perturbateur donc, on conclut que ce système n'est pas vulnérable. Ensuite, la méthode fait la différence de vulnérabilité qu'il peut y avoir entre deux systèmes ou plus, dépendamment de leur exposition par rapport au choc. Les systèmes, dans la plupart des cas, sont exposés à des amplitudes et des fréquences variables de forces perturbatrices, entraînant souvent des vulnérabilités différentielles (GIEC, 2001 ; Turner et al., 2003a, b). On capte ces différences d'exposition en calculant la valeur attendue du rapport de la sensibilité à l'état par rapport à un seuil sur la base de la distribution de fréquence des facteurs de stress d'intérêt :

$$V = \int \frac{|\partial w / \partial x|}{w/w_0} P_x(x) dx \quad (3.4)$$

Où P_x fait référence à la probabilité d'occurrence du facteur de stress x : et ou les bornes de l'intégrale sont les limites de valeurs plausibles de stress (éventuellement zéro pour la borne inférieure et l'infini pour la borne supérieure)

Cette métrique de vulnérabilité fournit un moyen de distinguer les systèmes avec différents états moyens d'être, les sensibilités et les expositions. Par exemple, supposons qu'il y ait deux communautés agricoles où la production agricole totale par habitant est une mesure de bien-être. Les deux communautés peuvent chacune avoir des fonctions de bien-être similaires. Cependant, une communauté (System N) peut avoir plus de terres cultivables par habitant qu'une autre communauté (système M) résultant en un bien-être moyen plus élevé (Figure 3-5b). Sur la base de la mesure de vulnérabilité proposée, si ces deux systèmes étaient exposés à la même distribution de facteurs de stress (disons la distribution A), alors le système M serait plus vulnérable, même s'ils avaient tous deux la même exposition et sensibilité. Dans ce cas la vulnérabilité est d'autant plus grande que le système est grand. D'un autre côté, s'il y avait deux systèmes distincts avec des fonctions de bien-être identiques (tous deux représentés par le

système Y) mais des distributions de facteurs de stress radicalement différentes (distributions A et B), les vulnérabilités de ces deux systèmes seraient distinctes l'une de l'autre (Figure- 3-5b).

Unités

Les unités de mesure de vulnérabilité ci-dessus sont les unités de bien-être (ou de mal-être) divisées par les unités du facteur de stress (W/X). Par exemple, dans l'étude d'un cas, la mesure du bien-être peut-être le rendement agricole (mesuré en *tonnes / ha*) et le facteur de stress que nous considérons est la température (C) au-delà d'un certain seuil. Les unités résultantes de notre mesure de vulnérabilité sont les $((\text{tonnes} / \text{ha}) / \text{C})$. Cependant, à des fins pratiques, dans notre analyse, nous représentons à la fois la vulnérabilité et la capacité d'adaptation comme des mesures sans unité relative en normalisant chacune par un état de référence. En général, l'état de référence utilisé dépendra de l'objectif de l'étude particulière. Dans les exemples agricoles cités, l'état de référence que nous utilisons est la vulnérabilité de la ferme moyenne dans la région d'étude.

Cette méthodologie bien qu'intéressante n'est pas adaptée au calcul de la vulnérabilité avec les enjeux présents dans la zone d'étude. Il est difficile de trouver une fonction qui décrit la variation de l'état d'un bâtiment ou des infrastructures présentes dans une zone par rapport à l'aléa (Profondeur d'eau et vitesse d'écoulement). La méthodologie intègre aussi l'aléa en considérant la probabilité d'occurrence d'un événement ce qui conduit directement au calcul du risque pas de la vulnérabilité.

Calcul de la Vulnérabilité à partir d'indicateurs

C'est une méthodologie qui vise à évaluer les conditions qui influencent les dommages causés par les inondations à différentes échelles spatiales : bassin fluvial, sous bassin et zone urbaine en utilisant des indicateurs pour calculer un indice de vulnérabilité aux inondations.

Dans cette méthodologie, une échelle spatiale est divisée en trois sous-systèmes indépendants. Le sous-système fluvial naturel, dans lequel se déroulent les processus physiques et biologiques, le sous-système socio-économique, qui comprend les activités sociétales (humaines) liées à l'utilisation du système fluvial naturel et le sous-système administratif et institutionnel comprenant la législation et la réglementation, où se déroulent les processus de prise de décision, de planification et de gestion.

Chacun de ces trois sous-systèmes est défini par certaines conditions. Le système fluvial naturel est délimité par le climat et les conditions (géo)physiques, le système socio-

économique est formé par les conditions démographiques, sociales et économiques, et le système administratif et institutionnel est formé et délimité par le système constitutionnel, juridique et politique.

Ces sous-systèmes englobent quatre (4) composantes du système qui sont perturbées par les inondations : sociale, économique, environnementale et physique. Les composantes sociales et économiques comprennent le sous-système socio-économique et le sous-système administratif et institutionnel, tandis que les composantes environnementales et physiques font partie du sous-système fluvial naturel. Les composants peuvent être évalués par différents indicateurs pour comprendre la vulnérabilité du système aux inondations.

Les différentes composantes sont ensuite reliées aux facteurs de vulnérabilité qui sont : l'exposition (E), la susceptibilité (S) et la résilience (R) peuvent aider à identifier les points faibles d'un système de défense contre les inondations, et donc aider à concevoir des stratégies d'amélioration du système global.

L'exposition peut être comprise comme les valeurs présentes dans les zones potentiellement menacées par les inondations. Dans le cas de l'indice de vulnérabilité aux inondations, l'exposition est définie (Balica 2007) comme « la prédisposition d'un système à être perturbé par une inondation en raison de son emplacement dans la même zone d'influence ». La susceptibilité est liée aux caractéristiques du système, y compris le contexte social de la formation des dommages dus aux inondations. Dans cet article, la susceptibilité est définie comme les éléments exposés au sein du système, qui influencent les probabilités (Turner II et al. 2003) d'être lésés lors d'inondations dangereuses. La résilience aux dommages causés par les inondations ne peut être envisagée que dans les endroits ayant connu des événements passés, puisque l'accent est mis principalement sur les expériences acquises pendant et après les inondations historiques. Dans cet article, la résilience est définie comme la capacité d'un système à subir toute perturbation, comme les inondations, en maintenant des niveaux significatifs d'efficacité dans ses composantes sociales, économiques, environnementales et physiques.

L'équation générale proposée pour calculer l'Indice de vulnérabilité aux inondations (FVI, Flood Vulnerability Index) relie les valeurs de tous les indicateurs aux composantes et facteurs de vulnérabilité aux inondations (exposition, susceptibilité et résilience) à partir d'une série de données. L'utilisation de cette équation permet des comparaisons entre différentes échelles géographiques, puisque le résultat du calcul est sans dimension. Des

résultats sans dimension sont nécessaires afin de comparer les FVI (Flood Vulnerability Index) pour des composants et des échelles similaires pour différentes études de cas.

Les équations FVI sans dimension sont développées en utilisant des fractions avec des indicateurs dans le cadre d'un numérateur ou d'un dénominateur, en fonction de leur effet sur la vulnérabilité aux inondations.

Les indicateurs représentant l'exposition et la susceptibilité augmentent la vulnérabilité aux inondations et sont donc placés dans le numérateur. Les indicateurs de résilience diminuent la vulnérabilité aux inondations et font à l'inverse partie du dénominateur :

$$FVI = \frac{E \times S}{R} \quad (3.5)$$

Outre les valeurs de FVI pour chaque composante, des résultats standardisés sont développés pour une comparaison plus poussée entre les composantes (Sullivan et al. 2003), servant également l'objectif d'une interprétation plus facile. Les valeurs FVI normalisées sont comprises entre 1 et 0 ; 1 étant la plus vulnérable aux inondations. La formule standardisée est présentée sous la forme d'un FVI d'un système divisé par le FVI maximum au sein d'un système.

$$FVI_s = \frac{FVI_{scale}}{FVI_{max}} \quad (3.6)$$

Tableau 3-3 Classification de la vulnérabilité d'un système aux inondations

Valeur de l'indice	Classification de la vulnérabilité	Description
<0.01	Très faible vulnérabilité aux inondations	Très faible vulnérabilité aux inondations, la zone se rétablit rapidement, il existe des assurances contre l'inondation, le montant de l'investissement dans la zone est élevé
0.01 - 0.25	Faible vulnérabilité aux inondations	Sur le plan social, économique, environnemental et physique, la région peut, de temps en temps, souffrir d'inondation. La zone est vulnérable aux inondations et le processus de récupération est rapide en raison des mesures de résilience élevées, budget élevé. D'autre part si la zone est moins développée économiquement, même si une inondation survient, les dommages ne sont pas élevés, donc une faible vulnérabilité aux inondations.

0.25 - 0.50	Vulnérabilité moyenne aux inondations	Sur le plan social, économique, environnemental et physique, la zone est vulnérable aux inondations, la zone peut récupérer en quelques mois en raison des processus de résilience moyenne, le montant des investissements suffit.
0.50 - 0.75	Vulnérabilité élevée aux inondations	Sur le plan social, économique, environnemental et physique, la zone est vulnérable aux inondations, le processus de récupération est très lent, peu résistant, aucune organisation institutionnelle.
0.75 - 1	Vulnérabilité très élevée aux inondations	Sur le plan social, économique, environnemental et physique, la zone est très vulnérable aux inondations, le processus de récupération est très lent, la zone se rétablira en années, le budget est très insuffisant.

Les indices de vulnérabilité de chaque composante sont calculés à partir de 28 indicateurs et se présentent comme suit :

Indice de vulnérabilité aux inondations pour la composante sociale :

$$FVI_s = FVI_s \left[\frac{P_{FA}, R_{Pop}, \%_{disable}, C_m}{P_E, A/P, C_{PR}, W_s, E_R, HDI} \right] \quad (3.7)$$

Indice de vulnérabilité aux inondations pour la composante économique :

$$FVI_{Ec} = FVI_{Ec} \left[\frac{L_U, U_M, I_{neq}, U_A}{L_{El}, F_I, A_{Inv}, \frac{S_c}{V_{year}}, E_{CR}} \right] \quad (3.8)$$

Indice de vulnérabilité aux inondations pour la composante environnementale :

$$FVI_{En} = FVI_{En} \left[\frac{R_{ainfall}, D_A, U_G}{L_U, E_V, N_R, U_{npop}} \right] \quad (3.9)$$

Indice de vulnérabilité aux inondations pour la composante physique :

$$FVI_{ph} = FVI_{ph} \left[\frac{T}{\frac{E_V}{R_{ainfall}}, \frac{S_c}{V_{year}}, D-L} \right] \quad (3.10)$$

Un exemple de certains indicateurs est présenté dans le tableau 3-4

Tableau 3-4.- Indicateurs/ composantes et facteurs

	Abréviation	indicateurs	Facteur
Composante sociale	P_{FA}	Population en zone inondable	Exposition
	A/P	Préparation	Susceptibilité
	WS	Système d'alarme	Résilience
Composante économique	L_U	Occupation de sol	Exposition
	U_M	Chômage	Susceptibilité
	E_{CR}	Relance économique	Résilience
Composante environnementale	D_A	Environnement dégradé	Exposition
	$Rainfall$	Précipitation	Susceptibilité
	RTF	Temps de récupération	Résilience
Composante physique	T	Topographie (pente)	Exposition
	F_O	Fréquence d'apparition	Susceptibilité
	D_L	Digues	Résilience

La totalité des indicateurs est donnée en annexe.

Cette méthode est très élaborée et fait intervenir beaucoup d'éléments pour le calcul de la vulnérabilité. Malheureusement à cause du manque de données sur le périmètre d'étude cette méthode ne pouvait être utilisée.

Les deux méthodes présentées plus haut n'ont pas pu être testées à cause du manque de données. Pour la méthode de Luers, il aurait fallu avoir pour les bâtiments un certain seuil au-delà duquel le bâtiment ne peut plus résister à l'inondation. Ce seuil qui a été établi étude de la mairie de Toulouse-Artelia pour un mur maçonné, en bon état, non chargé verticalement sous l'effet de la pression hydrostatique. Dans le cas de la ville Cavaillon, les murs sont assez diversifiés suivant le type et les matériaux de construction et l'état du mur pendant l'étude (mur en tuf avec terre et bois comme armature, et mur en bloc).

La méthode des indicateurs requiert beaucoup de données comme le taux de chômage, la mortalité infantile, l'indice de développement humain pour ne citer que ceux-là. Ces données sont pour la plupart inexistantes pour la région étudiée.

Ces méthodes sont toutefois explicitées dans le texte et en annexe en vue de permettre plus aisément la poursuite du travail dans le cadre d'une future recherche et de comprendre leurs intérêts et leurs limitations.

Le processus Analyse hiérarchique (AHP)

Les enjeux présents dans un milieu donné diffèrent les uns des autres (humains, matériels, et terrains agricoles ou autres). La question qui vient souvent à l'esprit dans les analyses est : « qu'est-ce qui a une plus grande importance à nos yeux » ou encore « à quoi ou à qui doit-on accorder la priorité ? ». Cette comparaison réalisée dans nos têtes est dans la majorité des cas qualitative. Maintenant l'objectif serait de transformer ces réflexions qualitatives en des analyses quantitatives. Ce moyen de réflexion quantitative permettra aussi de comparer des objets ou des situations complètement différentes. La méthode Multicritère Hiérarchique (AHP), proposée par Saaty (1980) est l'outil idéal pour cette comparaison. C'est une méthode qui transforme le qualitatif en quantitatif et rend possible la comparaison de deux éléments complètement différents selon le degré d'importance qu'on accorde à l'un ou l'autre et aussi suivant le contexte. Cette méthode consiste à décomposer un problème puis à regrouper les solutions de tous les sous-problèmes en une conclusion. Elle facilite la prise de décision en organisant les perceptions, les sentiments, les jugements et les mémoires dans un cadre qui montre les forces qui influencent une décision. Cette méthode de prise de décision implique les étapes suivantes : (1) Structurer un problème avec un modèle qui montre les éléments clés du problème et leurs relations, (2) Obtenir des jugements qui reflètent les connaissances, les sentiments ou les émotions, (3) Représenter ces jugements avec des nombres, (4) Utiliser ces nombres pour calculer les priorités des éléments de la hiérarchie, (5) Synthétiser ces résultats pour déterminer un résultat global, (6) Analyser la sensibilité aux changements de jugement (Saaty, 1977). La méthode est basée sur la capacité humaine innée à porter des jugements judicieux sur les petits problèmes. Elle consiste à hiérarchiser chaque élément d'un même ensemble selon son degré d'importance. Supposons que notre ensemble est une portion de terrain inondable et l'objectif est d'obtenir des cartes de risques d'inondation. Cette portion peut contenir des personnes, de habitats, des terrains agricoles. La méthode consiste à faire des comparaisons par paires d'éléments situés dans un même niveau hiérarchique (Figure 3-7). Les différentes comparaisons se font sur base de certains critères. Ces critères vont dépendre du pays et du contexte car tous les pays ne partagent pas les mêmes réalités. Comme par exemple l'électricité peut être un enjeu important dans les pays occidentaux car presque tout repose sur cet élément, ce qui peut être différent pour un quartier rural d'un pays du Sud.

Ainsi, encore à titre d'exemple, le premier niveau de hiérarchisation est composé des enjeux humain, matériels et terrain agricole. Le critère de comparaison pour ce niveau est l'élément à sauver en priorité (Figure 3-7).

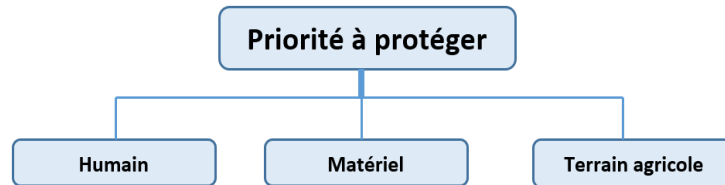


Figure 3-7- Premier niveau dans l'analyse de l'AHP

Les éléments du premier niveau peuvent aussi être subdivisés en plusieurs sous-niveaux selon les besoins de l'étude et le degré de précision recherché. Dans ce cadre-là, l'enjeu humain peut être, par exemple, subdivisé selon la fonction des individus : travailleurs, résidents, et écoliers (Figure 3-8). Ce critère de comparaison exprime la probabilité de trouver une personne au moment de l'évènement. Généralement au moment des intempéries les écoles sont fermées, les supermarchés et marchés informels ne fonctionnent pas. L'élément ayant plus de poids est le résident.

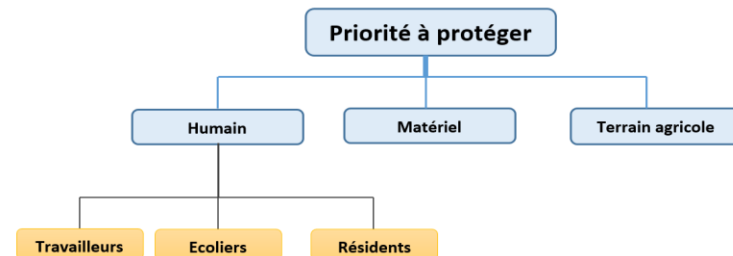


Figure 3-8- Deuxième niveau de hiérarchie dans l'analyse pour le critère humain

Le critère des comparaisons peut aussi être la fragilité des personnes ou son niveau de connaissance des victimes potentielles. Ce critère permet de faire ressortir la capacité des personnes à se sauver elles-mêmes face à un danger. Dans ce cadre-là une personne peut être considérée comme *Fragile* si elle est un enfant de moins de 12 ans ou un adulte de plus de 60 ans. La personne est *Non Fragile*⁻ avec un petit signe « moins » pour dire que cette personne-là ne sait pas lire. Cette catégorisation est basée sur le fait qu'une personne adulte qui a des limites de connaissances, étant seul, a du mal à agir correctement face à un problème. Une personne *Non Fragile*⁺ pour des personnes entre 13 et 59 ans qui savent lire et qui peuvent réagir correctement face à une menace. (Figure 3-9).

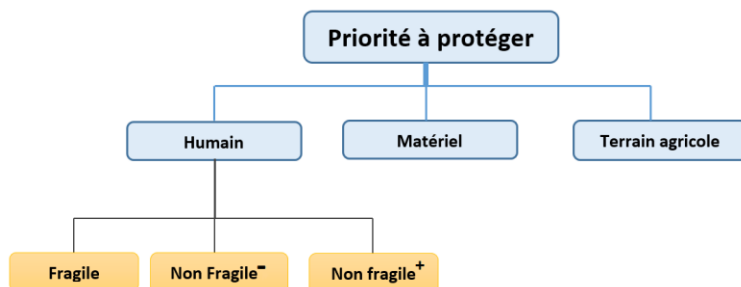


Figure 3-9- Deuxième niveau de hiérarchie dans l'analyse pour le critère humain

Le matériel qui se trouve aussi en second niveau peut avoir comme critère l'importance, la nécessité de l'élément et ainsi le temps nécessaire pour son remplacement.

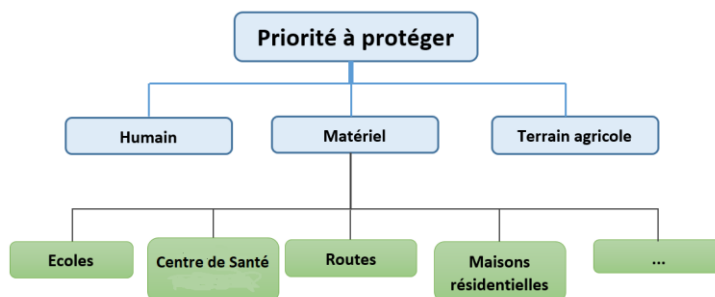


Figure 3-10-Deuxième niveau pour tous les éléments du premier niveau

Des éléments importants comme un hôpital ou des maisons résidentielles qui sont une nécessité et dont leur reconstruction ou leur remplacement peut prendre beaucoup de temps augmentent la vulnérabilité. Dans un territoire donné plus ces éléments sont importants en nombre plus la vulnérabilité augmente (Figure 3-10).

Il faut surtout préciser que l'importance d'un élément dans une région dépend de la région et du contexte. Un centre de santé peut être considéré moins important qu'une maison résidentielle. Dans certaines zones rurales d'Haïti, les habitants privilégient les soins ancestraux aux soins donnés dans les hôpitaux ou les centres de santé.

Les éléments présents dans un même niveau hiérarchique dans la méthodologie multicritère sont comparés deux à deux en se basant sur le tableau d'importance de Saaty (Tableau 3-5).

Tableau 3-5- Degré d'importance dans les comparaisons par paire

Degré d'importance	Définition d'importance	Explication
1	Même importance	Deux enjeux contribuent également à l'objectif.
3	Modérément plus important	L'expérience et le jugement favorisent légèrement une activité plutôt qu'une autre.
5	Plus important	L'expérience et le jugement favorisent fortement une activité plutôt qu'une autre.
7	Beaucoup plus important	Une activité est favorisée très fortement par rapport à une autre, sa dominance se manifestant en pratique.
9	Extrêmement plus important	Les preuves favorisant une activité plutôt qu'une autre sont du plus haut ordre d'affirmation possible.
2,4,6,8	Valeurs entre deux appréciations voisines	Parfois, il faut interpoler un jugement de compromis numériquement parce qu'il n'y a pas de bon mot pour le décrire.
Degré d'importance	Définition d'importance	Explication
Réciproques de ci-dessus	1/3 ; 1/5 ; 1/7 ; 1/9 ; 1/2 ; 1/4 ; 1/6 ; 1/8	Une comparaison mandatée en choisissant l'élément le plus petit comme unité pour estimer le plus grand comme un multiple de cette unité.
Rationnels	Ratios résultant de l'échelle	Si la cohérence devait être forcée en obtenant n valeurs numériques pour couvrir la matrice.
1.1 - 1.9	Pour les activités liées	Lorsque les éléments sont proches et presque indiscernables ; modéré est 1,3 et extrême est 1,9.

Source : (Saaty, 1980)

L'ensemble des comparaisons est résumé dans une matrice carrée dont l'ordre est le nombre d'éléments comparés.

Tableau 3-6- Représentation sous forme de matrice de comparaison de paires d'éléments

Eléments	E1	E2	E3	.....	En
E1	E11	E12	E13	.....	E1n
E2	E21	E22	E23	.....	E2n
E3	E31	E32	E33	.....	E3n
.....					
En	En1	En2	En3	.....	Enn

Dans cette matrice (Tableau 3-6) chaque cellule de jugement contient une valeur qui représente la dominance d'un élément de la colonne de gauche sur un élément de la ligne du haut.

Les cellules reflètent les critères préétablis pour faire les comparaisons. Dans le premier niveau de hiérarchisation, elles répondent à la question « quel est l'élément à protéger en priorité ». Dans le deuxième niveau de hiérarchisation, si le matériel est considéré la question serait différente « Quel est l'élément difficilement remplaçable et qui constitue une nécessité ». Les comparaisons entre élément sont réalisées en utilisant une échelle de nombre allant de 1 à 9 (Tableau 3-6). La comparaison des différents éléments obéit à certaines lois, comme par exemple tous les éléments se trouvant sur la diagonale sont égaux à l'unité. Une loi qui est plutôt logique car un élément sur la diagonale signifie qu'on compare celui-ci avec lui-même. Pour tout élément dans la matrice, exception faite de la diagonale, correspond une réciproque et la valeur attribuée à cette réciproque correspond en fait, à l'inverse de la valeur de l'élément (Si $E_{12} = 5$ alors $E_{21} = 1/5$). Pour les trois éléments de l'exemple les différentes comparaisons peuvent se présenter comme suit :

Tableau 3-7 - Les différentes comparaisons des éléments

Eléments		Poids	Explication
Terrains	Terrains	1	Même importance
Matériels	Terrains	3	Modérément plus important car le besoin est immédiat (Bâtiment)
Humains	Terrains	5	Plus important
Matériels	Matériels	1	Même importance
Humains	Matériels	5	Plus important
Humains	Humains	1	Même importance

Les valeurs des différentes comparaisons ainsi que leurs réciproques sont résumées dans la matrice de Saaty (Tableau 3-8).

Tableau 3-8 - Premier niveau de calcul avec les ordres de priorités

.	Terrains	Matériels	Humains
Terrains	1	1/3	1/5
Matériels	3	1	1/5
Humains	5	5	1

La matrice est ensuite complétée par deux nouveaux éléments W_i et T_i qui constituent les poids pour chaque élément.

$$T_i = \frac{W_i}{\sum W} \quad (3.11)$$

T_i représente le poids des critères ramené à l'intervalle [0 1]. Il est obtenu à partir des valeurs de W_i dont la formule est :

$$W_i = \left(\prod_{j=1}^n E_{ij} \right)^{1/n} \quad (3.12)$$

Et on obtient la matrice finale avec les diverses pondérations des différents éléments comparés (Tableau 3-9).

Tableau 3-9 - Matrice avec les diverses pondérations

Eléments	E ₁	E ₂	E ₃	.....	E _n	W _i	T _i
E ₁	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	.....	E _{1n}	W ₁	T ₁
E ₂	E ₂₁	E ₂₂	E ₂₃	.....	E _{2n}	W ₂	T ₂
E ₃	E ₃₁	E ₃₂	E ₃₃	.....	E _{3n}	W ₃	T ₃
.....	.....	.....	.....	.....	.....	W _{...}	T _{...}
E _n	E _{n1}	E _{n2}	E _{n3}	.....	E _{nn}	W _n	T _n
Total						ΣW _i	ΣT _i

Et en considérant l'exemple précédent la matrice finale se présente comme suit et les éléments de la dernière colonne seront les coefficients dans le calcul de la vulnérabilité.

Tableau 3-10- Matrice finale de Saaty pour l'exemple précédent

Eléments	Terrains	Matériels	Humains	W _i	T _i
Terrains	1	1/3	1/5	0.41	0.10
Matériels	3	1	1/3	1.00	0.26
Humains	5	3	1	2.47	0.64
Total				3.87	1.00

Les résultats des différentes comparaisons sont donnés sur un échelle de 0 à 1 selon le degré d'importance ou la priorité établie en début de calcul (Figure 3-11).

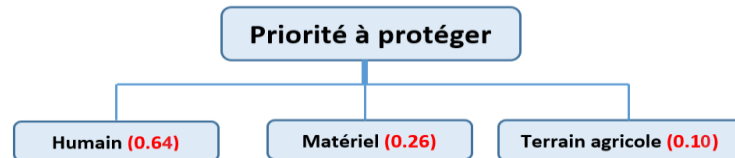


Figure 3-11-Représentation du résultat final de la méthode de Saaty

La méthode multicritère de Saaty donne des éléments de décision à chaque niveau hiérarchique et aussi une décision globale. Dans le calcul de la vulnérabilité, le résultat serait la vulnérabilité à chaque niveau et aussi la vulnérabilité globale. Les expériences ont montré que chaque groupe d'éléments considérés peut être concentré dans des espaces précis d'un même territoire. La concentration d'un groupe d'éléments renseigne sur la vulnérabilité de ce groupe d'éléments et dans la majorité des cas les groupes d'éléments ne se trouvent pas concentrés au même endroit. Ce qui a pour conséquence des cartes de vulnérabilité différentes pour chaque groupe d'éléments. Lorsque les cartes de vulnérabilité très différentes les unes des autres, la carte de vulnérabilité globale n'arrive pas représenter correctement la part de chaque groupe d'éléments (Figure 3-12). La meilleure option serait de rester avec les cartes de vulnérabilité de chaque groupe d'éléments.

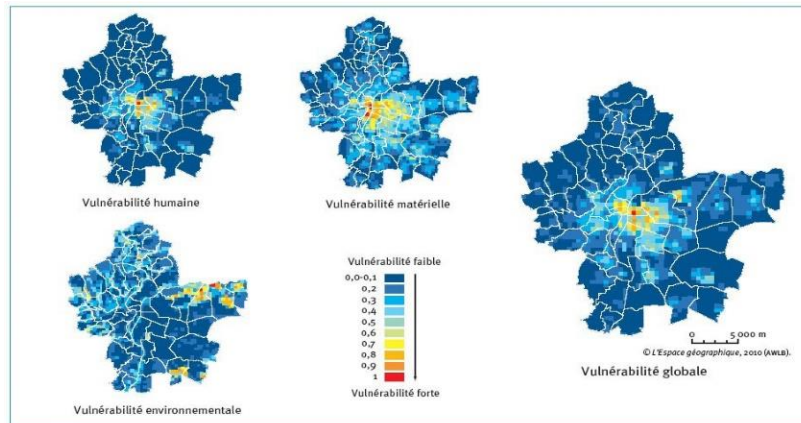


Figure 3-12-Vulnérabilité globale du Grand Lyon (Florent et ali., 2010)

3.2 Cartographie du risque d'inondation

Comme précisé précédemment, cette étude a été orientée vers la cartographie pour représenter les concepts aléa, risque et vulnérabilité. Cette partie de l'étude fait l'inventaire de toutes les méthodes qui existent et choisit la méthode, la mieux adaptée pour représenter les différents concepts selon le contexte de l'étude.

3.2.1 L'approche hydrogéomorphologique

La méthode hydrogéomorphologique de cartographie des risques d'inondation a vu le jour avec l'essor de la géomorphologie fluviale. Cette méthode fait aussi appel à une analyse de photographies aériennes en stéréoscopie, et à des enquêtes de terrain qui permettent la vérification de données aériennes (Masson et al., 1996). Cette méthode est surtout utilisée pour la prévision et la prévention de l'aléa inondation. Cette méthode utilise l'observation des phénomènes de dépôts et d'érosions qui relèvent de la dynamique de tous les cours d'eau (Knighton, 1996 ; Bravard et Petit, 1997 ; Robert, 2003). En effet, les cours d'eau transportent toujours une quantité de sédiments et ces sédiments sont arrachés quelque part ce qui provoque l'érosion. Les matières érodées sont déposées ailleurs, dans ce cas-ci on parle de dépôt. Cette méthode se base aussi sur des phénomènes antérieurs mais qui ont une certaine probabilité de se reproduire. Comme par exemple, le dépôt successif d'alluvions résulte du passage plus ou moins fréquent de crues de différentes ampleurs. Ces différents dépôts contribuent à la formation d'une plaine alluviale car les inondations laissent en place des dépôts de débordements composés de sédiments relativement fins. La combinaison de nouvelles formes causées par les érosions et les dépôts forme des unités spatiales homogènes qui peuvent facilement être observées (Lelievre et al, 2010). Ces unités ont été façonnées par l'eau qui s'est écoulée dans le passé et marquent les limites d'une crue prochaine (Ballais et al. 2005). Plus spécifiquement, la cartographie hydrogéomorphologique consiste à délimiter trois unités morphologiques de la plaine alluviale : les lits mineur, moyen et majeur. À chacune des unités morphologiques peut être associée une fréquence de l'aléa, qui peut être rare, fréquente ou exceptionnelle (Lelievre et al, 2010).

La mise en place des cartes hydrogéomorphologiques du risque inondation passe par plusieurs étapes (Lelievre et al., 2010). La première étape est subdivisée elle-même en plusieurs sous-étapes. Elle commence par l'analyse de la morphologie de la plaine alluviale et les limites des crues historiques. Cette analyse permet entre autres une répartition spatiale selon l'intensité de l'aléa qui est possible grâce aux traces morphologiques et sédimentologiques. Ensuite vient l'analyse stéréoscopique des photographies aériennes et les données de terrain qui permettent de tracer la limite des différents lits de la rivière (lit mineur, lit moyen et lit majeur). Une carte d'aléa inondabilité est issue de cette première étape. Elle comprend donc les limites des unités hydrogéomorphologiques, la ligne de la crue historique et les éléments morphologiques

à incidences hydrauliques (anciens méandres, dépressions, chenaux de crue, bras mort, cône alluvial).

La seconde étape consiste à identifier et à localiser les différents aménagements (digues, barrages, ponts) sur le cours d'eau car selon Thorne et Ali (1998), les activités anthropiques peuvent modifier de manière considérable la nature et l'intensité des réponses des systèmes fluviaux. Cette deuxième étape intègre les effets de aménagements et prend donc en compte les facteurs aggravants dans la cartographie.

La troisième étape consiste à identifier les différents enjeux dont la vulnérabilité croisée avec l'aléa mène à l'évaluation du risque. Dans la quatrième étape le risque lui-même est analysé. La définition classique est le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité. L'une des limites de l'approche hydrogéomorphologique est la représentation des zones urbanisées car la délimitation des lits mineur moyen et majeur n'est pas évidente lorsque le territoire est fortement aménagé.

3.2.2 L'approche télédétection

Tout comme les autres outils de création de cartes, la télédétection utilise différents outils pour caractériser l'aléa inondation pour ensuite le croiser avec la vulnérabilité. Parmi ces outils on peut citer :

1. Les capteurs satellitaires opérant dans les micro-ondes passives

La terre et l'atmosphère émettent naturellement des micro-ondes. Ces ondes sont facilement interceptées par des capteurs de micro-ondes passives. Ces ondes doivent être comprises entre 1GHz et 100 GHz (hyperfréquence). Le grand avantage de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir des images même en conditions nuageuses (Smith, 1997) car les radiations micro-ondes sont peu sensibles à la diffusion atmosphérique. Ces capteurs ont une faible résolution spatiale et les radiomètres doivent donc intégrer les émissions d'une large zone avant de pouvoir enregistrer un signal ce qui en fait leur limite. Leur précision est fortement réduite quand il s'agit d'enregistrer des phénomènes locaux (Matgen et al., 2011). Cette limitation peut aussi être un avantage car couplés avec la résolution temporelle, elles permettent de réaliser la détection et les suivis sur des grands territoires.

2. La photographie aérienne

Contrairement aux capteurs de micro-ondes passives, la photographie aérienne n'a pas une bonne résolution temporelle quand il s'agit de couvrir une grande superficie (Mallinis et al., 2011). L'atout majeur de la photographie aérienne, c'est qu'elle a une haute résolution spatiale, elle constitue une bonne source de données pour la cartographie de l'aléa inondation. Il est aussi impossible de faire des survols des zones inondées quand les conditions météorologiques l'en empêchent. Il n'est pas possible non plus d'avoir des images en ciel nuageux ou quand il y a une couverture végétale dense.

3. Les capteurs optiques satellitaires

Les capteurs satellitaires sont beaucoup moins coûteux que les photographies aériennes ce qui facilite l'accès aux données satellitaires pour la cartographie du risque d'inondation (Brivio et al., 2002). Ce type de capteur a aussi une très haute résolution spatiale qui permet une identification précise des limites d'inondation. Ces capteurs opèrent dans les bandes du visible jusqu'à l'infrarouge.

4. Les satellites radar à synthèse d'ouverture (RSO)

Ce sont des capteurs qui acquièrent des images de la surface terrestre même en présence de nuages, ils fonctionnent de jour comme de nuit (Bonn et al., 1996). Ces capteurs permettent d'avoir des informations dans les différentes phases des crues (Evans et al., 2010). Ils opèrent dans les hyperfréquences entre 1GHz et 40GHz.

3.2.3 L'approche « relevé de terrain »

Les relevés de terrain sont considérés comme les données les plus faciles à acquérir mais certaines fois l'acquisition de données nécessite beaucoup de travail de terrain. Après une inondation, un simple récepteur GPS ou une station totale peut permettre d'avoir des points qui délimitent la région inondée à condition de parcourir toute la zone à la recherche de laisses de crues ce qui peut prendre beaucoup de temps et dépend aussi de l'accessibilité du terrain. Néanmoins ces données ne permettent pas la caractérisation de l'aléa inondation et ne peuvent être adaptées à la gestion de crise.

3.2.4 L'approche « historique »

Cette approche historique des catastrophes existe depuis l'antiquité. Les données historiques, quand elles sont disponibles, permettent une bonne appréciation des situations de risques naturels. Des événements d'intensités assez élevés sont dans la plupart des cas éloignés dans le temps de plusieurs années voire de plusieurs siècles dans le cas de séismes.

L'approche historique consiste à rassembler des informations sur les événements passés. Ces informations sont exploitées dans le but de produire des cartes de risque mais ne s'y limitent pas. Elle est aussi importante face à une population oublieuse car la révélation fidèle de son existence permet de faire accepter des mesures parfois contraignantes.

3.2.5 L'approche « Modélisation Hydraulique »

Les approches de cartographie de risque comme l'approche historique ou encore l'approche par les relevés de terrain ne donnent pas tous les paramètres pour la caractérisation de l'aléa inondation. Ces paramètres étant la profondeur d'eau, la vitesse d'écoulement et dans beaucoup de cas la durée de submersion pour des inondations causées par débordement de crue. Ces approches, comme précisé plus haut, délimitent d'une manière ou d'une autre l'étendue potentiellement inondable. La modélisation est un outil mathématique permettant de combler ce manque. Les modèles hydrauliques

sont une représentation schématique d'un système réel et complexe qui nécessite la compréhension et l'intégration de chaque processus du cycle de l'eau à l'aide de plusieurs données (Estupina, Borrell, 2004). Tout cela peut représenter beaucoup de données, qu'il peut parfois être difficile et coûteux d'obtenir à cause d'un manque inéluctable de stations de mesures, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain (Mason et al., 2012a; Matgen et al., 2007). En effet, la modélisation hydraulique permet de prédire par calcul l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques (la hauteur d'eau et les vitesses d'écoulement) à partir d'une connaissance du terrain et des conditions climatiques, intégrées à des modèles de calcul. Ces modèles peuvent être réalisés sur un canal ou une rivière. La modélisation est un outil utilisé pour la prévision des inondations. Les résultats de ces calculs sont traduits dans la majorité des cas en carte d'aléa ou de risque. De nos jours, beaucoup de logiciels ont été développés pour la modélisation hydraulique. Chacun d'entre eux sont basés sur des hypothèses qui vont avoir des conséquences sur le réalisme et la précision des résultats obtenus. Les modèles hydrauliques seront abordés un peu plus en détail dans le chapitre suivant.

3.3 Conclusion

L'objectif de l'étude comme il a été précisé dans le chapitre 2 est d'arriver à représenter l'aléa, la vulnérabilité et le risque. Ces représentations vont servir comme des outils d'aide à la décision pour les communautés. Représenter l'aléa inondation consiste à donner en tout point du domaine de l'étude les éléments qui caractérisent l'inondation soient les profondeurs d'eau, les vitesses d'écoulement et la durée de submersion. Une fois l'aléa obtenu le risque peut être calculé.

Parmi les méthodes de représentation de l'aléa développé ci-dessus, la modélisation hydraulique semble être la mieux adaptée pour représenter l'aléa inondation. Les chapitres suivants vont mettre l'accent sur la modélisation hydraulique pour la production de cartes d'aléa.

Chapitre 4 La modélisation hydraulique en 1D et 2D

4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, un inventaire de certaines méthodes qui permettent de caractériser l'aléa a été réalisé. La liste n'est pas exhaustive mais contient les méthodes les plus couramment utilisées. Parmi ces méthodes, on retrouve l'approche hydrogéomorphologie, l'approche historique, l'approche relevé de terrain, l'approche modélisation hydraulique. Ces approches qui ont été développées au fil du temps sont toutes importantes mais ne possèdent pas la même quantité de détails. Dans certains cas, une approche peut être utilisée pour valider une autre approche. Parmi toutes ces méthodes, la modélisation hydraulique est la méthode recommandée dans la caractérisation des écoulements des crues et des inondations (EU, 2007). Cette méthode est généralement accompagnée des méthodes de relevé de terrain et des méthodes historiques pour sa calibration. Le choix du type de modèle hydraulique à réaliser dépend de l'étude et du niveau de précision attendu dans les paramètres et de la rivière. Une présentation des différents modèles hydrauliques est réalisée dans la prochaine partie du document.

4.2 Les modèles numériques en hydraulique à surface libre

Un modèle est un système qui consiste à remplacer un autre système plus complexe en essayant de reproduire plus ou moins fidèlement les aspects ou comportement de l'original (Gonçalves, 2005). Il existe plusieurs types de modèles comme les modèles mathématiques, numériques, hydrauliques, et physiques (modèles réduits) appliqués à différents types de réalités. Tout comme les autres modèles, un modèle hydraulique est une représentation plus ou moins simplifiée de la réalité, plus précisément de la réalité des écoulements dans des canaux aménagés ou dans une rivière naturelle. Le modèle numérique produit des résultats (éléments de sortie) sur base d'éléments spécifiés par le modélisateur (éléments d'entrée : géométrie). De manière concrète, les éléments d'entrée peuvent être des débits et/ ou des niveaux d'eau, des données topographiques et des coefficients de calage (coefficient de Manning par exemple). Pour les éléments de sortie, les modèles hydrauliques permettent d'estimer en différents points d'un cours

d'eau (canal ou rivière), la distribution des profondeurs d'eau et des vitesses de l'écoulement.

Le cœur du modèle est formé essentiellement d'équations qui décrivent les différents types d'écoulement. Ces équations peuvent être de simples lois statistiques ou empiriques ou des équations différentielles beaucoup plus complexes reposant sur les lois de la mécanique des fluides. Il existe trois grands principaux modèles hydrauliques : les modèles unidimensionnels (1D), bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D), décrits ci-après.

4.2.1 Le Modèle Unidimensionnel (1D)

Le modèle unidimensionnel est utilisé surtout dans les canaux ou dans les rivières en considérant l'écoulement selon une direction préférentielle, l'axe du thalweg qui est la ligne reliant les points les plus bas dans chaque section de la rivière (Figure 4-1). On suppose une vitesse uniforme dans chaque section. Cette modélisation de l'écoulement est très bien adaptée pour la prévision des crues car les de calculs sont beaucoup plus rapides mais moins bien adaptée pour les plaines d'inondations car l'hypothèse de la vitesse uniforme sur la section n'est pas valable dans ce cas.

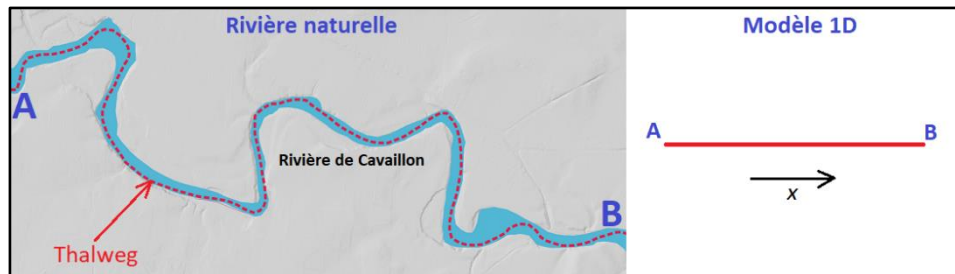


Figure 4-1- Représentation du modèle 1D

Le modèle 1D est utilisé dans ce travail pour des tronçon rivière plus ou moins linéaire où l'hypothèse de l'écoulement suivant un seul axe est acceptable. Trois logiciels de calcul pour écoulements 1D sont utilisés dans cette étude. Ils seront comparés et leur applicabilité à la rivière de Cavaillon sera discutée.

4.2.2 Le Modèle bidimensionnel (2D)

A une plus grande échelle, dans le cas de l'étude d'une inondation par exemple, les trois directions de la vitesse, localement, ne sont plus nécessaires. La direction verticale (w) est négligée par rapport aux deux autres u et v respectivement suivant x et y . Ce niveau de simplification provient de l'hypothèse d'une répartition hydrostatique des

pressions dans l'écoulement et permet de passer des équations de Navier – Stokes en 3D aux équations de Barré de Saint-Venant en 2D (Ghostine, 2009).

Un tronçon de la rivière de Cavaillon

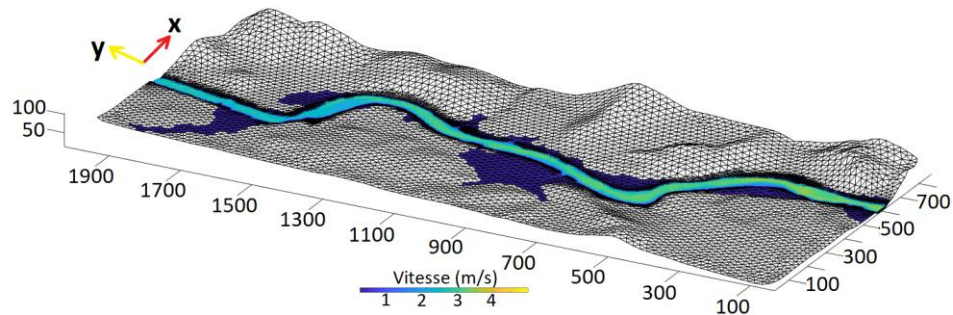


Figure 4-2- Modélisation en deux dimensions de la rivière de Cavaillon

Cette hypothèse de distribution hydrostatique des pressions est valable pour la plupart des écoulements à surface libre, et certainement dans le cas des écoulements traités dans ce travail. Ce modèle bidimensionnel sera particulièrement utile pour estimer la répartition du débit au niveau des diffluences et des confluences. Il permet aussi de représenter les plaines d'inondations où des écoulements de grandes différences de vitesses existent entre différentes zones pour un temps de calcul réduit par rapport au 3D. Ce modèle est aussi important pour la représentation d'une inondation en milieu urbain ou rural lorsqu'on a besoin d'une connaissance fine de la distribution 2D du champ de vitesse suivant le plan horizontal.

Les modèles 2D utilisés dans cette étude seront présentés et discutés dans les sections suivantes en même temps qu'une comparaison avec les résultats issus de modèles 1D.

4.2.3 Le modèle tridimensionnel (3D)

Ce modèle hydraulique est le plus complet et prend en considération la vitesse d'écoulement suivant les trois axes x , y et z . C'est un modèle complexe qui nécessite des grandes quantités de données en entrée et des temps de calcul très longs pour la résolution numérique. La modélisation 3D est privilégiée pour représenter des phénomènes très locaux de calculs d'écoulements complexes autour d'ouvrages hydrauliques, comme les piles de pont.

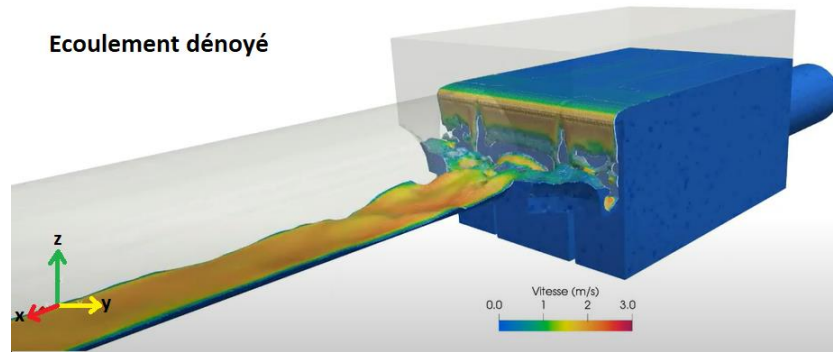


Figure 4-3 - Modélisation en 3D d'un déversoir d'orage (www.3deau.fr)

La représentation plus ou moins fine de ces écoulements est donnée par les équations de Navier – Stokes.

La mise en œuvre des modèles 3D requiert un nombre important de données qui sont en général inaccessibles dans les rivières réelles, sans compter le temps de calcul nécessaire qui rend impossibles les simulations détaillées à de telles échelles. Nous ne considérons donc pas ces modèles dans la présente étude.

4.3 Modélisation unidimensionnelle de la rivière de Cavaillon

Comme précisé précédemment la modélisation hydraulique en 3D n'est pas nécessaire à réaliser pour la rivière de Cavaillon qui ne possède pas vraiment de structure à analyser plus finement. Des modélisations unidimensionnelles ont été réalisées dans un premier temps. Une description sommaire des logiciels utilisés est donnée dans la section suivante.

4.3.1 Logiciels utilisés

Les codes de calcul utilisés pour cette étude sont *SV1D* et *Axeriv* pour la modélisation unidimensionnelle. Ce sont des codes de calcul développés au sein de l'équipe de recherche. Néanmoins, les résultats obtenus à partir des simulations avec ces codes sont comparés avec les résultats des calculs effectués avec le logiciel HecRas reconnu sur le marché. Ces outils sont présentés ci-après.

(a) Axeriv

Axeriv est un code de calcul d'axes hydrauliques dans les réseaux de canaux naturels et artificiels en écoulement permanent. Il a été développé par le laboratoire d'hydraulique de l'Université Catholique de Louvain (UCLouvain).

Le profil de la surface de l'eau est calculé entre deux sections comme il est montré ci-dessous en résolvant l'équation de Bernoulli entre ces deux sections (Figure 4-4). L'expression de l'équation de Bernoulli est écrite de la manière suivante :

$$h_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + J_{12} \quad (4.1)$$

Figure 4-4- Représentation de la ligne d'eau en écoulement graduellement varié dans un tronçon de canal

La perte de charge totale J_{12} peut être obtenue à partir de la moyenne des pertes de charges par unités de longueur au niveau des sections 1 et 2 multipliée par la distance Δs :

$$J_{12} = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \Delta s \quad (4.2)$$

En nous référant à la formule de Manning en écoulement uniforme, S_f peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (4.3)$$

La méthode EDM (Exchange discharge Method) implémentée dans les dernières versions de *Axeriv*, permet d'intégrer de façon correcte les coefficients de rugosité entre lit mineur et lit majeur mais elle n'est pas utilisée dans ce travail.

(b) SV1D

C'est un code de calcul hydraulique en une dimension (1D), développé à l'UCLouvain (Soares-Frazão, 2002) pour la simulation d'écoulements transitoires. Il utilise la forme conservative des équations de Saint-Venant.

$$\text{Forme vectorielle} \quad \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U) \quad (4.4)$$

Avec :

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix} ; \quad F(U) = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix} ; \quad S(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Tableau 4-1 – Termes de l'équation 4-5

U	Masse et quantité de mouvement du volume de contrôle
$F(U)$	Le flux de masse et de quantité de mouvement traversant les frontières du volume de contrôle
$S(U)$	Les termes sources
A	Aire mouillée de la section transversale
Q	Débit traversant la section
I_1	Moment statique de la section
I_2	Variation de largeur entre deux sections transversales
g	Accélération de la gravité
S_0	Pente de fond
S_f	Pente de la ligne d'énergie

Ces équations sont discrétisées par la méthode des volumes finis explicites. Le code de calcul est adapté pour les écoulements transitoires sévères avec chocs et discontinuités comme les ressauts hydrauliques par exemple. Le pas de temps Δt est conditionné par la condition de Courant puisque le schéma de résolution est explicite. La formulation discrétisée est donnée ci-dessous :

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(F_{i+\frac{1}{2}}^* - F_{i-\frac{1}{2}}^* \right) + S \Delta t \quad (4.6)$$

Dans cette équation, Δx représente la discrétisation spatiale (distance entre cellules de calcul). Les termes F représentent les flux de masse et de quantité de mouvement calculés au droit des interfaces entre les cellules de calculs. Ces flux sont calculés par la méthode de Pavie dans la présente étude (Soares-Frazão, 2002).

(c) HEC-RAS

HEC-RAS est un logiciel libre développé par l'USACE (US Army Corps of Engineers) pour la simulation d'écoulements uni et bidimensionnels, en écoulement permanent ou transitoire.

La version 1D pour écoulement permanent résout l'équation de Bernoulli d'une manière similaire à Axerix. Pour la simulation d'écoulements transitoires, une résolution des équations de Saint-Venant 1D (Hecras 6.2 Reference manual) par différences finies est adoptée, avec un schéma de type Preissmann (Liggett et Cunge, 1975) qui permet une résolution semi-implicite et donc des pas de temps de calcul généralement plus grands que le logiciel SV1D.

4.3.2 Modélisation d'un tronçon de la rivière de Cavaillon

Cette étude est réalisée sur un tronçon d'environ 20 kilomètres situé entre le déversoir de Dory en amont et la station hydrométrique de Grand Place en aval (Figure 4-5). Avant d'étudier en détail la totalité du tronçon concerné par l'étude, plusieurs petits tronçons sont étudiés séparément suivant leur complexité. Pour illustrer et analyser les capacités des modèles utilisés, un premier tronçon simple de 2.4 km environ a été choisi parce qu'il est plus ou moins linéaire pour répondre aux conditions des modèles 1D. Ce tronçon est constitué de sections transversales irrégulières car il s'agit d'une rivière naturelle. Le tronçon choisi n'est pas influencé par l'aval où le niveau de la mer peut varier de manière significative. L'influence de l'aval a été démontré dans une autre partie du document.

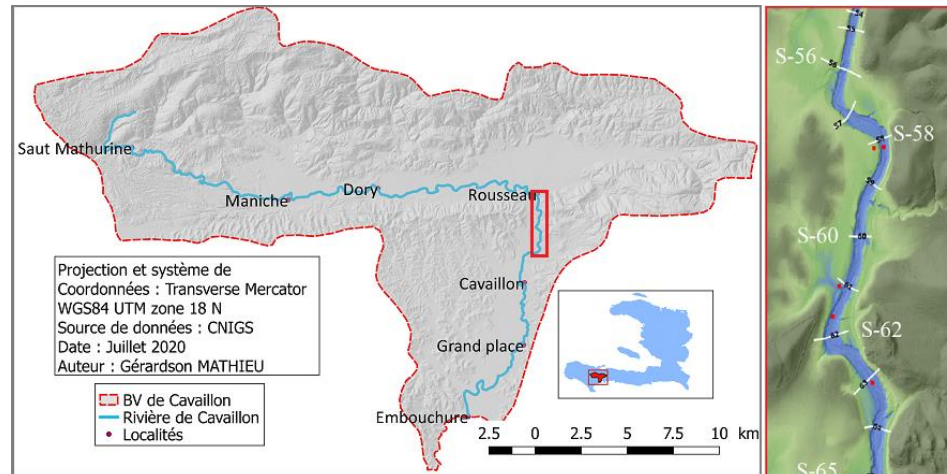


Figure 4-5- Le bassin versant et le tronçon étudié

La modélisation 1D pour le tronçon étudié a été réalisée à partir de deux codes de calculs développés à l'UCLouvain (*SV1D* et *Axeriv*).

Comme il a été précisé plus haut, la modélisation nécessite des données d'entrée comme : les sections transversales qui définissent la bathymétrie de la rivière, un coefficient de rugosité, un débit d'entrée et un niveau de sortie. Les sections transversales de la rivière ont été obtenues à l'aide d'un GPS différentiel. A la lumière de ces levés GPS, 92 sections transversales (une section transversale tous les 200 mètres environ) dans la portion de rivière sous étude ont été obtenues (Figure 4-7) (Joseph, 2019). Ces levés se limitaient uniquement au lit mineur de la rivière car le travail deviendrait fastidieux si on devait faire la relevée topographique de toute la zone

potentiellement inondable à partir du GPS. Avec cette méthode, il est possible d'avoir le vrai thalweg de la rivière, ce qui ne serait pas possible à l'aide d'un Modèle numérique de terrain ou en utilisant des photographies aériennes. Cette première acquisition de données est très importante mais insuffisante car le modèle doit permettre de couvrir toute la zone potentiellement inondable. Il devient alors nécessaire de prolonger les sections transversales jusqu'à la limite des zones potentiellement inondables. Les sections transversales sont prolongées en utilisant les données du Modèle Numérique de Terrain –MNT-, (Figure 4-6).

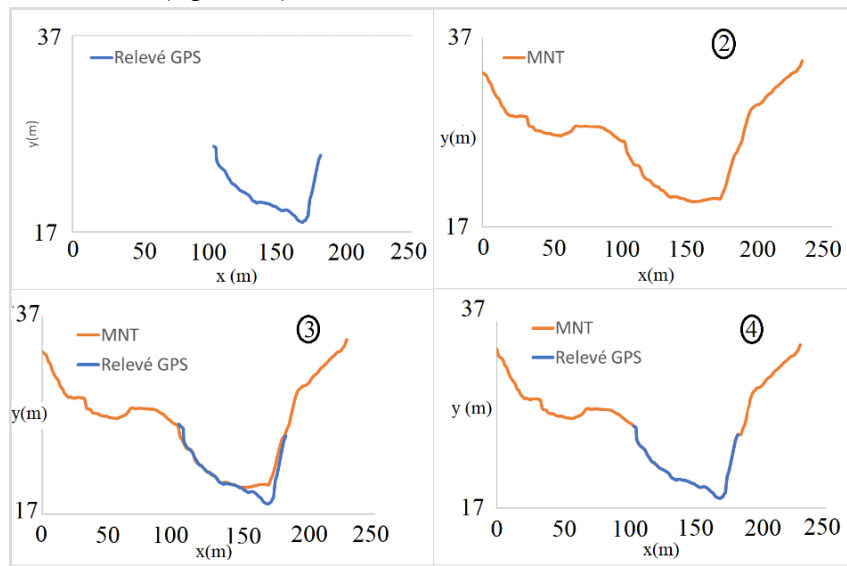


Figure 4-6 - Prolongation des sections transversales

Ce modèle numérique de terrain a été obtenu à partir de vol aérien sur tout le territoire national. Ces vols ont été organisés par IGN/France (Institut National de l'Information Géographique Forestière) en 2014. Ce modèle, ayant une précision de 1.5m, est disponible au Centre National de l'Information Géospatiale (CNIGS) en Haïti.

(a) Influence de l'aval

Pour obtenir une ligne d'eau caractérisant un écoulement dans une rivière ou dans un canal deux conditions sont nécessaires. La condition amont qui est généralement un débit et la condition aval qui est un niveau d'eau. Dans le cas d'un écoulement fluvial, l'aval peut avoir une influence sur une certaine longueur. Le niveau aval peut être celui de la marée si la limite de l'écoulement est proche de la mer.

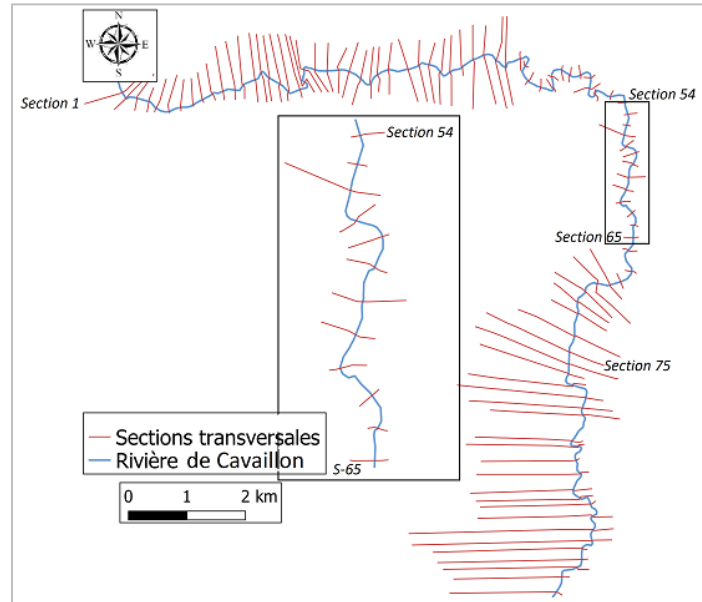


Figure 4-7 - Représentation des sections transversales

Dans le cas de l'étude, l'aval du tronçon choisi peut être influencée par les affluents car il est assez éloigné de l'embouchure pour subir une quelconque influence de la variation de la marée.

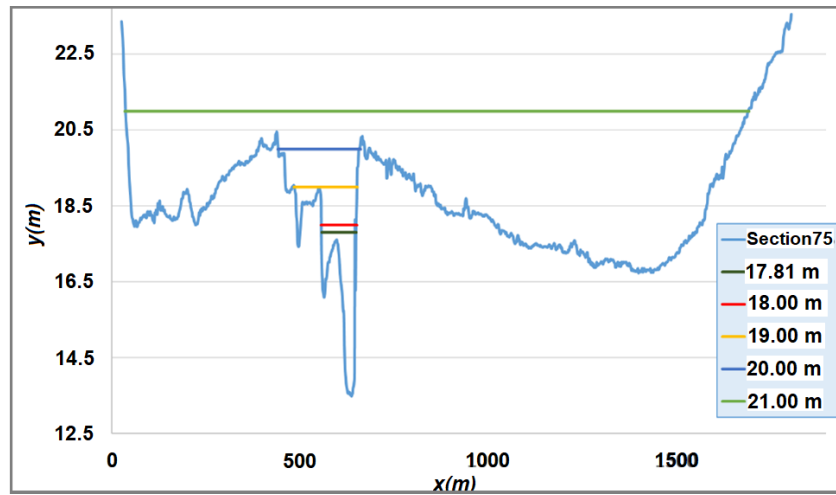


Figure 4-8– Variation du niveau d'eau dans la section 75

Cette non-influence de l'aval a été démontrée avec plusieurs simulations sur toute la zone étudiée en faisant varier progressivement le niveau d'eau en aval. L'objectif était d'augmenter de manière significative le niveau d'eau en aval et constater son influence sur le tronçon étudié. Le tronçon étudié dans cette première partie est celui qui a les sections 54 jusqu'à 65. Une section plus en aval a été choisie (section 75) et pour chaque simulation le niveau d'eau dans la section transversale est augmenté.

Plusieurs niveaux d'eau ont été choisis de façon graduelle partant de 17.81 mètres qui est le niveau d'eau pour un débit de $600 \text{ m}^3/\text{s}$, considéré comme maximum lors de l'ouragan Matthew en 2016 (Joseph, 2018), jusqu'à 21 mètres avec une augmentation d'un mètre à chaque fois (Figure 4-8). L'écoulement est considéré comme permanent avec un débit constant à l'entrée de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Les résultats ont montré qu'il n'y a pas de modification dans le tronçon choisi (54-65) pour les différentes valeurs de niveau dans la section 75 (Figure 4-9). On peut donc considérer la profondeur commune obtenue au droit de la section aval du tronçon étudié (la section 65) comme condition aux limites aval pour le tronçon 54-65.

Une fois le tronçon choisi, il faut aussi définir les autres paramètres de l'écoulement. Le coefficient de rugosité de la rivière a été estimé à $0.04 \text{ sm}^{-1/3}$ dans le lit majeur et $0.035 \text{ sm}^{-1/3}$ dans le lit mineur par la méthode Pebble Count (Joseph, 2019).

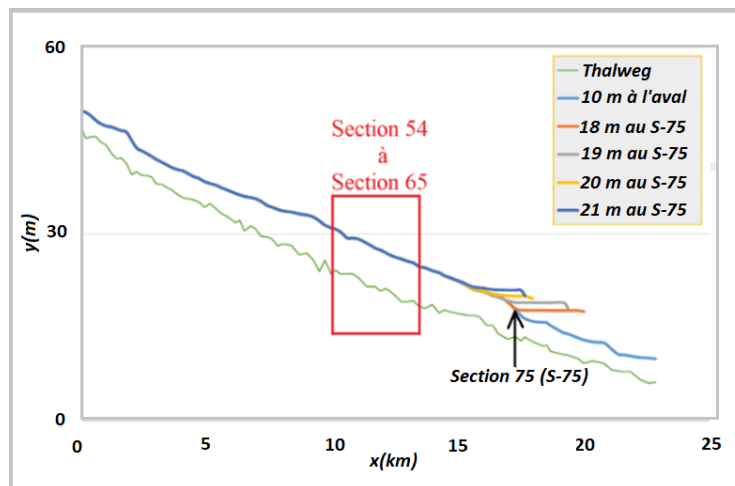


Figure 4-9— Non-influence de l'aval sur le tronçon étudié

Les coefficients de perte de charge par contraction et expansion sont respectivement 0.1 et 0.2. Dans cette première partie, l'écoulement est considéré comme permanent.

Le débit utilisé est le maximum qui a été obtenu dans les appareils de mesures à Dory avant leur destruction par la crue de 2016, soit la valeur de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (Joseph, 2019).

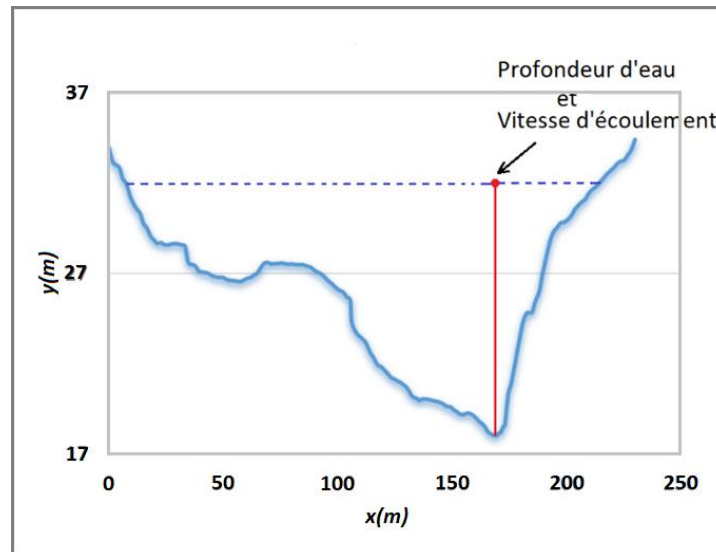


Figure 4-10- Résultats dans une section transversale

Les résultats obtenus avec le code de calcul *Axeriv* donnent dans toutes les sections transversales, les profondeurs d'eau et les vitesses dans l'axe de l'écoulement, ces résultats sont ensuite prolongés sur les autres parties des sections transversales (Figure 4-10). Ces données ont été matérialisées en ligne d'eau illustrée par la figure 4-11.

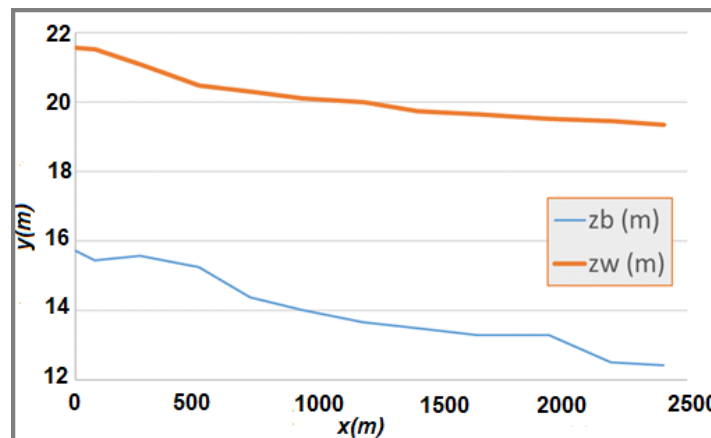


Figure 4-11- Représentation de la ligne d'eau obtenue à partir de la simulation

Pour une meilleure compréhension et une analyse approfondie de ces résultats, nous avons créé à partir de ceux-ci une surface raster dont la valeur des pixels représente la hauteur d'eau en différents points de la zone concernée. La méthodologie, développée par Joseph (2019), consiste à imposer dans un premier temps aux extrémités de chaque section la valeur du niveau d'eau calculée au droit du thalweg. Ces points forment une couche géométrique (shape en anglais) sur laquelle on peut appliquer les routines d'interpolation « interpolation par spline et création de couche raster » du logiciel QGIS pour créer la couche raster contenant le niveau d'eau du tronçon étudié. Une fois que cette couche de raster est créée, il suffit de soustraire le Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour avoir la valeur des différentes profondeurs d'eau sur toute la zone inondée. Les profondeurs d'eau obtenues constituent une première ébauche de carte d'aléa qui représente l'étendue de la zone inondable (Figure 4-12).

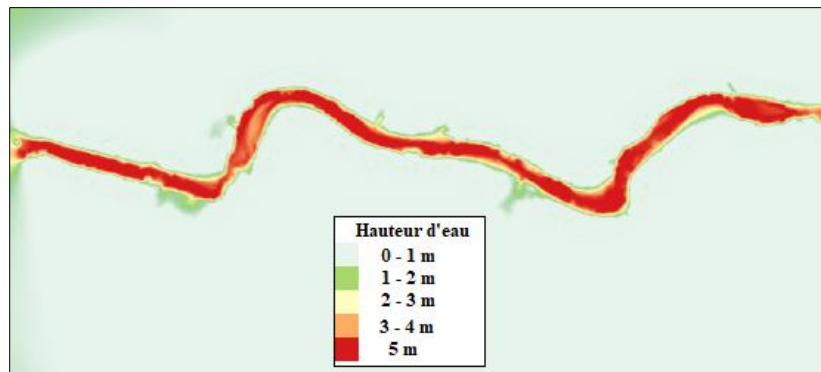


Figure 4-12- Représentation de la hauteur d'eau

Cette première représentation donne une estimation de la valeur de la profondeur d'eau sur l'ensemble de la zone étudiée, avec la couleur verte qui représente un niveau zéro (0) de l'eau, c'est-à-dire des zones où la cote du niveau du sol est supérieure ou égale à la cote du niveau d'eau. La hauteur d'eau augmente au fur et à mesure que l'on s'approche de la rivière pour atteindre une grandeur maximale qui est la hauteur d'eau au niveau du thalweg (Figure 4-10).

(b) Comparaison avec HEC-RAS

Une comparaison a été réalisée avec les résultats obtenus à partir du logiciel HEC-RAS. Le logiciel HEC-RAS a été utilisé dans les mêmes conditions, c'est-à-dire, les mêmes sections transversales, les mêmes coefficients de Manning (0.035 et $0.04 \text{ sm}^{-1/3}$), écoulement permanent et le même débit à l'entrée ($600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Les mêmes coefficients de contraction (0.1) et d'expansion (0.2) sont utilisés dans le code de calcul Axeriv. Les

données des différentes sections transversales ont été obtenues à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Les résultats sont présentés dans la figure 4-13. Il n'y a pas de grande différence entre le code de calcul Axeriv et le logiciel HEC-RAS. Il faut rappeler que pour des écoulements permanents les deux codes utilisent la relation de Bernoulli.

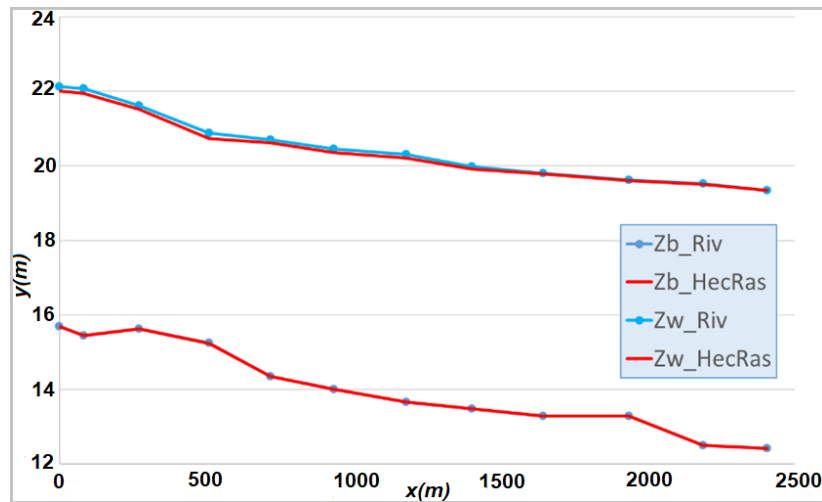


Figure 4-13– Comparaison HEC-RAS et Axeriv

4.3.3 Influence de l'interpolation des sections transversales en 1D

Les relevés des sections transversales des rivières naturelles au moyen des équipements topographiques traditionnels (Théodolite, niveau et GPS) sont très coûteux et consommateurs de temps et d'énergie. Généralement lors de la collecte de ces données, le technicien a souvent tendance à relever des sections transversales un peu éloignées les unes par rapport aux autres. Ce qui a pour conséquence la perte de beaucoup d'informations entre deux sections transversales, les changements au niveau de la morphologie, les changements de pente etc. Selon *Conner et al.* (2013) les sections transversales espacées d'au moins 2 fois la largeur moyenne du canal lissent la bathymétrie et suppriment les structures d'écoulement. Dans la majorité des cas, pour les besoins de la modélisation hydraulique, il est nécessaire de compléter les données de terrain en interpolant de nouvelles sections entre les sections transversales relevées sur le terrain.

Des sections transversales interpolées sont aussi nécessaires lorsque le changement de vitesse est trop important pour déterminer avec précision les pertes par contraction et d'expansion (variation de largeur d'une section transversale à une autre). L'interpolation va améliorer le calcul car en réduisant les différences entre sections consécutives on réduit les erreurs de lissage des résultats. Il faut cependant noter que l'interpolation ne peut pas rattraper des informations bathymétriques manquantes.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour interpoler des sections transversales. Il existe la méthode géométrique qui consiste à utiliser la géométrie des sections existantes pour tracer des sections interpolées. Une autre méthode qui est plutôt hydraulique tend à calculer ou à interpoler directement les variables hydrauliques qui caractérisent une section transversale comme l'aire mouillée, le périmètre mouillé, le rayon hydraulique ou, de manière directe la débitance ($AR^{2/3}$).

(a) Analyse comparative

Canal prismatique

Les deux méthodes ont été expérimentées pour un cas plus moins simple avant d'aborder le cas complexe des rivières naturelles. Les expériences ont été réalisées dans un canal prismatique ayant un rétrécissement local. Le canal fait 80 mètres de largeur et 10 mètres de hauteur dans le rétrécissement et 100 mètres de largeur ailleurs (Figure 4-14). Le débit est de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Les sections transversales sont espacées les unes des autres de 200 mètres.

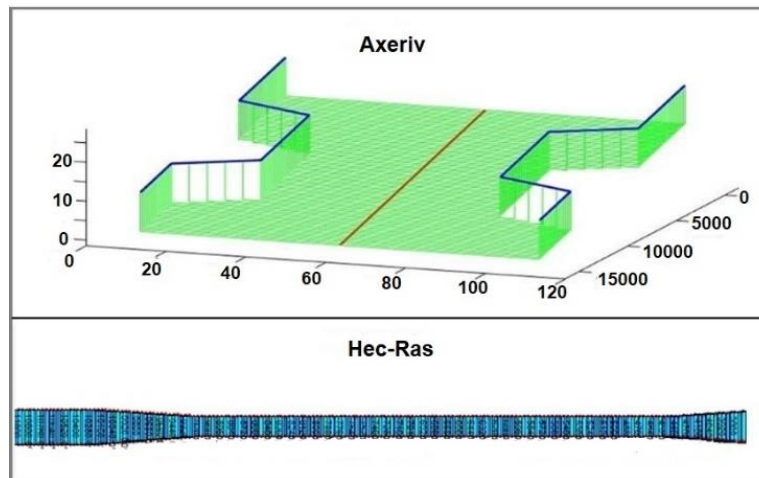


Figure 4-14. Représentation des sections transversales

Les deux logiciels ont été mis dans les mêmes conditions et les résultats sont présentés dans les figures 4.15 et 4.16. Les deux courbes se superposent parfaitement sur ces figures.

Cet écoulement est caractérisé par un débit constant de $600\text{m}^3/\text{s}$, avec un coefficient de Manning de 0.04

1.- Sans Interpolation

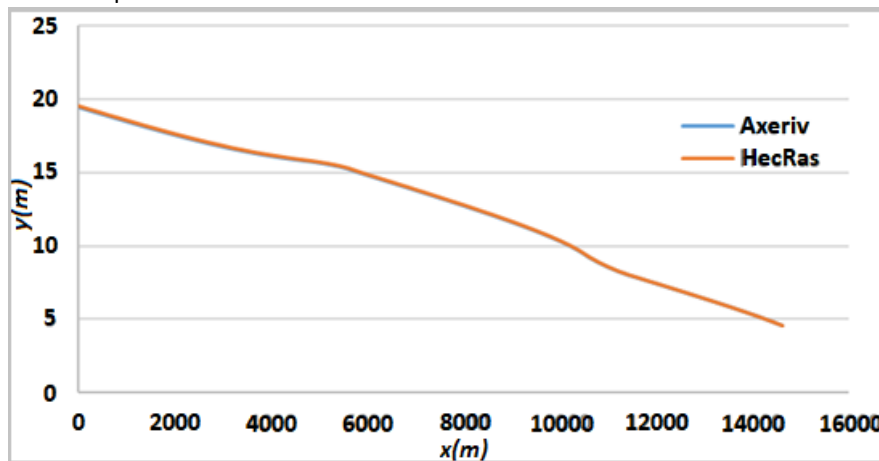


Figure 4-15- Comparaison des résultats Hec-Ras et Axeriv sans interpolation

2.- Avec interpolation

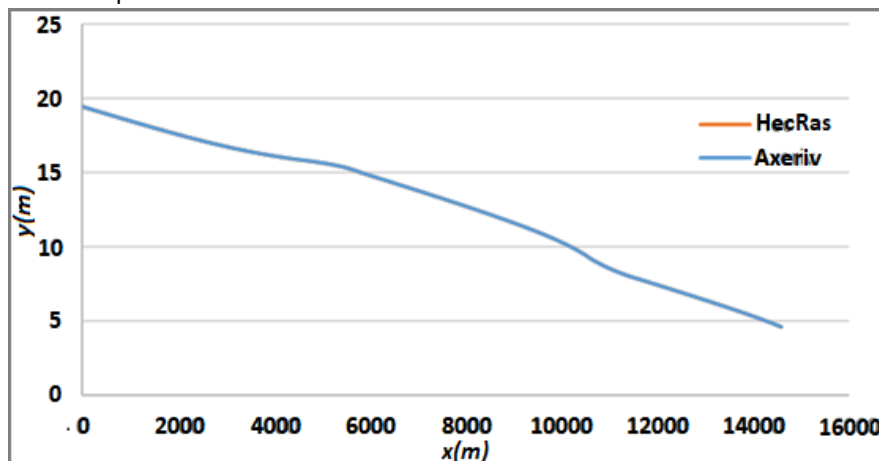


Figure 4-16- Comparaison des résultats Hec-Ras et Axeriv avec interpolation

Cinq sections transversales ont été interpolées entre deux sections dans les deux cas (HecRas et Axeriv) réduisant la distance entre sections de 200 à 40 mètres. Dans cette première expérience, les résultats restent inchangés, les deux lignes d'eau sont superposées. Il faut rappeler que HEC-RAS utilise l'interpolation géométrique qui consiste à créer d'autres sections à partir de la géométrie des sections déjà établies. Axeriv, par contre, utilise les caractéristiques hydrauliques des sections transversales déjà mises en place pour interpoler d'autres sections.

(b) Cas de la rivière naturelle

Dans cette partie du travail, trois modèles du tronçon 54-65 (Figure 4-17) ont été utilisés. Le premier modèle est réalisé avec les sections mesurées espacées de 200 mètres environ les unes des autres. Le deuxième modèle fait l'interpolation de 10 sections transversales entre les sections mesurées. Cette transformation, réalisée dans le code de calcul Axeriv, réduit considérablement la distance entre deux sections transversales de 200 à 20 mètres environ pour la plupart. Dans le troisième modèle, les sections interpolées dans le second modèle sont remplacées par les vraies sections obtenues à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de CNIGS.

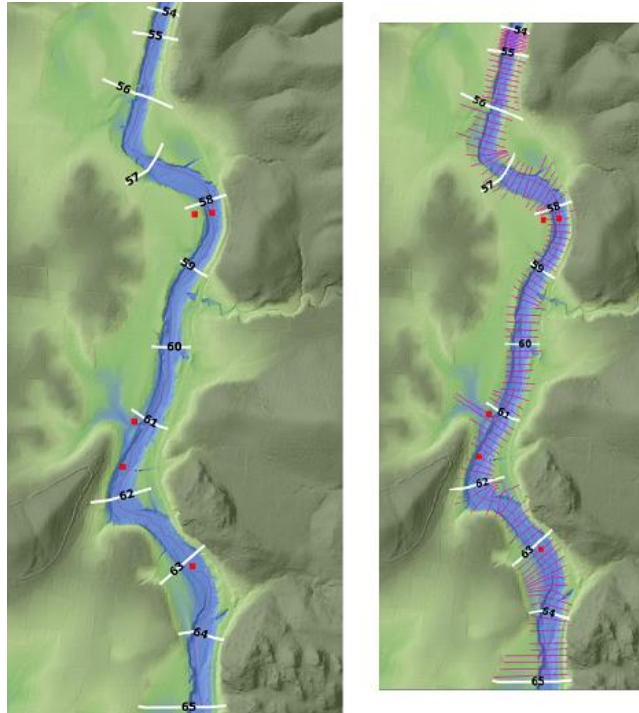


Figure 4-17- Interpolation des sections transversales en rivière naturelle

Cette dernière transformation est réalisée dans le but de démontrer que l'interpolation des sections transversales ne peut pas rattraper complètement les informations bathymétriques perdues. Les trois modèles ont été mis dans les mêmes conditions : même débit à l'entrée, même niveau d'eau à la sortie et même coefficient de Manning.

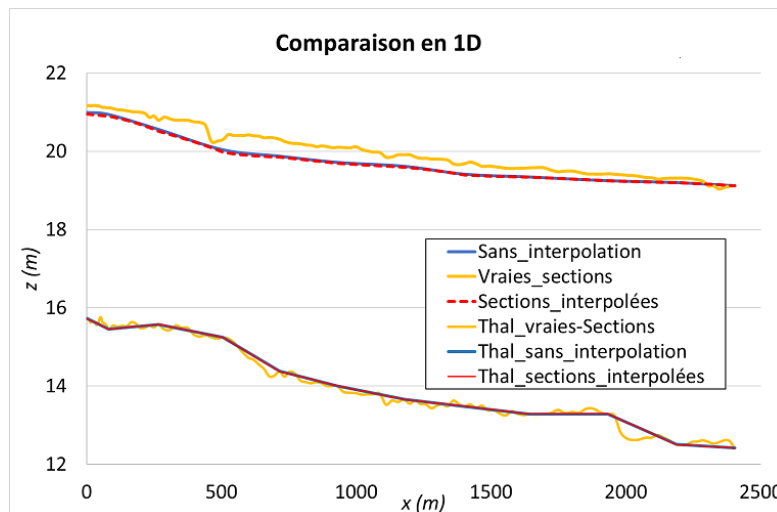


Figure 4-18– Résultats de l'interpolation des sections avec Axeriv

Il n'y a pas de différence significative entre le modèle sans interpolation et le modèle avec les sections interpolées. Par contre, les résultats du dernier modèle avec les vraies sections transversales qui remplacent celles qui ont été interpolées sont différents des deux autres modèles. Les sections interpolées sont pour la plupart des copies conformes des sections réelles. Dans ce cas, chaque tronçon contenant des sections interpolées se comporte comme le cas d'un canal prismatique (Figure 4-15, 4-16). La ligne d'eau est restée lisse comme avant car il n'y pas de nouvelles données dans le modèle. Les vraies sections transversales, par contre, ajoutent des informations supplémentaires. A 500 mètres de l'amont (Figure 4-18), on peut remarquer un fort changement de pente de la ligne d'eau qui peut être dû à un changement de pente de fond ou un changement de géométrie. L'augmentation du niveau d'eau dans les sections réelles est due au fait qu'en multipliant le nombre de sections irrégulières, on augmente les pertes de charge par des élargissements et rétrécissements successifs.

4.3.4 Conclusion de la modélisation 1D

Le modèle à une dimension possède beaucoup d'avantages comme sa mise en place surtout en utilisant les modèles numériques de terrain – du moins pour le lit majeur –

pour obtenir les sections transversales dont l'assemblage constitue le maillage du modèle. Un autre avantage est le temps de calcul qui est très court même pour les modèles les plus robustes avec des maillages extrêmement fins où les sections transversales sont très rapprochées les unes des autres. Le processus devient plus ardu, par contre, si les sections transversales proviennent des relevés topographiques manuels. Dans le souci d'avoir la vraie bathymétrie de la rivière pour un niveau de précision plus poussée, il est nécessaire certaines fois de procéder à des relevés manuels ce qui peut prendre beaucoup de temps selon la surface à couvrir. Dans un second temps, il est nécessaire de bien placer les sections transversales pour ne pas manquer de données importantes comme un méandre, un changement de géométrie ou un changement de pente. Dans ce cas, l'ingénieur responsable doit être très prudent pour essayer de refléter de manière plus ou moins fidèle la réalité du problème.

La modélisation unidimensionnelle est néanmoins limitée dans la représentation spatiale de l'écoulement, car les résultats, profondeur d'eau et vitesse d'écoulement sont moyennés sur la section transversale, ce qui conduit à un même niveau d'eau qui est rarement le cas surtout dans les inondations. L'autre conséquence directe c'est une répartition uniforme irréaliste des vitesses d'écoulement au niveau de la section transversale. Face à ces manquements la modélisation bidimensionnelle est préférée. Cette modélisation est présentée dans le chapitre suivant.

4.4 Modélisation bidimensionnelle

Les codes de calcul unidimensionnels sont aujourd'hui largement utilisés en raison du faible besoin en données topographiques ainsi que du temps de calcul qui est en général assez court comme précisé dans les sections précédentes. Dans cette méthode, à cause des hypothèses simplificatrices, seule la composante de vitesse moyenne dans la direction de l'axe de l'écoulement est considérée. Ceci a pour conséquence une représentation simpliste des écoulements dans les rivières puisque les effets bidimensionnels sont ignorés.

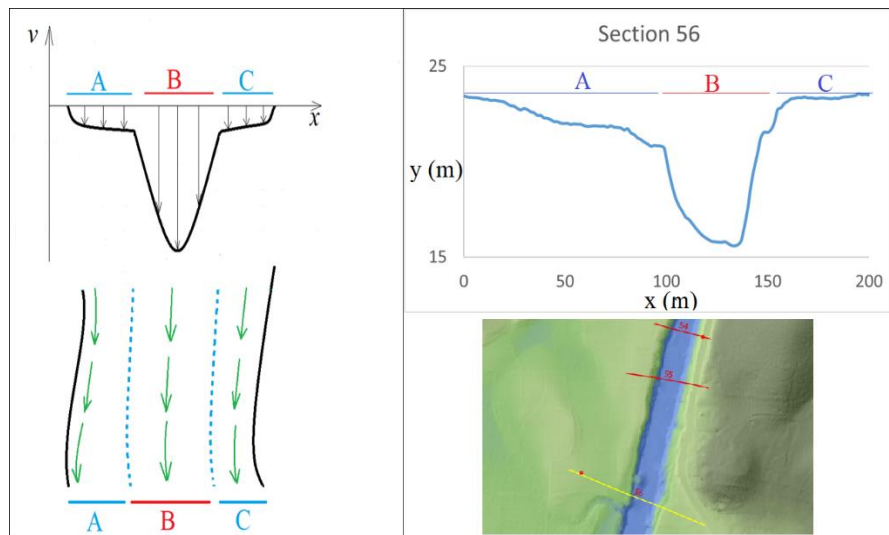


Figure 4-19 - Distribution de la vitesse d'écoulement dans une section transversale

D'autre part, en présence d'un lit majeur assez large, l'hypothèse de départ est de considérer une vitesse uniforme sur toute la largeur de l'écoulement. Or dans ce cas il y a moins de frottement dans le lit mineur qui est plus profond et en général moins végétalisé, ce qui conduit à une différence entre la pente de la ligne d'énergie dans les lits mineur et majeur (Figure 4-19). Avec des lignes d'énergie différentes, les deux écoulements sont différents et créent automatiquement une perte de charge supplémentaire dans leur ligne de séparation. Ensuite, certaines zones mortes dans le lit majeur peuvent se comporter, pour certains débits, comme une zone de recirculation causée par la viscosité de l'eau et de la turbulence de l'écoulement.

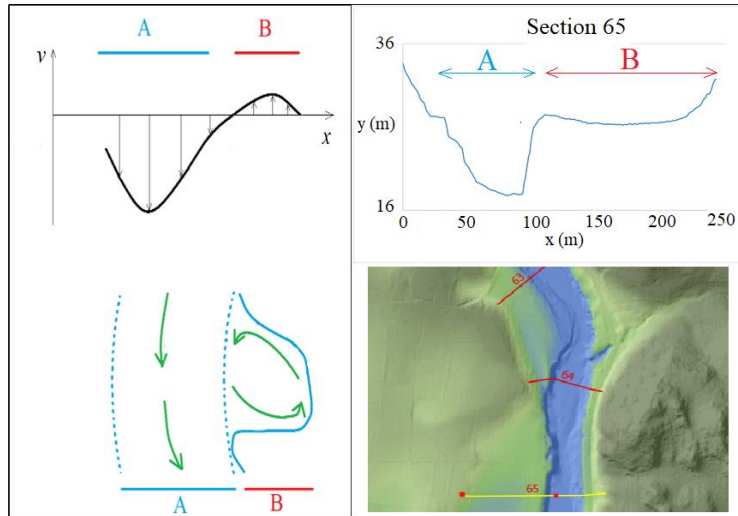


Figure 4-20 - Présence de zone morte dans le lit majeur

Ces phénomènes provoquent des échanges latéraux de quantité de mouvement entre l'eau circulant dans le lit mineur et le plan d'eau du lit majeur. La vitesse d'écoulement dans la zone de recirculation peut être considérée comme nulle en écoulement permanent ce qui fait de la poche topographique un élément passif et ne participe pas réellement à l'écoulement (Figure 4-20).

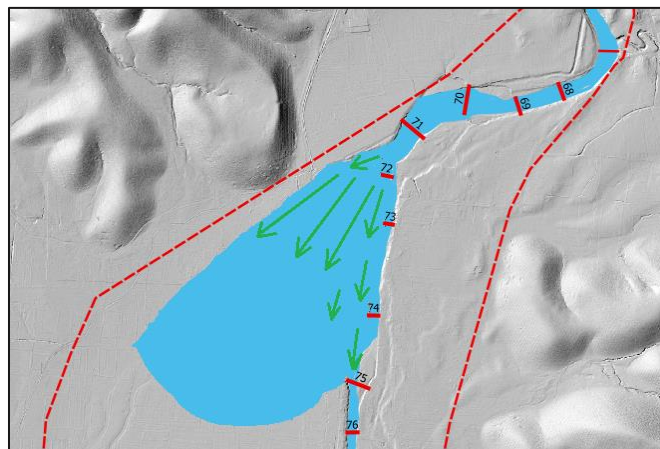


Figure 4-21- Débordement de la rivière

Enfin, les inondations par débordement de crue se produisent quand la capacité du lit mineur est dépassée et que l'eau envahit le lit majeur. Deux situations peuvent se présenter : La rivière qui inonde les plaines d'inondation en passant par des points faibles qui sont des points topographiquement bas situés sur les rives ; Toute la rivière peut laisser son lit pour aller envahir les plaines inondables. Dans un cas comme dans l'autre, la considération de la vitesse d'écoulement dans une seule direction n'est plus valable (Figure 4-21).

Plusieurs études ont été réalisées pour pallier ces difficultés de la modélisation 1D, comme c'est le cas de la modélisation 1D à casiers pour les plaines d'inondation, ou encore la méthode EDM (Bousmar, 2002) développé à l'UCLouvain pour les échanges entre lits mineur et majeur (Joseph, 2019). La frontière entre les deux cas est assez délicate, car il faudra toujours se demander pour quelle plage de débit les zones mortes peuvent être considérées comme des éléments actifs dans l'écoulement. Dans les deux cas, ces modélisations nécessitent l'expertise d'un ingénieur hydraulicien modélisateur sur place. Enfin, dans le cas d'écoulements plus complexes lorsqu'on a besoin d'une connaissance fine de la distribution de vitesses pour lesquels les hypothèses des codes unidimensionnels sont trop simplificatrices, l'usage de code calcul bidimensionnel est privilégié.

Dans le code bidimensionnel, les vitesses d'écoulement selon la direction verticale sont négligées et on priorise les directions u et v .

4.4.1 Choix du maillage

La discrétisation en deux dimensions peut être obtenue en définissant des points ou des volumes (cellules) dans le plan horizontal (x, y). Ces cellules peuvent être triangulaires ou quadrangulaires. L'arrangement formé par ces cellules prend le nom de maillage. Le maillage forme la bathymétrie de toute la zone d'écoulement (Figure 4-23).

Le terme maillage peut être encore utilisé pour désigner la disposition des points de discrétisation de l'espace. Les maillages sont généralement obtenus à partir des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Comme le niveau du fond de chaque maille est considéré comme constant dans l'approche des volumes finis, la topographie est discontinue et la représentation plus ou moins fidèle de la topographie dépend donc de la densité du maillage (Figure 4-22). Un maillage dense permet de représenter les éléments de petite échelle qui ont un impact local sur l'écoulement comme le lit mineur d'une rivière naturelle.

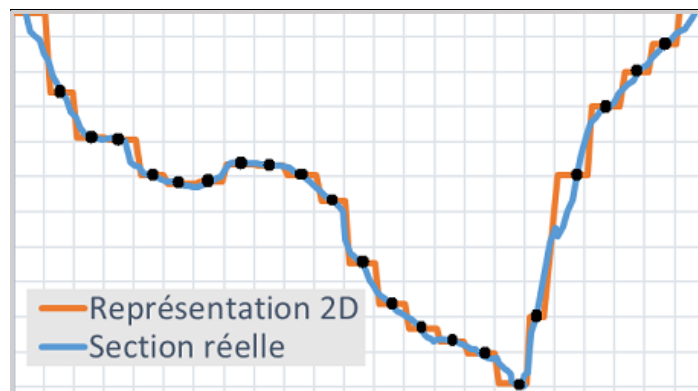


Figure 4-22 – Représentation des lits mineur et majeurs dans un maillage

Le maillage dense permet aussi d'obtenir les meilleures modélisations des vitesses d'écoulement, des profondeurs d'eau, et des superficies inondées (Gallegos et al., 2009 ; Néelz & Pender, 2009 ; Schubert et al., 2008 ; Seyoum, 2013 ; Soares-Frazão et al., 2008 ; Soares-Frazão, & Zech, 2008). Il réduit les erreurs du modèle cependant plus le maillage comporte de cellules, plus le temps d'exécution du modèle est long.

Un maillage plus grossier est acceptable dans les plaines d'inondations avec de faibles variations topographiques, ce maillage permet de réduire le temps de calcul (Lai et al., 2009). Cependant le maillage grossier surestime généralement la surface inondée (Gallegos et al., 2009), en outre il ne convient pas pour l'évaluation des vitesses car la vitesse du front de l'onde de crue est sous-estimée (Begnudelli & Sanders, 2007).

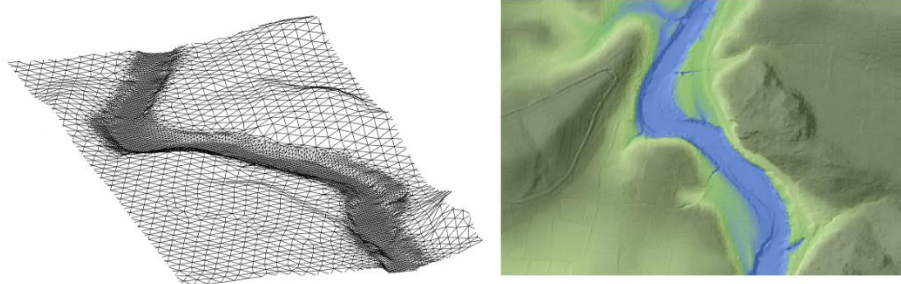
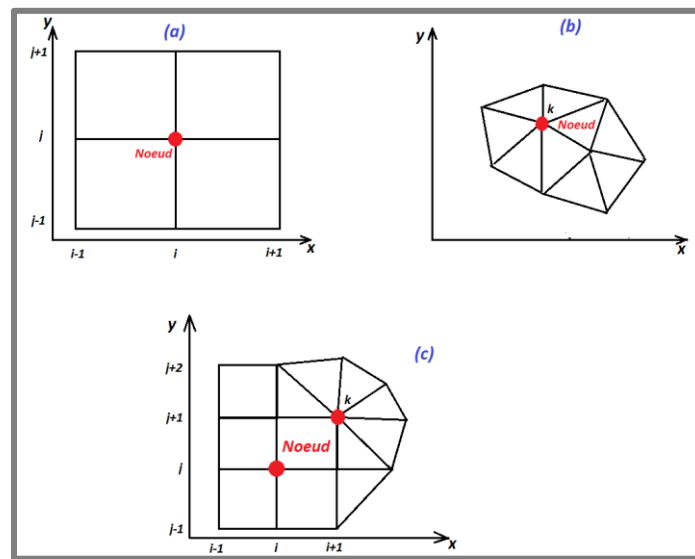


Figure 4-23- Représentation de la Bathymétrie à partir d'un maillage

Il existe deux types de maillages suivant leur arrangement dans l'espace. Le maillage structuré qui est très largement utilisé en modélisation hydraulique (Mavriplis, 1996 ; Néelz & Pender, 2009 ; Seyoum, 2013) surtout pour les modèles de différences finies les plus classiques (HEC-RAS, MIKE). Son principal avantage est de faciliter l'exécution de l'algorithme et d'être facile à implanter dans le modèle (Néelz & Pender, 2009).

Figure 4-24 - (a) Maillage structuré (b) Maillage non structuré
(c) Maillage hybride

Cette forme apporte une facilité de numération et de discrétisation des équations de modélisations (Seyoum, 2013), offrant de meilleurs temps de calcul. Cette technique de maillage a le désavantage d'être peu flexible pour les géométries complexes. Il y a peu de contrôle sur la distribution des points du maillage, ce qui pose un problème de précision de la solution au problème physique (Mavriplis, 1996).

Le maillage non structuré quant à lui offre une plus grande flexibilité et permet plus ou moins facilement l'adaptation aux géométries les plus complexes. Ce maillage offre aussi la possibilité de raffiner localement sa structure pour les zones à grand gradient tout en s'adaptant facilement à la géométrie des conditions limites (Schubert & Sanders, 2012). La faiblesse de cette structure est qu'elle nécessite plus d'éléments pour couvrir une région d'étude par rapport à un maillage structuré. Ce qui a pour conséquence d'augmenter la complexité du modèle et par ricochet le temps de calcul. Cette variation de la résolution du maillage permet par contre de garder une bonne précision (Begnudelli & Sanders, 2007).

Dans le maillage structuré l'espace est discrétisé en lignes, colonnes et/ou rangées et leurs intersections forment les nœuds (Figure 4-24a) tandis que le maillage non structuré, les nœuds ne sont pas alignés selon des directions préférentielles (Figure 4-24b). Pour leur besoin certains codes de calcul comme HEC-RAS utilisent une forme hybride en associant structuré et non structuré (Figure 4-24c). Les maillages non-structurés ont l'avantage de s'adapter à tout type de géométrie de la zone d'étude, par exemple des berges ou singularités qui ne seraient pas alignées avec les directions principales du maillage.

4.4.2 Logiciels utilisés dans cette étude

Dans cette partie de l'étude, nous allons utiliser le logiciel SV2D (Soares-Frazão, 2002) qui résout les équations de Saint-Venant bidimensionnelles par une méthode de volumes finis explicites sur maillage non structuré et le logiciel HEC-RAS en 2D qui résout les mêmes équations par la méthode des différences semi-implicites sur les mailles structurées et des volumes finis explicite sur des mailles non structurées dans les zones intermédiaires. La forme vectorielle du système bidimensionnelle est écrite en dessous. Les vecteurs F et G sont respectivement les vecteurs flux dans les directions x , y :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U) \quad (4.7)$$

Avec :

$$U = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix}; \quad F(U) = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + gh^2/2 \\ uvh \end{bmatrix}; \quad G(U) = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + gh^2/2 \end{bmatrix};$$

$$S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0,x} - S_{f,x}) \\ gh(S_{0,y} - S_{f,y}) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

La discrétisation suivant le schéma de volumes finis utilisée dans le modèle est donnée par l'équation

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(F_{i+\frac{1}{2}}^* - F_{i-\frac{1}{2}}^* \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(G_{i+\frac{1}{2}}^* - G_{i-\frac{1}{2}}^* \right) - S_i^* \Delta t \quad (4.10)$$

4.4.3 Un cas d'étude (le tronçon 54-65 de la rivière de Cavaillon)

Le même tronçon de la rivière de Cavaillon décrit au chapitre 4 a été modélisé en deux dimensions en utilisant un maillage triangulaire dans le code de calcul SV2D et un maillage rectangulaire avec Hec-Ras. Le maillage triangulaire est généré à partir du Plugin GMSH dans QGIS. Comme dans le cas de la modélisation en une dimension, la création d'un modèle en deux dimensions nécessite certains éléments. Ces éléments sont : le maillage pour la disposition des points ou des volumes de calcul selon la méthode de discrétisation utilisée, les conditions aux frontières, la rugosité.

Généralement dans un modèle hydraulique deux conditions aux limites sont nécessaires : Tout d'abord, il faut une condition à l'amont du modèle qui est généralement un débit. Ce débit peut être constant tout au long de la simulation si on travaille en écoulement permanent ou être un hydrogramme qui indique la variation du débit dans le temps. Il faut ensuite une autre condition à l'aval du modèle, cette condition comme à l'amont peut-être un niveau d'eau ou un limnigramme qui exprime la variation du niveau d'eau dans le temps. Une autre condition est le comportement des autres frontières du système qui peut être libre ou remplacée par des murs (Figure 4-25).

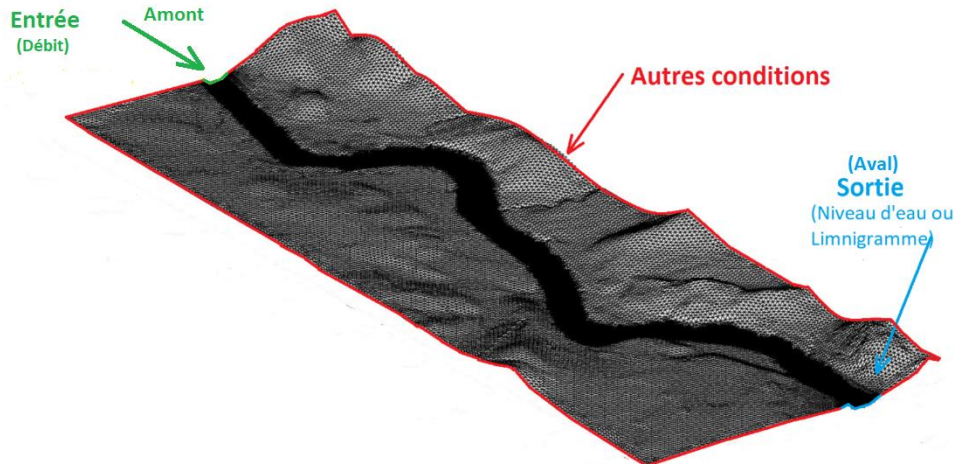


Figure 4-25 - Conditions aux limites d'un modèle en 2D

Le maillage peut être considéré comme la première étape dans la mise en place du modèle. Il constitue la disposition des points ou des volumes de calcul des équations déjà discrétisées dans l'espace délimité pour le modèle. Les objectifs principaux d'un maillage sont la représentation plus ou moins fidèle de la zone à étudier et un temps de calcul acceptable. Malheureusement, dans les modèles, il est difficile d'avoir les deux en même temps. Généralement un compromis raisonnable est fait pour ces deux éléments.

Le modèle de la rivière de Cavaillon utilise le maillage non structuré qui est recommandé dans les rivières naturelles où la topographie du lit mineur peut être très irrégulière. Plusieurs densités de maillages ont été testées avant de faire le choix de celui qui minimise le temps de calcul tout en permettant d'obtenir de très bonnes représentations des différents lits.

Dans les cas test, un maillage fin a été réalisé dans le lit mineur et un autre plus grossier dans la plaine d'inondation. Les sections transversales mesurées au GPS ont été comparées à celles obtenues à partir des maillages (Figures; 4-26 ; 4-27 ; 4-28 ; 4-29), afin d'identifier le maillage qui donnerait une meilleure représentation des lits mineurs et majeurs.

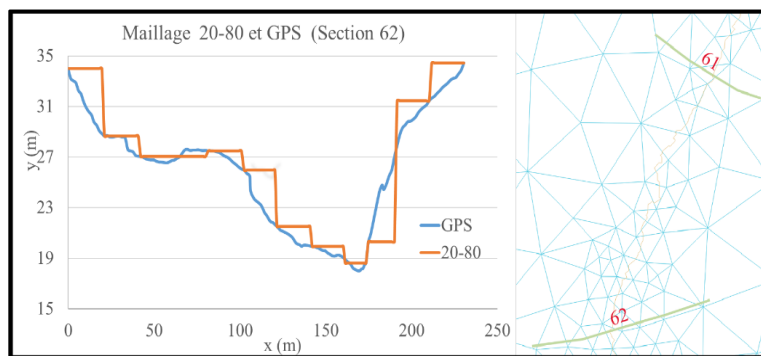


Figure 4-26-Maillage 20-80 et Relevé de section par GPS

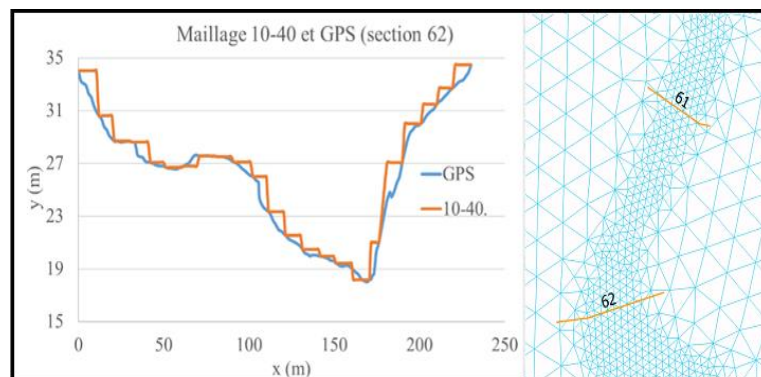


Figure 4-27 -Maillage 10-40 et Relevé de section par GPS

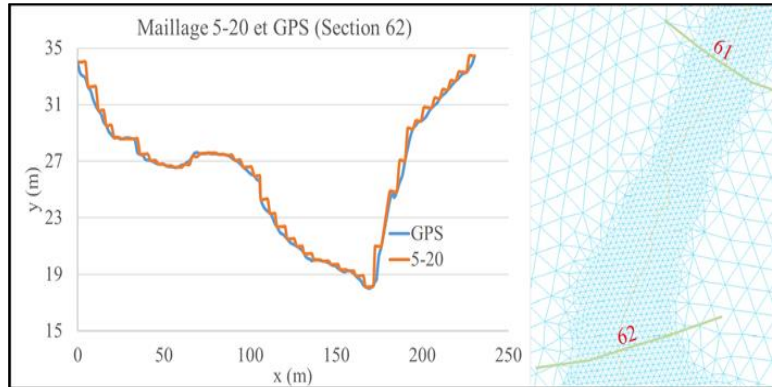


Figure 4-28.- Maillage 5-20 et Relevé de section par GPS

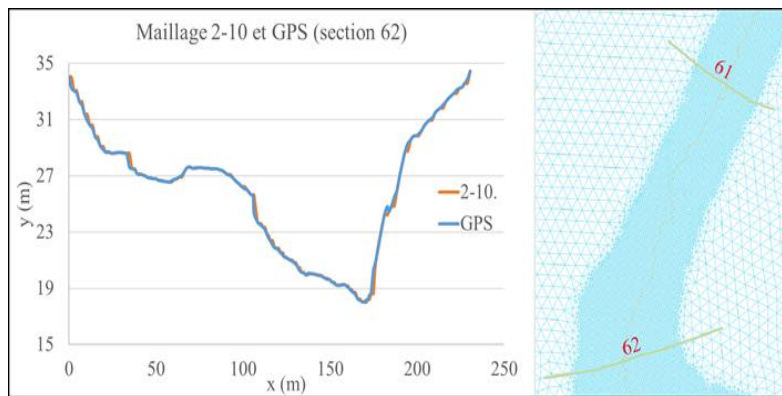


Figure 4-29-Maillage 2-10 et Relevé de section par GPS

Les deux chiffres représentant le nom du maillage se rapportent respectivement à la longueur moyenne des côtés des cellules dans les lits mineurs et majeurs. Un maillage 5-20, par exemple indique 5 mètres de longueur de côté pour les cellules dans le lit mineur et 20 mètres dans le lit majeur (Figure 4-28).

Une première analyse a permis de voir que les maillages 10-40 (taille des mailles dans le mineur 10 mètres et dans le lit majeur 40 mètres) et 20-80 représentent assez mal le lit mineur. Ceci est dû au fait que le lit mineur de la rivière ne fait en moyenne que 30 mètres.

Nonobstant cette première analyse, des simulations des différents modèles avec les différentes densités de maillage ont été réalisées avec SV2D dans l'objectif de vérifier le temps de calcul de chaque modèle.

Comparaison des résultats

Les différents modèles, cités précédemment, ont été mis dans les mêmes conditions (même débit, même coefficient de rugosité). Les coefficients de Manning-Strickler dans les lits mineur et majeurs sont respectivement 0.035 et 0.040 s.m^{-3} .

Pour arriver à comparer les différents modèles entre eux et aussi avec les résultats du modèle 1D, une interpolation a été réalisée sur la ligne du Thalweg dans les résultats des modèles 2D. Cette interpolation a été réalisée avec l'outil « *B-spline interpolation* » dans le logiciel QGIS. La validation de cette interpolation a été réalisée dans la partie comparaison 1D-2D du document. Il faut néanmoins préciser que le thalweg considéré pour cette partie du travail est celui obtenu avec le Modèle Numérique de Terrain dans le but de trouver dans un même repère et aussi en considérant qu'en période de grande crue, le vrai Thalweg n'est pas indispensable dans les calculs.

Les résultats sont obtenus dans toutes les cellules de maillage des différents modèles.

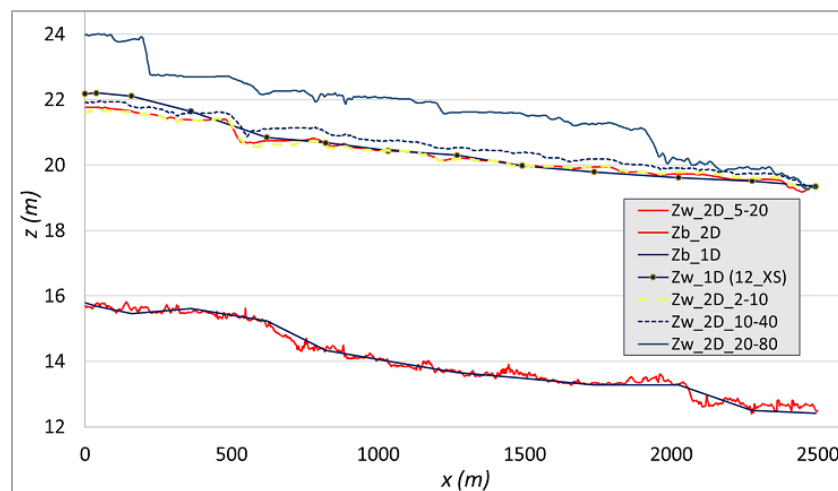


Figure 4-30 - Comparaison des résultats des différentes tailles de maillage

Dans les résultats, on peut remarquer que la ligne d'eau du maillage 20-80 ne suit pas la même tendance que les autres lignes d'eau, elle est complètement différente des autres (Figure 4-30). Les résultats du maillage 10-40 semblent suivre la tendance mais s'écarte des autres lignes d'eau. Les lignes d'eau des maillages 5-20 et 2-10 semblent être identiques et suivent la même tendance que les résultats de la modélisation en une dimension pour le même tronçon mais se situent en dessous de ce dernier. Le choix final devra se porter sur l'un de ces types de maillage. La lumière sur la différence avec les résultats du modèle en une dimension se fera un peu plus tard dans le document.

Etant donné que les modèles 5-20 et 2-10 sont presque identiques, le choix final se fera sur base de temps de calcul (Figure 4-31).

Il faut rappeler que tous les modèles sont soumis aux mêmes conditions. Le temps final de calcul pour le modèle 5-20 est de trois jours, tandis que le modèle 2-10 a mis un mois pour terminer la même simulation. Il faut aussi rappeler que les différentes simulations sont réalisées sur ordinateur portable qui est équipé de 8 Go de mémoire RAM.

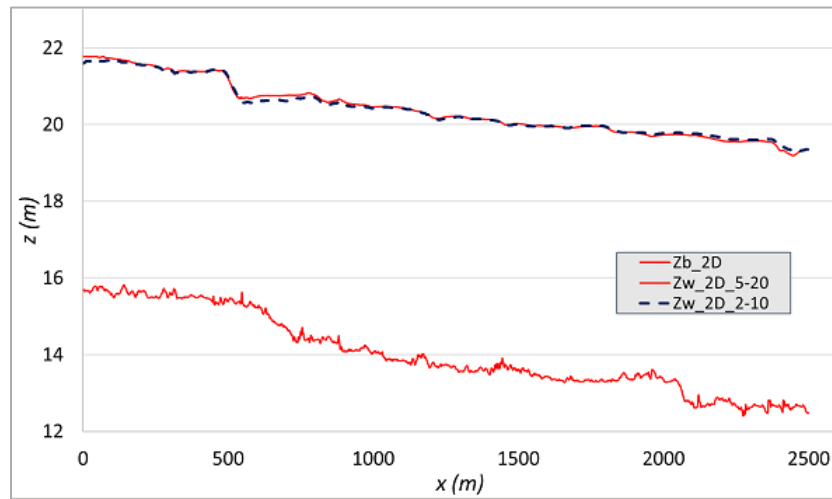


Figure 4-31– Comparaison des résultats des maillages 5-20 et 2-10

Ceci peut s'expliquer par le fait que le maillage 2-10 contient beaucoup plus d'éléments (177000 éléments) pour couvrir une même surface que le maillage 5-20 (27000 éléments). Le maillage 5-20 est donc adopté pour les autres calculs de l'étude.

4.4.4 Analyses, comparaisons et discussions

Une fois le maillage choisi, les autres paramètres disponibles (coefficient de rugosité, débit à l'amont niveau d'eau à l'aval), la simulation a été réalisée pour ce tronçon. L'écoulement est considéré comme permanent avec un débit constant à l'entrée de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Les résultats obtenus permettent de visualiser au niveau de toutes les cellules la profondeur d'eau (Figure 4-32) et la vitesse d'écoulement dans le plan horizontal (x, y).

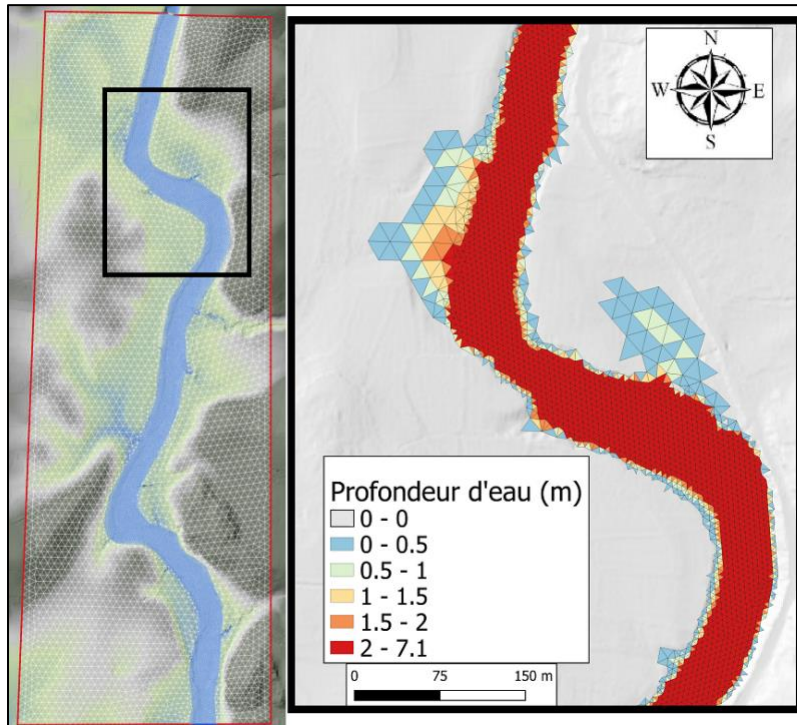


Figure 4-32 - Présentation globale des résultats

Les vitesses se présentent comme précisé plus haut sous forme de vecteurs suivant les directions x et y . Des phénomènes de recirculation sont observés dans plusieurs points de l'écoulement comme le montrent les figures ci-dessous.

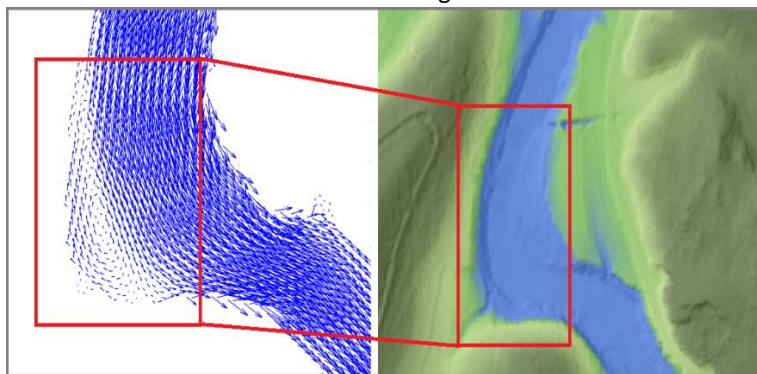


Figure 4-33 - Phénomène de recirculation suite à un changement de direction

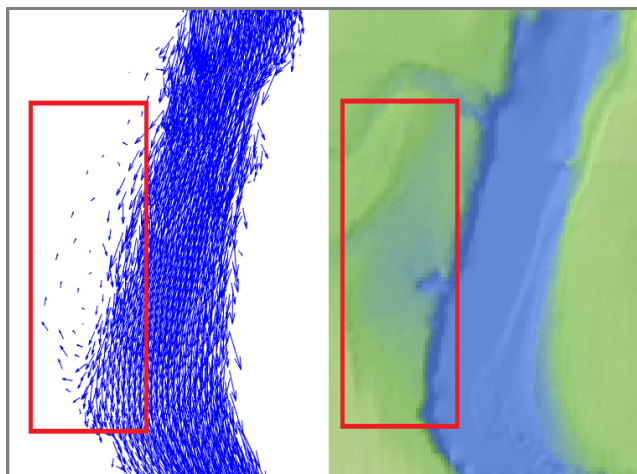


Figure 4-34- Phénomène de recirculation dans une zone morte

Les phénomènes de recirculation sont dus surtout à un changement radical de direction avec un angle de 70 degrés ou plus (Figure 4-33) ou un élargissement local après un rétrécissement (Figure 4-34).

4.4.5 Carte d'aléa

Les deux variables, profondeur d'eau et vitesse d'écoulement, ont été combinées pour avoir une carte d'aléa (Figure 4-35), en suivant la méthodologie du tableau 3-2 présentée dans les caractéristique de l'aléa inondation (page 75). Le tableau est rappelé en dessous.

Tableau 4-2 - Croisement de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement

Aléa Inondation		Vitesse (m/s)		
		$V < 0.5$	$0.5 < V < 1$	$V > 1$
Profondeur (m)	$H < 0.25$	Faible	Moyen	Moyen
	$0.25 < H < 0.5$	Moyen	Fort	Fort
	$0.5 < H < 1$	Fort	Très fort	Très Fort
	$H > 1$	Fort	Très fort	Très fort

Tableau 4-3-Croisement de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement

Aléa Inondation		Vitesse (m/s)		
		0.45	0.95	1.00
Profondeur (m)	0.24	0.11	0.23	0.24
	0.45	0.20	0.43	0.45
	0.95	0.43	0.90	0.95
	1.00	0.45	0.95	1.00

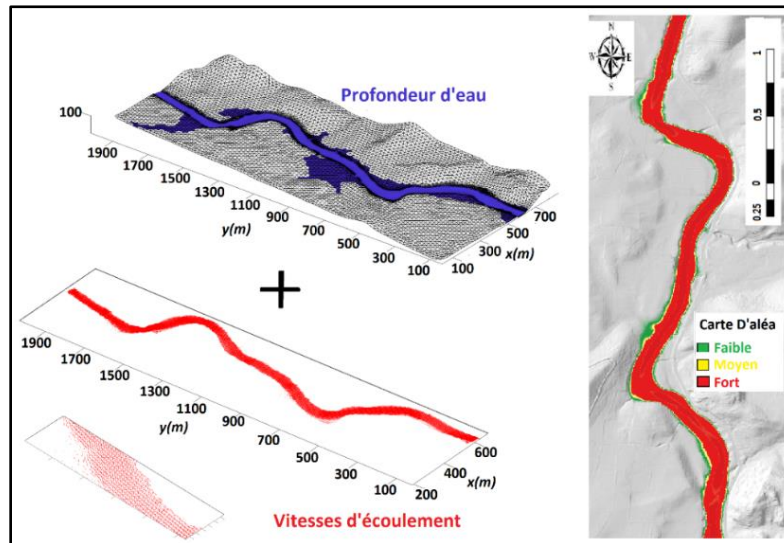


Figure 4-35 -Carte d'aléa inondation du tronçon étudié

4.5 Comparaison 1D et 2D

Les simulations des modèles unidimensionnels ont l'avantage d'avoir un temps de calcul très court et ces modèles nécessitent peu de données pour leur mise en place. Les modélisations unidimensionnelles sont beaucoup utilisées dans les rivières dont la structure est relativement simple ou dans les canaux, car elles privilégient un seul axe d'écoulement. Le grand inconvénient de ce type de modélisations est qu'elles n'offrent pas une bonne représentation des vitesses locales. Les modélisations en deux dimensions, par contre, représentent mieux les vecteurs vitesses mais sont coûteuses en données et le temps de calcul peut être relativement long. Lors des grandes crues où la structure de la rivière semble changer de telle sorte qu'il est difficile d'identifier lit mineur et lit majeur, lorsqu'il y a beaucoup de débordement, il n'y a plus un axe de direction privilégié, la modélisation en deux dimensions devient une nécessité (Figure 4-19 ; 4-20 ; 4-21). Il y a quand même lieu de faire une comparaison entre les deux types de modélisation en restant dans les limites acceptables de la modélisation unidimensionnelle c'est-à-dire pas trop de débordement et structure relativement simple de la rivière.

Plusieurs modèles ont été développés et comparés en partant d'un cas très simple de canal rectangulaire avec une pente de fond constante pour arriver à un canal plus compliqué avec des méandres, des rétrécissement et élargissement similaire à une rivière naturelle. Ces comparaisons ont permis de mieux comprendre les différences qu'il peut y avoir entre les deux types de modèle. Pour les comparaisons, les lignes d'eau des modèles bidimensionnels ont été obtenues par interpolation dans l'axe de l'écoulement.

Pour arriver à faire une comparaison entre les deux modèles, des interpolations avec le logiciel QGIS sont réalisées sur tout le domaine d'écoulements. A partir de ces interpolations le profil au niveau du thalweg est obtenu. Ce type d'interpolation a été validé avec la comparaison de plusieurs profils provenant du MNT du CNIGS et les surfaces créées par interpolation avec les points représentant la bathymétrie du maillage (Figure 4-36). Cette interpolation a créé une image raster à partir de laquelle, il est possible d'obtenir des profils.

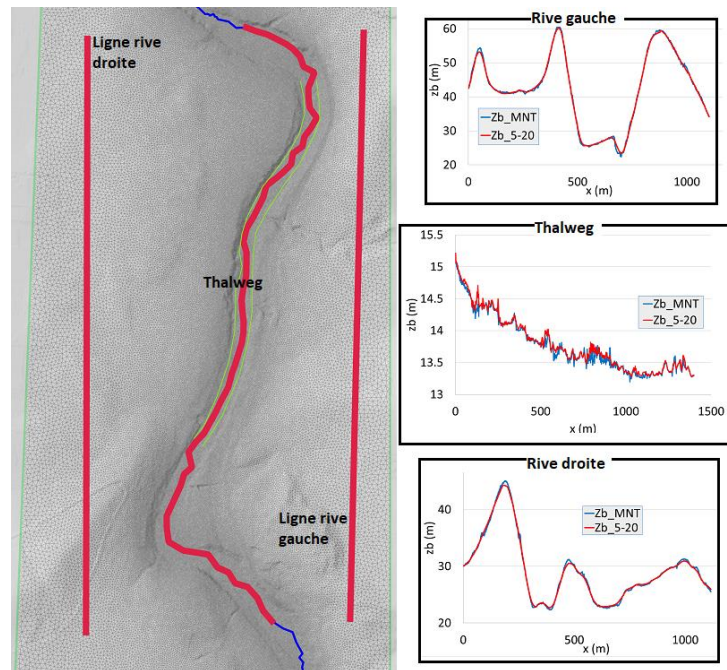


Figure 4-36- Validation de l'interpolation

3 profils chaque fois de deux manières différentes ont été créés avec l'image raster de l'interpolation et le MNT de CNIGS qui est aussi une image raster. Ces profils représentent dans tous les cas la bathymétrie sur la rive gauche (2 profils), sur le thalweg (2 profils) et sur la rive droite (2 profils). Les résultats montrent que les différents profils sont similaires (Figure 4-36). Une fois que ce type d'interpolation est validé, il est utilisé dans les autres parties du travail pour présenter les résultats au niveau du Thalweg des modèles bidimensionnels.

Il faut néanmoins rappeler que dans les comparaisons 1D-2D pour le cas de la rivière naturelle, le thalweg utilisé est celui du modèle numérique de terrain dans le but de placer les deux modèles à comparer dans un même repère. Ce choix est fait uniquement pour les objectifs de la comparaison car l'idéal serait de trouver le vrai thalweg de la rivière dans les deux cas.

4.5.1 Cas 1.- Canal rectangulaire

Deux premiers modèles (1D et 2D) d'un canal rectangulaire sont créés (Figure 4-37). Les deux modèles ont une largeur de 100 mètres pour une longueur de 3000 mètres. Le modèle unidimensionnel formé de sections transversales distantes de 40 mètres. Le

modèle bidimensionnel est formé par un maillage triangulaire dont la taille des mailles est de 5 mètres.

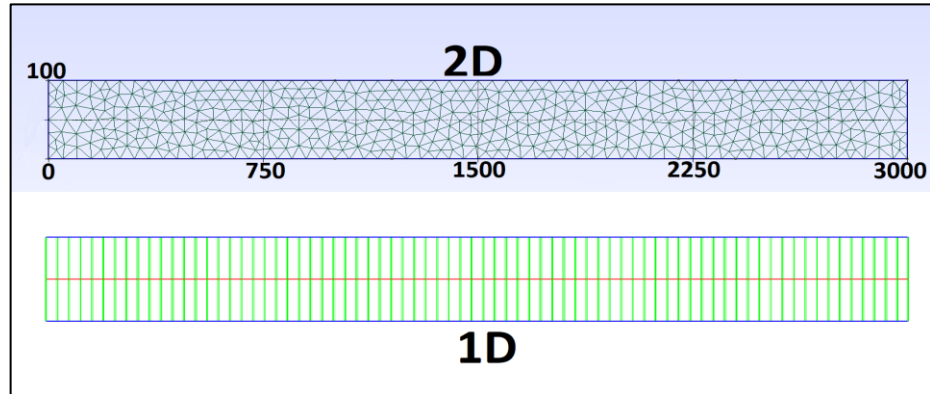


Figure 4-37- Modèle 1D et 2D pour un canal rectangulaire

Les deux modèles sont mis dans les mêmes conditions (débit à l'entrée, niveau d'eau à la sortie et même coefficient de Manning).

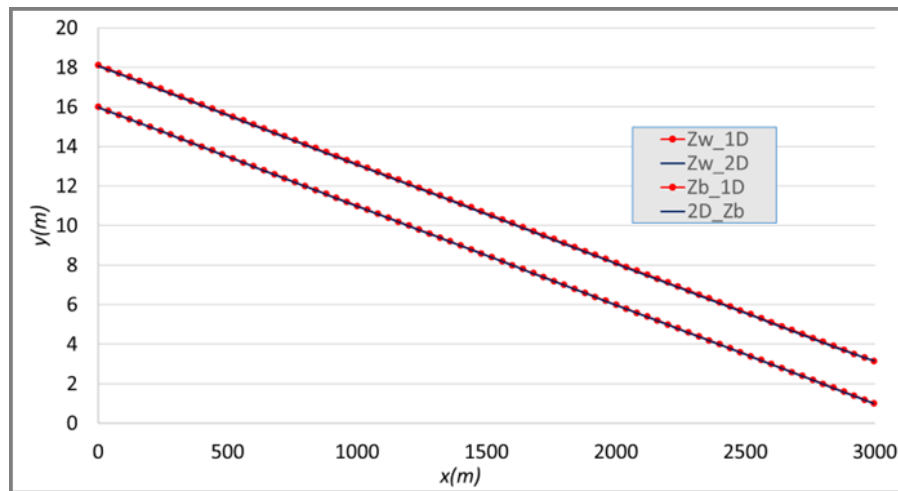


Figure 4-38 -Résultat de la comparaison 1D et 2D pour un canal rectangulaire

Zb représente la bathymétrie de la rivière dans les deux modèles, et on voit clairement qu'elle évolue de manière constante au début jusqu'à la fin des modèles. Zw représente les niveaux d'eau dans les deux modèles.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence entre les deux modèles, les lignes d'eau se superposent. L'objectif de cette approche est de montrer que dans une situation prismatique, n'ayant pas d'irrégularité de forme ou de pente le modèle unidimensionnel est suffisant pour la représenter (4-38).

4.5.2 Cas 2.- Canal rectangulaire avec rétrécissement

Les modèles précédents sont dupliqués avec la présence d'un rétrécissement au milieu du canal et les pentes de fond des deux canaux sont constantes sur toute la longueur (4-39). Les deux modèles sont mis dans les mêmes conditions.

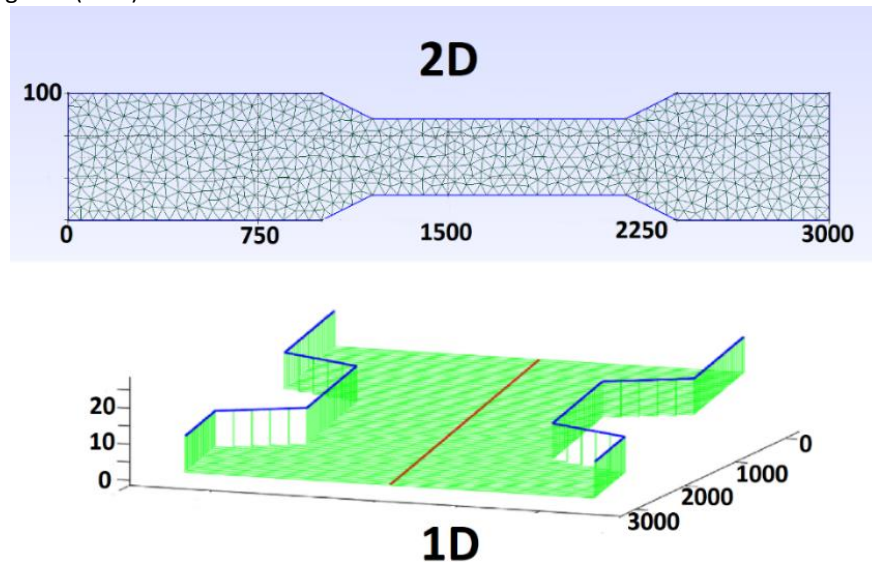


Figure 4-39– Canal avec rétrécissement

Le canal est suffisamment long pour retrouver la profondeur uniforme avant et après les discontinuités. Les résultats montrent que les lignes d'eau sont superposées dans la première partie de l'écoulement (500 m). Il est possible d'observer un décollement de la ligne d'eau en une dimension (Figure 4-40). Ce décollement est d'autant plus grand que les coefficients de contraction et d'expansion sont grands. En général les coefficients de contraction et d'expansion sont respectivement égaux à 0.1 et 0.2 dans Axeriv et 0.1 et 0.3 par défaut dans HEC-RAS.

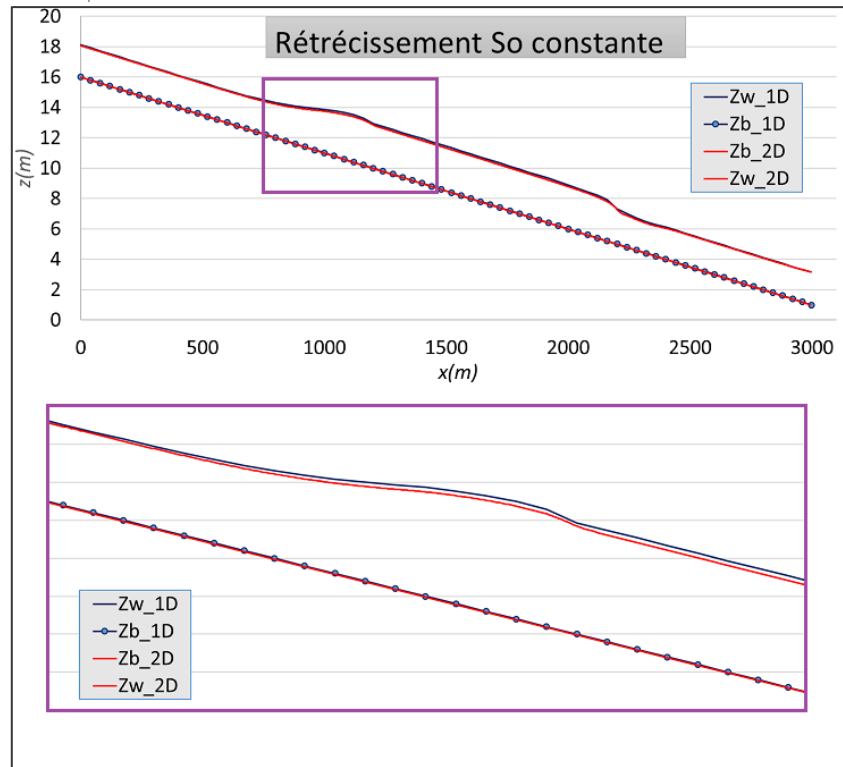


Figure 4-40— Résultat du canal rétréci

4.5.3 Cas 3.- Canal avec rétrécissement et méandre

Ces nouveaux modèles ont intégré dans la mesure du possible les conditions retrouvées en rivière naturelle, des méandres pour les changements de directions, des rétrécissement et élargissement, la pente de fond qui est par contre maintenue constante. L'objectif de cette dernière comparaison est de se rapprocher un peu plus vers la rivière naturelle dont la bathymétrie est souvent très complexe (Figure 4-41). Cette approche permettra d'avoir une idée sur les différences à attendre quand il s'agira d'une rivière naturelle. Un fond horizontal a été intégré dans ce modèle.

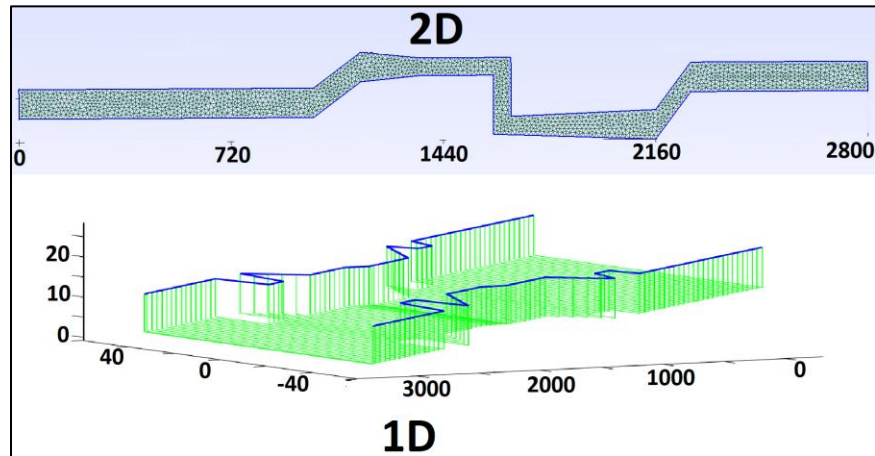


Figure 4-41– Comparaison des résultats 1D et 2D pour un canal complexe

Il s'agit bien de l'exemple le plus complexe avant les rivières naturelles.

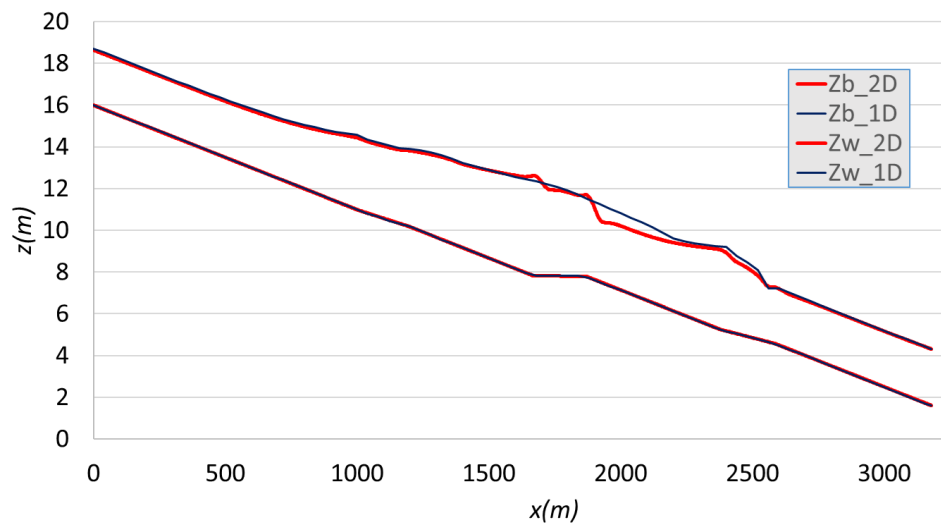


Figure 4-42– Comparaison des résultats 1D et 2D pour un canal complexe

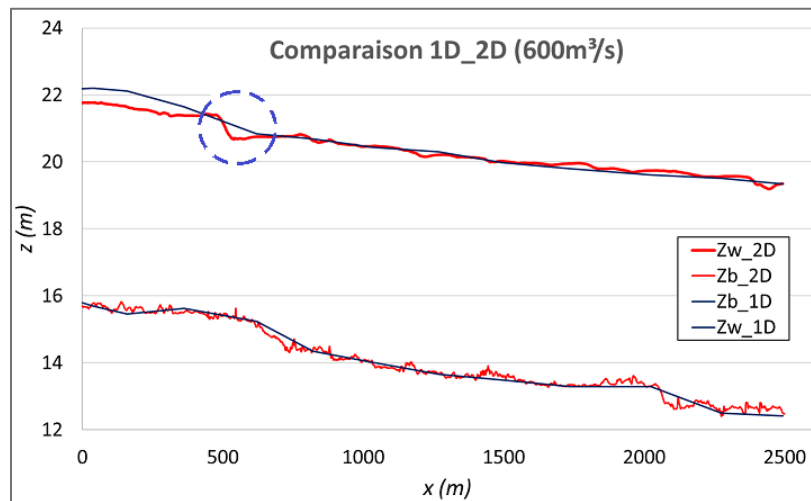
Les résultats montrent que l'action combinée des rétrécissements et élargissements, des changements de direction de l'écoulement, a créé une différence significative entre

les deux lignes d'eau (Figure 4-42). Cette différence sera décrite plus en détail avec le cas réel d'un tronçon de la rivière de Cavaillon.

4.5.4 Comparaison 1D et 2D de la rivière de Cavaillon

La même opération a été réalisée sur le tronçon 54-65 de la rivière de Cavaillon. Le même tronçon a été utilisé pour les deux modèles 1D et 2D. Plusieurs opérations ont été réalisées sur le modèle unidimensionnel dans le but de refléter la réalité de la rivière naturelle.

Le modèle unidimensionnel, dans un premier temps, est formé de 12 sections transversales obtenues avec le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de CNIGS. Le modèle 2D quant à lui est réalisé suivant le maillage 5-20 choisi précédemment. Comme dans les autres opérations, les deux modèles ont été mis dans les mêmes conditions d'écoulement.



Les premiers résultats montrent que les deux lignes d'eau suivent la même tendance. La ligne d'eau du modèle 1D obtenue des résultats de la simulation est lisse tandis que la courbe du modèle 2D est plus chahutée (Figure 4-43).

Cette première différence peut être due au maillage du modèle 1D qui n'est pas assez dense, beaucoup d'informations sont perdues entre deux sections transversales qui sont distantes de 200 mètres en moyenne. Comme c'était le cas dans les démonstrations de différents modèles de canal plus haut, la partie aval des lignes d'eau semble bien

coïncider entre 2000 et 2500 mètres à proximité de la condition limite aval (Figure 4-43). Au fur et à mesure que la bathymétrie se complique en ayant des rétrécissements et des élargissements, des changements de direction, les deux lignes s'écartent. Cet écart ne semble plus se rattraper avec environ 30 centimètres de différence à l'amont, comme dans les plus simples cas des canaux présentés précédemment. Des modifications vont être réalisées dans le modèle unidimensionnel comme précisé précédemment. Les premières modifications vont surtout concerner le maillage et elles visent à rattraper des informations insuffisantes.

Premier niveau de raffinement

Une première tentative de modification essaie de rattraper les informations insuffisantes dans un tronçon à 600 mètres de l'amont (Figure 4-43) en ajoutant plusieurs sections transversales (Figure 4-44).

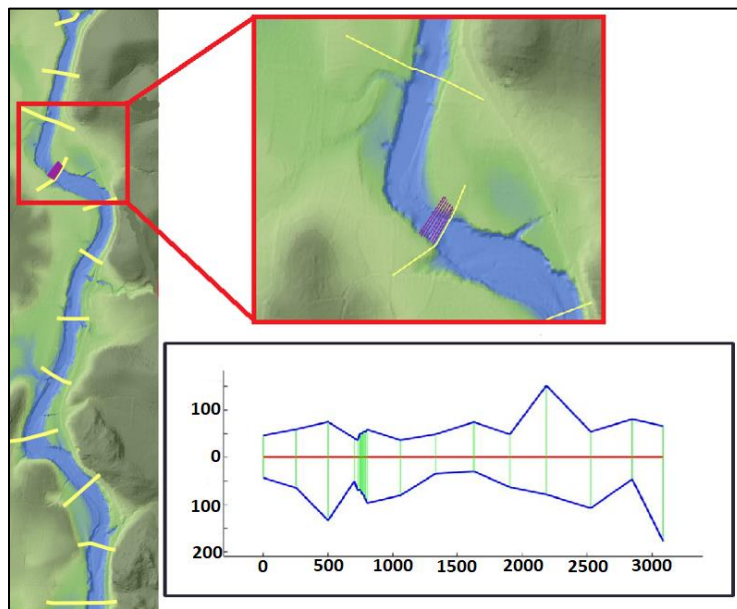


Figure 4-44- Premier niveau de raffinement du maillage 1D

Cette première modification apporte de sérieuses améliorations à la forme de la ligne d'eau dans la modélisation 1D à ce niveau. Cependant, ce premier raffinement a aussi pour conséquence l'augmentation du niveau d'eau à l'amont (Figure 4-45).

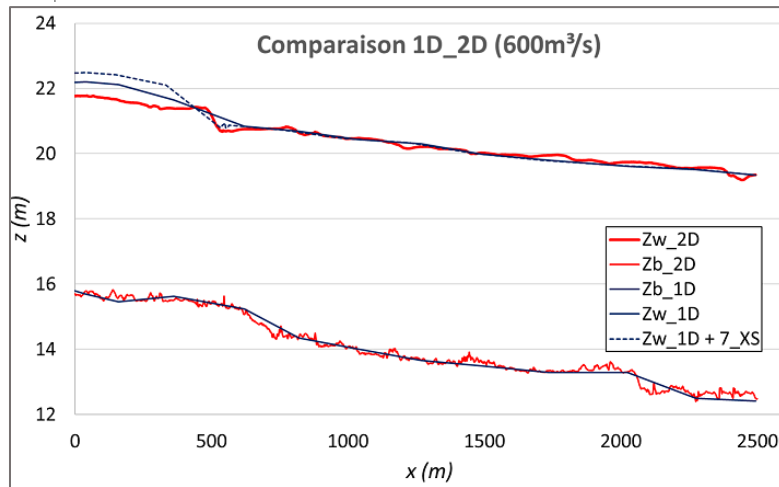


Figure 4-45 - Résultat après le premier niveau de raffinement

Cette augmentation est due à l'ajout de nouvelles sections transversales disposées toutes au droit d'un rétrécissement.

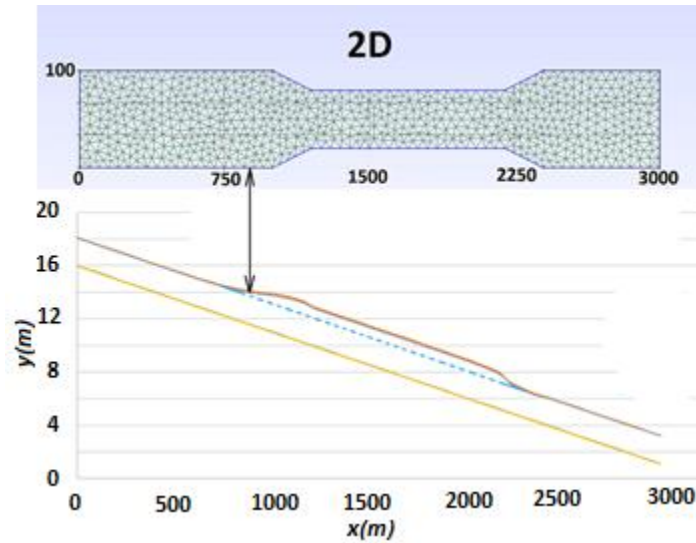


Figure 4-46 – Comparaison 1D-2D avec rétrécissement

Comme on l'a vu dans l'exemple du canal rétréci qui est repris au-dessus, l'augmentation de la profondeur se fait dans le rétrécissement mais aussi en amont de

celui. En réalité le rétrécissement a diminué l'efficacité de l'écoulement ce qui a pour effet l'augmentation de quantité d'eau en amont du rétrécissement d'où l'augmentation dans la profondeur. La ligne bleue de la figure 4-46 indique ce qu'on aurait eu s'il n'y avait aucun rétrécissement.

Cette augmentation est d'autant plus élevée que le rétrécissement est étroit. C'est ce qui s'est produit avec l'ajout de ces sections transversales.

Les rivières naturelles ne se présentent généralement pas sous la même forme qu'un canal créé par l'homme. Elles se présentent en comme une succession de sections étroites et de sections élargies. L'ajout de plusieurs sections transversales dans des parties élargies de la rivière est l'objet du deuxième raffinement dans le maillage unidimensionnel.

Deuxième niveau de raffinement

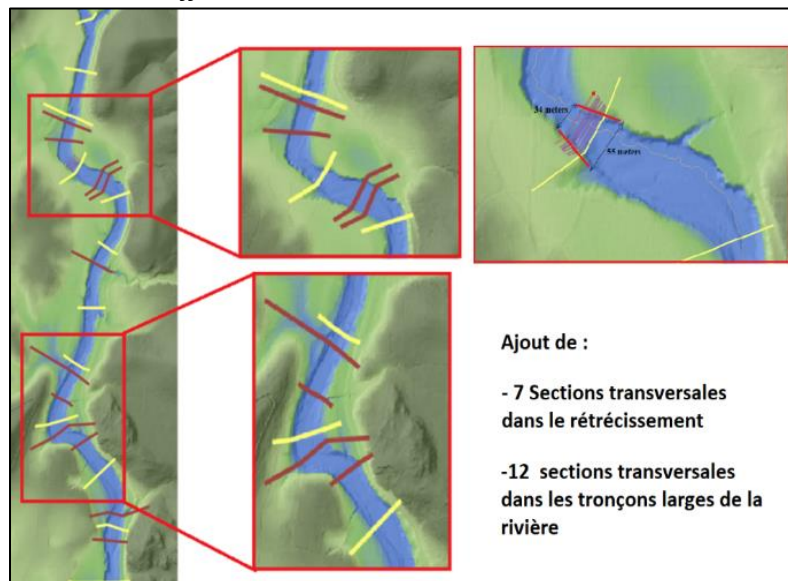


Figure 4-47- Deuxième niveau de raffinement du maillage 1D

Ce deuxième niveau de raffinement avait pour objectif, comme précisé plus haut de rattraper les anomalies de niveaux créées par les sections dans les zones de rétrécissement (Figure 4-47).

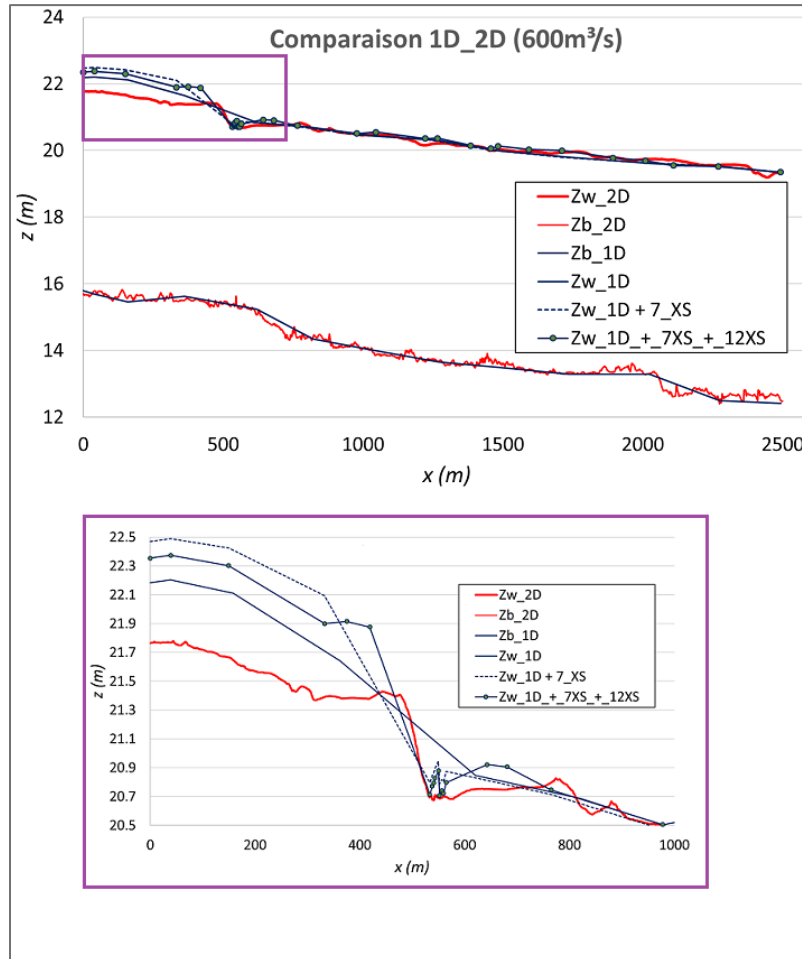


Figure 4-48 - Résultats du deuxième raffinement

Les résultats montrent que la ligne d'eau obtenue est en deçà de la précédente mais n'atteint pas encore son niveau avec les 12 sections transversales. (Figure 4-48). Cette dernière qui n'était pas superposée avec la ligne d'eau de la modélisation bidimensionnelle. Ce qui indique que toutes les informations manquantes du modèle unidimensionnel n'ont pas pu être rattrapées par ce deuxième niveau de raffinement.

Troisième niveau de raffinement

Un troisième niveau de raffinement est créé dans le but de récupérer la majorité des informations perdues entre deux sections transversales dans les deux premiers niveaux de raffinement. Ce niveau de raffinement contient 134 sections transversales au lieu de 12 (Figure 4-49).

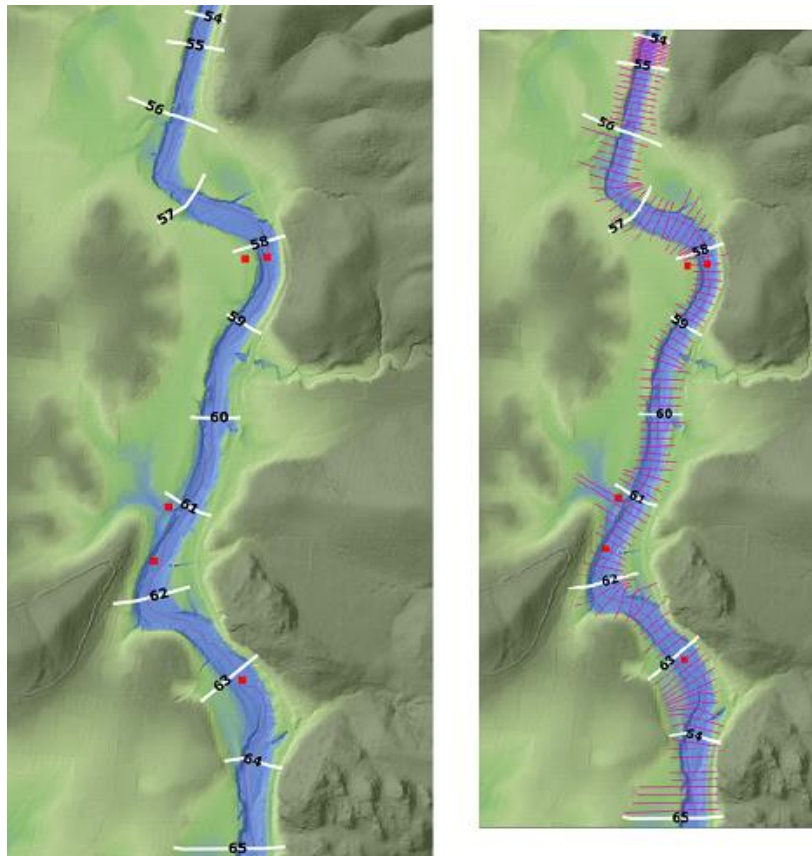


Figure 4-49- Troisième niveau de raffinement

Les résultats montrent que les deux lignes d'eau sont similaires ce qui veut dire que les informations perdues dans les autres niveaux de raffinement sont rattrapées (Figure 4-50). Cependant, les deux lignes sont éloignées l'une de l'autre et l'explication possible est le traitement du coefficient de Manning par les deux modèles.

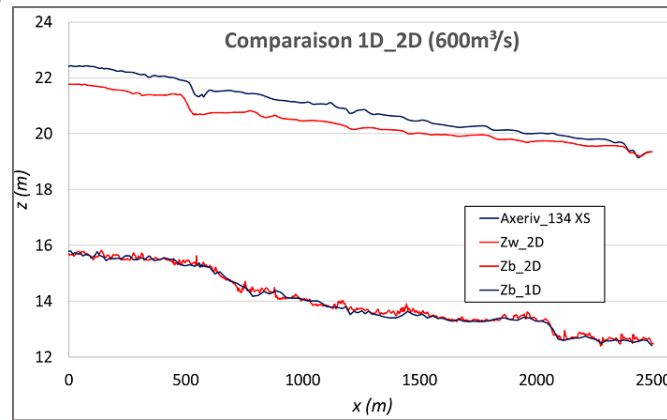


Figure 4-50- Résultats du troisième niveau de raffinement

Il faut préciser que la surface où s'exercent les forces de frottement dans le modèle unidimensionnel est différente de la surface dans le modèle bidimensionnel (Figure 4-51).

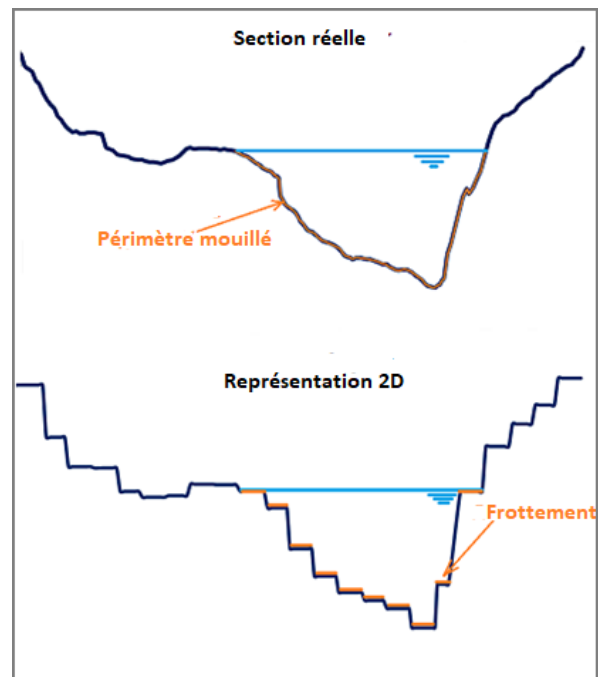


Figure 4-51 – Traitement du coefficient de Manning

Une manière de résoudre le problème serait de considérer un coefficient de frottement pour chaque modèle car comme précisé plus haut. Les forces de frottements agissent sur le périmètre mouillé dans le modèle unidimensionnel et sur les marches d'escalier dans le modèle bidimensionnel (Figure 4-51). Dans cette nouvelle méthode un coefficient différent est utilisé dans chaque modèle et les deux valeurs sont bien dans un rapport du type $(P/L)^{(2/3)}$, puisqu'en 2D, le frottement ne se fait que sur le fond des cellules (donc sur une distance L au lieu de P). Pour arriver à déduire un coefficient de Manning pour le modèle unidimensionnel, on a utilisé l'une de nos sections transversales avec le périmètre mouillé pour la profondeur qui correspond au débit de $600\text{m}^3/\text{s}$ (Figure 4-52).

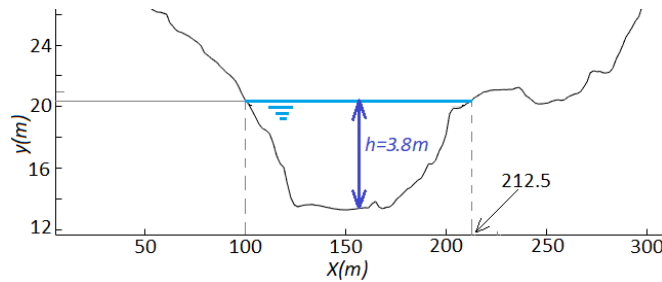


Figure 4-52 - Recherche du coefficient de Manning

La largeur en surface qui est équivalent à la largeur de la surface de frottement du modèle bidimensionnel vaut 112.5m et le périmètre mouillé vaut 160 mètres. Avec le rapport des surfaces de frottement en supposant qu'on a une longueur unitaire dans les deux cas, on obtient la rugosité équivalente qu'il faut utiliser dans le modèle unidimensionnel qui est de $0.029 \text{ s/m}^{1/3}$.

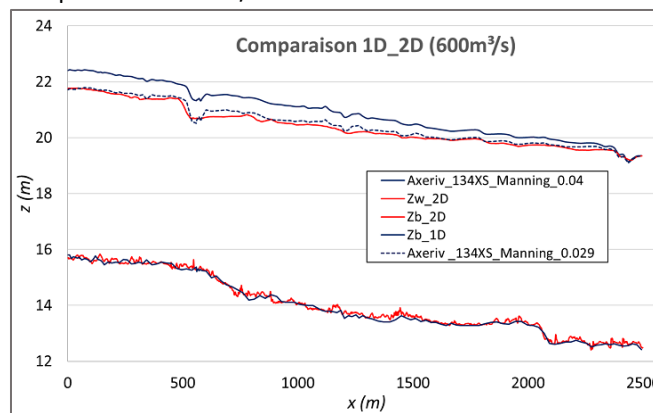


Figure 4-53-Comparaison 1D et 2D

Avec cette approche on obtient un meilleur résultat pour la comparaison des deux modèles (4-53).

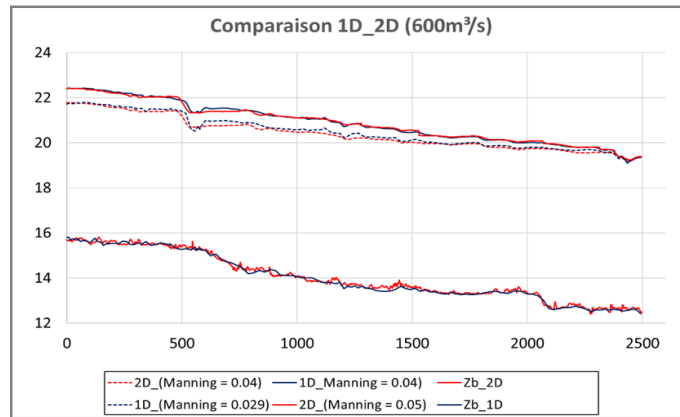


Figure 4-54 – Comparaison 1D-2D

La même opération est possible en modifiant de préférence le coefficient de Manning dans le modèle bidimensionnel tout en restant dans le rapport $(P/L)^{(2/3)}$ (Figure 4-54) mais il reste recommandé de diminuer le coefficient de Manning du modèle unidimensionnel.

Dans ces dernières comparaisons, les résultats du logiciel HEC-RAS en bidimensionnel ont aussi été utilisés. Pour rappel, la méthode de discrétisation du logiciel HEC-RAS est une combinaison des approximations par les différences finies et les volumes finis qui ont été présentées dans une section précédente.

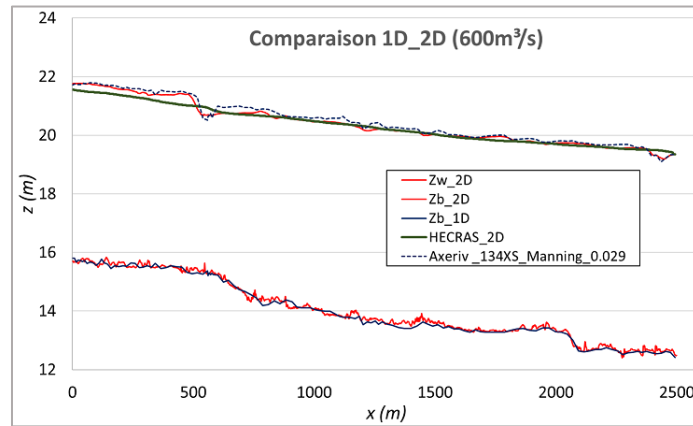


Figure 4-55 - Comparaison 1D et 2D

Les différentes lignes d'eau (modèle 1D avec Axeriv, modèle 2D avec SV2D et HEC-RAS) sont similaires mais la courbe provenant du logiciel HEC-RAS se trouve en deçà des courbes provenant des codes de calcul hydrodynamiques Axeriv et SV2D à l'amont de l'écoulement pour un même débit à l'entrée (Figure 4-55).

Il est aussi possible de remarquer que la ligne d'eau du logiciel HEC-RAS est plus lisse que les autres (Figure 4-55). Cela est dû au fait que HEC-RAS utilise une approche de Bathymétrie sous maille. L'idée derrière cette approche est d'utiliser une grille de calcul relativement grossière avec des informations à une échelle plus fine sur la topographie sous-jacente (Casulli, 2008). Dans cette approche, les détails de la grille fine sont factorisés en tant que paramètres représentant plusieurs intégrales sur les volumes et les surfaces de face. En conséquence, le transport de masse fluide représente la topographie à échelle fine à l'intérieur de chaque cellule discrète.

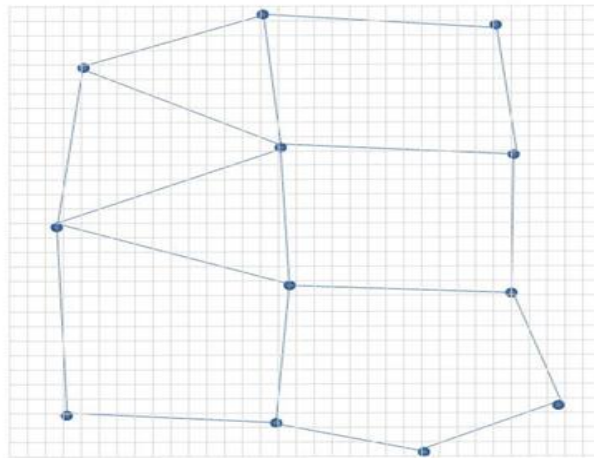


Figure 4-56- Bathymétrie sous grilles (HEC-RAS, Reference Manual)

Les cellules de la grille de calcul contiennent des informations supplémentaires telles que le rayon hydraulique, le volume et la section transversale qui peuvent être pré-calculés à partir de la bathymétrie fine. Les détails à haute résolution sont perdus, mais suffisamment d'informations sont disponibles pour que la méthode numérique plus grossière puisse rendre compte de la bathymétrie fine par la conservation de la masse. Cette méthode est considérée comme appropriée car, ils considèrent que la surface de l'eau libre est plus lisse que la bathymétrie, de sorte qu'une grille plus grossière peut être utilisée efficacement pour calculer la variabilité spatiale de l'élévation de la surface libre.

Chapitre 5.
Cas de la ville de Cavaillon

Chapitre 5 Le cas de la ville de Cavaillon et des zones avoisinantes

Dans les chapitres précédents, un tronçon a été utilisé pour la vérification des différentes hypothèses de calcul. Ces expériences ont permis aussi de voir la rigidité des codes de calculs ainsi que leurs limites (comparaison 1D et 2D). D'après les résultats obtenus (Figure 4-35) ainsi que les enquêtes de terrain réalisés, ce tronçon de la rivière de Cavaillon n'a pas été inondée lors de l'épisode Matthew en 2016.



Figure 5-1.- La ville de Cavaillon



Figure 5-2.-L'inondation de la ville de Cavaillon

La ville de Cavaillon et ses environs par contre ont été sévèrement touchés par les inondations résultantes des pluies apportées par l'ouragan Matthew en 2016 (figure 5-1 ; 5-2).

5.1 Modèle de la ville de Cavaillon et ses environs

Une modélisation dans toute la zone qui a été inondée par l'ouragan Matthew en octobre 2016 a été réalisée (Figure 5-3). Cette délimitation de la zone inondée, pour rappel, a été établie lors des enquêtes de terrain à partir des laisses de crue et des témoignages des populations. Le modèle est constitué par un maillage mixte (5-20) avec une plus grande densité dans le lit mineur (5 mètres) pour bien représenter les irrégularités et des mailles plus larges dans les plaines d'inondation (20 mètres). La transition des tailles des mailles se fait progressivement du lit mineur vers la plaine d'inondation.

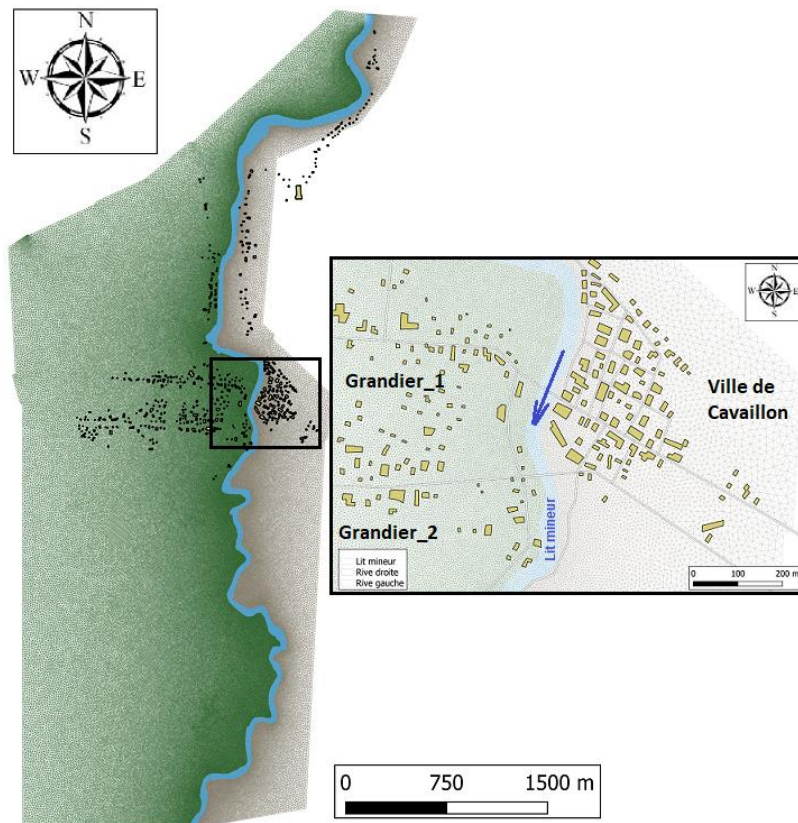


Figure 5-3.-Modèle de la ville de Cavaillon et ses environs

Le modèle hydraulique de la ville de Cavaillon et ses environs nécessite une donnée supplémentaire pour sa mise en place. En effet, l'écoulement était considéré comme permanent dans les modèles précédents, on a utilisé un seul débit dans la condition limite amont des modèles. Dans la réalité, lors des événements catastrophiques le débit n'est jamais constant dans la rivière. En plus du maillage et de la condition limite aval, ce modèle doit avoir comme condition limite amont un hydrogramme qui exprime la variation du débit dans le temps et un limnigramme, qui est la variation du niveau d'eau dans le temps, comme condition aval. Etant donné que les autres éléments nécessaires pour la mise en place d'un modèle hydraulique ont déjà été décrits dans les sections précédentes, il ne reste à aborder que la condition limite amont (hydrogramme) et la condition limite aval (limnigramme).

Avant la construction de l'hydrogramme, un inventaire des hydrogrammes qui ont déjà été construits dans la région a été fait. Les méthodes de création de ces hydrogrammes sont décrites dans les sections suivantes. Sur base de ces méthodes un choix a été fait pour la construction de l'hydrogramme du modèle de la rivière de Cavaillon.

5.2 Construction de l'hydrogramme à Dory

Généralement les hydrogrammes peuvent être obtenus de plusieurs manières. La manière la plus simple est de récolter les données directement sur une station de mesure pendant l'épisode donné. Malheureusement, les appareils de mesure de débits sont très coûteux, et sont susceptibles d'être emportés par l'écoulement lors des grandes crues.

Une deuxième méthode serait d'utiliser les mesures des niveaux d'eau à différent moment et établir une courbe de tarage sur lequel on peut se baser pour la construction de l'hydrogramme d'un événement donné. Dans cette méthode deux choix sont possibles : un premier choix serait d'utiliser des appareils automatiques qui permettent d'avoir le niveau d'eau à tout moment dans la rivière. Ces appareils peuvent aussi être emportés par le courant quand il est trop important. Le second choix serait de mesurer manuellement le niveau d'eau pendant des intervalles de temps déterminées. Il est difficile en temps de pluie en période d'inondation qu'une personne puisse faire les mesures correctement sans parler du côté dangereux de la question.

Une autre méthode serait d'utiliser les données de pluie et les caractéristiques du bassin versant pour créer des hydrogrammes. En effet, les données de pluies sont plus faciles à collecter que les données de débit et n'ayant pas de rapport directe avec la rivière ces appareils ne peuvent pas être emportés par les crues. C'est cette dernière méthode qui a été adoptée dans cette étude.

Sur la rivière de Cavaillon quatre stations de collecte de données ont été établies : Dory, Gros-Marin et Pradine et Grand-Place (Figure 5-4).

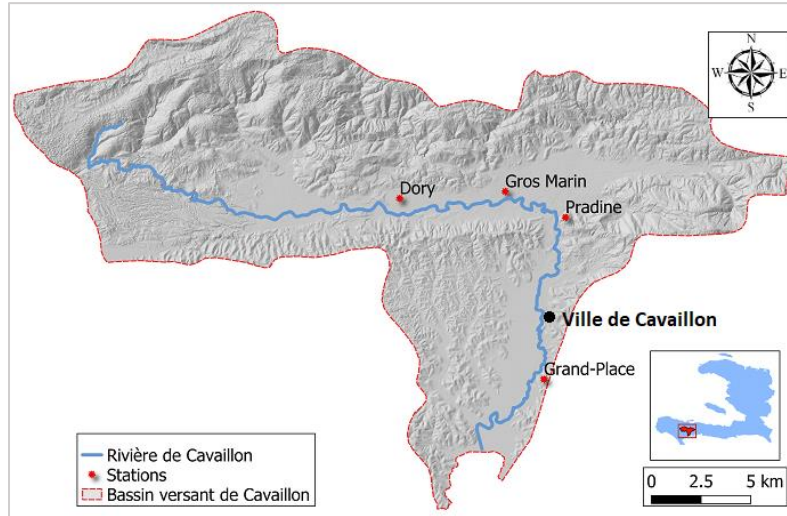


Figure 5-4 - Stations pluviométriques et hydrométriques dans le bassin versant

La Station de Dory ainsi que celle de Grand-Place disposaient de pluviographes et de sondes plongées dans la rivière donnant les niveaux d'eau. Dans les stations de Pradine et de Gros marin seulement des sondes de mesure du niveau d'eau ont été installées.

Au cours de l'ouragan Matthew en octobre 2016, la station de Grand-Place n'avait pas fonctionné. Les sondes installées dans les stations de Dory, Pradine et Gros-marin ont été emportées par la crue. Certaines données de niveau d'eau ont été récupérées au niveau de la station de Dory avant que la sonde ne soit emportée par le courant. Le pluviographe de Dory a enregistré les données de pluie de l'ouragan Matthew pendant toute la période. Deux hydrogrammes ont été créés à partir des données disponibles à Dory lors des deux recherches précédentes (Carlier, 2018 ; Joseph, 2019). Un premier hydrogramme utilisant la relation profondeur d'eau et débit. Un autre en utilisant un logiciel, l'ATelier HYdrologique Spatialisé (ATHYS). Les méthodes établies pour construire ces hydrogrammes sont présentées ci-après.

5.2.1 Méthode Hauteur-Débit

Cette approche utilisée par Carlier (2018), consiste, comme précisé précédemment, à créer un hydrogramme à Dory (Figure 5-4) par une relation Hauteur-Débit. Pour ce faire les données de niveaux d'eau d'une sonde de pression ont été utilisées.

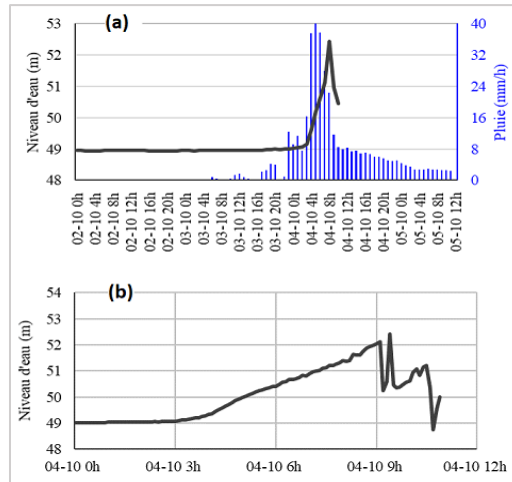


Figure 5-5.- Données recueillies dans la sonde (Carlier, 2018)

L'évolution du niveau d'eau enregistrée par la sonde a été comparée aux données de pluie collectées pendant la même période à partir d'un pluviographe installé dans le même périmètre (Figure 5-5a). Les deux jeux de données semblent être logique mais en regardant de plus près, des anomalies ont été détectées (Figure 5-5a). L'explication possible est que la crue de la rivière a dans un premier temps fait détacher le support de la sonde de ses fondations dans le lit de la rivière pour trouver une position d'équilibre précaire dans laquelle les mesures ont continué à être enregistrées pendant une heure avant que la sonde ne soit arrachée et emportée.

Pour pallier ce manque, Carlier (2018) a proposé une extrapolation légère représentée par des traits interrompus rouge (Figure 5-6), pointillé rouge à partir des données jugées fiables représentées en vert sur la même figure avec l'hypothèse d'une augmentation continue du niveau d'eau similaire aux observations antérieures.

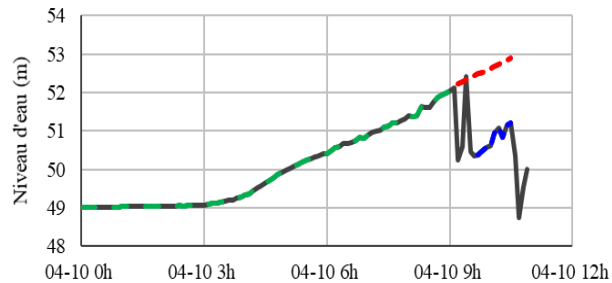


Figure 5-6.-Extrapolation de données (Carlier 2018)

Cette hypothèse a été complétée par plusieurs modélisations dont en se basant sur le niveau d'eau qui aurait dispersé des laisses de crue dans la plaine inondable. Ainsi plusieurs débits ont été simulés jusqu'à arriver à un niveau où la profondeur correspond parfaitement aux laisses de crues (Figure 5-7). Ce niveau d'eau est considéré comme le niveau maximal et elle correspond plus ou moins au niveau maximal de l'extrapolation de la figure 5-6.

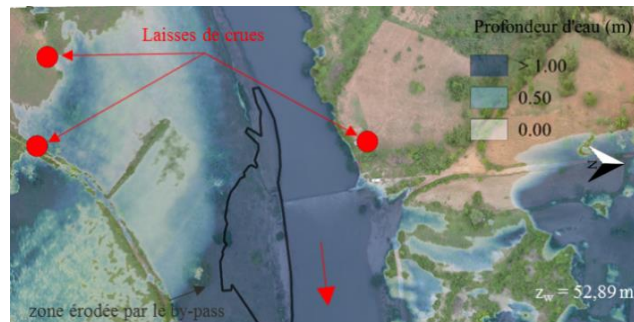


Figure 5-7.- Niveau d'eau et laisses de crues (Carlier, 2018)

Ainsi le niveau $Z_w = 52.89$ m était considéré comme le niveau maximal et constitue le pic de la crue de 2016 suivant cette méthodologie.

Toute cette démarche a consisté à la création de la partie montante de l'hydrogramme, la crue. La décrue a été considérée comme indépendante de l'averse et est réalisée à partir des caractéristiques du bassin versant. Le profil de la courbe de décrue a été déterminé sur base d'événements antérieurs comme la crue de mai 2016 (Figure 5-8).

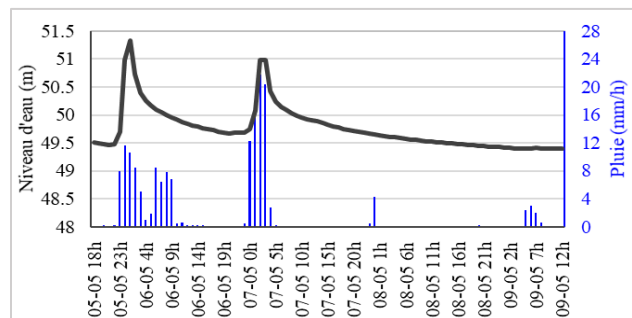


Figure 5-8.- Hydrogramme de la crue de mai 2016

Ainsi la courbe de décrue a été obtenue en faisant aussi l'hypothèse que le débit sera toujours proportionnel au débit précédent à un facteur près lié au temps qui sépare les deux débits. En considérant que la décrue est uniquement dépendante du bassin versant, et non de la pluie, il a obtenu une constante à réutiliser pour établir le profil de n'importe quelle décrue en suivant la relation de Réménérias (1965) :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha_r t} \quad (5.1)$$

La reconstruction de l'hydrogramme est complète (Figure 5-9)

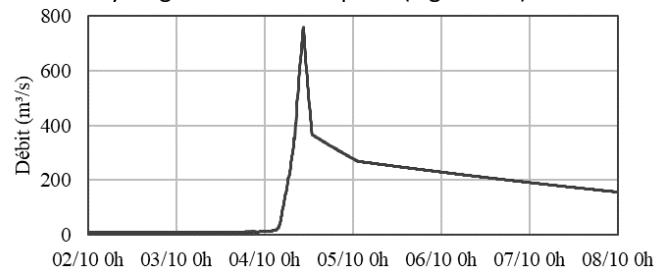


Figure 5-9.- Hydrogramme proposé dans l'épisode Matthew (Carlier, 2018)

Malheureusement la construction de cet hydrogramme (crue et décrue) est basée sur de nombreuses hypothèses qui affectent sa fiabilité.

5.2.2 Hydrogramme à partir de ATHYS

Le deuxième hydrogramme est créé avec les données de pluie enregistrées à Dory (Figure 5-4), en utilisant le modèle hydrologique ATHYS dont les détails seront donnés plus tard dans le document (Joseph, 2019).

La première partie de l'hydrogramme avant la panne de l'appareil est utilisée comme paramètre de calage dans le logiciel ATHYS, car elle était fiable. Pour les besoins de la modélisation hydraulique qui concernait précisément la ville de Cavaillon (Figure 5-4), deux autres hydrogrammes ont été calculés celui de Gros-Marin et celui de Pradine.

Cet hydrogramme est créé uniquement à partir des données collectées à Dory (Figure 5-10). A cet hydrogramme ont été ajoutés deux autres hydrogrammes représentant respectivement les affluents de Gros-marin et de Pradine en utilisant une autre source de données : le Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) qui est présenté ci-après.

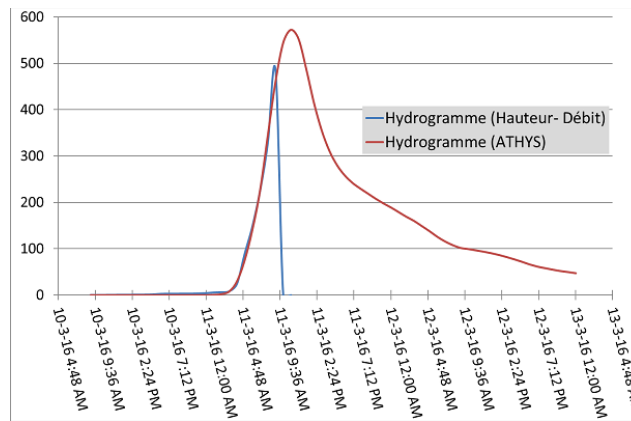


Figure 5-10.- Hydrogramme de crue simulé au niveau du déversoir de Dory (Joseph,2019)

Malheureusement ces données ne sauraient à elles seules représenter tout le sous bassin versant en amont de la ville de Cavaillon. La présente étude présente une méthode similaire en utilisant la source de données GES DISC, pour les données de pluie sur tout le sous bassin amont de la ville de Cavaillon pour créer un hydrogramme. La validation des données de GES DISC est donnée dans les paragraphes suivants. Une présentation de la source de donnée est donnée ci-après.

5.3 Le Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)

Le centre de services de données et d'information (DISC) Goddard Earth Sciences (GES) de la NASA situé au Goddard Space Flight Center (GSFC) à Greenbelt, dans le Maryland, est l'un des 12 centres de données de la direction des missions scientifiques de la NASA qui fournissent des données, des informations et des services sur les sciences de la Terre aux chercheurs scientifiques, aux scientifiques des applications, aux utilisateurs d'applications et aux étudiants.

Le GES DISC a créé l'infrastructure interactive de visualisation et d'analyse en ligne GES DISC, « Giovanni (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) », pour permettre la visualisation et l'analyse sur le Web d'ensemble de données météorologiques, océanographiques et hydrologiques télédéteectées par satellite. Le terme Giovanni n'est que l'interface qui donne accès aux données mais étant plus facile à utiliser ce nom fera toujours référence dans les prochaines parties du document au GES DISC. Le système Giovanni opérationnel actuel contient huit (8) interfaces différentes qui permettent de traiter un certain nombre de mesures satellitaires importantes. Selon la structure des données d'entrée,

le système fournit différentes analyses statistiques simples et crée de nombreuses images de type tracé utile ou une sortie ASCII. Giovanni traite les données avec différentes résolutions temporelles et spatiales et, ainsi, permet à la fois des recherches climatiques régionales et mondiales à long terme et des enquêtes sur des événements particuliers à court terme, ainsi que des validations et des évaluations de données. En raison de sa simplicité d'utilisation, Giovanni est puissant et polyvalent, capable d'aider un large éventail d'utilisateurs, des scientifiques de la discipline menant des recherches préliminaires dans divers domaines aux étudiants en classe qui apprennent la météo, le climat et d'autres phénomènes naturels.

Parmi les différentes interfaces, on peut citer celle qui nous intéresse dans cette étude à savoir le système de visualisation de données et d'analyse en ligne agricole. Il s'agit du nom de l'interface mais l'utilisation n'est pas restreinte à l'usage agricole. Cette interface qui permet aux utilisateurs de visualiser et d'analyser les précipitations mondiales sur 30 minutes, 3 heures, quotidiennement, sur 10 jours et mensuellement et en temps quasi réel (qualité expérimentale). La résolution spatiale des données mensuelles de climatologie et d'anomalie est de $1,0^{\circ} \times 1,0^{\circ}$ et toutes les autres données sont de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$, cette dernière résolution correspond à plus d'une vingtaine de kilomètres.

5.3.1 Validation des données de Giovanni

Pour cette validation, les données collectées avec le pluviographe à Dory pendant l'ouragan Matthew en 2016 ont été comparées aux données du satellite Giovanni. La plateforme fait la moyenne des précipitations pour une surface donnée et donne la possibilité à plusieurs jeux de données pour un même événement. Cependant elle indique à chaque fois un jeu de données qui est recommandé pour l'utilisation générale. L'inconvénient de la prise de données sur la plateforme est la difficulté de trouver une configuration qui délimite uniquement le bassin versant recherché. Plusieurs manipulations sont nécessaires avant de trouver une superficie qui correspond grossièrement à la superficie recherchée (Figure 5-11).

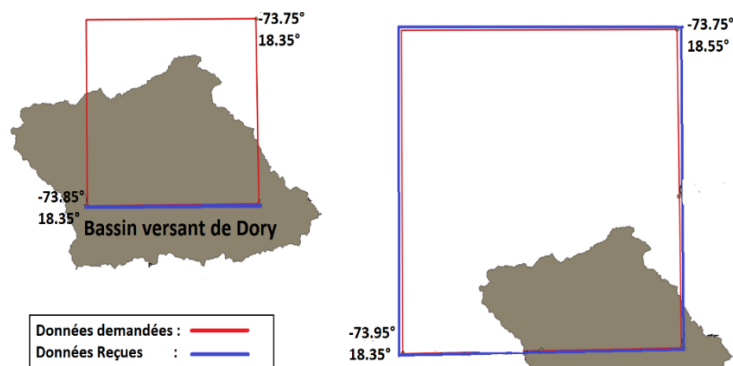


Figure 5-11.- Mailles de données dans le satellite Giovanni

Les cellules de données du satellite les plus proches des données collectées sur le terrain ont été traitées. Les données recommandées pour l'utilisation générale par la plateforme ont été utilisées pour les comparaisons (Figure 5-12). Les données de Giovanni qui sont recommandées pour l'utilisation générale semble bien concorder avec les données collectées mais sont dans certaines parties en deçà de données réelles de terrain.

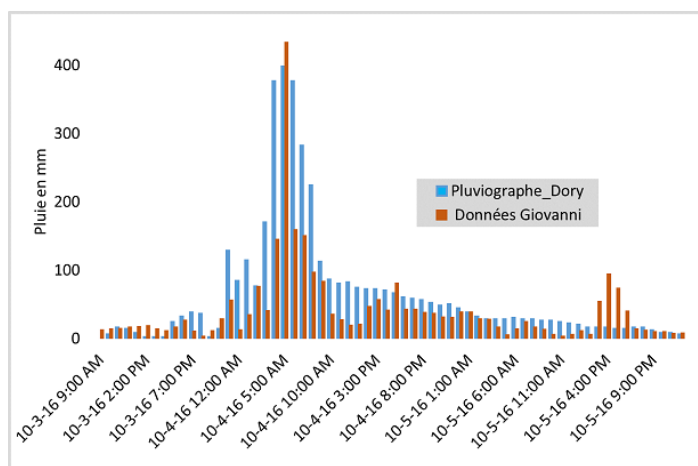


Figure 5-12.- Comparaison des données Giovanni avec les données du pluviographe de Dory

Ces deux jeux de données vont être utilisés dans le logiciel ATHYS pour la production des hydrogrammes.

5.4 ATelier HYdrologique Spatialisé (ATHYS)

L'hydrogramme issu de ces données de pluie est réalisé avec un logiciel connu qui est L'ATelier HYdrologique Spatialisé (ATHYS). En effet, le logiciel ATHYS se présente comme un ensemble de modèles hydrologiques, développé par L'Institut de Recherche pour le Développement de Montpellier (IRD), qui traitent des données hydro climatiques et géographiques (IRD, 2014). En des termes plus simples pour ce qui concerne cette présente étude, elle transforme les pluies qui sont les données faciles à collecter en débits qui sont plus difficiles à obtenir sur le terrain (Figure 5-13). Ce logiciel est formé de 4 composantes (Vishyr, Vicair, Mercedes et Spatial) très bien décrites par *Joseph* (2019), une présentation des grandes lignes est proposée dans la présente étude. Dans la transformation des pluies en débits, le logiciel utilise un modèle numérique de terrain pour la représentation topographique, les données de pluie et certaines caractéristiques du bassin versant et de l'écoulement.

Au cours du traitement, la zone étudiée est divisée en mailles carrées dont à chacune est attribuée une fonction de production (production de débit de ruissellement) et une fonction de transfert qui permet de faire passer le débit produit d'une maille à l'autre.

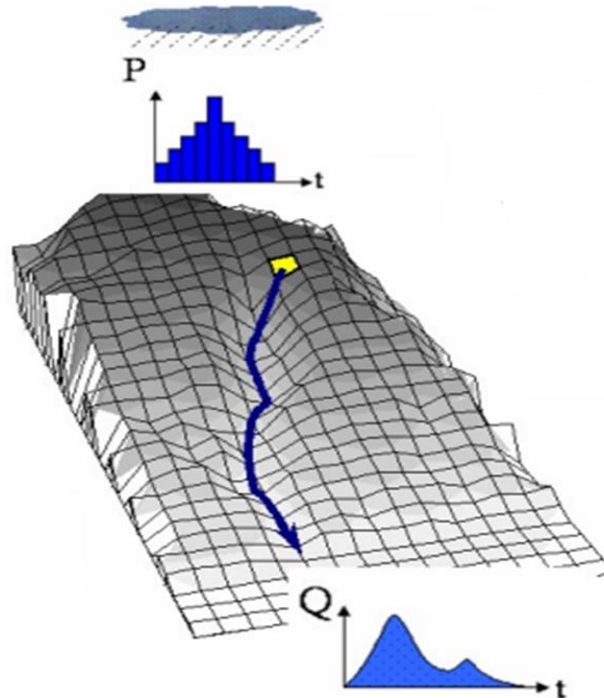


Figure 5-13.- Division du bassin versant en mailles

5.4.1 Fonction de production

La fonction de production utilise le modèle du « Soils Conservation Service » (SCS) dont l'idée général est de trouver un lien entre la pluie brute qui sont les précipitations elles-mêmes et la pluie efficace qui est la partie ruisselée de ces précipitations. Le bassin versant est divisé en mailles (Figure 5-13) dont chacune va produire une pluie efficace. Ces mailles sont généralement issues d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Chaque maille produit un débit.

La pluie reçue dans chaque maille est considérée comme une pluie brute. La pluie brute reçue par une maille du temps (t) jusqu'au temps $t+\Delta t$ est noté $P_b(t)$. Celles-ci sont ensuite transformées en pluie efficace notée $P_e(t)$ après avoir perdu une certaine quantité dans l'infiltration (I). Cette perte dépend grandement de la capacité de stockage du sol (S) qui sert de réservoir pour les l'infiltration, elle dépend aussi des caractéristiques du sol et des conditions de l'écoulement. Cette première transformation qui est nécessaire n'est pas suffisante, elle le serait si en réalité la seule perte était l'infiltration. Il existe d'autres pertes qu'il faut aussi prendre en considération comme l'évaporation et l'interception. Ces pertes sont donc intégrées dans le modèle et au final un coefficient est obtenu permettant de transformer raisonnablement la pluie brute en pluie efficace.

L'approche la plus simple est de lier la pluie efficace ($P_e(t)$) avec la pluie brute ($P_b(t)$) en utilisant un coefficient, le gros du travail est de trouver ce coefficient.

$$P_e(t) = C(t) \times P_b(t) \quad (5.2)$$

Dans un premier temps, le principe de base de la méthode est de considérer que le rapport pluies efficaces cumulées et pluies brutes cumulées est égal au rapport pluies brutes cumulées et pluies brutes cumulées plus le stockage (eq 5.3).

$$\frac{\sum P_e(t)}{\sum P_b(t)} = \frac{\sum P_b(t)}{\sum P_b(t) + S} \quad (5.3)$$

L'idée est de considérer que toute la pluie brute ($P_b(t)$) devienne la pluie efficace en absence de stockage dans le sol. Dans un autre sens, si la capacité de stockage (S) est infinie, toute la pluie brute disparaît en infiltration, il n'y a pas de ruissellement ($P_e(t)$). C'est une relation qui indique les pertes par infiltration.

Cette relation (eq 5.3) va être modifiée en intégrant un élément important qui est le volume d'infiltration initial. L'infiltration initiale (I_a) est considérée comme la perte par infiltration des premières pluies brutes qui atteignent le sol sans donner lieu à ruissellement. Cette partie I_a de la pluie brute est donc perdue.

$$\frac{\sum P_e(t)}{\sum P_b(t) - I_a} = \frac{\sum P_b(t) - I_a}{\sum P_b(t) - I_a + S} \quad (5.4)$$

Cette capacité initiale (I_a) équivaut en moyenne à 20% de la capacité de stockage (S), selon le SCS. La relation devient alors :

$$\frac{\sum P_e(t)}{\sum P_b(t) - 0.2S} = \frac{\sum P_b(t) - 0.2S}{\sum P_b(t) - 0.2S + S} = \frac{\sum P_b(t) - 0.2S}{\sum P_b(t) + 0.8S} \quad (5.5)$$

En réarrangeant un peu les termes :

$$\sum P_e(t) = \frac{(\sum P_b(t) - 0.2S)^2}{\sum P_b(t) + 0.8S} \quad (5.6)$$

La définition d'un coefficient de ruissellement précise et exacte passe par la dérivée de la pluie efficace cumulée ($\sum P_e(t)$) par rapport à la pluie brute cumulée ($\sum P_b(t)$).

$$c(t) = \frac{d \sum P_e(t)}{d \sum P_b(t)} \quad (5.7)$$

En développant les différents termes on obtient à la fin ce coefficient :

$$c(t) = \left(\frac{\sum P_b(t) - 0.2S}{\sum P_b(t) + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{\sum P_b(t) - 0.2S}{\sum P_b(t) + 0.8S} \right) \quad (5.8)$$

La pluie brute cumulée dans (5.8) va être modifiée afin d'intégrer d'autres éléments qui interviennent aussi lors des précipitations. Ces éléments qui sont l'interception, l'évaporation, et le ressuyage du sol et vont être représentés dans un nouveau modèle de réservoir (Figure 5-14).

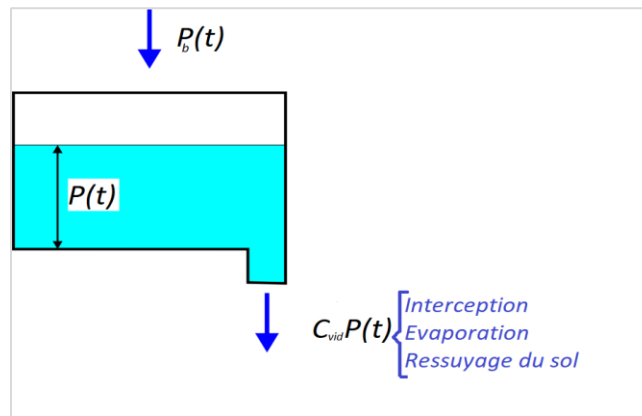


Figure 5-14.- Nouveau modèle de réservoir

Ce modèle reçoit de la pluie brute instantanée qui le remplit et a une hauteur $P(t)$ et qui a une vidange qui représente les éléments cités plus haut. Cette vidange va être proportionnelle à la lame d'eau dans le réservoir moyennant un coefficient de vidange (Figure 5-14).

L'équation 5.8 subit donc une modification en remplaçant la somme des pluies brutes par la hauteur d'eau dans le réservoir $P(t)$ et comme ça on tient compte automatiquement des autres pertes, la relation devient:

$$c(t) = \left(\frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \quad (5.9)$$

L'équation 5.2 devient au final :

$$P_e(t) = P_b(t) \left(\frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \quad (5.10)$$

Un autre élément important est que la partie non ruisselée de la pluie va participer à l'écoulement souterrain (Figure 5-15).

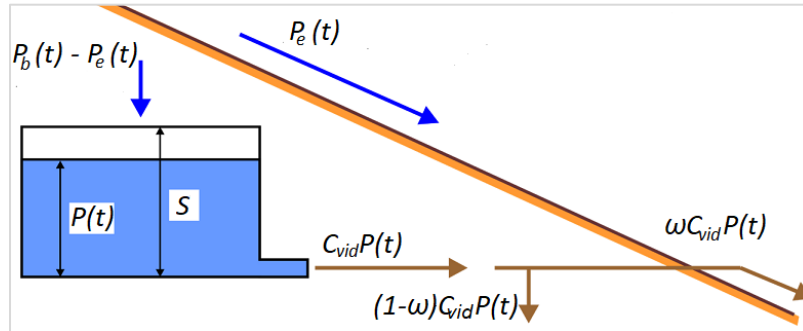


Figure 5-15.- Ecoulement souterrain

De cette partie une portion va percoler et elle est perdue et l'autre portion va resurgir un peu plus en aval pour participer au ruissellement. Le débit ruisselé devient alors :

$$Q(t) = P_e(t) + \omega C_{vid} P(t) \quad (5.11)$$

Parmi les coefficients présents dans la formule (équation 5.11), les paramètres C_{vid} et ω varient très peu d'un bassin versant à l'autre. Le coefficient de stockage (S) par contre est très variable. Ce coefficient, selon le *Sol Conservative Service (SCS)*, dépend de

plusieurs facteurs : type de couverture des sols, les conditions hydrologiques des surfaces cultivées ainsi que la texture et la structure des sols (Argile, sable).

Suivant les types hydrologiques, les sols peuvent être fortement sableux (sable supérieur à 90%), ou sableux (50-90% de sable), peu sableux (inférieur à 50% de sable), ou argileux (Argile supérieur à 40%). Les types hydrologiques sont résumés dans le tableau 5-1.

Tableau 5-1.- Types hydrologiques de sol

Types hydrologiques	Matériaux	
	Sable	Argile
A	> 90%	< 10%
B	50 > x > 90%	10 > x > 20%
C	< 50%	20 > x > 40%
D		> 40%

Plus le sol est sableux, plus il y aura d'infiltration et plus la recharge du réservoir sous terrain va être favorisé. Un sol sableux aura tendance à augmenter le coefficient de stockage.

Selon Le SCS, les conditions hydrologiques de surface peuvent être de deux types : elles peuvent mauvaises en ayant des cultures en lignes et pas de travail de conservation des sols ; Elles peuvent aussi être bonnes avec les rotations de cultures accompagnées d'autres techniques de conservation des sols. Les bonnes conditions hydrologiques des sols augmentent le coefficient de stockage.

En ce qui concerne la couverture des sols, elle peut être de plusieurs types, on y distingue : Les espaces de pâtures, les prairies, les bois, les forêts, les espaces ouverts, les surfaces imperméables (parking, toitures), les rues et les routes (asphaltées, terre battue), les quartiers centraux et les quartiers résidentiels.

Les surfaces imperméables ne favorisent pas l'infiltration (routes en asphalte, parkings), contrairement aux espaces ouverts (espaces verts, bois et forêts). Le tableau 5-2 résume la variation du coefficient de stockage en fonction des trois paramètres (Types de couverture, conditions hydrologiques et types hydrologiques des sol).

Tableau 5-2.- Capacité de stockage du Sol

Couverture		Capacité de stockage (mm) par type hydrologique des sols			
Type de couverture	Conditions hydrologiques	A	B	C	D
Pâtures, prairies	Mauvaises	120	68	41	31
	Moyennes	264	114	68	48
	Bonnes	397	162	89	64
Prairies		593	184	104	72
Bois et prairies	Mauvaises	192	94	56	41
	Moyennes	337	137	80	56
	Bonnes	540	184	99	68
Bois et forêts	Mauvaises	310	131	76	52
	Moyennes	452	169	94	68
	Bonnes	593	208	109	76
Fermes et dépendances		177	89	56	41

Les autres coefficients concernant les surfaces imperméables, les quartiers centraux et les quartiers résidentiels sont données en annexe.

5.4.2 Fonction de transfert

Une fois que ce débit est produit dans une maille, elle va se propager dans les autres mailles suivant les directions de plus grande pente, selon la topographie du terrain d'où l'importance du modèle numérique de terrain (Figure 5-16).

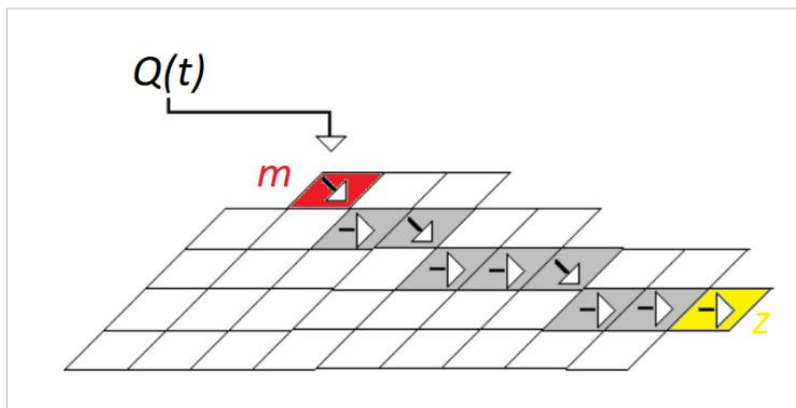


Figure 5-16.- Transfert du débit produit d'une cellule à une autre

Le logiciel part sur la base que l'hydrogramme qui peut représenter un bassin versant est celui qui est récolté à l'exutoire. La fonction de transfert exprime le transport de tous les débits produits dans toutes les mailles à l'exutoire. Le débit produit dans la maille **m** va mettre un certain temps pour arriver à l'exutoire **z** (Figure 5-16). Le temps va être le rapport de la somme des distances parcourues de **m** à **z** par la vitesse à laquelle l'eau passe d'une maille à l'autre qui dépend de la pente locale de la maille.

$$T_m = \sum \frac{l_k}{v_k} \quad (5.12)$$

Avec l_k et v_k qui représentent respectivement les longueurs et les vitesses des k mailles comprises entre la maille **m** et l'exutoire **z**. La vitesse comme précisé plus est fonction de la pente locale de la maille :

$$v_k(t) = v_0 (S_{0,k})^\alpha \quad (5.13)$$

Pour faciliter les calculs dans notre cas, et faute de données suffisantes, la vitesse est considérée comme constante avec α nul.

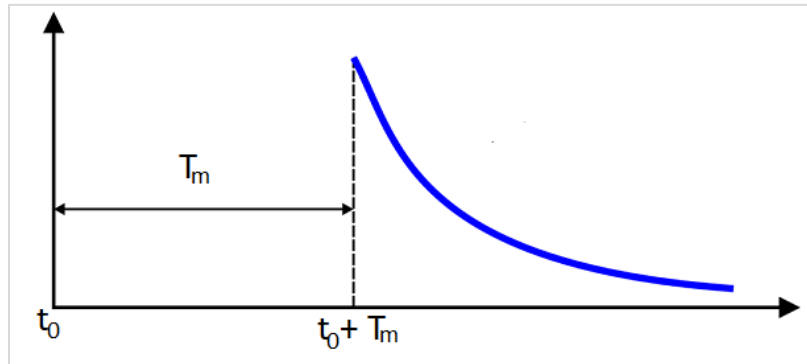
Le débit de chaque maille dépend de la durée des précipitations. Si ce temps considéré est inférieur au temps (T_m) nécessaire pour que le débit produit dans la maille **m** arrive à l'exutoire, la maille ne participe pas. Par contre, si ce temps est supérieur à T_m , la maille participe à l'exutoire et ce débit dépend de l'aire de la maille, de l'apport initial $P_e(t_0)$ d'un coefficient de diffusion qui a les dimensions d'un temps (K_m), et du temps (t).

$$\begin{aligned} &\text{Si } t < t_0 + T_m \text{ alors } Q_m(t) = 0 \\ &\text{Si } t > t_0 + T_m \text{ Alors } Q_m(t) = \frac{P_e(t_0)}{K_m} A \cdot \exp\left(-\frac{t - (t_0 + T_m)}{K_m}\right) \end{aligned} \quad (5.14)$$

Le temps de diffusion, K_m est déterminé à partir de la relation :

$$K_m = K_0 T_m \quad (5.15)$$

Ce débit quand il arrive à l'exutoire est maximal au début pour ensuite diminuer comme une exponentielle décroissante (Figure 5-17).

Figure 5-17.- Transfert de la maille m

Certains paramètres des fonctions de production et de transfert ont des valeurs par défaut qui n'ont pas besoin de modification. Les paramètres les plus importants sont le paramètre de stockage (S) et la vitesse de propagation d'une maille à une autre (v_0).

5.5 Construction de l'hydrogramme pour la rivière de Cavaillon

La construction de l'hydrogramme qui servira de données d'entrée dans le modèle hydraulique a été fait en deux étapes : Une première étape qui a consisté à définir certains paramètres du logiciel ATHYS afin de trouver un hydrogramme similaire à celle de *Joseph* (2019). En effet les seules données disponibles au niveau du bassin versant sont les données collectées à Dory, même si le bassin versant de Dory ne saurait représenter à lui seul toute la partie en amont du modèle hydraulique de la ville de Cavaillon (Figure 5-18). La seconde étape a consisté à créer l'hydrogramme d'entrée en utilisant les données représentant le bassin versant nord à partir des satellites de GES DISC qui peuvent couvrir tout le bassin versant Nord dont le sous bassin versant de Dory en fait partie avec les paramètres ajustés obtenus dans la première étape.

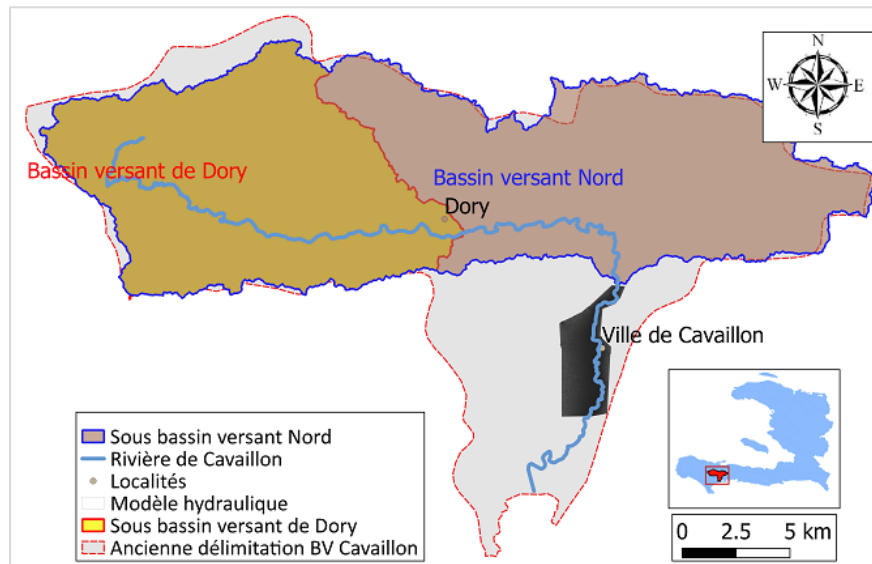


Figure 5-18.- Les sous bassins de la rivière de Cavaillon

Une première comparaison avait été effectuée entre les données satellitaires Giovanni et les données enregistrées avec le pluviographe de Dory pendant l'ouragan Matthew. Les deux jeux de données avaient la même tendance mais à vue d'œil les données des satellites paraissaient inférieures aux données mesurées à Dory en termes de volume (Figure 5-19).

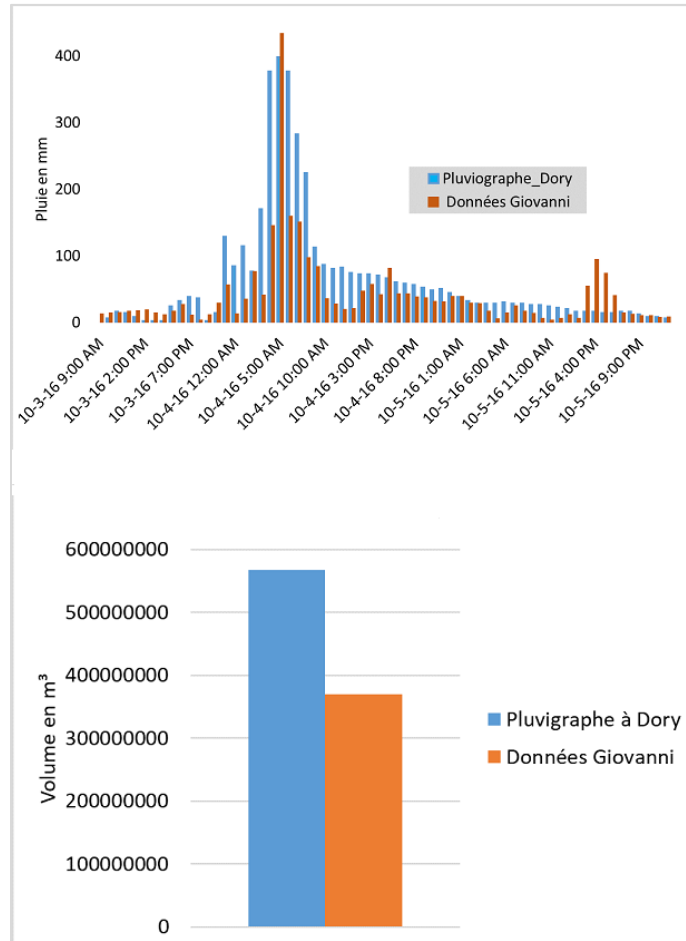


Figure 5-19.- Comparaison des données du pluviographe de Dory et des données de GES DISC

Cette différence entre les différents jeux de données a été démontrée par la comparaison des volumes de pluie entre les deux sources de données (Figure 5-19). Il faut un ajustement dans ces données pour qu'elles puissent refléter la réalité du terrain.

5.5.1 Construction d'hydrogrammes pour le sous bassin de Dory

Plusieurs hydrogrammes ont été créés pour le bassin de Dory avec les deux jeux de données : les données du pluviographe de Dory et les données satellitaires Giovanni (Figure 5-19). La construction des hydrogrammes a été faite en deux étapes. Une première étape a consisté à calibrer le modèle avec les données de débit obtenues à

partir des niveaux d'eau enregistrés avant que l'appareil de mesure ne soit emporté par le courant. Cette étape a conduit à modifier les valeurs de paramètres utilisés dans ATHYS de telle manière que les hydrogrammes résultants des différents jeux de données (Dory et Giovanni) soient similaires (Figure 5-20).

Ce procédé, qui consiste à manipuler les paramètres d'ATHYS pour que les pluies issues de Giovanni restituent les hydrogrammes correspondant aux pluies réellement mesurées, n'est évidemment pas idéal mais il permet d'utiliser les données de pluies dans les parties du bassin versant de la rivière de Cavaillon où n'existent aucune mesures directes des précipitations.

L'étape suivante a donc consisté à modéliser les pluies de Giovanni sur tout le bassin versant Nord en utilisant les paramètres modifiés de la première approche.

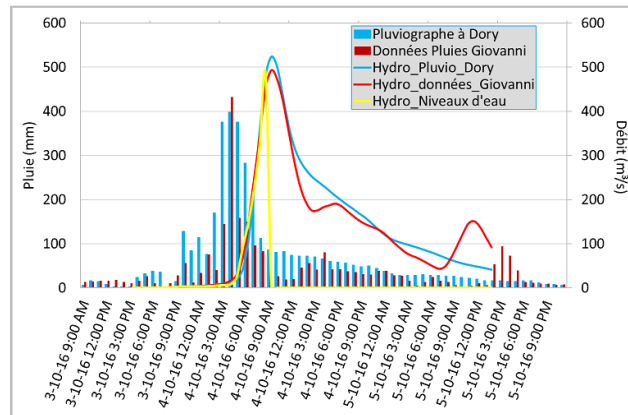


Figure 5-20.- Comparaison entre l'hydrogramme issu des pluies mesurées et l'hydrogramme issu des données satellitaires avec des paramètres d'ATHYS modifiés de telle manière que les hydrogrammes soient plus ou moins similaires .

Pour le fonctionnement du modèle hydrologique de ATHYS, plusieurs données sont nécessaires comme le Modèle numérique de terrain pour la topographie, les données de pluies qui seront transformés en débit, et certaines fois des données de débits qui servent de calibration pour le modèle. Des paramètres sont définis au modèle (*Calage 1*, Tableau 5-3) pour la simulation. Le modèle modifie ses paramètres (*Calage 2*, Tableau 5-3) dans le but d'obtenir des valeurs similaires aux valeurs de calibration. Ces modifications concernent principalement les paramètres de stockage (S) et de vitesse (v). Ces paramètres modifiés conduisent à des résultats plus ou moins similaires à ceux issu de la mesure directe (Figure 5-20). Après la simulation des différents modèles, les hydrogrammes obtenus des différents jeux de données semblent être similaires dans la

partie avant la destruction de l'appareil. Dans la seconde partie les tendances se ressemblent mais les valeurs ne sont pas toujours les mêmes ainsi que les maximums, 493 m³/s pour l'hydrogramme avec les données de Giovanni (et les paramètres d'ATHYS modifiés) et 524 m³/s avec les données mesurées (Figure 5-20). Les paramètres de calibration sont donnés dans le tableau ci-après 5-3. Le calage 1 correspond à une première estimation des paramètres, tant pour les pluies mesurées que pour les pluies issues de Giovanni. Le calage 2 pour les pluies mesurées est obtenu en optimisant les paramètres pour que la montée de l'hydrogramme calculé se rapproche de la montée de l'hydrogramme issu des mesures. Le calage 2 pour les pluies de Giovanni indique les paramètres d'ATHYS qu'il a fallu modifier pour obtenir un hydrogramme proche de l'hydrogramme réel.

Tableau 5-3.-Paramétrage du modèle.

Pluviographe à Dory		S (mm)	Vo (m/s)	Cvid (j ⁻¹)	ω	Ko
	Calage 1	213	1.3	0.4	0.3	0.4
	Calage 2	201	1.79	0.4	0.3	0.4
Données de Pluie de Giovanni		S (mm)	Vo (m/s)	Cvid (j ⁻¹)	ω	Ko
	Calage 1	213	1.3	0.4	0.3	0.4
	Calage 2	44	1.29	0.4	0.3	0.4

Cette première approche a montré que malgré que les données de pluie de Giovanni soient inférieures aux données enregistrées avec le pluviographe de Dory, la calibration permet, avec les données de débit des niveaux d'eau, d'obtenir un hydrogramme plus ou moins similaire à l'hydrogramme avec les données du pluviographe de Dory en modifiant certains paramètres du modèle principalement le paramètre de stockage (S). Il faut par ailleurs signaler qu'il existe encore une incertitude concernant le pic réel de l'hydrogramme à Dory.

Les paramètres modifiés obtenus après calibration ont été réutilisé dans le modèle sans calibration et les résultats sont les mêmes (Figure 5-21).

Ce sont ces paramètres modifiés qui ont été utilisés pour créer les autres hydrogramme dans cette étude.

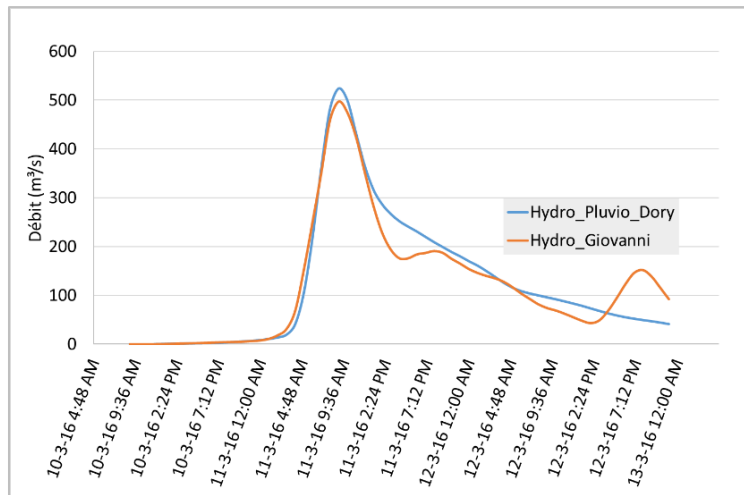


Figure 5-21.— Comparaison des hydrogrammes avec les paramètres modifiés obtenus après calibration pour les données de Giovanni

Il faut surtout se rappeler que le coefficient de stockage varie en fonctions de trois paramètres principaux : type de couverture des sols, les conditions hydrologiques des surfaces cultivées ainsi que la texture et la structure des sols.

Les sols du Bassin versant sont dominés par des zones de cultures agricoles environ 86 %. Ces cultures agricoles peuvent être moyennement denses (47%), denses (28%) ou un système d'agroforesterie dense (11%). Les matériaux alluvionnaires et les matériaux détritiques qui se situent autour de l'axe de la rivière font 25% de la superficie totale du bassin. On retrouve, par contre, les calcaires de type marne au niveau de Champloies (Camp-Perrin) qui représentent 1% du bassin soit 597.949 ha. Les calcaires durs sont les plus représentés du bassin, ils font 74% de la surface total (Chapitre 1). Les conditions hydrologiques des surfaces cultivées peuvent-être considérées comme moyennes.

Ces caractéristiques du Bassin versant permettent de valider le coefficient de stockage de 201 mm obtenu par calibration des données de pluie de Dory avec les données du limnigraphe.

Un peu plus tard dans le travail, d'autres hydrogrammes vont être construits pour des bassins versant ayant des caractéristiques assez différentes de celles présentées précédemment. En effet la zone qui a été inondée est entourée de ravines. Les sous bassins versant des ravines sont surtout caractérisés par une pente forte, étant donné qu'ils drainent les eaux des montagnes. Ces sous bassin ne contiennent pas trop de végétation. Le coefficient de stockage utilisé pour la création de ces hydrogrammes est

celui calculé avec la calibration des données de Giovanni qui est de 44 mm qui correspond aux caractéristiques de ces sous-bassins.

5.6 Construction de l'hydrogramme de la partie Nord en amont du modèle

L'hydrogramme de la partie nord en amont du modèle a été construit avec les données de pluies obtenues à partir de l'interface des satellites de GES DISC (Figure 5-22). Les paramètres de stockages ($S=201\text{mm}$) et de vitesse ($v=1.79\text{m/s}$) obtenus lors du calage réalisé précédemment ont été utilisés.

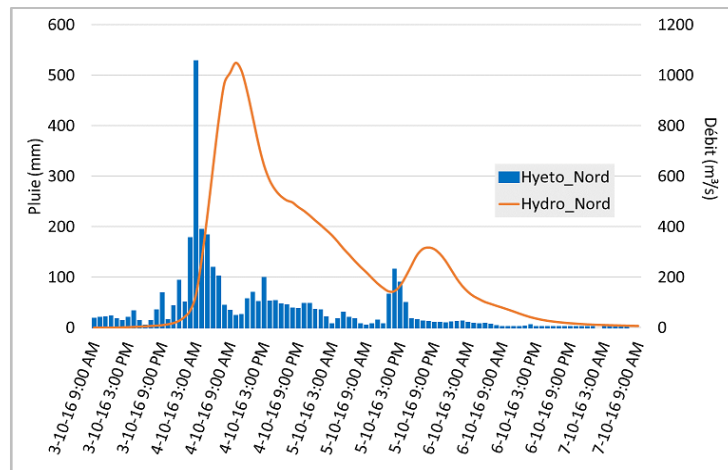


Figure 5-22.-Hyétogramme et hydrogramme du sous bassin Nord

Le pic de l'hydrogramme créé avec les paramètres calibrés (calage_1) est similaire au maximum déjà enregistré sur le bassin versant (USACE, 1999) cité par Carlier (2018).

Le modèle de la ville de Cavaillon et de ses environs a été mis dans les mêmes conditions des premiers modèles du chapitre 5.

Le coefficient de Manning vaut $0.04 \text{ s/m}^{-1/3}$ dans les plaines d'inondation où il y a de la végétation et $0.035 \text{ s/m}^{-1/3}$ dans le lit mineur (Joseph, 2019). Les conditions limites amont et aval sont représentées respectivement par un hydrogramme et un limnigramme obtenu à partir du modèle 1D de la même région d'étude. Les autres frontières du modèle sont laissées libres.

5.7 Simulation du modèle de la ville de Cavaillon

La simulation de ce modèle a été réalisée en deux temps : Dans un premier temps, les seules données de débits sont représentées par l'hydrogramme du bassin versant Nord en amont du modèle de la figure 5-18 reprise en dessous.

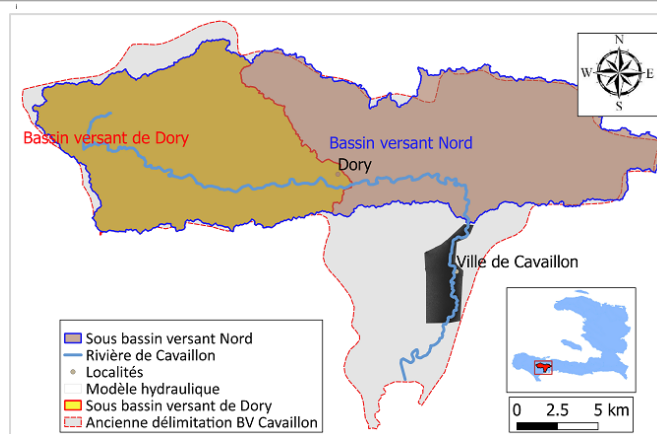


Figure 5-18 – Bassin versant Nord incluant le sous bassin de Dory

Les résultats de ce premier essai ont montré que le domaine de l'inondation représenté par le modèle se trouve en deçà de ce qui s'est réellement passé dans la ville et ses zones avoisinantes (Figure 5-23 ; Figure 5-24). Ce qui porte à croire que la rivière à elle seule n'a pas causé tous les dégâts dans cette zone. Un deuxième essai a été réalisé en intégrant dans le modèle toutes les ravines, dont une description est donnée dans les paragraphes suivants, qui ont participé à l'inondation de la région. Les différentes ravines ont été identifiées par les riverains lors des enquêtes de terrain. Les résultats ont représenté de manière plus ou moins fidèle les inondations de la ville de Cavaillon et de ses environs.

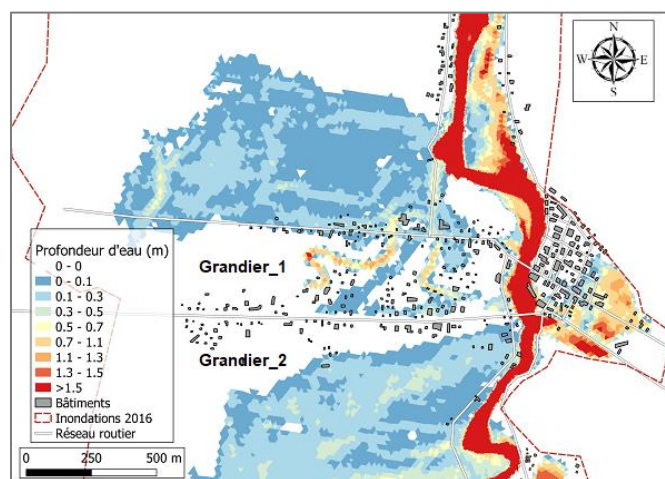


Figure 5-23 - Résultats du modèle

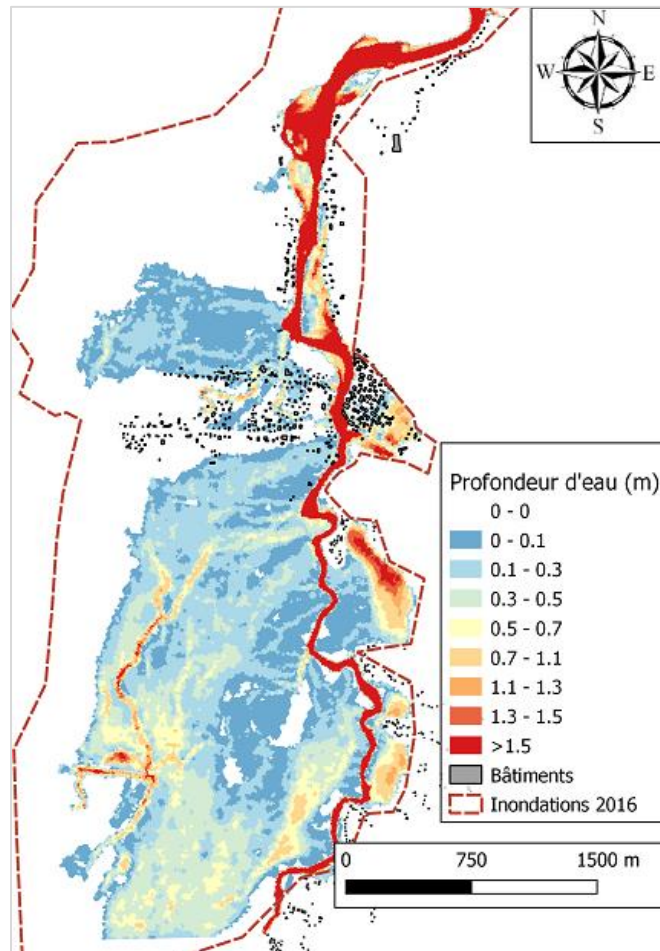


Figure 5-24.-Profondeurs d'eau maximales dans tout le modèle dans l'hypothèse où les ravines sont aussi prises en compte

Les figures 5-23 et 5-24 représentent les profondeurs d'eau maximales de la simulation sur l'ensemble de la zone étudiée.

Dans certaines parties de l'écoulement comme Grandier_1 et Grandier_2 (Figure 5-23), les résultats du modèle sans les ravines ne représentent pas bien ce qui s'est passé lors de l'épisode Matthew. Ce qui veut dire que la rivière à elle seule n'a pas causé tous les dégâts de la ville et de ses environs. Selon les riverains les ravines de la région participent beaucoup dans l'inondation de ces dites régions. Le second modèle va non

seulement prendre en compte les apports de la rivière mais aussi la contribution des différentes ravines.

5.8 Intégration des ravines

Une ravine, dans certains cas, est considérée comme une rivière temporaire qui a un certain débit lors des épisodes pluvieux (Figure 5-24). Elle peut aussi être un drain naturel pour les écoulements lors des grandes pluies.

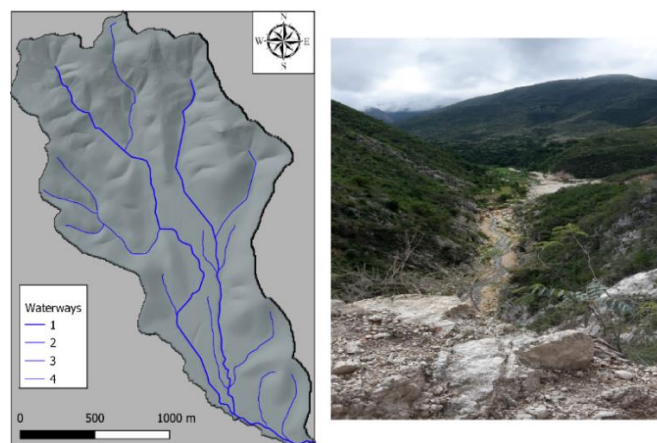


Figure 5-25.- Exemple d'une ravine

Selon les enquêtes de terrain et le témoignage de la population plusieurs ravines ont été repérées dans la zone d'étude. Ces ravines se déversent, lors des grands épisodes pluvieux dans les plaines d'inondation Grandier_1 et Grandier_2 et aussi dans la ville de Cavaillon.

Un nouveau modèle a été réalisé en intégrant les apports de toutes ces ravines dans les plaines d'inondation (Figure 5-25). Les données de pluie ont été obtenues avec le satellite Giovanni. Les sous bassins versants étant très rapprochés, ils ont les mêmes données de pluie à cause de la résolution spatiale des données du satellite ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$). Ces données ont été traitées et converties en hydrogramme avec le logiciel ATHYS comme précédemment en utilisant le paramètre de stockage (S) ajusté qui correspond aux caractéristiques des sous bassins versants ($S = 44 \text{ mm}$). Une remarque assez importante est qu'il y a un certain décalage dans les maximums dans les hydrogrammes des bassins versants (Figure 5-26). Etant donné que le temps de concentration d'un bassin versant dépend de sa forme et de sa grandeur. Plus le bassin versant est grand et/ou long plus son temps de concentration est grand, temps où tout le bassin versant

contribue à l'exutoire. Les petits bassins versant atteignent leur capacité maximale assez tôt.

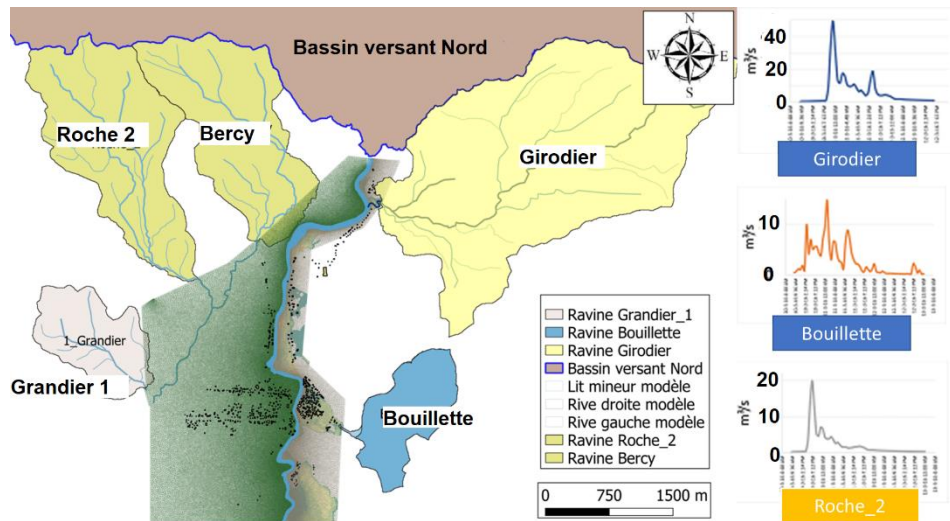


Figure 5-26.-Intégration des ravines dans le modèle hydraulique

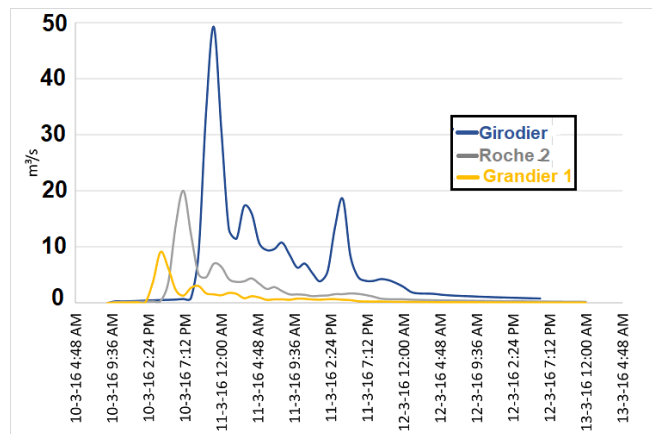


Figure 5-27.- Décalage dans le temps des hydrogramme

La simulation du nouveau modèle est réalisée avec, comme données en entrée l'hydrogramme du bassin versant Nord ainsi que les différents hydrogrammes obtenus des différentes ravines dans la zone d'étude (Figure 5.26). La simulation a débuté à 9h du matin, l'heure où la sonde limnométrique à Dory commençait réagir

Les résultats montrent que les ravines inondent la ville de Cavaillon et les plaines inondables avant même le débordement de la rivière (Figure 5-28).

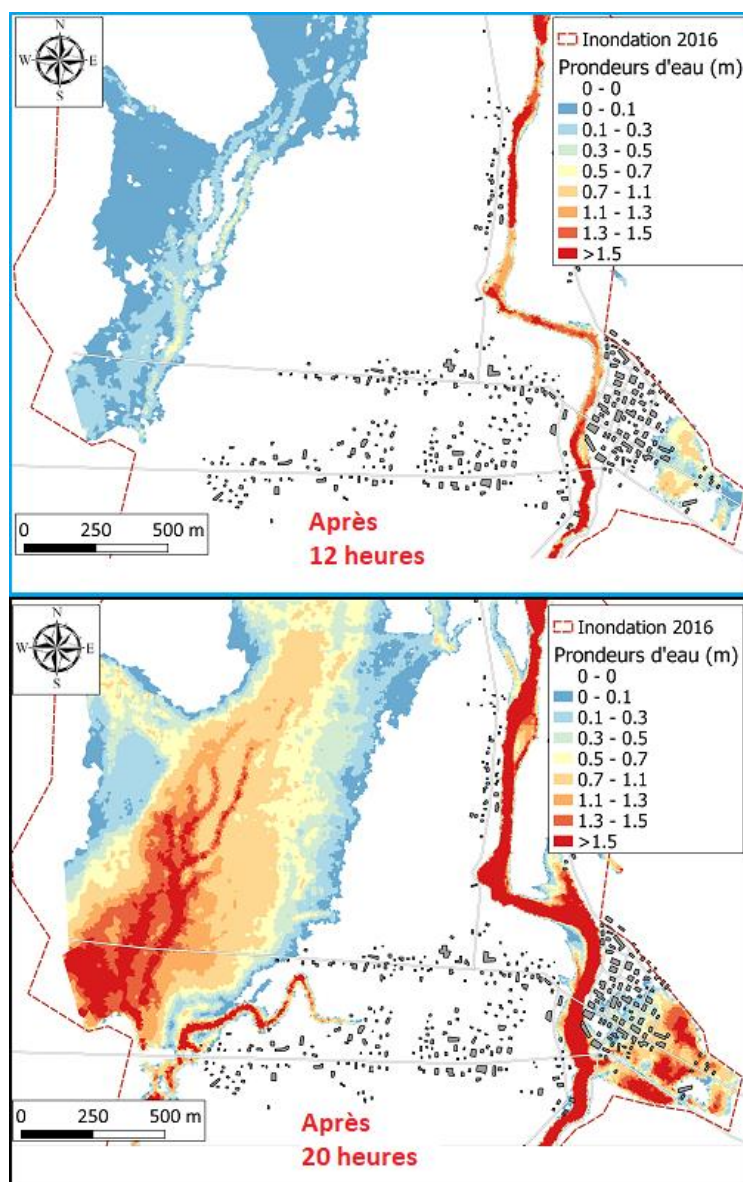


Figure 5-28.- Impact des ravines

Les profondeurs d'eau maximales sont atteintes après 35 heures (Figure 5-29).

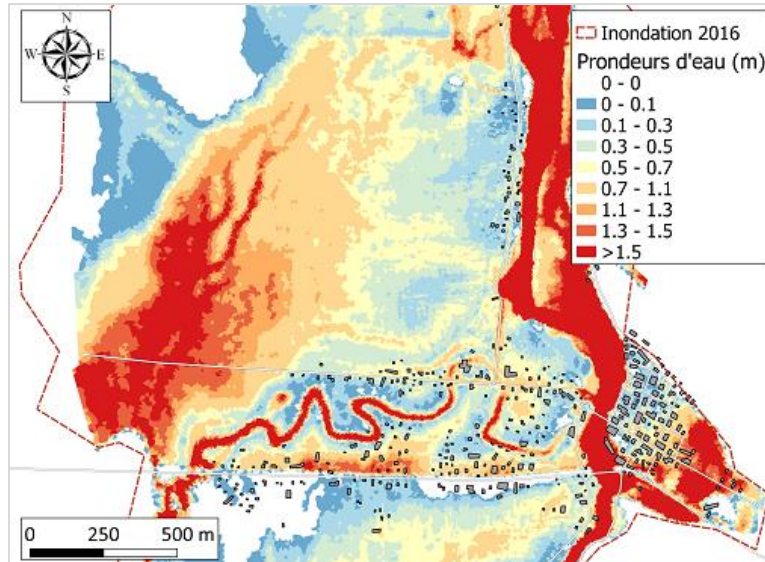


Figure 5-29.-Profondeurs d'eau maximales

Ces profondeurs d'eau sont accompagnées des vitesses d'écoulement (Figure 5-29)

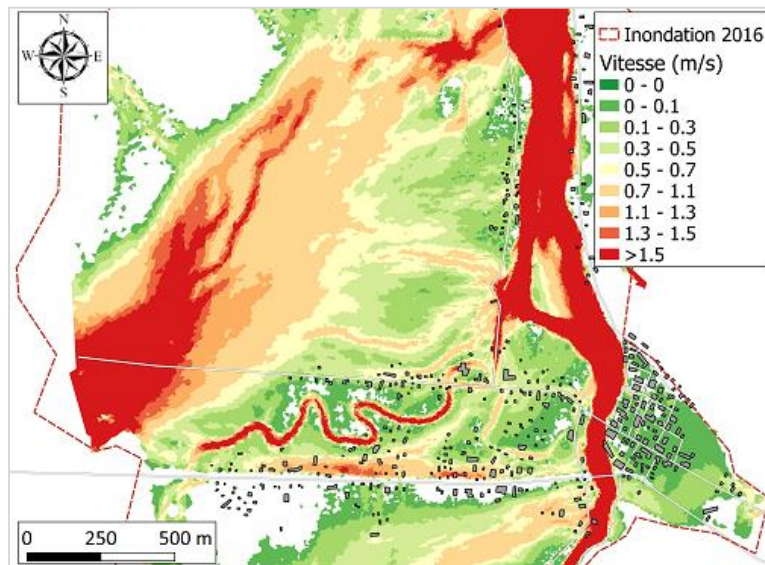


Figure 5-30.- Vitesse d'écoulement (m/s)

Ces nouveaux résultats semblent bien concorder avec les enquêtes de terrain (Figure 5-29 ; 5-30). Ce qui démontre que les ravines, qui sont souvent négligées dans les modèles, ont un apport considérable dans les inondations lors des grands épisodes pluvieux. D'autres cartes des vitesses d'écoulement et d'aléas sont obtenues à partir des résultats de cette simulation.

Pour réaliser les cartes d'aléa inondations les profondeurs d'eau doivent être croisées avec les vitesses d'écoulement. Les caractéristiques de cette carte sont données par le tableau 1 qui a été déjà présenté dans le chapitre 3.

Tableau 5-4.-Caractéristiques de l'aléa

Aléa Inondation		Vitesse (m/s)		
		V<0.5	0.5<V<1	V>1
Profondeur (m)	H<0.25	Faible	Moyen	Moyen
	0.25<H<0.5	Moyen	Fort	Fort
	0.5<H<1	Fort	Très fort	Très Fort
	H>1	Fort	Très fort	Très fort

Ces caractéristiques faible, moyen, fort et très fort sont converties en nombre en faisant le produit des profondeurs d'eau et des vitesses d'écoulement, pour être représentées dans la carte d'aléa. Les valeurs limites maximales sont utilisées à chaque fois pour le croisement des deux caractéristiques de l'écoulement (Profondeurs d'eau et vitesses d'écoulement).

Aléa Inondation		Vitesse (m/s)		
		0.45	0.95	1.00
Profondeur (m)	0.24	0.11	0.23	0.24
	0.45	0.20	0.43	0.45
	0.95	0.43	0.90	0.95
	1.00	0.45	0.95	1.00

Ainsi, les résultats obtenus avec la modélisation sont convertis en par cette méthode et présentés sous forme de carte d'aléa inondation pour la ville de Cavaillon et des zones avoisinantes (Figure 5-30).

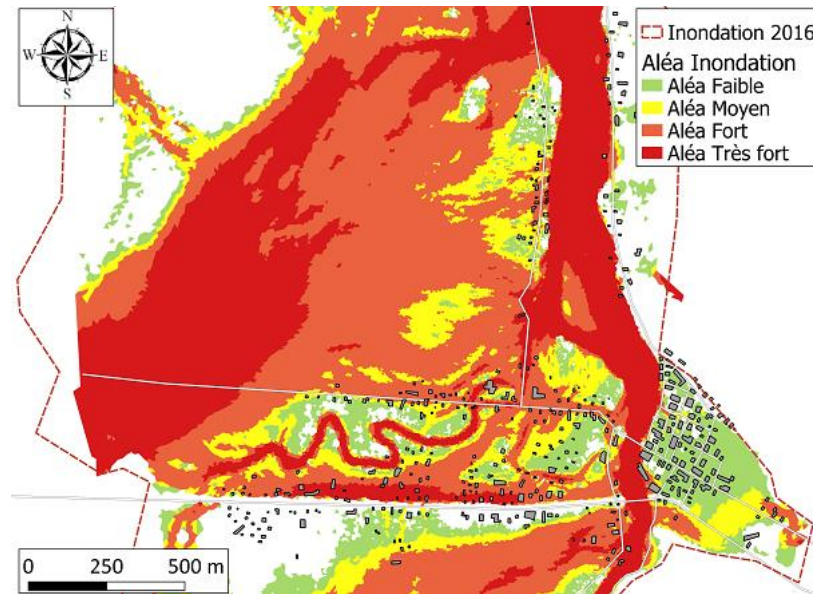


Figure 5-31.- Carte d'aléa inondation

Une comparaison entre les résultats du modèle et les données collectées sur le terrain a été réalisée. Les données récoltées sur le terrain proviennent des témoignages de la population et les marques laissées par l'eau sur les murs de certaines maisons (Figure 5-31). Cette comparaison est donnée dans le tableau (5-5), les parties colorées correspondent à la figure 5-32.

Tableau 5-5- Comparaison entre données collectées et résultats du modèle

Quartier	Coordonnées géographiques		Hauteur d'eau dans les maisons (m)	Résultats Modèle
	Y-proj	X-proj		
Ville de Cavaillon	2023679.1	642370.21	1.3	1.5
Ville de Cavaillon	2023730.76	642324.37	1.3	1.3
Ville de Cavaillon	2023878.27	642288.69	1	0.78
Girodier	2024379	641995.19	0.3	0.5
Grandier_1	2023715.01	641688.06	1.3	1.2
Grandier_1	2024012.59	641729.57	1.4	1.5

Grandier_1	2023852.19	641355.38	0.3	0.22
Grandier_1	2024003.36	641126.39	0.3	0.09
Christine	2023359.31	641869.95	0.4	0.1
Bedeau	2023635.16	642168.61	1.4	1.4
Ville de Cavaillon	2023876.63	642162.53	0.9	0.66
Ville de Cavaillon	2023776.66	642076.31	1.4	1.43
Grandier_1	2024028.9	641735.39	0.4	0.573
Grandier_1	2023951.95	641819.32	0.3	0.308

Avec cette comparaison, on a pu s'apercevoir que les résultats du modèle 2D s'approche raisonnablement de la réalité du terrain (Tableau 5-5 ; Figure 5-31).

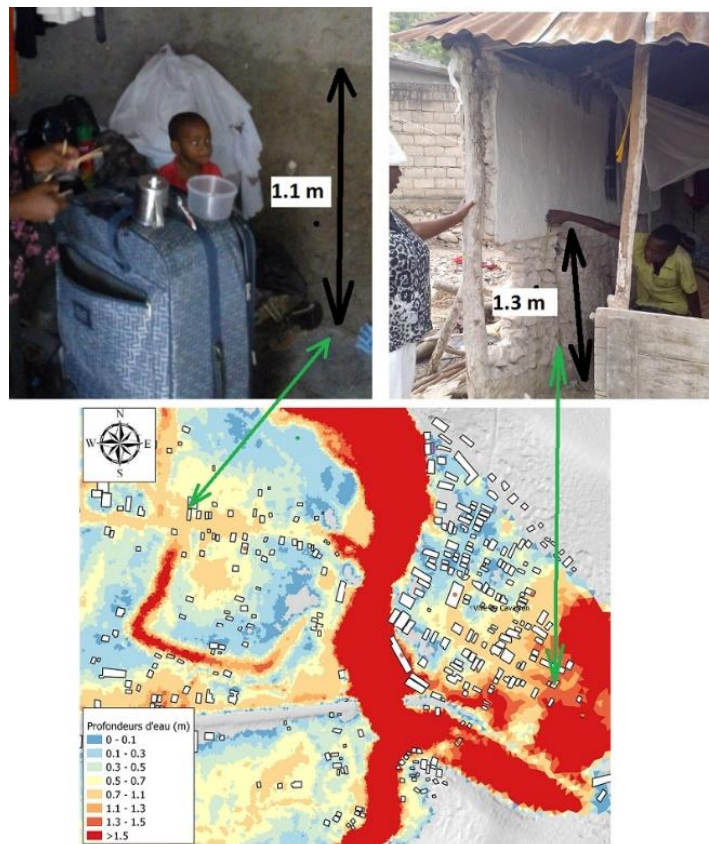


Figure 5-32. Comparaison des données collectées et les résultats du modèle

Une fois que les cartes d'aléa inondation ont été réalisées, la prochaine étape a été la création des cartes de vulnérabilité, pour arriver aux cartes de risque. Les cartes de risque sont le croisement des cartes d'aléa et des cartes de vulnérabilité. Les paragraphes suivants présentent, la création des cartes de vulnérabilité avec la méthode multicritère de Saaty présentée dans le chapitre 3.

5.9 Carte de la vulnérabilité

La vulnérabilité peut être définie comme la propension des biens à subir des dégâts et des personnes à subir des préjudices. Dans la lutte contre les catastrophes naturelles, une bonne connaissance de l'aléa permet de prévenir les dangers à venir et la connaissance de la vulnérabilité donne la possibilité de réduire cette tendance à subir des dégâts. La vulnérabilité croisée avec l'aléa permet d'obtenir le risque. Cette partie de l'étude se consacre à la création des cartes de vulnérabilité de la ville de Cavaillon et de ses environs par rapport au risque d'inondation. La méthode de Saaty, qui a été présentée au chapitre 3 de ce document, va être utilisée pour calculer la vulnérabilité. En effet, comme précisé dans le troisième chapitre, cette méthode fait la comparaison de divers éléments entre eux en leur attribuant un poids suivant un ou plusieurs critères choisis.

Les éléments présents en zone potentiellement inondables sont les personnes (enjeu humain), le matériel (enjeu matériel), les types de culture (enjeu culture). La méthode permet de faire une première catégorisation en comparant ces trois enjeux (humain, matériel, culture). Elle permet aussi d'avoir d'autres niveaux de catégorisation en comparant les éléments caractérisant les premiers enjeux (Figure 5-33).

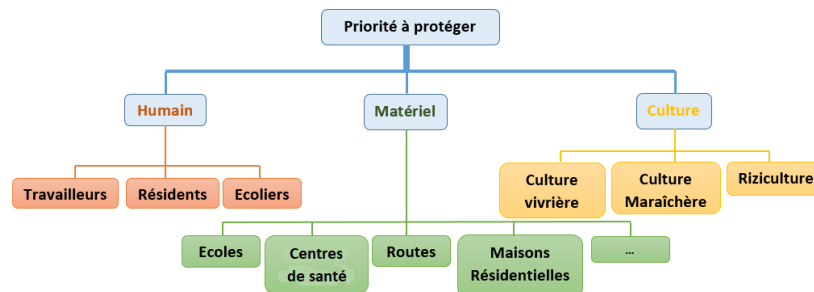


Figure 5-33.- Différent niveau des enjeux

Chaque enjeu (humain, matériel, cultural) sera pris séparément et une carte de la vulnérabilité sera établie pour chacun de ces enjeux. Deux méthodes de calcul ont été utilisées, une première méthode utilisant la quantité d'éléments dans une cellule de

calcul ou maille et une seconde méthode utilisant la densité des éléments (quantité d'éléments par unité de surface). Les deux méthodes sont utilisées pour le calcul de toutes les vulnérabilités (Humain, matériel et terrain agricole) mais elles sont présentées uniquement pour l'enjeu humains, pour les autres enjeux seule la seconde méthode qui est la plus logique est présentée dans ce document. Pour réaliser les calculs un maillage a été réalisé dans toute la zone d'intérêt (Figure 5-34).

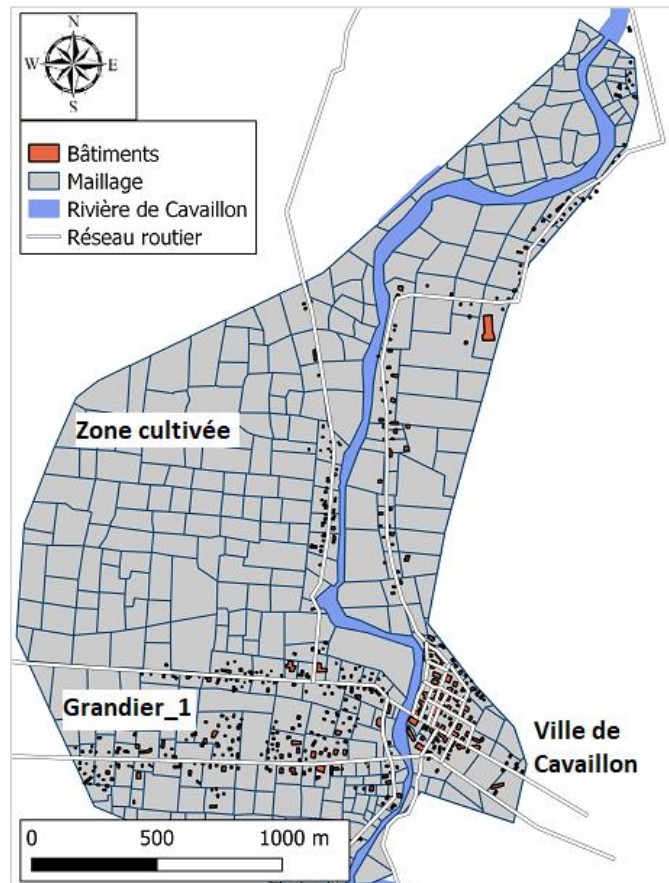


Figure 5-34.- Maillage pour les calculs de vulnérabilité

Les mailles ont été réalisées suivant le mode d'occupation de sol. Dans la ville de Cavaillon et les zones avoisinantes, l'aire des mailles est aléatoire. La préoccupation était de ne pas avoir une maille qui divise en deux un même bâtiment. Elles ont été réalisées de façon à contenir les routes, les poteaux électriques qui sont considérés comme des

sous-éléments de l'enjeu matériel. Dans les zones à forte dominance de culture, elles ont été délimitées suivant le propriétaire des jardins. Généralement, pour ces zones-là on retrouve de grandes mailles. Le maillage contient les différentes caractéristiques des composantes des différents enjeux qui seront croisées aux résultats de la matrice de Saaty pour obtenir la vulnérabilité. L'enjeu humain est détaillé ci-après.

5.9.1 Enjeu Humain

L'enjeu humain peut être divisé en plusieurs catégories selon le critère choisi. Le critère choisi est fonction du type et du nombre de personnes de la population. Selon ce critère les composantes de l'enjeu humain sont représentées par les résidents, les travailleurs et les écoliers. Ce critère permet de traduire la probabilité pour que les composantes de cet enjeu se trouve dans la zone inondable au moment de la catastrophe. La composante qui a la plus grande probabilité de se trouver dans la zone au moment de la catastrophe est considérée comme plus exposée et aura le poids le plus élevé dans les comparaisons. Une même personne peut avoir les trois composantes elle peut résider dans la zone d'étude, être écolière et travailleuse. Cette personne prend automatique la composante qui a le plus de poids. Généralement dans le contexte de la région, l'annonce d'un aléa qui pourrait devenir une catastrophe est accompagnée de l'annonce de la fermeture des écoles. Néanmoins certains établissements comme les écoles professionnelles, les écoles congréganistes continuent de fonctionner selon l'ampleur de l'aléa. En ce qui concerne la population travailleuse, les principales activités de la région sont l'agriculture, l'élevage et le commerce. Ces activités se trouvent paralysées pendant un cyclone ou une inondation. Les activités commerciales en pleine rue deviennent impossibles mais certaines maisons de commerce pour certains produits, notamment les produits de première nécessité, continuent de fonctionner mais sont inclus dans les résidences personnelles qui se trouvent déjà dans leur catégorie « résident ». Certains courageux qui n'habitent pas la région viennent quand même dans leurs maisons de commerce pour écouler leurs produits car ces moments représentent aussi une opportunité. Ils sont cependant très peu nombreux à prendre cette initiative. Les résidents restent généralement chez eux. Ils sont considérés comme la composante qui a la plus grande probabilité de se retrouver dans la région pendant la catastrophe. Dans la catégorisation suivant cette probabilité, on retrouve les résidents, ensuite les écoliers et enfin les travailleurs. L'enjeu humain est principalement représenté par les bâtiments car les données ont été collectées principalement dans les bâtiments. Ces bâtiments peuvent être des maisons résidentielles, des écoles, des maisons de commerce (Figure 5-35).

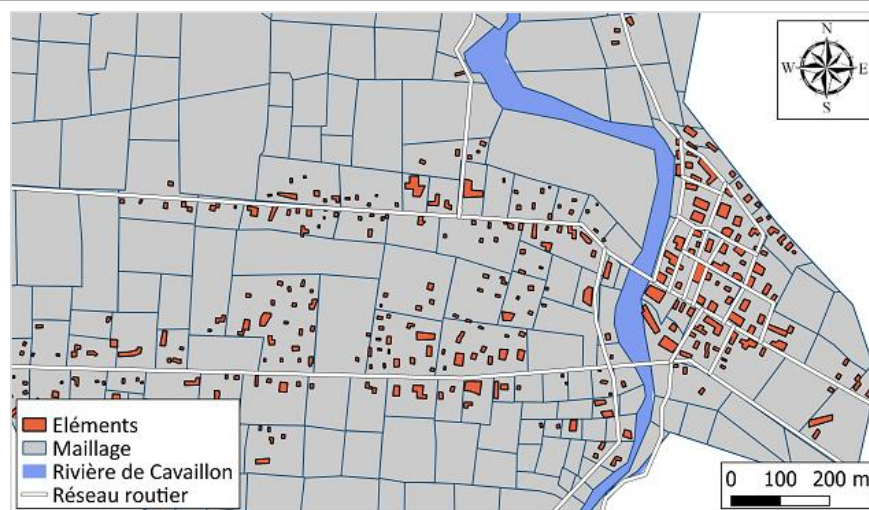


Figure 5-35.- Enjeu humain

La comparaison par paire est réalisée avec chaque élément et un poids a été donné à chaque comparaison selon le critère de la fonction.

Tableau 5-6 - Comparaison par paire

population scolaire	population travailleuse	3
population résidente	population travailleuse	7
population résidente	population scolaire	5

Cette comparaison aboutit à la création de la matrice carrée de Saaty dont l'ordre est le nombre d'éléments dans les comparaisons.

Tableau 5-7 - Matrice de Saaty

Eléments	pop_trav	pop_scol	pop_rés
pop_trav	1	1/3	1/7
pop_scol	3	1	1/5
pop_rés	7	5	1

Une fois que la matrice est établie, les différents calculs des poids de chaque élément dans la cellule est établis (équations 3.11 et 3.12).

Tableau 5-8 - Matrice de Saaty complétée

Eléments	pop_trav	pop_scol	pop_rés	W	T
pop_trav	1	1/3	1/7	0.36	0.08
pop_scol	3	1	1/5	0.84	0.19
pop_rés	7	5	1	3.27	0.73
Total				4.48	1.00

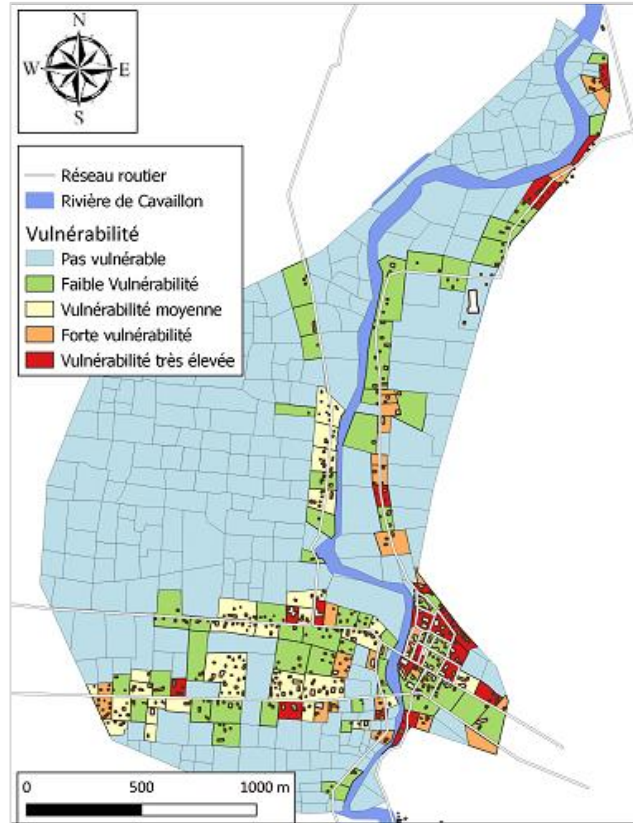


Figure 5-36.- Vulnérabilité de chaque maille

Dans la première approche, une fois que les poids de chaque élément des différentes comparaisons sont obtenus, ils sont multipliés par le nombre de chaque élément présent dans chaque maille. Ce dernier résultat est la vulnérabilité. A partir de ces résultats, une carte de vulnérabilité est créée qui renseigne sur le niveau de vulnérabilité de chaque cellule ou maille (Figure 5-36).

Vérification de la cohérence de cette première approche

Pour cette vérification, deux mailles voisines dont les résultats du calcul de la vulnérabilité sont différents vont être fusionnés et le résultat final du calcul de la fusion indiquera la cohérence ou non de la méthode de calcul. Les deux mailles n'ont pas la même quantité de personnes d'où cette différence dans les résultats de la vulnérabilité (Figure 5-37).

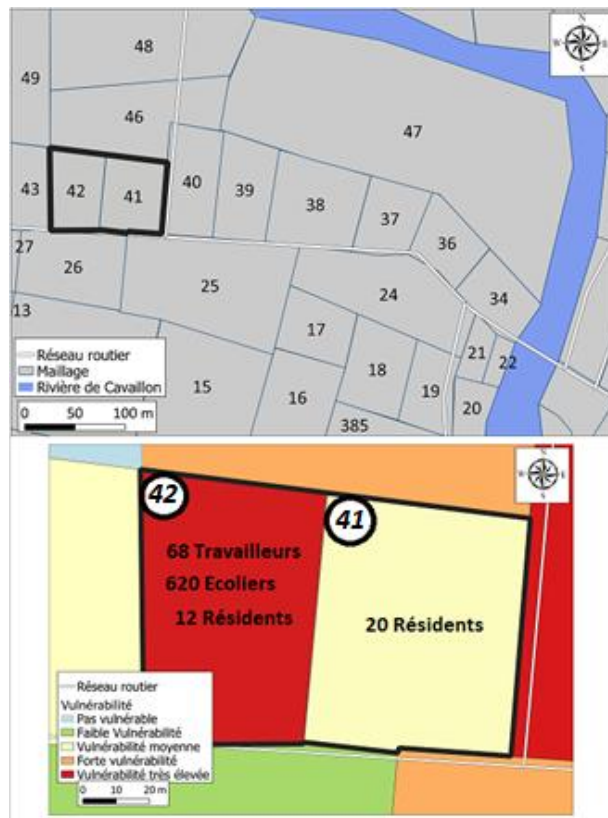


Figure 5-37.- Vérification de la première méthode

La maille 42 très vulnérable a une école (620 personnes), des personnes qui travaillent dans l'école (68) et des résidents (12). Dans la maille 41 non vulnérable, il n'y a que des résidents (Figure 5-37).

La formule de vulnérabilité est la même pour les deux mailles :

$$V = 0.73 \times pop_{résident} + 0.08 \times pop_{travailleuse} + 0.19 \times pop_{scolaire} \quad (5.16)$$

Les résultats sont respectivement **132** et **14.6** pour la maille plus vulnérable et la maille moins vulnérable. Le même calcul a été réalisé pour la fusion des deux mailles dont la différence se trouve uniquement dans la population résidente qui se trouve augmentée de 20 personnes. Le résultat devient **146.6** ce qui ne fait qu'augmenter la vulnérabilité même pour la maille qui était que faiblement vulnérable, or un mélange de ce type devrait au moins donner une valeur intermédiaire dans la fusion.

La seconde approche prend en compte cette anomalie en ramenant le calcul de la vulnérabilité à la surface pour chaque maille. Les résultats deviennent respectivement la valeur **321** pour la maille vulnérable, la valeur **31** pour la maille préalablement pas vulnérable et la valeur **168** pour la fusion des deux mailles ce qui donne à cette dernière une vulnérabilité moyenne. Cette même correction a été appliquée dans toutes les mailles pour le calcul de la vulnérabilité. On obtient une nouvelle carte de vulnérabilité pour l'enjeu humain.

Il faut surtout rappeler que pendant un évènement cyclonique susceptible de donner lieu à des inondations les riverains dans la plupart des cas restent à la maison. C'est ce qui fait que dans les cartes de vulnérabilité les calculs sont attachés aux bâtiments. Ceci est aussi valable pour les personnes qui n'habitent pas la région mais viennent quand même au moment des intempéries pour faire écouler leurs produits. Ces derniers calculs sont attachés aux maisons de commerce dans la région.

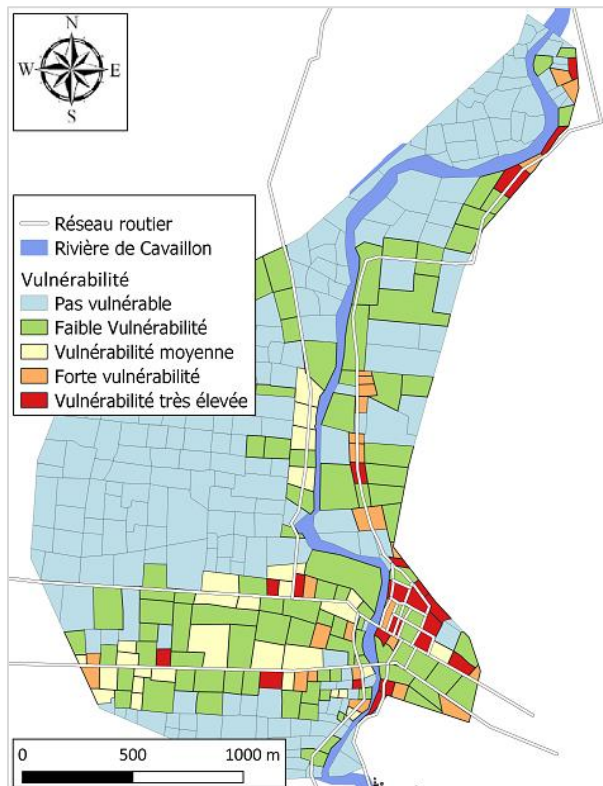


Figure 5-38.- Carte de vulnérabilité pour l'enjeu humain (Approche 2)

Cette carte de vulnérabilité a été créée sur base du nombre de personnes concernées dans la population (Figure 5-37). D'autres cartes sont possibles sur d'autres critères choisis notamment le critère « *fragilité la population* » qui est présentée.

La fragilité de la population dans ce cas précis va être assimilée à leur capacité à se protéger contre l'aléa. De ce fait un enfant entre la naissance jusqu'à 12 ans peut avoir certaines difficultés de se protéger contre l'aléa. Il en va de même pour les personnes âgées de plus de 65 ans. Dans cette même catégorie peut se trouver des personnes qui ont un handicap physique.

A côté de ça on peut aussi trouver des personnes qui ne sont pas fragiles mais qui ont des difficultés pour comprendre un message d'alerte : dans cette catégorie on trouve les non fragiles ne sachant pas lire et enfin on retrouve les personnes qui peuvent se sauver du danger et aussi sauver d'autres personnes qui sont dans le besoin. Ainsi une nouvelle carte a été créée en se basant uniquement sur la fragilité de la population (Figure 5-38).

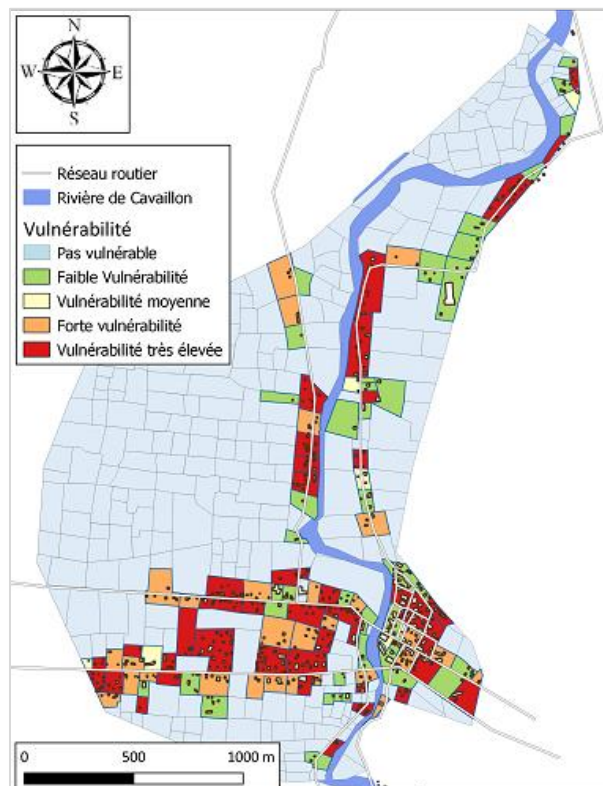


Figure 5-39.- Vulnérabilité suivant le critère Fragilité de l'enjeu humain

5.9.2 Enjeu matériel

Des données, comme le nombre de personnes dans chaque foyer, l'âge, l'éducation pour ne citer que ceux-là, étaient nécessaires pour le calcul de la vulnérabilité humaine. Le calcul de la vulnérabilité matérielle passe aussi par la connaissance de tous les enjeux matériels présents dans la zone potentiellement inondable susceptible ou non de subir des dégâts. Des données sur les fonctions des bâtiments et toute autre infrastructure présente dans la zone d'étude comme les routes, les infrastructures électriques (poteau).

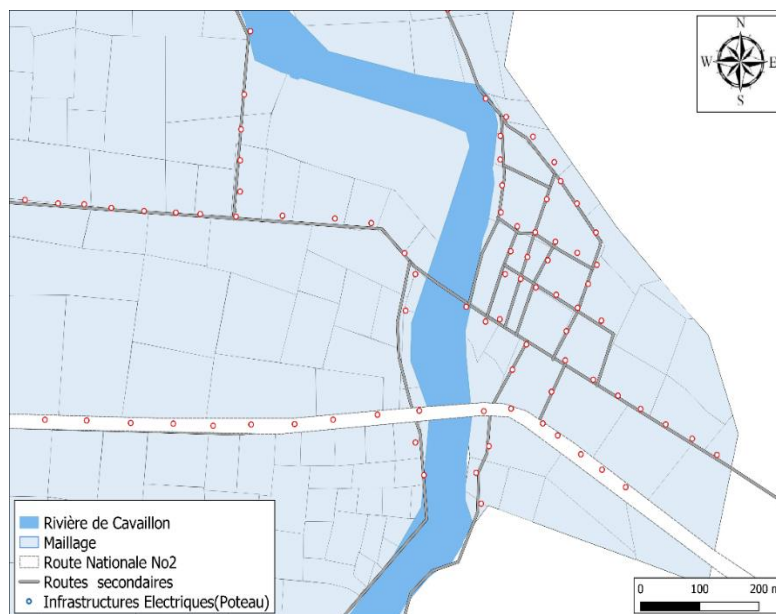


Figure 5-40.- Routes et infrastructures électriques

Les routes sont divisées en la route nationale No2 qui délimitent les localités de *Grandier_1* et de *Grandier_2* (Figure 5-40) et les routes secondaires qui se trouvent majoritairement dans la ville de Cavaillon. Les routes secondaires sont en béton à l'intérieur de la ville mais deviennent des routes en terre battue dans les autres localités. Les autres infrastructures de la zone d'études sont les bâtiments et les canaux d'irrigation. Les bâtiments sont classés suivant leur fonction. On retrouve par ordre de priorité des bâtiments résidentiels, les bâtiments scolaires et religieux, les bâtiments administratifs et les centres de santé et enfin les bâtiments inhabités (Figure 5-41). Une vue globale de la ville de Cavaillon et ses environs est présentée en annexe.

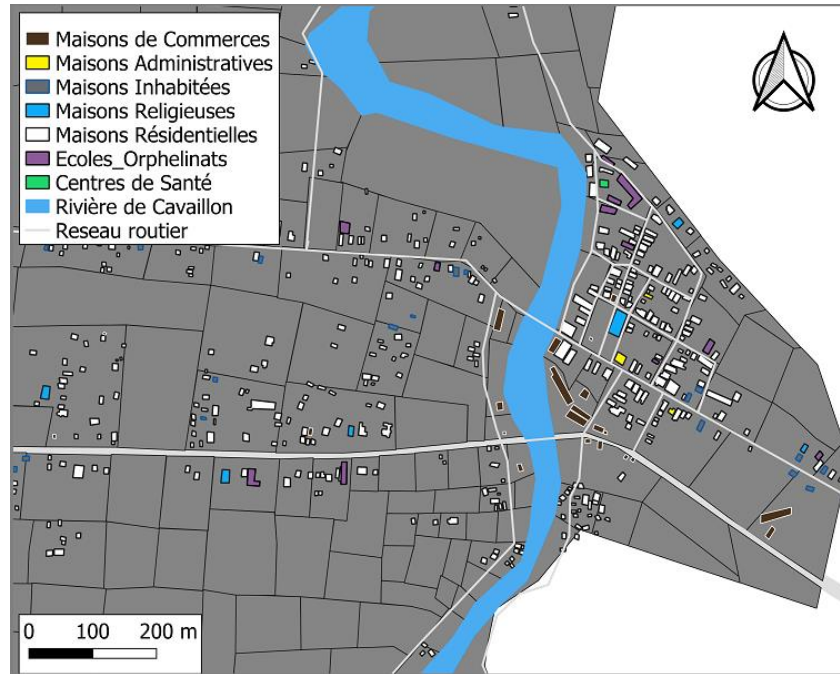


Figure 5-41.- Représentation des bâtiments suivant leur fonction

Le système d'irrigation est constitué d'un long canal primaire d'environ 20 kilomètres de longueur et des canaux secondaires qui desservent les plaines cultivables comme précisé dans le chapitre 2 (Figure 5-42).

Le canal primaire est en maçonnerie sur environ 15 kilomètres et en terre battue sur le reste de son parcours. Ce canal traverse les localités de Grandier_1 et de Grandier_2 en irrigant les terres agricoles qui se trouvent dans ces localités (Figure 5-42). L'autre partie en terre battue traverse la localité de Félix pour aller se terminer à Christine qui est une vaste étendue de plaine agricole. Il faut signaler que les éléments comme les routes, les poteaux électriques et le canal d'irrigation sont délicats à calculer. En effet un poteau électrique ne saurait être attaché à une seule cellule de calcul car si un tel élément subit des dégâts c'est toute la région qui subit les conséquences pas uniquement la cellule de calcul à laquelle le poteau est attaché. Il en est de même pour le canal d'irrigation principal, s'il subit des dommages, toute la superficie irriguée en aval paie le prix. La solution pour les poteaux électriques est d'attacher à toutes les cellules électrifiées du calcul le poids de ceux-ci comme si on considérait que toute les cellules électrifiées de calcul ont un poteau électrique. Une cellule électrifiée est une cellule qui a au moins un

bâtiment ou une structure qui consomme de l'électricité. Le même principe est appliqué pour la route principale ainsi que pour les canaux d'irrigation.

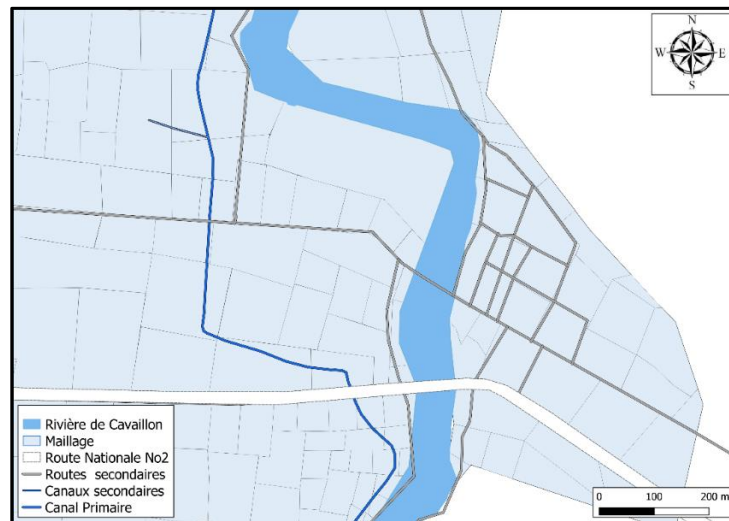


Figure 5-42.- Canal d'irrigation

Une fois que tous ces éléments sont réunis la comparaison de Saaty devient possible ainsi que la matrice de calcul. La matrice de Saaty se présente comme suit :

Tableau 5-9.- Matrice de Saaty

	MI	MR	IE	RP	RI	EO	MC	MA	CS	Mrés		
MI	1	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	MI	Maisons inhabitées
MR	7	1	1/3	1/2	1/4	1/5	1/6	1/5	1/5	1/6	MR	Maisons religieuses
IE	7	3	1	1/2	1/5	1/3	1/4	1/4	1/4	1/5	IE	Infrastructures électriques
RP	7	2	2	1	1/4	1/3	1/4	1/4	1/4	1/5	RP	Routes et Ponts
RI	7	4	5	4	1	1/4	1/4	1/4	1/4	1/5	RI	Réseau d'irrigation
EO	7	2	3	3	4	1	1/4	1/4	1/4	1/5	EO	Ecoles et Orphelinat
MC	7	6	4	4	4	4	1	1/3	1/4	1/5	MC	Maisons de commerces
MA	7	5	4	4	4	4	3	1	1/4	1/5	MA	Maisons Administratives
CS	7	5	4	4	4	4	4	4	1	1/5	CS	Centre de Santé
Mrés	7	6	5	5	5	5	5	5	5	1/5	Mrés	Maisons résidentielles

La comparaison est établie sur base de deux critères : la nécessité de l'élément considéré ainsi que son temps de remplacement. Plus l'élément est nécessaire et plus le temps de remplacement est long, plus cet élément a plus de poids dans les comparaisons.

Tableau 5-10.- Calcul des poids de chaque élément

	MI	MR	IE	RP	RI	EO	MC	MA	CS	Mrés	Wi	t
MI	1	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	0.143	0.009
MR	7	1	1/3	1/2	1/4	1/5	1/6	1/5	1/5	1/6	0.342	0.022
IE	7	3	1	1/2	1/5	1/3	1/4	1/4	1/4	1/5	0.506	0.033
RP	7	2	2	1	1/4	1/3	1/4	1/4	1/4	1/5	0.579	0.038
RI	7	4	5	4	1	1	1/4	1/4	1/4	1/5	1.064	0.070
EO	7	2	3	3	4	1	1/4	1/4	1/4	1/5	1.052	0.069
MC	7	6	4	4	4	4	1	1/3	1/4	1/5	1.780	0.117
MA	7	5	4	4	4	4	3	1	1/4	1/5	2.226	0.146
CS	7	5	4	4	4	4	4	4	1	1/5	3.128	0.205
Mrés	7	6	5	5	5	5	5	5	5	1/5	4.429	0.290
Total											15.250	1

Le poids de chaque élément est calculé dans la matrice. La vulnérabilité va être calculée en fonction du poids de l'élément dans la matrice et du nombre d'éléments présents dans la cellule de calcul. La formule devient :

$$V = (0.009 \times MI) + (0.022 \times MR) + (0.033 \times IE) + (0.038 \times RP) + (0.070 \times RI) + (0.069 \times EO) + (0.117 \times MC) + (0.146 \times MA) + (0.205 \times CS) + (0.290 \times Mrés) \quad (5.17)$$

Comme précisé précédemment, les comparaisons par paire d'éléments sont réalisées dans la matrice de calcul. Cette comparaison se fait sur des critères bien définis. Dans le cas de la vulnérabilité matérielle un élément est important quand il est considéré comme indispensable et que le temps de retour à la normale dans le cas où cet élément subit des dommages est élevé. En d'autres termes, un élément indispensable dont le temps de retour à la normale est long aura plus de poids dans les comparaisons. Par exemple, les maisons résidentielles sont considérées par toute la population comme l'élément le plus important car c'est le premier lieu de refuge. Le temps de retour à la normale pour les maisons endommagées est relativement long dans la région, car la population est pauvre et attends dans la majorité des cas l'intervention de l'état qui tarde toujours à venir.

Les résultats sont représentés dans des cartes réalisées avec le logiciel QGIS (Figure 5-43).

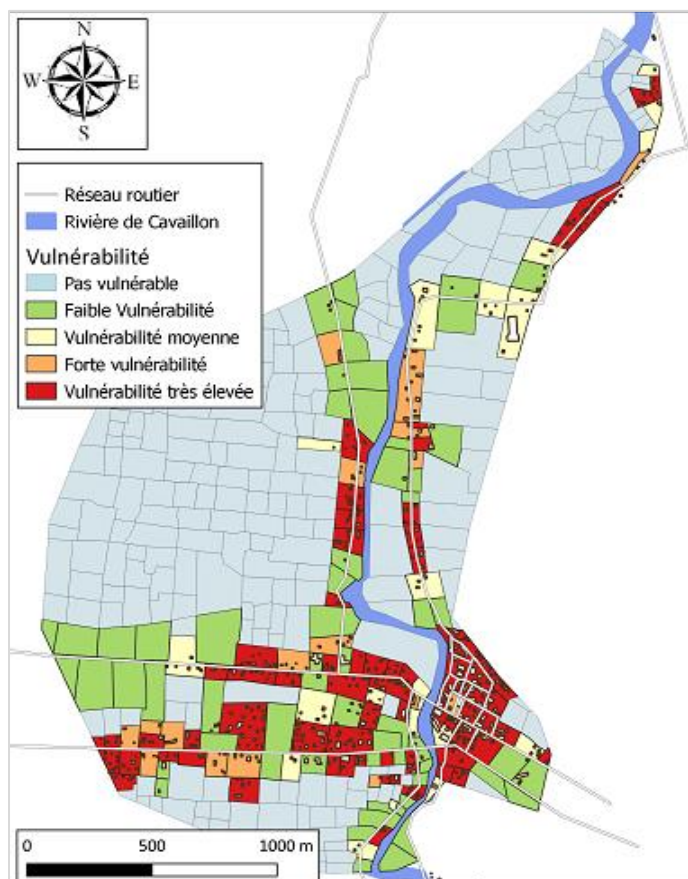


Figure 5-43 - Vulnérabilité de l'enjeu matériel

5.9.3 Enjeu culturel

Les pratiques agricoles sont des éléments qui peuvent être perturbées ou même détruites par les inondations. Elles constituent un enjeu très important. Il existe trois types de cultures dans la région. La culture maraîchère qui est surtout constituée de légumes comme l'aubergine, la tomate, l'épinard pour ne citer que ceux-là. Ce type de culture résiste très mal à l'inondation et développe assez rapidement des champignons qui peuvent détruire toute une récolte. Un autre type de culture dans la région, la culture vivrière, qui est surtout constituée d'aliments de tous les jours (Figure 5-43). Parmi les plantes des cultures vivrières, on retrouve notamment le maïs, le haricot, la patate douce. Ces cultures résistent faiblement aux montées d'eau. Le dernier type de culture est celui qui est le plus résistant aux inondations, la riziculture (Figure 5-44). Celle-ci n'est

pas sensible à la montée de l'eau mais se trouve très sensible au lessivage. Avec une vitesse d'eau plus ou moins importante, un cultivateur risque de tout perdre.



Figure 5-44 - Plantation de maïs



Figure 5-45.- Riziculture

Le processus de calcul de la vulnérabilité pour les cultures est le même que pour les autres calculs. La comparaison par paires est réalisée parmi les différents types de culture suivant la nécessité de la culture dans la vie courante et aussi suivant sa résistance par rapport à l'immersion. Il faut aussi noter que les parcelles qui sont laissées en jachère ou en friches considérées comme des parcelles non cultivées sont aussi prises en compte dans les différentes comparaisons.

Tableau 5-11 - Comparaisons de Saaty

Riziculture	Non-cultivée	3	la riziculture est modérément plus importante que les parcelles non-cultivées
Vivrière	Non-cultivée	7	Beaucoup plus important
Maraîchère	Non-cultivée	8	Beaucoup plus important
Vivrière	Riziculture	6	Plus important
Maraîchère	Riziculture	7	Beaucoup plus important
Maraîchère	Vivrière	3	Modérément plus important

Tableau 5-12.-Matrice de calcul de Saaty

	Non cultivée	Riz	C. Vivrière	Maraichère	w	t
Non cultivée	1.00	0.33	0.14	0.13	0.278	0.044
Riziculture	3.00	1.00	0.17	0.14	0.517	0.082
C. Vivrière	7.00	6.00	1.00	0.33	1.934	0.306
Maraîchère	8.00	7.00	3.00	1.00	3.600	0.569
Total					6.329	1.000

La formule de calcul de la vulnérabilité devient :

$$V = (0.044 \times \text{Non-cultivée}) + (0.082 \times \text{Riziculture}) + (0.306 \times \text{C. Vivrière}) + (0.569 \times \text{C. Maraîchère}) \quad (5.18)$$

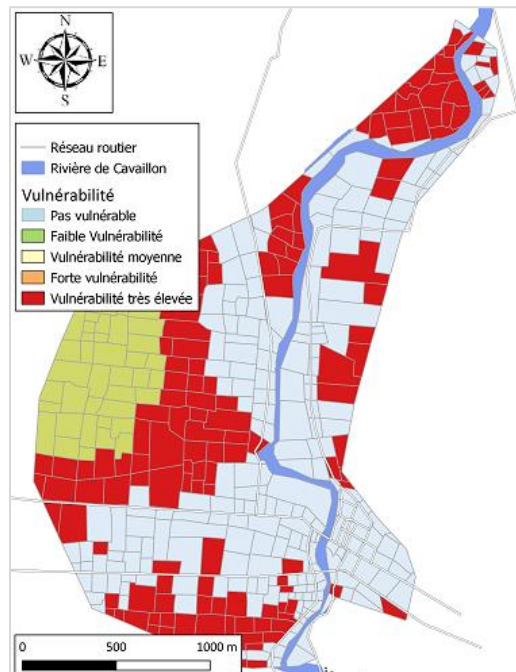


Figure 5-46.- Carte de la vulnérabilité des pratiques culturelles

Comme il fallait s'y attendre, la ville de Cavaillon et les zones avoisinantes qui sont habitées ne sont pas concernées par la vulnérabilité des cultures qui est surtout concentrée dans les zones de pratiques culturales (Figure 5-46).

Les cartes de vulnérabilité sont importantes car elles pourront permettre aux décideurs de développer un plan d'action en commençant par les endroits les plus vulnérables. Ce plan peut consister en la reconstruction de certaines maisons, l'aménagement d'autres, de développer des pratiques culturales peu sensibles à l'inondation. Tous ces travaux peuvent prendre un certain temps, les habitants ont aussi besoin d'un élément qui pourra leur servir de guide si un évènement similaire se produit dans un futur proche étant donné que le pays est frappé en moyenne par deux cyclones par an.

Ces guides, qui permettront aux décideurs de prendre des mesures rapides en fonction des besoins, aux agents de protection civile de cibler les points les plus à risque, ne sont autre que des cartes de risques. Les cartes de risques sont généralement le croisement des cartes d'aléa inondation et des cartes de vulnérabilité de la région. Dans ce contexte chaque type d'enjeu dans la zone va avoir une carte de risques.

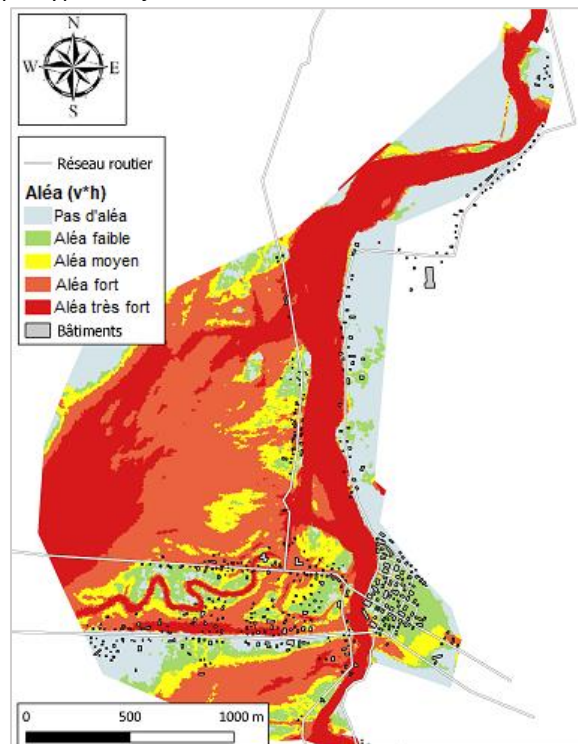


Figure 5-47.- Risque humain (Aléa inondation)

Pour le risque humain la carte de l'aléa pourrait servir comme une première approche d'une carte de risques (Figure 5-47), puisque l'aléa a été défini de manière assez sophistiquée en tenant compte non seulement de la profondeur d'eau mais aussi de la vitesse de celle-ci. Cependant, cette approche ne tient pas compte de la vulnérabilité qui, combinée avec l'aléa, indique le vrai niveau de risque.

Une méthode plus rigoureuse consiste à croiser l'aléa inondation avec la vulnérabilité humaine de la zone d'étude. Pour y arriver les cellules de calcul de la vulnérabilité ont été fusionnées avec les cellules de calcul de l'aléa. Ainsi chaque cellule de l'aléa contient les informations de la vulnérabilité - Humain - Matériels - culture - (Figure 5-48).

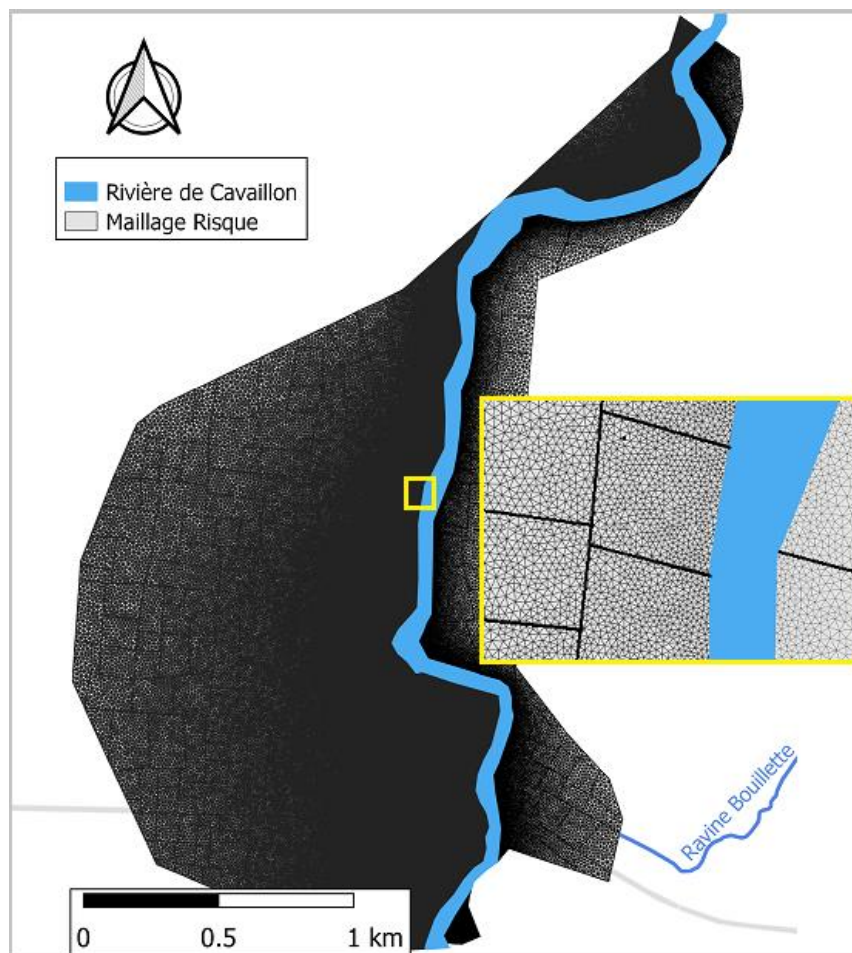


Figure 5-48 – Fusion entre les cellules de calcul de l'aléa et les cellules de calcul de la vulnérabilité

Le calcul est réalisé faisant le produit dans chaque cellule. Ce calcul est résumé dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5-13 – Calcul du risque

No Cellule	Vulnérabilité	Aléa	Risque
1668	0.62	0.10	0.06
1689	0.62	0.02	0.01
3442	0.62	0.00	0.00
30822	1.00	0.99	0.99
83316	1.00	0.51	0.51
50251	0.63	0.16	0.10

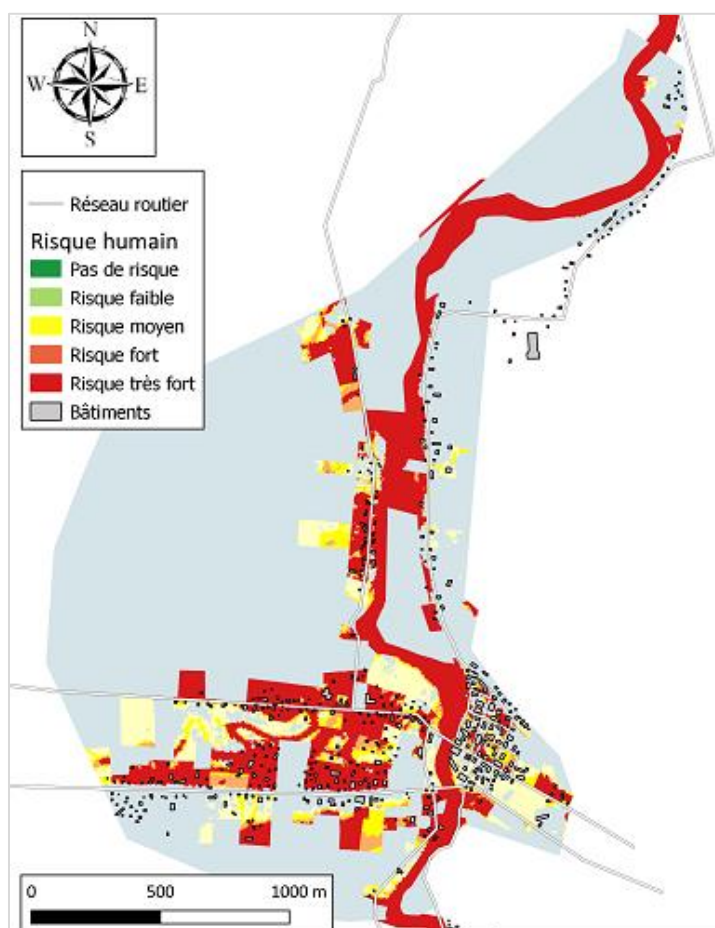


Figure 5-49- Carte de risque Humain (Aléa X Vulnérabilité)

Les valeurs caractérisant l'aléa ainsi que les valeurs caractérisant la vulnérabilité varient de 0 à 1. Leur produit reste dans l'intervalle 0 et 1 avec 0 comme qui indique qu'il n'y a pas de risque et la valeur 1 le plus grand degré de risque (Tableau 5-13).

La carte de vulnérabilité humaine a été créée à partir des données recueillies directement dans les bâtiments, liée aux bâtiments elle a une valeur non nulle là où il y a des bâtiments et nulle où il n'y en pas. Toutes les valeurs sont croisées avec les valeurs de l'aléa. Seules les cellules ayant une valeur non nulle sont représentées. La carte de vulnérabilité suivant la fonction et le nombre de personnes a été utilisée.

La méthodologie est la même pour la création des cartes de risques matériels et pour les cartes de risques dans les plaines cultivables. L'aléa est croisé avec la vulnérabilité (Figure 5-50, 5-51).

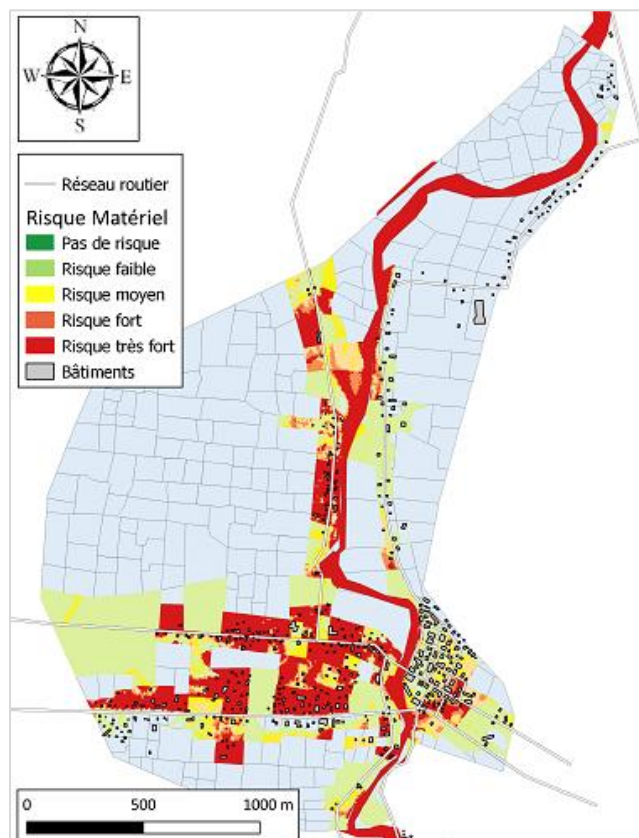


Figure 5-50.- Risque matériel (Aléa X Vulnérabilité)

Comme on pouvait s'y attendre dans les cartes de risques humains et matériels, le danger se concentre surtout dans les villes et partout où il y a des bâtiments habités, des infrastructures routières et électriques. Les cartes de risques des pratiques culturelles sont tout à fait différentes.

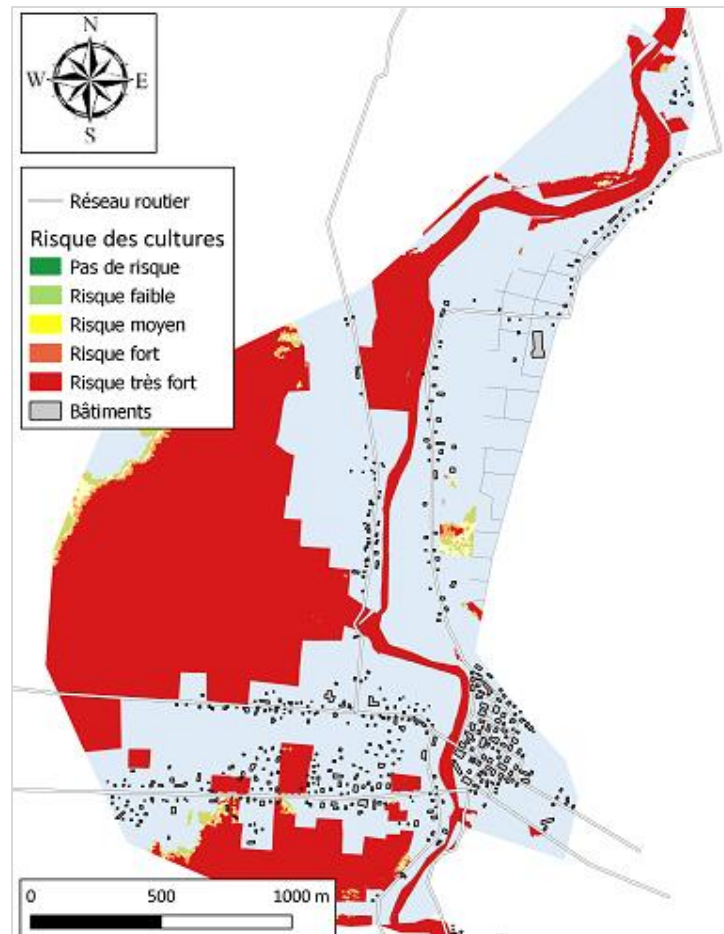


Figure 5-51.- Risques associés aux cultures

Cette différence dans la distribution du risque dans les cartes montre que ce n'est pas une bonne idée de constituer une carte globale contenant tous les risques. Cette procédure de création de carte globale diminuerait l'impact des différents enjeux étant donné qu'ils ne sont pas concentrés au même endroit.

Chapitre 6 Conclusion

Ce travail constitue une contribution à la recherche de solutions alternatives pour lutter contre les inondations en attendant les décisions concrètes contre le réchauffement climatique. En effet ce travail comporte deux volets principaux : l'un purement technique qui peut être appliqué à toutes les rivières dans l'étude de leur caractérisation et l'autre qui peut être considéré comme un mélange de technique et de social avec une application spécifique au site haïtien de la rivière de Cavaillon.

La caractérisation d'une rivière est par définition la représentation plus ou moins réaliste des profondeurs d'eau, des vitesses d'écoulement et de la durée de submersion. Cette caractérisation a été faite à travers des modélisations unidimensionnelles et bidimensionnelles.

Il a été démontré que le modèle unidimensionnel est efficace pour une bathymétrie relativement simple, et un profil assez régulier, c'est-à-dire sans méandre, ni rétrécissement ou élargissement importants. Les sections dont l'ensemble constitue le maillage doivent cependant être suffisamment denses pour représenter de manière suffisamment correcte la bathymétrie. L'approche unidimensionnelle permettra de gagner sur le temps de calcul tout en donnant des résultats rapides et fiables.

Dans le cas où la bathymétrie est plus complexe et le profil assez irrégulier la modélisation bidimensionnelle est conseillée. Il faut toujours essayer d'assurer avec cette méthode une bonne représentation de la bathymétrie et une attention particulière doit toujours être mise dans le lit mineur des rivières naturelles qui nécessite généralement un raffinement.

Il est important de s'assurer de prendre en compte tous les éléments qui sont susceptibles d'influencer l'écoulement et qui peuvent conduire à avoir des résultats beaucoup plus fiables avec les modèles. Cela a été démontré avec l'intégration des ravines dans le modèle de la ville de Cavaillon et de ses environs : l'apport des ravines semblait pouvoir être négligé a priori, vu la taille réduite de ces bassins versants mais il s'est avéré décisif pour représenter correctement les inondations dans la ville.

Les premières simulations ont été réalisées en écoulement permanent. Dans la réalité dans le cas d'une crue et d'une inondation l'écoulement est transitoire et dépend d'un hydrogramme en amont. Généralement, quand elles sont disponibles, les données hydrologiques mesurées permettent refléter au mieux la réalité du problème. Dans ce travail, les données hydrologiques mesurées n'ont été disponibles que très partiellement

tant dans l'espace que dans le temps. Les données moyennes estimées à partir des observations radar satellitaires ont été utilisées pour pallier le déficit de mesures. Cette solution doit être interprétée avec prudence surtout quand les données estimées ne reproduisent qu'imparfaitement les données mesurées.

Le second volet du travail concernait l'estimation de la vulnérabilité des territoires de la région d'étude. Cette estimation a été réalisée par la méthode multicritère de Saaty. On a constaté que les choix des différents critères reflètent la réalité locale. Ces comparaisons pourraient être totalement différentes pour une région différente et il convient d'être conscient de ce caractère local dans la généralisation éventuelle de la méthode.

Les acquis, les savoirs de la population sont intégrés dans l'étude sous forme de besoins et on a pu constater que malgré les effets néfastes de la rivière pendant les intempéries, la population y est toujours attachée et a même exigé que la solution à apporter face au problème ne limite en aucun cas l'accès à cette ressource commune.

Au terme de l'étude des cartes d'aléa inondation, de vulnérabilité par rapport à l'inondation et de risque d'inondation ont été produites et serviront d'outils d'aide à la décision pour la zone d'étude. La méthodologie proposée dans ce travail comme précisé précédemment peut être reproduite dans d'autres régions présentant le même problème et les résultats seront d'autant meilleurs que les données sont fiables.

ANNEXES

Annexe 1. Rupture de digue à Hunan en Chine (2016)



Annexe 2. Rupture de barrage au Sud 'Est du Laos (2018)



Annexe 3. Vue globale de la ville de Cavaillon**Annexe 4. Couverture des sols**

Types de couvertures des sols



Annexe 5. Vue globale de la ville de Cavaillon
Types de couvertures des sols dans le bassin versant



Annexe 6. Valeur de la capacité de stockage *S* en fonction de la couverture des sols

Couverture		Capacité de stockage (mm) par type hydrologique de sol			
		A	B	C	D
Espaces ouverts (parc, etc.)	Espaces verts < 50 %	120	68	41	31
	Espaces verts 50.....75 %	264	114	68	48
	Espaces verts > 75 %	397	162	89	64
Surfaces imperméables	Parkings, toitures	5	5	5	5
Rues et routes	Asphaltées	5	5	5	5
	Asphaltées avec fossés ouverts	52	31	22	13
	Graviers	80	45	31	25
	Chemins non revêtus	99	56	38	31
Quartiers centraux Quartiers résidentiels	Commerces et affaires (85 % imperméable)	31	22	16	13
	Industries (72 % imperméable)	60	35	25	19
	Parcelles < 500m ² (65% imperméable)	76	45	28	22
	Parcelles de 500 à 1000 m ² (38 % imperméable)	162	85	52	38
	Parcelles de 1000 à 1350 m ² (30 % imperméable)	192	99	60	41
	Parcelles de 2000 m ² (25 % imperméable)	216	109	64	45
	Parcelles de 4000 m ² (20 % imperméable)	244	120	68	48
	Parcelles de 8000 m ² (12 % imperméable)	298	137	76	56

Annexe 7.1 : Composante environnementale la vulnérabilité par indicateurs

Vulnérabilité aux inondations	Exposition	Abréviation	Echelle géographique	Susceptibilité	Abréviation	Echelle géographique	Résilience	Abréviation	Echelle géographique
Composante sociale	Densité de population	Pd	R,S,U	Expérience du passé	PE	R,S,U	Système d'alarme	WS	R,S,U
	Population en zone inondable	Pfa	R,S,U	Taux d'alphabétisation	Ed	R,S,U	Chemin d'évacuation	ER	R,S,U
	Proximité de la zone inondée	Cia	R,S,U	Préparation	A/P	R,S,U	Capacité institutionnelle	IC	R,S,U
	Population près des cotes	Pccl	R,S,U	Mortalité infantile	Cm	R,S,U	Service d'urgence	ES	R,S,U
	Population pauvre	Pp	R,S,U	Communication	CPR	R,S,U	Refuge	S	R,S,U
	% de zones urbanisées	%UA	R,S	Accès à l'assainissement	PwaS	R,S,U			
	Population rurale	Rpop	R,S	Accès à l'eau (Rpop)	PwoWS	R,S			
	Enquête cadastrale	CS	S,U	Qualité de l'eau	QWS	S,U			
	Héritage culturel	CH	S,U	Qualité de l'énergie	QES	S,U			
	Terrain non occupé	% Disable	S,U	Croissance démographique	PG	S,U			
				Santé	HH	S,U			
				Indice de développement humain	HDI	S,U			
				Aménagement urbain	UP	U			

Annexe 7.2 : Composante économique la vulnérabilité par indicateurs

Vulnérabilité aux inondations	Exposition	Abréviation	Echelle géographique	Susceptibilité	Abréviation	Echelle géographique	Résilience	Abréviation	Echelle géographique
Composante économique	Occupation de Sol	LU	R,S,U	Chômage	UM	R,S,U	Investissement	Amln	R,S,U
	Proximité à la rivière	PR	R,S,U	Revenu	I	R,S,U	Infrastructure	IM	R,S,U
	Proximité à la zone inondée	Cia	R,S,U	Inégalité	Ineq	R,S,U	barrage et capacité de stockage	D SC	R,S,U
	% de zones urbanisées	%UA	R,S	Volume annuel	V _{year}	R,S,U	Assurance inondation	FI	R,S,U
	Cadastre	CS	S,U	Espérance de vie	LEI	R,S,U	Reprise économique	ECR	R,S,U
				Croissance urbaine	UG	S,U	Expérience du passé	PE	S,U
				Mortalité infantile	CM	S,U	Digues	DL	S,U
				Région/capita	GDP	S			
				Aménagement urbain	UP	U			

Annexe 7.3 : Composante environnementale la vulnérabilité par indicateurs

Vulnérabilité aux inondations	Exposition	Abréviation	Echelle géographique	Susceptibilité	Abréviation	Echelle géographique	Résilience	Abréviation	Echelle géographique
Composante environnementale	Terrain	GWL	R,S,U	Réserve naturelle	NR	R,S,U	Temps de récupération	RTF	R,S,U
	Occupation de sol	LU	R,S,U	Maintien de la vie	YSHL	R,S,U	Préoccupation environnementale	EC	R,S,U
	Utilisation excessif des sols	OUA	R,S,U	Qualité des infrastructures	QI	R,S,U			
	Sol dégradé	DA	R,S,U	Santé	HH	S,U			
	zone non peuplée	Unpop	R,S	Croissance urbaine	UG	S,U			
	Type de végétations	TV	R,S	Mortalité infantile	CM	S,U			
	% zone urbanisée	%UA	R,S	Précipitation	Rainfall				
	% Forêt	FCR	R	Evaporation	Ev				

Chaque composante a des indicateurs dans les trois variables de la vulnérabilité (Exposition – Susceptibilité – Résilience). L'échelle géographique qui est divisée en Bassin versant (River Basin -R-), sous-bassin versant (Subcatchment – S), et zone Urbaine (Urban Area – U). Cette catégorisation indique la limitation de l'indicateur. Un indicateur peut se trouver dans les trois ou dans une seule échelle et agit de manière globale ou très spécifique.

Annexe 7.4 : Composante économique de la vulnérabilité par indicateurs

Vulnérabilité aux inondations	Exposition	Abréviation	Echelle géographique	Susceptibilité	Abréviation	Echelle géographique	Résilience	Abréviation	Echelle géographique
	Composante Physique								
	Topographie (pente)	T	R,S,U	Codes du bâtiment	Bc	U	barrage et capacité de stockage	D SC	R,S,U
	Forte précipitation	HR	R,S,U	Fréquence d'apparition	FO	R,S,U	Routes	R	R,S,U
	Durée des inondations	FD	R,S,U				Digues	DL	S,U
	Période de retour	RP	R,S,U						
	Proximité à la rivière	PR	R,S,U						
	Humidité du sol	SM	R,S,U						
	Evaporation	Ev	R,S,U						
	Débit dans la rivière	RD	S,U						
	Vitesses d'écoulement	FV	S,U						
	Tempête	SS	S,U						
	Précipitation	Rainfall	S,U						
	Profondeur d'eau	FWD	S,U						
	Sédimentation	SL	S,U						
	Volume annuel	Vyear	S,U						

Bibliographie

- Adger, WN (2000). « Résilience sociale et écologique : sont-elles liées ? » *Progrès en géographie humaine*, 24(3), 347-364.
- Araud Q., (2012). « Simulation des écoulements en milieu urbain lors d'un évènement pluvieux extrême. » *Thèse doctorale, Université de Strasbourg*, 289p.
- Aubriot O., (2004). *L'eau Miroir d'une société. Irrigation paysanne au Népal central*. Paris, Editions du CNRS, 321p.
- Azar M.S. et Lafrance D., (2010). « Etude de base du bassin versant de Cavaillon ». 34p.
- Balica S.F., Douben N., Wright N.G. (2009). «Flood vulnerability indices and varying spatial scales » *Science et technologie de l'eau* 60(10) 71-80
- Ballais, J.L. et Garry, G. (2005). « Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du midi méditerranéen français. » *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1), 1120-1130.
- Begnudelli, L. & Sanders, B. F. (2007). «Simulation of the St. Francis Dam-Break flood.» *Journal of Engineering mechanics*, 133(11), 13.
- Bertrand-Krajewsky J.L. (2006). « Modélisation des écoulements en réseau d'assainissement.» URGC, INSA de Lyon. Cours d'hydrologie urbaine
- Bonn, F., Rochon, G., française,. (1996). « Précis de télédétection. » *Principes et méthodes*, Presses de l'Université du Québec.
- Bousmar D., Zech Y., 1999. «Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. » *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125 (7), 696-706.
- Braschi G., Gallati M. (1992): «A conservative flux prediction algorithm for the explicit computation of transcritical flow in natural streams, proc. » *Hydr. Eng. Software IV, CMP, Southampton* 381-394.
- Bravard, J.-P. et Petit, F., (1997). *Les cours d'eau: dynamique du système fluvial*. Paris, Armand Colin, 222 pages.
- Brivio, P.A., Colombo, R., Maggi, M., Tomasoni, R., (2002). «Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas. » *International Journal of Remote Sensing*, 23(3): 429-441.
- Buyer M., (2002). *Transport de flux en réseau d'assainissement : Modèle 1D pour l'hydraulique des collecteurs et déversoirs avec prise en compte des discontinuités*. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur –Strasbourg. 238p.
- Carlier O., (2018). *Caractérisation de l'évolution morphologique d'une rivière soumise à des crues rapides en Haïti*. Thèse doctorale, Université catholique de Louvain, 314 p.

- Chocat B. (1997). *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*, Lavoisier, Paris, 1124 p.
- Crowder D.W., Diplas P., (2000). «Using Two dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance. » *Journal of Hydrology*, 230(3-4):172-191.
- Dauphiné A. et Provitolo D., (2007). « La résilience : un concept pour la gestion des risques. » *Annales de Géographie*, 654(2), 115.
- Demoraes F., (2004). *Mobilité, enjeux et risques dans le District Métropolitain de Quito (Equateur)*. Thèses de doctorat en géographie, Université de Savoie – Chambéry, 587 p.
- De Vanssay B., (2001). « Risques naturels et relations hommes / environnements dans les Caraïbes. » *Actes du colloque Risques et territoires*, tome 2, CNRS, Vaulx-en-Velin.
- Downing, T. E., Butterfield, R., Cohen, S., Huq, S., Moss, R., Rahman, A., Sokona, Y., and Stephen, L.: 2001, Climate Change Vulnerability: Linking Impacts and Adaptation. Report to the Governing Council of the United Nations Programme. United Nations Environmental Programme, Nairobi, Kenya.
- Dudgeon D., (1995). River regulation in southern China : ecological implications, conservation an environmental management, *Regulated Rivers : Research & Management*, 11.35-54
- Erlich M., Girard, C., et David, E., (2012). « Intégration du modèle hydraulique 2D dans la chaîne de prévision de crues-éclair en temps réel » In *Problèmes actuels de la protection contre les inondations*, Paris-Orléans, 28, 29, 30 septembre 2012
- Estupina Borrell V., (2004). *Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair Application à de petits bassins versants du sud de la France*. Thèse doctorale de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. 254p.
- Evans, T.L., Costa, M., Telmer, K., Silva, T.S.F., (2010). « Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian Pantanal. » *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 34 (2): 560-575.
- Franzini F., Soares-Frazão S., (2016). «Efficiency and accuracy of Lateralized HLL, HLLS and Augmented Roe's scheme with energy balance for river flows in irregular channels », *Applied Mathematical Modelling*, 40 (17-18), 7427-7446.
- Foucault H., (2020). *Les pratiques agricoles à l'épreuve des crues de Cavaillon-Haïti « L'exemple des populations de Dory et Grand-Place »* Thèse de doctorat à l'Université catholique de Louvain
- Fread, D.L., (1974), « Numerical Properties of the Implicit Four Point Finite Difference Equations of Unsteady Flow. » *NOAA Technical Memorandum NWS Hydro-18, U.S. Department of Commerce*, NOAA, NWS, Silver Spring, MD, 123pp.

- Gallegos, H. A., Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2009). « Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California. » *Advances in Water Resources*, 32(8), 1323-1335. doi: 10.1016/j.advwatres.2009.05.008
- Garry G., Ballais, J.L. et Masson, M. (2002). La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France Méditerranéenne. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, no. 1, 297-306.
- Germanwatch, (2016). Global Climate Risk index 2016. <https://germanwatch.org/en/crisis>
- Ghostine R., (2009). *Contribution à la résolution numérique des équations de Barré de Saint Venant bidimensionnelles par une méthode de type éléments finis discontinus : Application à la simulation des écoulements au sein des carrefours dans la ville*. Thèse de doctorat de l'université de Strasbourg, 213p
- Goncalvès, E., (2005). Résolution Numérique. Discrétisation des EDP et EDO. *Institut National Polytechnique de Grenoble*, Grenoble Cours théorique.
- Graf W.H., Altinakar M.S. (1996). *Hydraulique Fluviale – Tome 2 : Ecoulement non permanent et phénomène de transport*. Lausanne (Suisse): Presses polytechniques et Universitaire Romandes, 380p ISBN 2-88074-300-1
- Gros E., (2018). *Numerical Modelling of Two-Phase Flow with Moving Boundary Fitted Meshes*. PhD thesis, EPFL Lausanne, 116 p.
- Holling C.S., (1973). «Resilience and stability of ecological systems. » *Institute of Resource Ecology*, University of British Columbia, Vancouver, Canada. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Hunter, N. M.. (2008). «Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. » *Proceedings of the ICE - Water Management*, 161(1), 13-30. doi: 10.1680/wama.2008.161.1.13
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. (www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_FullReport.pdf)
- Joseph A., (2019). *Caractérisation et modélisation des écoulements de crue. Application aux inondations de la ville de Cavaillon*. Thèse doctorale, Université catholique de Louvain, 233 p.
- Joseph A., Gonomy N., Zech Y., Soares-Frazão S., (2017). «Modelling and analysis of the flood risk at Cavaillon City, Haiti. », *La Houille Blanche*, n° 2, 2018, p. 68-75.
- Knighton, D., (1998). *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. London, Arnold Publication, 383 pages

- LAI Y.-K., KOBELT L., HU S.-M., (2009). Feature aligned quad dominant remeshing using iterative local updates. *Computer-Aided Design*.
- Ledoux B., (2006). *La Gestion du risque Inondation*. Paris, Lavoisier, 766 p.
- Lelièvre, M. A., Buffin-Bélanger, T., & Morneau, F. (2008). « L'approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans les vallées de petites et moyennes tailles: un exemple commenté pour la vallée de la Rivière-au-Renard. » In *Comptes rendus de la 4^{ème} Conférence canadienne sur les géorisques: des causes à la gestion*.
- Liggett, J.A., and Cunge, J.A., (1975). « Numerical Methods of Solution of the Unsteady Flow Equations, in *Unsteady Flow in Open Channels*. » K. Mahmood and V. Yevjevich, Vol. I, Chapter 4, Water Resources Publications, Ft. Collins, CO.
- Luers A., Lobell D.B., Sklar L.S., Addams C.L., Matson P.A., (2003). « A method for quantifying vulnerability, applied to the Yaqui Valley, Mexico. ». *Global Environmental Change* 13, 255–267.
- Macq J.F., (2016). *Mesure topographique par photogrammétrie à partir d'un drone. Application à la rivière de Cavaillon*. Travail de fin d'études, Université catholique de Louvain.
- Malaterre P.O., (1994). *Modelisation, Analysis and LQR optimal control of irrigation canal*. PHD Thesis LAAS-CNRS-ENGREF-Cemagref.
- Mallinis, G., Gltas J.Z., Giannakopoulos V., Maris F., Tsakiri-Statí M., (2011). « An objectbased approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. » *International Journal of Digital Earth*: 1-13.
- Mason, D.C. et al. (2012). « Automatic near real-time selection of flood water levels from high-resolution Synthetic Aperture Radar images for assimilation into hydraulic models: A case study. » *Remote Sensing of Environment*, 124: 705-716.
- Masson, M., Garry, G. et Ballais, J.-L., (1996). *Cartographie des zones inondables - Approche hydrogéomorphologique*. Éditions Villes et Territoires, Paris, 100 p.
- Matgen, P., Schumann G., Henry J-B., Hoffman L., (2007). «Integration of SAR-derived river inundation areas, high-precision topographic data and a river flow model toward near real-time flood management. » *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(3): 247-263.
- Mavriplis, D. J. (1996). «Mesh generation and adaptivity for complex geometries and flows. » *Handbook of Computational Fluid Mechanics* 417-459.
- Merwade, V., Cook, A., Coonrod, J., (2008). «GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping». *Environ. Model. Softw.* 23, 1300-1311.
- Mitchell, J., Devine, N., Jagger, K., (1989). «A contextual model of natural hazards. » *Geographical Review* 79, 391–409.

- Morin, M., (2008). *Concepts de base en sécurité civile*, 60 p.
- Nelson J.M., Smith J.D., (1989). « Flow in meandering Channels with natural topography. » *In River Meandering*, Ikeda S, Parker G (eds). American Geophysical Union, Washington DC; 69-102.
- Néelz, S., & Pender, G. (2009). *Grid resolution dependency in inundation modelling: a case study*. Flood Risk Management: Research and Practice
- Ngo A. T. (2014). *Evaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (centre Viêt-Nam)*. Thèse de doctorat. Géographie. Université d'Orléans, 426 p.
- Ostrom E., 2010. *Gouvernance des biens communs : Pour une nouvelle approche des ressources naturelles*. De Boeck, 301 p.
- Petaccia G., Natale L., Savi F., Velickovic M., Zech Y., Soares Frazao S., (2013). «Flood wave propagation in steep mountain rivers. », *Journal of Hydroinformatics*, 15(1), 120-137.
- Réménérias G., (1965). *L'hydrologie de l'ingénieur*. Paris. Eyrolles. Collection du centre de recherche et d'essais de Chatou. 2e édition. 456p.
- Robert, A., (2003) :. *River Processes: An Introduction to Fluvial Dynamics*. Arnold Publication, London, 240 p.
- Saaty T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority, Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill, 287 p.
- Schubert, J. E., B. F. Sanders, M. J. Smith, and N. G. Wright (2008), *Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding*, *Advances in Water Resources*, 31 (12), 1603 – 1621, doi:<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.07.012>.
- Seyoum, S. D. (2013). *Framework for Dynamic Modelling of Urban Floods at Different Topographical Resolutions*. UNESCO-IHE PhD Thesis, 160p.
- Smith, L.C., (1997). «Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. » *Hydrol. Process.*, 11(10): 1427-1439.
- Soares-Frazão, S., & Zech, Y. (2007). « Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle. » *Journal of Hydraulic Research*, 45(sup1), 27-36.
- Soares-Frazão, S., & Zech, Y. (2008). «Dam-break flow through an idealised city. » *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 648-658.
- Szymkiewicz R. (1991): «Finite element method for the solution of the Saint-Venant equations in an open channel network. » *Journal of Hydrology*
- Thorne, C.R., Hey R.D., et Newson M.D., (1998). *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. Chichester, John Wiley, 376 p.
- Turner, B. L., (2003). «A framework for vulnerability analysis in sustainability science. » *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), 8074-8079.
- USACE (1999). *L'évaluation des ressources d'eau d'Haïti*. Rapport d'études, août 1999.

- Valencia N., (2006). *Risques naturels, aléa et vulnérabilité mécanique : cas de constructions en maçonnerie vis-à-vis des séismes et inondations*. Thèse, Université de Marne la Vallée.
- Wang C.K., Philpot W.D., (2007). «Using airborne bathymetric LIDAR to detect bottom type variation in shallow waters». *Remote Sensing of Environment*. 106, 123-135.