



# **MODÉLISATION DES CRUES DANS UNE ZONE SEMI-URBAINE DE GRAND-OUAGA (BURKINA FASO)**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE  
**MASTER**  
SPECIALITE INFRASTRUCTURES ET RÉSEAUX HYDRAULIQUES

-----  
Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

**Rollis Ernest JIOFACK FEUZE (20150160)**

**Directeur de mémoire : Dr FOWE TAZEN (Post-Doctorant, 2iE)**

**Co-Directeur de mémoire : Dr Babacar LEYE (Enseignant-Chercheur, 2iE)**

**Encadrant : Gnenakantanhan COULIBALY (Doctorant, 2iE)**

**Laboratoire Eaux, Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA)**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Malicki ZOROM

Membres et correcteurs : Dr Lawani MOUNIROU  
Dr FOWE TAZEN  
Dr Boureima KOUANDA

**Promotion [2018/2019]**

## **DEDICACES**

Je dédie ce mémoire,

A mon père DZOZONG Alain,

A mes mamans ZAMBOU Thérèse et DONTSACK Christine,

A mes frères et sœurs pour leurs soutiens,

A Giacomo TERUGGI et Pascal ANGNOMO pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

## CITATIONS

« **S**i le navire de la chance n'arrive pas jusqu'à votre quai,  
nagez à sa rencontre ».  
(Jonathan Winters)

## **REMERCIEMENTS**

La mise en œuvre de ce travail de mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs acteurs. C'est l'occasion pour moi de témoigner ma reconnaissance à toutes ces personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mes encadreurs :

**Dr. FOWE TAZEN**, Post-doctorant au Laboratoire Eaux, Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA) à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) pour la confiance qu'il m'a accordé dans l'exécution de ce travail. Sa disponibilité, ses critiques et recommandations ont contribué à l'atteinte des objectifs fixés dans ce travail ;

**Dr. Babacar LEYE**, Enseignant-Chercheur à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), pour ses conseils, ses recommandations et par-dessus tout son enseignement quant au formalisme mathématique des équations de la dynamique des fluides et la compréhension du code de simulation numérique ;

**Mr Gnenakantanhan COULIBALY**, Doctorant au Laboratoire Eaux, Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA), à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) qui a été comme une lumière pour moi et dont les idées, critiques et recommandations m'ont tenu la main le long du chemin menant à l'élaboration ce mémoire et au-delà de tout pour sa disponibilité durant les nombreuses rencontres et présentations ;

Mes remerciements sont également adressés à Mr **Jean-Baptiste MIGRAINE**, Coordinateur technique à l'Organisation Météorologique Mondiale pour son enseignement sur la compréhension des modèles hydrologiques, ses conseils, et la confiance qu'il m'a accordée ;

A tout le corps professoral et administratif de 2iE, plus particulièrement à tous ceux qui ont été mes enseignants ;

A tous mes amis de la promotion de Master (2016 - 2018) à 2iE pour avoir surmonté tous ensemble ces deux années de dur labeur ;

A toute ma famille, mes amis et connaissances pour le soutien moral, matériel et financier dont j'ai bénéficié de leur part tout au long de mon parcours académique.

**Je vous dis Infiniment merci à tous, que le Père céleste vous bénisse et vous comble au-delà de vos espérances.**

## **RÉSUMÉ**

Le développement de cartes d'inondation est un besoin primordial exprimé par le gouvernement de Burkina Faso suite à la récurrence des évènements d'inondations avec des dommages considérables. Cette étude avait pour objectif de contribuer à une meilleure connaissance du risque d'inondation dans une zone semi-urbaine de l'espace Grand-Ouaga au Burkina Faso. Le bassin versant semi-urbanisé étudié est de forme allongée ( $K_G=1.45$ ) avec un relief faible (indice de pente globale=1.45 m/km) montrant ainsi des vitesses de ruissellement relativement faible. Le suivi hydrologique et hydrométrique des écoulements à l'exutoire a permis l'échantillonnage de 25 évènements de crues importantes en 2016 et 2017. De l'analyse de ces évènements, il ressort une grande dispersion statistique des paramètres de crues, en particulier la précipitation totale et le temps de montée qui varient respectivement de 12.2mm à 84.6mm et de 2h à 9h45 avec pour médianes 33.5mm et 5h43. La résolution des équations de Saint-Venant Barré par la méthode des volumes finies a permis de développer un outil de simulation numérique des écoulements. L'analyse de sensibilité a montré que cet outil est sensible aux perturbations des paramètres de friction et d'infiltration. L'outil numérique est assez robuste pour la simulation des crues. Les performances obtenues pour la simulation des crues du 18 au 22/07/2016 et du 17 au 20/08/2017 sont satisfaisantes avec les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe supérieures à 0,60.

### **Mots Clés :**

- 
- 1 - Crues**
  - 2 – Equations de Barré Saint-Venant**
  - 3 – Grand-Ouaga**
  - 4 - Modélisation hydrologique et hydraulique**

## **ABSTRACT**

The development of flood maps is a primary need expressed by the Government of Burkina Faso following the recurrence of flood events with considerable damage. This study aimed to contribute to a better knowledge of the risk of flooding in a semi-urban area of the Grand-Ouaga area in Burkina Faso. The studied semi-urban watershed is elongated ( $K_G = 1.45$ ) with a low relief (overall slope index = 1.45 m / km), thus showing relatively low runoff rates. The hydrological and hydrometric monitoring of the flows at the outlet allowed the sampling of 25 major flood events in 2016 and 2017. From the analysis of these events, it appears a great statistical dispersion of the flood parameters, in particular the precipitation total and rise time which vary respectively from 12.2mm to 84.6mm and 2h to 9h45 with median 33.5mm and 5:43. Solving the Saint-Venant Barré equations using the finite volume method has led to the development of a numerical flow simulation tool. Sensitivity analysis has shown that this tool is sensitive to disturbances of friction and infiltration parameters. The digital tool is robust enough for flood simulation. The performances obtained for the flood simulation from 18 to 22/07/2016 and from 17 to 20/08/2017 are satisfactory with the values of the Nash-Sutcliffe criterion greater than 0.60.

**Key words:**

---

- 1 - Flood**
- 2 - Shallow water equations**
- 3 - Grand-Ouaga**
- 4 - Hydrological and hydraulic modeling**

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>AMMA</b>	: Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
<b>AMMA-2050</b>	: Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine à l'horizon 2050
<b>ANAM</b>	: Agence Nationale de la Météorologie
<b>BDOT</b>	: Base de Données de l'Occupation des Terres
<b>BUNASOL</b>	: Bureau National des Sols
<b>CLUVA</b>	: Climate Change and Urban Vulnerability in Africa
<b>CNFSH</b>	: Comité National Français des Sciences Hydrologiques
<b>CONASUR</b>	: Conseil National de Secours d'Urgence et de Réhabilitation
<b>EM-DAT</b>	: Emergency Events Database
<b>ETP</b>	: Evapotranspiration Potentielle
<b>IGB</b>	: Institut Géographique du Burkina
<b>INSD</b>	: Institut National de la Statistique et de la Démographie
<b>MNT</b>	: Modèle Numérique de Terrain
<b>OMM</b>	: Organisation Météorologique Mondiale
<b>PANA</b>	: Programme d'Action National d'Adaptation
<b>RAINCELL</b>	: Rain Cell Africa
<b>SRTM</b>	: Shuttle Radar Topography Mission
<b>WASCAL</b>	: West African Science Service Center on Climate Change and Adapted Land Use
<b>2D</b>	: Bidimensionnel
<b>3D</b>	: Tridimensionnel

## TABLE DE MATIERES

<i>DEDICACES</i> .....	<i>i</i>
<i>CITATIONS</i> .....	<i>ii</i>
<i>REMERCIEMENTS</i> .....	<i>iii</i>
<i>RÉSUMÉ</i> .....	<i>iv</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>v</i>
<i>LISTE DES ABRÉVIATIONS</i> .....	<i>vi</i>
<i>TABLE DE MATIERES</i> .....	<i>vii</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	<i>ix</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i> .....	<i>x</i>
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<i>I.1. Contexte</i> .....	<i>1</i>
<i>I.2. Problématique</i> .....	<i>2</i>
<i>I.3. Objectifs</i> .....	<i>3</i>
<i>I.4. Hypothèses</i> .....	<i>3</i>
<i>I.5. Justification de la zone d'étude</i> .....	<i>3</i>
<i>I.6. Structuration du mémoire</i> .....	<i>4</i>
<b>II. GENERALITES SUR LA MODELISATION DES CRUES</b> .....	<b>5</b>
<i>II.1. Crue</i> .....	<i>5</i>
<i>II.2. Hydrogramme de crue</i> .....	<i>5</i>
<i>II.3. Modélisation des crues</i> .....	<i>7</i>
<b>III. MATÉRIEL ET MÉTHODES</b> .....	<b>9</b>
<i>III.1. Caractérisation de la zone d'étude</i> .....	<i>9</i>
III.1.1. Cadre géographique.....	9
III.1.2. Paramètres physiques du bassin versant.....	14
III.1.3. Hydrographie et réseau de drainage .....	16
III.1.4. Cadre humain .....	16
III.1.5. Occupation du sol.....	18
<i>III.2. Caractérisation des crues</i> .....	<i>18</i>
<i>III.3. Modélisation Hydraulique des écoulements</i> .....	<i>21</i>
III.3.1. Modèle Mathématique.....	21
III.3.2. Termes d'infiltration et de friction .....	23

III.3.3. Schéma de discrétisation, grille et schéma numérique :.....	25
III.3.4. Données de l'étude .....	30
III.3.5. Prise en compte du bâti dans l'outil numérique .....	32
III.3.6. Support de simulation.....	33
<b>IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>34</b>
<i>IV.1. Caractérisation physique et hydrologique de la zone d'étude.....</i>	<i>34</i>
<i>IV.2. Caractérisation des crues observées en 2016 et 2017.....</i>	<i>37</i>
<i>IV.3. Analyse de la sensibilité de l'outil numérique de simulation des crues aux paramètres friction et d'infiltration .....</i>	<i>43</i>
<i>IV.4. Simulation de quelques scénarios .....</i>	<i>46</i>
IV.4.1. Scénario 1 : Simulation de l'impact des conditions d'humidité du sol.....	46
IV.4.2. Scénario 2 : Prise en compte du bâti et du réseau de drainage.....	47
<i>IV.5. Application de l'outil de simulation aux cas réels d'évènements de crue :.....</i>	<i>48</i>
<b>V. CONCLUSION .....</b>	<b>53</b>
<b>VI. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>54</b>
<b>VII. ANNEXES.....</b>	<b>59</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I:</b> Activités économiques de la commune de Ouagadougou (source : INSD, 2009)	17
<b>Tableau II:</b> Coordonnées géographiques du réseau d'observation hydrométéorologique de la zone d'étude .....	32
<b>Tableau III:</b> Caractéristiques physiques de la zone d'étude.....	34
<b>Tableau IV:</b> Nombre d'évènements de crues par mois avec une hauteur maximale supérieure au seuil de 2 m en 2016 et 2017 .....	38
<b>Tableau V:</b> Valeurs de friction choisies pour l'étude de sensibilité du modèle (source : FHWA, 2005).....	43
<b>Tableau VI:</b> Valeurs d'infiltration utilisées pour l'étude de sensibilité du modèle (Source : Données de terrain) .....	44

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 :</b> Représentation d'un hydrogramme de crue .....	6
<b>Figure 2:</b> Situation géographique du bassin versant (Source : IGB).....	10
<b>Figure 3:</b> Evolution des précipitations moyennes mensuelles à Ouagadougou entre 1986 et 2014 (Source : station synoptique de Ouagadougou).....	11
<b>Figure 4:</b> Evolution annuelle des températures minimales et maximales à Ouagadougou (source : station synoptique de Ouagadougou) .....	12
<b>Figure 5:</b> Carte des sols (Source BUNASOLS) .....	13
<b>Figure 6:</b> Carte d'occupation du sol (source : IGB).....	18
<b>Figure 7:</b> Visualisation du pont lors d'un suivie des hauteurs des écoulements à l'exutoire du bassin versant .....	19
<b>Figure 8:</b> Aperçu de l'impact de l'inondation du 21/08/2017 .....	20
<b>Figure 9:</b> Mise en place du dispositif de doubles anneaux de Müntz .....	23
<b>Figure 10 :</b> Visualisation de la topographie sur Scilab.....	31
<b>Figure 11 :</b> Carte du réseau d'observation de la zone d'étude .....	32
<b>Figure 12 :</b> Visualisation de la topographie avec la prise en compte du bâti sur Scilab .....	33
<b>Figure 13:</b> Carte du relief .....	35
<b>Figure 14:</b> Courbe hypsométrique du bassin versant .....	36
<b>Figure 15:</b> Carte du réseau Hydrographique .....	36
<b>Figure 16:</b> Chronique des crues de 2016 (1 <sup>er</sup> Juin – 30 Septembre) .....	37
<b>Figure 17:</b> Chronique des crues de 2017 (16 Mai – 30 Septembre).....	38
<b>Figure 18:</b> Boîte à moustache - Précipitation totale événementielle ayant généré des lames d'eau écoulées supérieures à 2m .....	39
<b>Figure 19:</b> Boîte à moustache - Intensité maximale d'évènements pluvieux ayant généré des lames d'eau écoulées supérieures à 2m.....	40
<b>Figure 20:</b> Boîte à moustache - Temps de montée, Durée de l'averse et Temps de réponse des évènements de crues ayant des lames d'eau écoulées supérieures à 2m.....	41
<b>Figure 21:</b> Boîte à moustache - Temps d'atteinte de l'intensité maximale de pluie d'évènements de crue ayant générés des lames d'eau écoulées supérieures à 2m .....	42
<b>Figure 22:</b> Boîte à moustache - Hauteur d'eau maximale d'évènements de crue ayant générés des lames d'eau écoulées supérieures à 2m .....	42
<b>Figure 23:</b> Sensibilité du modèle à la friction .....	44
<b>Figure 24:</b> Sensibilité du modèle à l'infiltration.....	45

<b>Figure 25:</b> Sensibilité du modèle au couplage Friction-Infiltration .....	46
<b>Figure 26:</b> Simulation de l'impact des conditions d'humidité du sol .....	47
<b>Figure 27:</b> Simulation de l'impact de la prise en compte du bâti et réseau de drainage.....	48
<b>Figure 28:</b> Limnigrammes observé et simulé des crues du 18 au 22/07/2016 .....	50
<b>Figure 29:</b> Limnigrammes observé et simulé de la crue du 17 au 20/08/2017 .....	50
<b>Figure 30:</b> Cartes d'évolution spatio-temporelle des crues du 18 au 22 Juillet 2016 .....	51
<b>Figure 31:</b> Cartes d'évolution spatio-temporelle de la crue du 17 au 20 Août 2017 .....	52

## **I. INTRODUCTION**

### **I.1. Contexte**

Le changement climatique constitue l'une des plus grandes préoccupations du 21<sup>ème</sup> siècle (Bani et al, 2016). Il n'est certes pas un phénomène nouveau, mais a pris une ampleur particulièrement importante au cours des dernières décennies. Tous les continents sont affectés à des degrés divers par ce phénomène (Sall, 2011). Les changements climatiques se traduisent par l'accroissement d'évènements météorologiques extrêmes qui induisent les catastrophes naturelles telles que les sécheresses, les inondations, les tempêtes, etc. (PNUD, 2008). Dans ce contexte de changements climatiques, il est vraisemblable que les fortes précipitations et les inondations dévastatrices continueront à devenir plus intenses et plus fréquentes dans le monde (GIEC, 2007a).

L'Afrique de l'Ouest est considérée comme l'une des régions les plus vulnérables aux changements climatiques (GIEC, 2007a). Les évènements extrêmes tels que les fortes pluies, les inondations sont régulièrement observées (Sarr, 2011). Selon Sarr (2011), le nombre d'évènements d'inondation serait passé d'un évènement par an avant les 1990 à une moyenne de 8 à 12 par an au cours des années 2000 en Afrique de l'Ouest.

Au Burkina Faso, en plus des causes structurelles de la pauvreté touchant plus de 40%<sup>1</sup> de la population, le pays doit faire face aux évènements d'inondations avec des conséquences très désastreuses. En effet, le développement urbain amorcé depuis les années 1960 accroît le risque d'inondation due à la modification des processus hydrologiques ainsi que de la vulnérabilité des populations aux inondations (Salavati, 2017).

Ce phénomène s'observe principalement dans les grandes villes telles que Ouagadougou qui sont sujets à une forte explosion démographique, une urbanisation rapide et incontrôlée augmentant les superficies imperméables, une insuffisance et/ou un mauvais entretien des ouvrages d'assainissement, etc. (R. Laganier & Salvador, 2000). L'action conjuguée de ces facteurs, en plus d'une fréquence accrue des extrêmes pluvieux favorise l'apparition des inondations (Bani, 2011). La collecte d'informations sur ces évènements à travers les rapports du CONASUR, les archives des organes de presse et les bases de données internationales

---

<sup>1</sup> Résultats de l'enquête multisectorielle de l'INSD en 2016

comme EM-DAT, a permis de répertorier 74 cas d'inondation au Burkina Faso dont 30% de ces évènements sont reportés dans l'espace Grand-Ouaga sur la période 1986 - 2015 (Kabore, 2016).

### **I.2. Problématique**

Ces dernières années, la saison hivernale va de pair avec les mots inondations, destruction des biens, déplacement des populations, développement de maladies hydriques et pertes en vies humaines (OMS, 2009). Au Burkina Faso, l'évènement le plus marquant remonte au 1er Septembre 2009 où les inondations ont causé des dommages considérables, tant sur le plan humain que matériel, à Ouagadougou et dans certaines localités environnantes. En effet, selon le rapport d'activité du CONASUR (CONASUR, 2009), près de 150 000 personnes ont été affectées par ces inondations, plus 24 000 maisons se sont écroulées et 9 personnes ont trouvé la mort. Selon le Ministère du transport, un tel évènement pluvieux (263 mm en 10h)<sup>2</sup> ne s'était pas produit au Burkina Faso depuis 1919. En raison de la recrudescence des inondations au cours des deux dernières décennies, de la présence d'une population et des biens matériels dans des zones propices aux inondations et de la nécessité de répondre aux attentes actuelles des communautés en termes de protection des vies et des moyens de subsistance, l'élaboration d'un système de prévision et d'alerte des risques climatiques est un besoin pressant, reconnu depuis 2007 (PANA, 2007). C'est sur ce fond de croissance démographique, de tendance à l'urbanisation, de changement climatique et ses corollaires et du manque de connaissance quant à la caractérisation hydrologique des évènements antérieures d'inondation que de nombreux projets de recherche ont été mis en place en Afrique de l'Ouest. Parmi ceux-ci, l'on peut citer les projets RAINCELL (Rain Cell Africa), CLUVA (Climate Change and Urban Vulnerability in Africa), AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), etc. C'est dans cet élan que s'inscrit le projet AMMA-2050 (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine à l'horizon 2050) en Afrique de l'Ouest. Ce projet s'étend sur deux sites pilotes (Niakhar au Sénégal et à Ouagadougou au Burkina Faso). Au Burkina Faso, l'espace « Grand-Ouaga » a été identifié pour étudier et comprendre le risque d'inondation et la mise en place d'outils d'évaluation des impacts futurs des inondations. C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude dont le thème est : « Modélisation des crues dans une zone semi-urbaine de Grand-Ouaga (Burkina Faso) ».

---

<sup>2</sup> International Core Steering Committee -9-WMO

### **I.3. Objectifs**

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à une meilleure connaissance du risque d'inondation dans une zone semi-urbaine au Burkina Faso.

Plus spécifiquement, ce travail vise les objectifs suivants :

- ❖ Caractériser physiquement et hydrologiquement le bassin versant semi-urbain considéré ;
- ❖ Caractériser les échantillons de crues enregistrés à l'exutoire de ce bassin au cours des années 2016 et 2017 ;
- ❖ Analyser la sensibilité de l'outil numérique de simulation des crues (développé dans le cadre du projet AMMA-2050) aux paramètres de friction et d'infiltration ;
- ❖ Tester la performance de l'outil de simulation pour des cas réels d'évènements de crue.

### **I.4. Hypothèses**

La connaissance du risque d'inondations, des causes et conséquences, est un enjeu capital pour la mise en place de système d'alerte précoce et l'élaboration des stratégies de réduction de la vulnérabilité.

A l'issue de cette étude, il est question de vérifier les hypothèses suivantes :

- Le risque d'inondation est étroitement lié aux paramètres physiques, hydrologiques et d'occupation du sol du bassin versant ;
- La prise en compte du bâti améliorerait les performances de l'outil de simulation des crues.

### **I.5. Justification de la zone d'étude**

Le bassin versant semi-urbain dont l'exutoire est localisé à Rayongo (commune de Saaba) a été identifié pour la simulation numérique des crues dans cette étude. Ce choix a été guidé par un certain nombre de critères qu'il importe d'exposer ici. En effet, cinq (5) principaux critères ont guidé le choix de la zone d'étude à savoir :

- Le taux d'urbanisation de la zone : La zone d'étude abrite les quartiers Ouaga 2000 et la ZAD (Zone d'Activités Diverses) qui, du fait des importantes infrastructures qu'ils abritent, représentent les quartiers les plus urbanisés de la commune de Ouagadougou. En d'autres termes, une zone où l'infiltration est susceptible d'être très faible et des vitesses d'écoulement très élevées (Laganier et al, 2000/2).
- La Croissance démographique : La commune de Ouagadougou possède l'un des taux de croissance démographique les plus élevés au monde : 7.6 % / an, selon une étude

menée par l'OPO<sup>3</sup> entre 1960 et 2015. La forte concentration de la population dans cette zone, surtout dans la partie du bassin dont l'habitat est de type spontané (« non lotis ») représente un fort risque de perte en vie humaine en cas d'inondations.

- Les enjeux économiques, politiques et stratégiques : De nombreuses infrastructures ayant de grands enjeux pour le pays s'y trouvent parmi lesquelles : le Palais présidentiel (KOSSIAM), les Ministères de la défense et de l'agriculture, une partie l'aéroport, les Ambassades (USA, Mali...), le palais des sports, et bien d'autres.
- Le risque d'inondation : De plus en plus des événements d'inondations ont été observés sur la zone d'étude, principalement à l'exutoire où le cours d'eau déborde de son lit mineur à chaque événement de pluies (observations de terrain de l'équipe de recherche AMMA2050 à 2iE depuis 2016).
- L'enjeu culturel : En guise d'enjeu culturel on peut citer le monument des martyrs qui a été construit en s'appuyant sur les valeurs expressives de la culture nationale, représente l'unité nationale et la reconnaissance du peuple burkinabé envers les héros nationaux. L'on recense également 8 églises (Paroisse notre dame des Apôtres, CCB<sup>4</sup> Saint Marc, CCB Saint Antoine de Padoue, etc.) et 2 mosquées (la grande mosquée De Ouaga 2000 et la mosquée Al-Houda).

### **I.6. Structuration du mémoire**

Après l'introduction, le présent rapport se composera de trois grandes parties :

*La première partie*, qui regroupera les chapitres généralités, matériels et méthodes. La première section de cette partie, présentera la revue de la littérature sur les inondations en milieux urbains et les moyens numériques de les simuler. La deuxième section, définira la démarche adoptée ainsi que le matériel utilisé pour la caractérisation des bassins versants. La troisième section, portera sur la méthodologie de caractérisation des crues enregistrées entre 2016 et 2017. La quatrième montrera les différentes étapes du développement et paramétrage de l'outil de modélisation des inondations. La dernière section de cette première partie quant à elle, sera consacrée à la méthodologie utilisée pour l'évaluation des performances de l'outil de modélisation ;

*La deuxième partie* synthétisera l'ensemble des résultats obtenus et leurs discussions ;

*La troisième partie* quant à elle, se focalisera sur la conclusion et les recommandations.

---

<sup>3</sup> Observatoire de la Population de Ouagadougou

<sup>4</sup> Communauté Chrétienne de Base

## **II. GENERALITES SUR LA MODELISATION DES CRUES**

Dans cette partie, il sera défini les termes et mots clés qui régissent l'étude. Il sera donc premièrement défini ce que c'est qu'une crue, puis un hydrogramme de crue et enfin ce que l'on entend par la modélisation des crues (modélisation hydrologique, modélisation hydraulique et modélisation couplée hydrologique-hydraulique).

### **II.1. Crue**

D'après le Glossaire International d'Hydrologie (OMM, 1992) : «la crue, phénomène hydrologique de base, est l'augmentation plus ou moins brutale du débit et par conséquent de la hauteur d'un cours d'eau. La crue est la croissance du débit exprimée par la partie montante de l'hydrogramme, durant laquelle le débit dépasse un certain multiple du débit moyen annuel». Le choix du seuil définissant l'apparition d'une crue dépend de l'importance du cours d'eau. Très souvent ce seuil est estimé égal à la moyenne interannuelle de l'écoulement ; c'est-à-dire que tout événement hydrologique dont le coefficient d'écoulement moyen est supérieur ou égal à celui de l'écoulement moyen interannuel du cours d'eau est considéré comme crue et peut faire l'objet d'une étude précise.

Selon le CNFSH (CNFSH, 2000), on distingue en général deux types de crues : les crues fluviales et les crues torrentielles même si le passage de l'une à l'autre se fait de façon continue. Les crues fluviales, souvent saisonnières, affectent les cours d'eau importants aux vastes bassins versants ; en général la montée des eaux y est lente. Les crues torrentielles ou rapides, subites, brutales, soudaines ou encore éclair affectent n'importe quelle partie du réseau hydrographique ; elles sont souvent dues à des pluies de caractère convectif très violentes et localisées ; elles sont caractérisées par une évolution très rapide, la montée des eaux étant très brutale. Cependant, certains hydrologues désignent par "la crue" l'épisode complet de crue et décroissance jusqu'au retour à un régime non influencé. La crue est simple, si elle présente une seule pointe ; elle est dite complexe si elle présente plusieurs pointes.

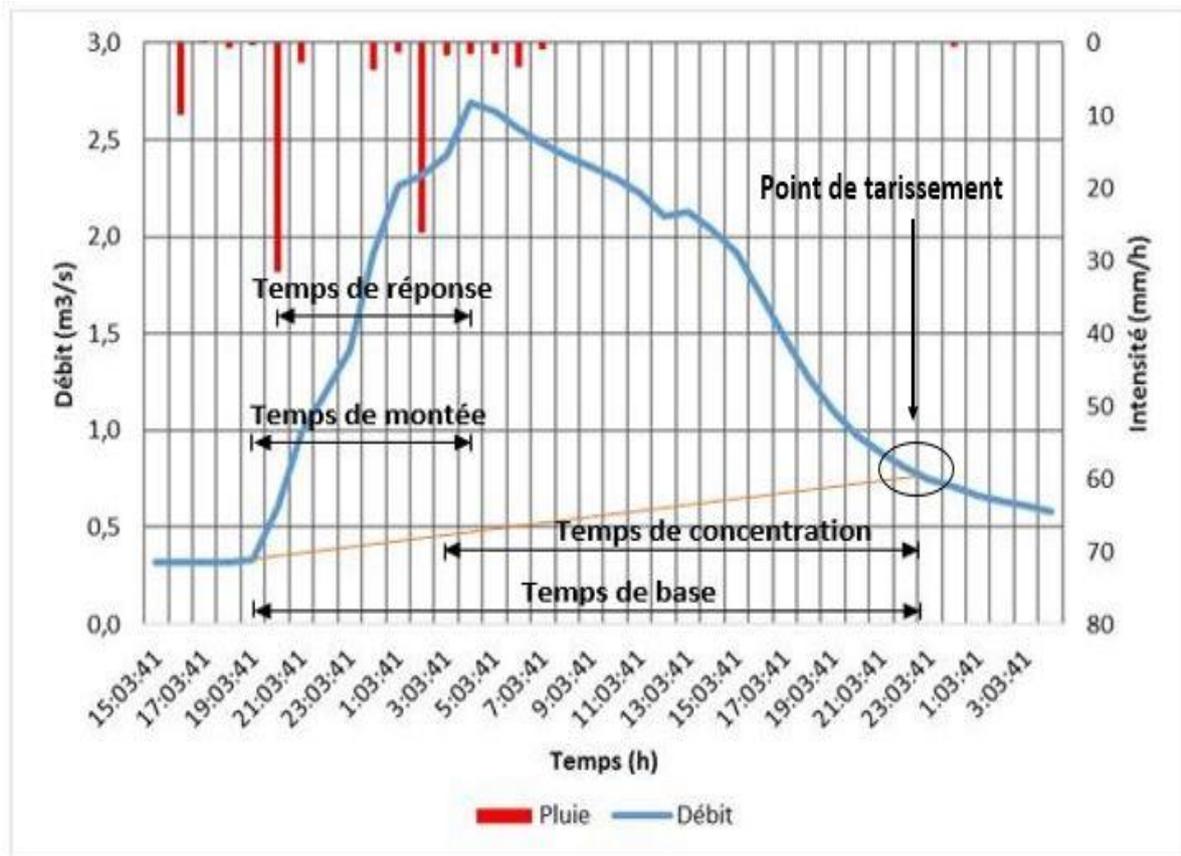
### **II.2. Hydrogramme de crue**

Plusieurs définitions ont été attribuées à l'hydrogramme de crue, on lit entre autres :

- ❖ « Courbe d'évolution des débits en fonction du temps dans une section d'un cours d'eau, résultante des diverses formes d'écoulement existant dans le bassin » (Rémenérias, 1960)
- ❖ « Graphique de variation des débits en fonction du temps » (OMM, 1992)

- ❖ « Graphique qui montre la relation, avec le temps, le niveau, le débit ou la vitesse de l'eau dans un cours d'eau ou un canal » (Herschy et al, 1998)

D'une manière plus synthétique, l'hydrogramme de crue est l'expression des débits en fonction du temps, se rapportant à une station donnée durant une période déterminée tel qu'illustre la figure 1.



***Figure 1 : Représentation d'un hydrogramme de crue***

L'hydrogramme de crue présente la forme générale d'une courbe en cloche dissymétrique que l'on divise en quatre parties : la montée, la pointe de la crue, la décrue, le retour au niveau de base. La montée de la crue est la partie montante (début d'écoulement jusqu'au débit de pointe), dite courbe de crue. La durée correspondante est appelée temps de montée ( $t_m$ ). En fin de montée, apparaît la pointe de la crue qui exprime la puissance de la crue et la durée de la période critique sur l'hydrogramme, ce qui permet de calculer la hauteur des digues insubmersibles, elle permet de comparer entre elles la puissance des crues pendant la période d'observation et de calculer le débit maximum instantané. Ensuite viennent les courbes de décrue et de tarissement durant lesquelles le niveau du cours d'eau baisse, mais le temps de décrue est plus long que temps de concentration.

À partir de la figure 1, on définit également plusieurs temps caractéristiques :

- ❖ **Temps de réponse du bassin  $t_p$**  : Intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue ou parfois du centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.
- ❖ **Temps de concentration  $t_c$**  : Temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée "hydrologiquement" de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. On peut estimer  $t_c$  en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct (i.e. fin de l'écoulement de surface). Il est plus long pour une aire réceptrice allongée et étroite, plus court lorsqu'elle est ramassée et en forte pente. Il augmente avec la longueur des différents tronçons constituant le réseau hydrographique. Or de ce temps de concentration, dépend en grande partie la puissance de la crue.
- ❖ **Temps de montée  $t_m$**  : Temps qui s'écoule entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement rapide (décelable par le limnigraphe) et le maximum de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.
- ❖ **Temps de base  $t_b$**  : Durée du ruissellement direct, c'est-à-dire la longueur sur l'abscisse des temps de la base de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.

### II.3. Modélisation des crues

#### ❖ Modélisation hydrologique

Un modèle hydrologique permet la transformation d'une ou de plusieurs entrées météorologiques (pluie, évapotranspiration...) en sortie hydrométrique (débit, hauteur d'eau). C'est une reconstitution, plus ou moins proche de la réalité physique selon le niveau de complexité du modèle et les hypothèses retenues, des processus de genèse et de propagation des crues et des facteurs associés (ruissellement direct, écoulements hypodermiques, infiltration, évapotranspiration...) (Laganier, 2015). Comme indiqué par Ambroise (Ambroise, 1998), il existe une très grande variété de modèles hydrologiques (« il y a presque autant de modèles que d'hydrologues »). Des classifications des modèles, d'après plusieurs critères, ont été proposées dans la littérature (Ambroise, 1998 ; Kampf et al, 2007). Les modèles se distinguent selon leur degré d'abstraction, leur représentation du bassin, ou encore selon la représentation temporelle des phénomènes.

### ❖ Modélisation hydraulique

Un modèle hydraulique permet de modéliser les caractéristiques d'une crue se propageant, sur tout le linéaire du cours d'eau d'intérêt, telles que les débits, vitesses, hauteurs d'eau atteintes, et les surfaces inondées dans le cas d'un évènement débordant. Ce type de modèle est basé sur les équations de Saint-Venant, établies en 1871 par Barré de Saint-Venant, ou sur des simplifications de celles-ci (onde cinématique, onde diffusante). Ces équations sont remplacées localement par des lois d'ouvrages lorsqu'un ouvrage hydraulique (seuil, barrage) est présent, et sont complétées par des pertes de charge additionnelles lorsque la section du cours d'eau varie brusquement (en présence d'un pont, de gorges...). Les équations de Saint-Venant, les lois d'ouvrages et les lois de pertes de charge sont à la base des modèles hydrauliques (Laganier, 2015).

### ❖ Modélisation couplée Hydrologique-Hydraulique

Il existe deux grandes options de couplage de modèles hydrologique et hydraulique. Le couplage peut être unidirectionnel (externe), ou bidirectionnel (interne ou complet) (Lerat, 2009). Dans le cas de la première option, les deux codes de modélisation restent indépendants l'un de l'autre. L'échange d'informations se fait à sens unique du modèle hydrologique vers le modèle hydraulique : les hydrogrammes obtenus avec le modèle hydrologique alimentent le modèle hydraulique, qui est employé dans un second temps. C'est la stratégie de couplage la plus simple et la plus fréquemment employée (Lerat, 2009). Dans le cas des couplages bidirectionnels, le modèle hydraulique interagit avec le modèle hydrologique, permettant une modélisation plus réaliste aux confluences (prise en compte des remous). Cette approche est aussi bien plus lourde numériquement : à chaque pas de temps de la simulation, les deux modèles doivent être mis en cohérence selon une procédure complexe (Lerat, 2009). De plus, selon Lerat (2009), les applications de couplages bidirectionnels se limitent à de petites zones (de l'ordre de la dizaine voire quelques dizaines de km<sup>2</sup>). Lorsque les codes des modèles hydrologique et hydraulique sont fusionnés en un seul, en reformulant et adaptant les équations les composant, le couplage est qualifié de complet. L'annexe 8 présente quelques logiciels existants qui couplent la modélisation hydrologique-hydraulique ainsi que leurs applicabilités, leurs forces et limites.

### **III. MATÉRIEL ET MÉTHODES**

Ce chapitre est divisé en trois parties. La première porte sur la caractérisation de la zone d'étude. Il s'agit d'aborder le cadre géographique, les caractéristiques physiques et hydrologiques ainsi que l'occupation du sol de la zone. La seconde partie porte sur la caractérisation des limnigrammes des crues observées en 2016 et 2017. La dernière partie est axée sur les étapes de la modélisation mathématique des crues. L'ensemble des notes de calculs sont reportées à l'annexe 1.

#### **III.1. Caractérisation de la zone d'étude**

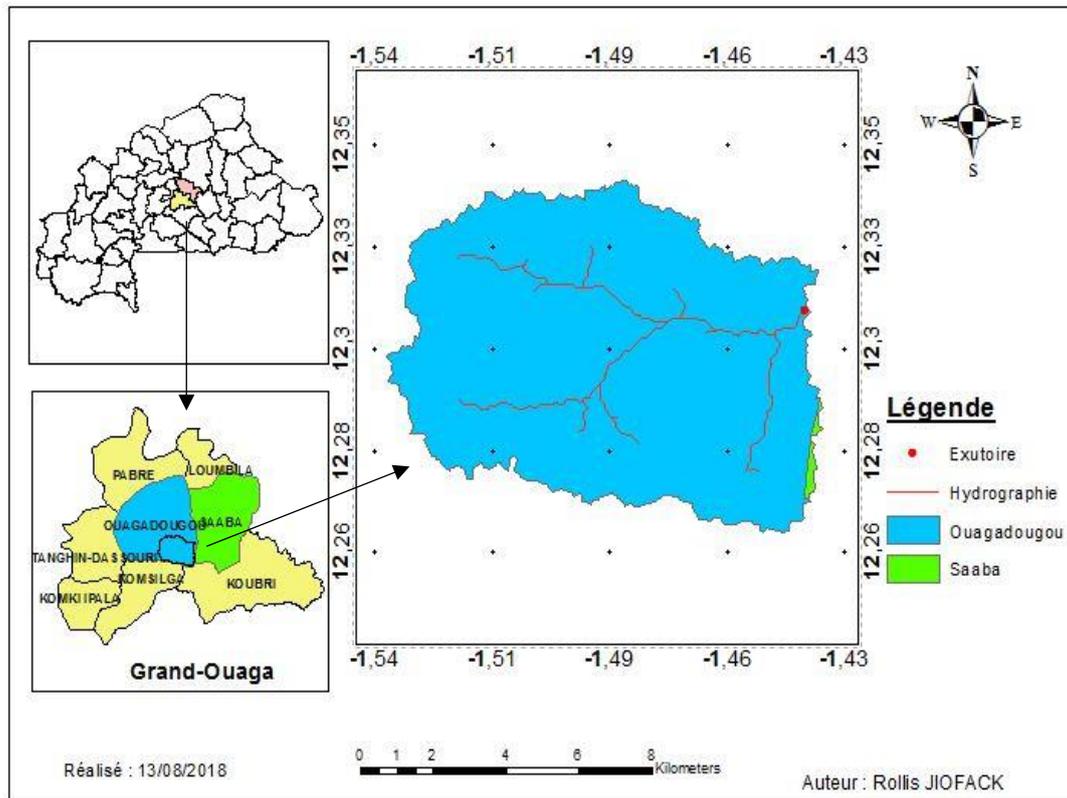
##### **III.1.1. Cadre géographique**

###### **III.1.1.1. Localisation**

La zone d'étude se situe dans l'espace « Grand Ouaga », issu du schéma directeur d'expansion de la ville de Ouagadougou à l'horizon 2025. Elle est comprise entre les parallèles 12.26° et 12.35° de latitude Nord et entre les méridiens 1.43° et 1.54° de longitude Ouest. L'espace « Grand Ouaga » est un espace géographique composé de huit (8) communes situées à l'intérieur de deux (2) régions limitrophes (Figure 2) : la Région du Centre et la Région du Plateau Central. Ses communes sont réparties comme suit :

- Sept (7) communes dans la Province du Kadiogo, Région du Centre, dont une Commune urbaine (Ouagadougou) et 6 Communes rurales (Komsilga, Komki-Ipala, Koubri, Pabré, Saaba, Tanghin-Dassouri) ;
- Une Commune rurale (Loumbila), dans la Province de l'Oubritenga, Région du Plateau Central.

La zone d'étude se situe au Sud-Est de la commune de Ouagadougou et est à cheval entre celle-ci et la Commune de Saaba. Les proportions de la zone d'étude appartenant aux deux communes sont de 99.42% pour Ouagadougou et 0.58% pour Saaba.



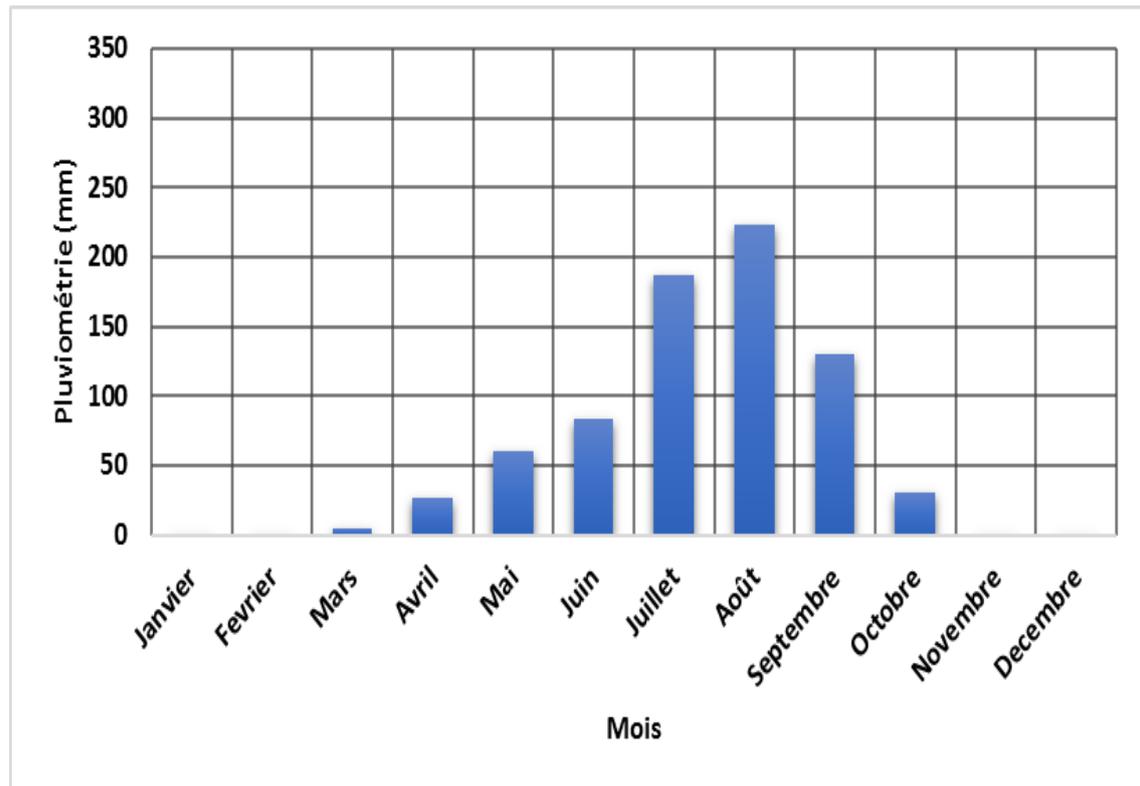
***Figure 2: Situation géographique du bassin versant (Source : IGB)***

### *III.1.1.2. Climat*

La zone d'étude est sous la dépendance du climat soudano-sahélien du Burkina Faso (PNA, 2015). Son climat se caractérise par l'alternance de deux principales saisons résultant du mouvement du Front Inter-Tropical (FIT) :

- Une saison sèche de 7 mois (de novembre à mai) marquée par l'harmattan (vent frais et sec jusqu'en fin janvier, chaud et sec de février à avril) ;
- Une saison pluvieuse de 5 mois (de juin à octobre) annoncée par la mousson (vent chaud et humide) avec une abondance de pluies en août.

La pluie moyenne annuelle sur la période 1986-2014 est de 756.8 mm. La variation des pluies moyennes mensuelles est présentée sur la figure 3.



***Figure 3: Evolution des précipitations moyennes mensuelles à Ouagadougou entre 1986 et 2014 (Source : station synoptique de Ouagadougou)***

Le régime thermique de la zone d'étude se caractérise par sa variabilité mensuelle mais aussi interannuelle. On distingue deux périodes où il fait relativement froid au cours de l'année marquées par de basses températures :

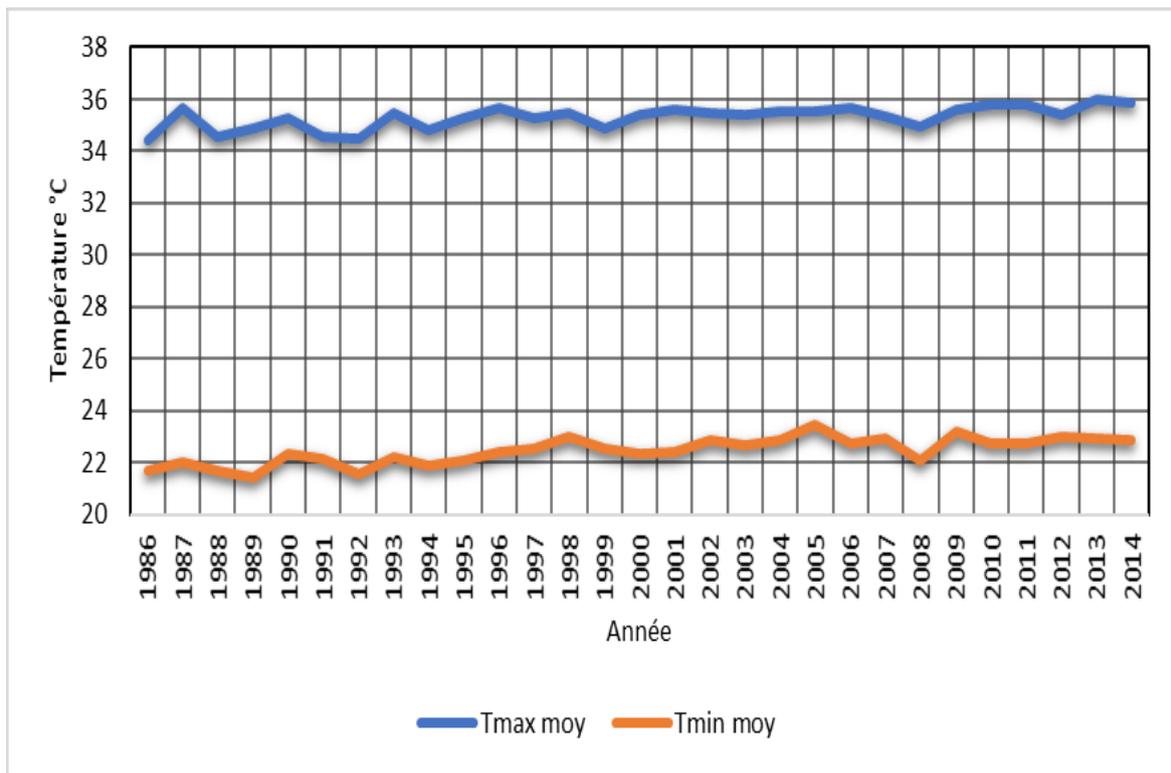
- De Décembre à janvier, les températures mensuelles oscillent entre 14.3 et 23.7°C.
- De Juillet à septembre, correspondant à la saison pluvieuse qui s'installe avec l'arrivée des vents de mousson, les températures varient entre 22 et 24°C.

Entre ces deux (2) périodes bien distinctes s'installent deux autres périodes dites chaudes :

- ❖ De Mars à juin représente la période la plus sèche et la plus chaude de l'année, les températures mensuelles sont de l'ordre de 37 à 40°C.
- ❖ D'Octobre à novembre constitue la seconde période de chaleur et correspond à la fin de la saison des pluies, les températures maximales atteignent 35°C.

La température moyenne annuelle est de 28.5°C avec des minimas moyens de l'ordre de 16.5°C entre décembre et janvier et des maximas moyens de 39.4 °C entre mars et avril (Sankara, 2010).

La variation annuelle des températures minimales et maximales sur la période 1986 - 2014 est présentée sur la figure 4.



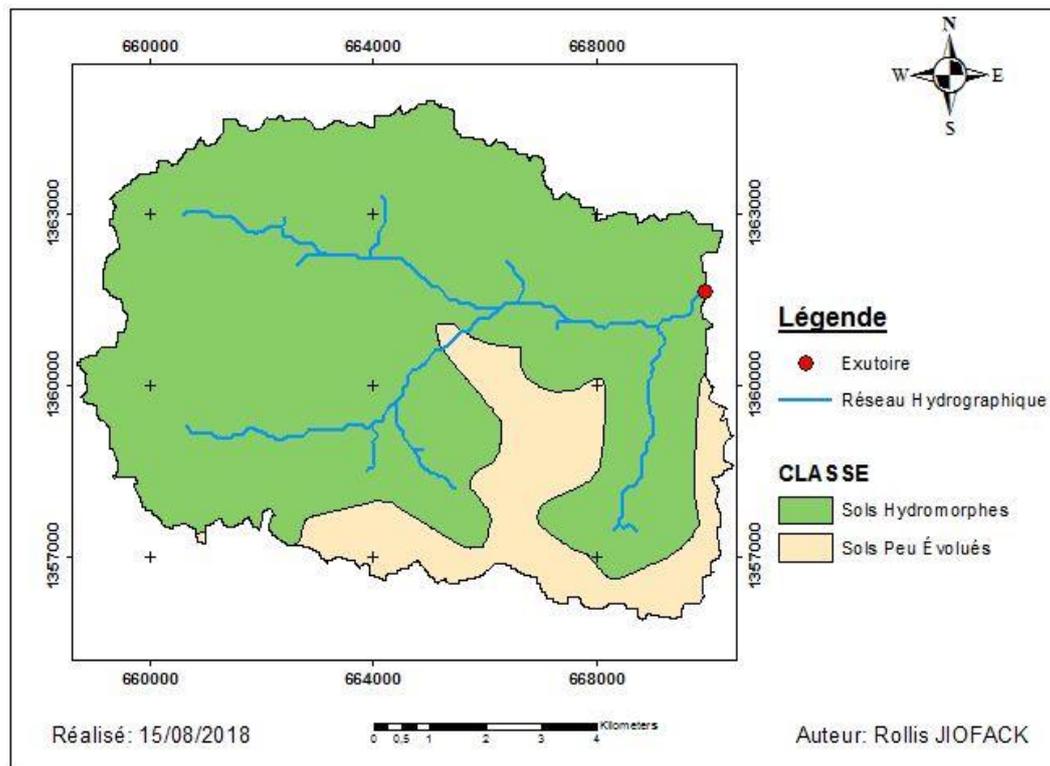
***Figure 4: Evolution annuelle des températures minimales et maximales à Ouagadougou (source : station synoptique de Ouagadougou)***

### *III.1.1.3. Sol et Végétation*

#### *❖ Sol*

Le sol agit sur l'hydrologie d'un cours d'eau tout d'abord de par sa nature qui influence le développement de la végétation et la réflexion des rayons solaires, mais aussi par ses propriétés mécaniques qui régissent sa perméabilité (Makoko et al, 1986).

La base des données des sols, obtenue au niveau de BUNASOLS, révèle que le sol de la zone d'étude est représenté majoritairement par des sols de type hydromorphe (association à lithosols sur cuirasses ferrugineuses) composés de matériaux gravillonnaires, couvrant le long des cours d'eau et des sols peu évolués (association à lithosols sur cuirasses ferrugineuses et sols ferrugineux tropicaux remaniés sur matériau argilo-sableux en profondeur) composés de matériaux argilo-sableux (Figure 5).



***Figure 5: Carte des sols (Source BUNASOLS)***

### ❖ Végétation

L'effet principal de la couverture du sol par la végétation réside dans le contrôle de l'énergie cinétique des gouttes de pluies par les parties aériennes et la réduction du battage de sol avec toutes les conséquences qui en découlent : maintien de la structure du sol en surface, meilleure infiltration, donc ruissellement réduit (Makoko et al, 1986).

La formation végétale initiale de la zone d'étude a connu une dégradation nette en quantité et en qualité (Bayala et al, 2009). Seules les espèces utilitaires telles que le karité, le raisinier, etc., ont été épargnées ou conservées. Quelques espèces fruitières ou non comme le manguier, l'eucalyptus, la pomme d'acajou, le caïlcédrat ont été plantées à l'intérieur ou aux alentours des concessions. La ceinture verte mise en place avant la période révolutionnaire avait pour but de protéger la capitale des vents desséchants, de piéger les poussières et d'atténuer l'érosion des sols par les eaux de ruissellement vers les barrages a été presque totalement « consommée » par les habitats spontanés ou les lotissements (Kafando, 2006).

Selon l'occupation du sol, la zone d'étude est encore largement agricole. L'activité agricole la plus répandue est l'horticulture maraîchère appelée couramment le maraîchage qui constitue une source d'approvisionnement du marché local. Elle se pratique généralement aux bords des cours d'eau et des retenues.

### III.1.2. Paramètres physiques du bassin versant

Le milieu physique dans lequel évolue le cycle hydrologique varie d'un bassin à un autre en fonction d'un certain nombre de paramètres physiques, morphologiques et géométriques qui interviennent, et souvent de façon combinée, dans les modalités d'écoulement fluvial. Les différents paramètres morphométriques d'un bassin versant (forme, altitude, pente, relief, etc.) jouent un rôle essentiel dans son comportement hydrologique. Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée qu'il convient de préciser autant que possible, dès le début de toute étude. L'analyse et la mesure de ces paramètres permettent d'avoir une meilleure compréhension du comportement hydrologique d'un bassin versant.

#### III.1.2.1. Paramètres de forme

La forme du bassin joue un rôle important sur l'allure de l'hydrogramme de crue résultante d'une averse donnée à l'exutoire du bassin. Un bassin très allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de la forme très ramassée (Roche, 1963). Les bassins en forme d'éventail ont les plus fortes pointes de crue. Les différentes grandeurs déterminant la forme d'un bassin versant sont les suivantes :

##### ❖ Indice de compacité de Gravelius

*L'indice de Gravelius* : Il est défini comme étant le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même superficie. L'importance de cette information est évidente dans le comportement du bassin au point de vue du ruissellement (Makoko et al, 1986).

Le coefficient de Gravelius est supérieur ou égal à l'unité, il vaut par exemple environ 1.12 pour un bassin carré et est d'autant plus grand que le bassin est allongé (Wisler et al, 1959). La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants.

##### ❖ Dimension de rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est une transformation géométrique qui assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même surface. Pour des bassins ayant le même indice de Gravelius, le rectangle permettrait d'apporter plus de précision sur la forme des bassins versants, permettant ainsi de les comparer.

### ❖ Indice de pente global

L'indice de pente global est un indice qui se calcule à la vue de la courbe hypsométrique et qui est destiné à permettre rapidement :

- De situer le bassin étudié dans une échelle de pente ;
- De comparer entre eux plusieurs bassins.

#### *III.1.2.2. Relief*

La connaissance de la pente et des altitudes est indispensable dans la compréhension de la dynamique des écoulements. Comme son nom l'indique, le MNT est une représentation numérique du terrain en termes d'altitude. Il fournit des renseignements non seulement sur les formes du relief, mais également sur leur position (Riazanoff, 1989). Le relief joue un rôle important sur le comportement hydrologique d'un bassin, il détermine en grande partie l'aptitude des terrains au ruissellement. L'obtention du MNT s'est faite à partir des données STRM 30 présentées sur la plateforme de USGS<sup>5</sup> (United States Geological Survey). Nous avons téléchargé la scène (SRTM1N12W002V3) comprise entre les parallèles 12° et 13° de latitude Nord et entre les méridiens 1° et 2° de longitude Ouest, puis un traitement a été effectué sous ArcGIS afin d'extraire le bassin versant.

#### *III.1.2.3. Courbe hypsométrique*

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief (Makoko et al, 1986). Elle met en relation les altitudes et les surfaces dans un bassin, sous forme de fréquence de superficies inférieures à un seuil donné. Elle est obtenue par le cumul de l'histogramme des altitudes et elle permet de déterminer les altitudes maximale, minimale, moyenne, médiane, ainsi que l'indice de pente globale du bassin.

La courbe hypsométrique demeure un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elle peut en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donne des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

---

<sup>5</sup> <https://earthexplorer.usgs.gov/>

### III.1.3. Hydrographie et réseau de drainage

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels et artificiels, permanents ou temporaires qui participent à l'écoulement (Vincent et al, 1995). Le cours d'eau étudié est un affluent du Massili et se caractérise par des cours d'eau temporaires au régime lié à celui de la pluviométrie. L'élaboration de la carte du réseau hydrographique à l'aide de l'outil ArcGIS permettra de le décomposer en thalwegs d'ordre :

- ✦ 1 : Tout cours d'eau élémentaire n'ayant pas encore reçu d'affluent ;
- ✦ 2 : Formé par deux cours d'eau d'ordre un ;
- ✦ 3 : Formé par deux cours d'eau d'ordre deux, etc. (Selon Horton et Schumm).

#### ❖ La densité de drainage :

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et dans une certaine mesure des conditions climatiques et anthropiques. En pratique les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé ; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage,  $C=1/D_d$ , s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ». Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau).

#### ❖ La densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. En somme, les régions à haute densité de drainage et à haute densité hydrographique (deux facteurs allant souvent de pair) présentent en général une roche mère imperméable, un couvert végétal restreint et un relief montagneux. L'opposé, c'est-à-dire faible densité de drainage et faible densité hydrographique, se rencontre en région à substratum très perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué.

### III.1.4. Cadre humain

#### III.1.4.1. Démographie

En 2015, la population de la Commune était estimée à environ 2.5 millions d'habitants avec une densité de 903 hab / km<sup>2</sup> (INSD, 2015) et l'un des taux de croissance démographique les

plus élevé au monde soit 7.6% / an selon une étude menée par l'observatoire de la population de Ouagadougou sur la période 1960 - 2015. Ce qui permettrait d'estimer la population de la zone d'étude à environ 70000 habitants en 2015. Du fait de sa concentration humaine et sa situation de principal centre économique, politique et culturel, la Commune comporte des potentialités, mais aussi des contraintes liées à sa situation géographique. La forte pression démographique et l'urbanisation accélérée dans cet espace constituent des contraintes majeures qui handicapent son développement équilibré.

### III.1.4.2. Activités économiques

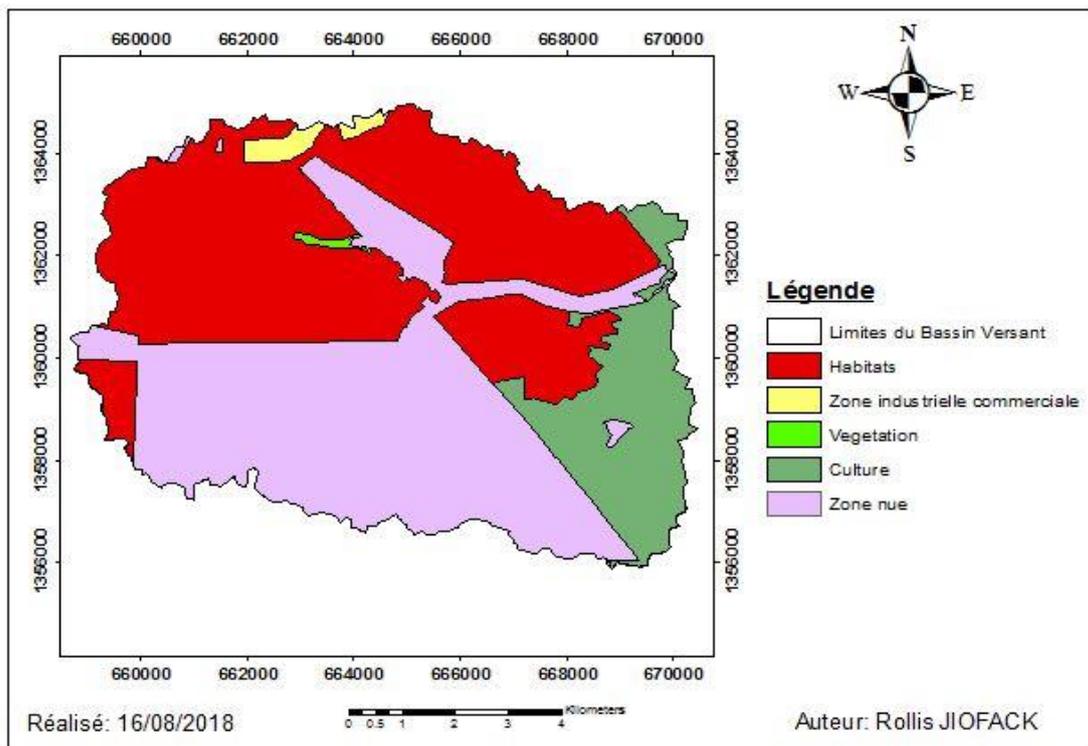
Afin d'illustrer les activités économiques dans la zone d'étude, nous présenterons les statistiques fournies par une étude de l'INSD faite sur l'ensemble de la Commune de Ouagadougou (Tableau I). Parmi la population active, 39.5 % appartiennent au groupe d'occupation « Personnel de service et de vendeurs », la deuxième catégorie d'occupation concerne les « Artisans, ouvriers et employés non qualifiés » avec 29.8 % et la troisième catégorie regroupe les « Agriculteurs, éleveurs et pêcheurs » avec 6.9 %. A elles seules, ces trois catégories regroupent 76.2 % de la population active. Au niveau des hommes, 35.3 % d'entre eux sont dans les services et la vente, 33.1 % sont des ouvriers ou des artisans et 7.1% des agriculteurs, éleveurs et pêcheurs. Par contre au niveau de la population féminine occupée, 49.0 % sont dans les services et la vente, 22.4% sont des ouvrières, artisanes et employés non qualifiés tandis que 6.2 %, font l'agriculture, l'élevage et la pêche. Parmi les chômeurs ayant déjà travaillé, 26.0 % étaient dans les services et la vente, 14.1 % étaient des ouvriers et des artisans et 6.5 % des cadres subalternes de l'administration.

**Tableau I: Activités économiques de la commune de Ouagadougou (source : (INSD, 2009)**

Groupe d'Occupation	Population active		
	Hommes	Femmes	Ensemble
Personnel de services et vendeur	35.3	49	39.5
Artisanats, ouvriers, employés non qualifiés	33.1	22.4	29.8
Agriculteurs, élevage, pêcheurs	7.1	6.2	6.9
Cadres subalternes de l'administration	4.5	6.3	5
Intellectuels, scientifiques	4	2.2	3.5
Autre métiers et professions	13.2	11.1	12.5
Sans profession	2.8	2.7	2.8

### III.1.5. Occupation du sol

L'urbanisation augmente la proportion de surfaces imperméables dans un bassin versant. Par conséquent, pour un événement de pluie donné, l'urbanisation augmente le volume d'eau de ruissellement, tout en diminuant le temps de concentration (Gangbazo et al, 2000). Pour ce qui est des caractéristiques d'occupation du sol, nous avons exploité la BDOT 2012 fournie par l'IGB. D'après ces données, la zone d'étude n'est pas entièrement occupée par des habitations (Figure 6). Nous relevons que 46.18% du bassin versant est urbanisé, le reste est occupé par de petits quartiers identifiables à des non-lotis, des espaces verts, des espaces cultivables, une zone industrielle et des sols nus. Les informations obtenues permettront d'estimer les paramètres de friction et d'infiltration du bassin versant (Tholin et al, 1959).



**Figure 6: Carte d'occupation du sol (source : IGB)**

### III.2. Caractérisation des crues

Pour la caractérisation des crues, la première étape consiste à sélectionner les événements de crues à caractériser. Pour cette étude, la méthode d'échantillonnage par valeur supérieure à un seuil a permis de sélectionner les événements. Elle consiste à retenir la valeur maximale d'un ensemble d'événements indépendants ayant dépassé un seuil donné. Elle offre une plus grande

## Modélisation des crues dans une zone semi-urbaine de Grand-Ouaga (Burkina Faso)

---

souplesse et robustesse en permettant de rassembler un plus grand nombre d'évènements sélectionnés, quoique si le seuil est suffisamment élevé, seuls les évènements majeurs seront retenus. De plus, l'extraction via cette méthode est connue pour être délicate (St-Hilaire et al, 2011). C'est ainsi que la sélection des évènements extrêmes s'est faite selon un seuil fixé à 2 m de hauteur des écoulements. Ce seuil de 2 m représente la hauteur du pont à l'exutoire tel qu'illustré sur la figure 7, il a été fixé afin de mesurer l'impact des inondations dans le quartier de Rayongo. Seuls les évènements ayant atteint ou submergé le pont seront considérés. Sur la base de ce critère, 25 évènements extrêmes ont été sélectionnés.



***Figure 7: Visualisation du pont lors d'un suivie des hauteurs des écoulements à l'exutoire du bassin versant***

La figure 8 donne un aperçu de l'impact de l'inondation du 21/08/2017 à l'exutoire du bassin versant.



***Figure 8: Aperçu de l'impact de l'inondation du 21/08/2017***

La caractérisation des comportements hydrologiques dans cette étude est faite sur une base événementielle à l'aide de différents indices hydrologiques estimés après analyse de chaque hydrogramme de crue pluviale. En effet, pour caractériser un épisode de crue, il existe un grand nombre de variables statistiques dont les valeurs conditionnent la sévérité des crues. Toutefois, les analyses hydrologiques ont toujours porté sur les pointes de crues alors que bien d'autres variables sont tout aussi importantes pour une bonne planification des ressources en eau et des ouvrages hydrauliques (Mediero et al, 2010). Dans cette étude, les variables suivantes ont été choisies pour la caractérisation des hydrogrammes de crues pluviales (Mediero et al., 2010) :

- La précipitation totale observée pour chaque événement pluvieux (en mm) ;
- L'intensité maximale de chaque événement pluvieux (en mm/h) ;
- Le temps d'atteinte de l'intensité maximale : il s'agit de la durée séparant le début de l'évènement pluvieux à l'intensité maximale (h) ;
- La durée de l'averse (h) : elle correspond à la durée séparant le début et la fin de l'évènement pluvieux ayant généré la crue ;
- La hauteur maximale d'écoulement observée durant la crue (m) ;

- Le temps de réponse du bassin à l'évènement (h).
- Le temps de montée de la crue générée par l'évènement pluvieux (h)

### III.3. Modélisation Hydraulique des écoulements

#### III.3.1. Modèle Mathématique

Le modèle hydraulique 2D repose sur les équations bidimensionnelles de la conservation du volume et de la quantité de mouvement encore appelées équations de Saint-Venant Barré. Dans l'approche des eaux peu profondes, la seule hypothèse stipule que les vitesses normales à une direction principale de l'écoulement sont plus faibles que celles dans la direction principale de l'écoulement. Par conséquent, le champ de pression se révèle presque hydrostatique en tout point.

La forme conservatrice des équations de la moyenne de volume et de la quantité de mouvement calculée en profondeur peut être écrite comme suit en utilisant des notations vectorielles :

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial f_d}{\partial x} + \frac{\partial g_d}{\partial y} = S_o + S_f \quad (1)$$

Où  $s = [h, hu, hv]^T$  est le vecteur des inconnues conservatrices.  $f$  et  $g$  représentent les flux d'advection et de pression dans les directions  $x$  et  $y$ , tandis que  $f_d$  et  $g_d$  sont les flux diffusifs:

$$f = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \end{pmatrix}; g = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$f_d = \frac{-h}{\rho} \begin{pmatrix} 0 \\ \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}; g_d = \frac{-h}{\rho} \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

$S_o$  et  $S_f$  désignent respectivement la variation du fond topographique et les termes de frottement :

$$S_o = -gh \left[ 0, \frac{\partial z_b}{\partial x}, \frac{\partial z_b}{\partial y} \right]^T \quad (4)$$

$$S_f = \left[ 0, \tau_{bx} \frac{\Delta \varepsilon}{\rho}, \tau_{by} \frac{\Delta \varepsilon}{\rho} \right]^T \quad (5)$$

Avec

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial y}\right)^2} \quad (6)$$

Conformément à Hervouet (Hervouet, 2003),  $\Delta\varepsilon$  représente l'augmentation de la surface frottante au fond en présence d'une topographie irrégulière (Dewals et al, 2006).

- $t$  : représente le temps
- $x$  et  $y$  : Coordonnées spatiales
- $h$  : Profondeur de l'eau
- $u$  et  $v$  : Vitesses moyennes du fluide dans les directions  $x$  et  $y$
- $z_b$  : Altitude topographique
- $g$  : Accélération gravitationnelle ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )
- $\rho$  : Masse volumique de l'eau
- $\tau_{bx}$  et  $\tau_{by}$  : Contraintes de cisaillement inférieures
- $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  : Contraintes normales turbulentes
- $\tau_{xy}$  : Contraintes de cisaillement turbulente

Aux vues des différents paramètres et constantes définies, on peut en déduire une interprétation physique des différents termes

- $\frac{\partial(hu)}{\partial t}$  &  $\frac{\partial(hv)}{\partial t}$  : Accélération locale de l'écoulement
- $\frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y}$  : Termes d'advection, transport de la quantité de mouvement par l'écoulement moyen
- $\frac{\partial z_b}{\partial x}$  &  $\frac{\partial z_b}{\partial y}$  : Variations de la topographie
- $-gh \frac{\partial z_b}{\partial x}$  : Termes de gradients de surface libre
- $-h \frac{\sigma_x}{\rho}$  &  $-h \frac{\sigma_y}{\rho}$  : Viscosités cinématiques
- $-h \frac{\tau_{bx}}{\rho}$  &  $-h \frac{\tau_{by}}{\rho}$  : Contraintes dues au vent en surface
- $-h \frac{\tau_{xy}}{\rho}$  : Frottement sur le fond topographique

### III.3.2. Termes d'infiltration et de friction

L'une des particularités de cette étude repose sur l'analyse de sensibilité de l'outil numérique de simulation des crues aux paramètres d'infiltration et de friction. Il sera donc question de faire varier les valeurs de ces deux paramètres et d'observer l'influence de ces variations sur les hauteurs d'eau à l'exutoire du bassin. Les valeurs d'infiltration de la zone d'étude ont été obtenues à travers des essais d'infiltration sur le terrain par la méthode de Müntz ou double anneau tel qu'illustre la figure 9. Tenant compte du faible nombre des mesures d'infiltration effectuées, les valeurs obtenues ne sauraient être représentatives de l'infiltration globale du bassin versant. Quant aux valeurs de friction, elles seront tirées de la littérature scientifique.



***Figure 9: Mise en place du dispositif de doubles anneaux de Müntz***

#### III.3.2.1. Infiltration

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'estimation du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines. Les processus d'évaporation et d'évapotranspiration étant très faibles durant une averse, ils ont été considérés comme nulles. La conception de l'infiltration de Horton a été utilisée assez largement et a donné de bons résultats dans la pratique

et surtout, son articulation avec la méthode de l'hydrogramme unitaire a introduit la science hydrologique dans une époque nouvelle (Xiaoliu, 2011).

$$i(t) = i_f + (i_0 - i_f)e^{-rt} \quad (7)$$

Avec :

$i(t)$  : Capacité d'infiltration au temps  $t$  [mm/min] ;

$i_0$  : Capacité d'infiltration initiale dépendant surtout du type de sol [mm/min] ;

$i_f$  : Capacité d'infiltration finale [mm/min] ;

$t$  : Temps écoulé depuis le début de l'averse [min];

$r$  : Constante empirique, fonction de la nature du sol [ $\text{min}^{-1}$ ].

Le cumul d'infiltration  $I(T)$  est déduit de la relation suivante :

$$I(T) = \int_0^T i(t) dt \quad (8)$$

et est donné par :

$$I(T) = i_f T + \frac{(i_0 - i_f)(1 - e^{-rT})}{r} \quad (9)$$

Avec  $T$  durée de l'averse en (min).

### III.3.2.2. Friction

La friction est une interaction qui s'oppose au mouvement relatif entre deux systèmes en contact. La force qui oppose une résistance au mouvement du fluide. Elle se manifeste dans les équations de la dynamique des fluides à travers la formule de résistance à l'écoulement. Trois formules ont traversé l'histoire et sont actuellement utilisées pour relier la pente de la ligne d'énergie nécessaire pour calculer la débitance à la vitesse moyenne de l'écoulement et au rayon hydraulique. Il s'agit des formules de Chézy (Chézy, 1775), de Manning (Manning, 1891), et de Darcy-Weisbach (Weisbach, 1847). La formule de Manning, très souvent utilisée, est devenu le standard (Vidal, 2005) :

$$S_{f_x} = gh u \left[ \sqrt{u^2 + v^2} \frac{n_b^2}{h^3} + u \sum_{K_x}^{N_x} \frac{4}{3} \frac{N_w^{\frac{3}{2}}}{h^{\frac{1}{3}} \Delta x} \right] \quad (10)$$

$$S_{f_y} = gh v \left[ \sqrt{u^2 + v^2} \frac{n_b^2}{h^3} + v \sum_{K_y}^{N_y} \frac{4}{3} \frac{N_w^{\frac{3}{2}}}{h^{\frac{1}{3}} \Delta y} \right] \quad (11)$$

Où :

$n_b$  : Coefficient de Manning caractérisant le frottement du fond topographique

$n_w$  : Coefficient de Manning caractérisant le frottement des parois (pris égale à 0)

Cette condition étant une hypothèse de travail commune pour des cours d'eau à lit de gravier, l'usage du coefficient  $n$  et de la formule associée s'est ainsi imposé au fil du temps auprès de la communauté des hydrauliciens. Dans la suite du document, le coefficient de Manning  $n$  dépendra de l'occupation du sol et les contraintes dues au vent seront négligées car n'ont presque pas d'influence dans l'étude des inondations.

### III.3.3. Schéma de discrétisation, grille et schéma numérique :

#### III.3.3.1. Schéma de discrétisation

La résolution des équations de Saint-Venant Barré (1) par la méthode des volumes finis consiste d'abord à discrétiser le domaine d'espace en cellules ou volumes finis.

$$C_i X C_j = \left] x_{i-\frac{1}{2}}, x_{i+\frac{1}{2}} \left[ X \left] y_{j-\frac{1}{2}}, y_{j+\frac{1}{2}} \left[ \right]$$

Avec  $\{i, j\} \in \mathbb{Z}$

Les cellules sont centrées respectivement sur les points de coordonnées :

$$x_i = \frac{x_{i-\frac{1}{2}} + x_{i+\frac{1}{2}}}{2} \text{ et } y_j = \frac{y_{j-\frac{1}{2}} + y_{j+\frac{1}{2}}}{2} \quad (12)$$

Avec pour longueurs respectives :

$$\Delta x = x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}} > 0 \text{ et } \Delta y = y_{j+\frac{1}{2}} - y_{j-\frac{1}{2}} > 0 \quad (13)$$

Les indices demi-entiers désignent les interfaces d'une cellule avec les cellules voisines. De même, on se donne un pas de discrétisation  $\Delta t$  en temps et une suite d'instants discrets

$$t^n = n\Delta t, \quad n \in \mathbb{N}$$

Avec comme condition de stabilité, celui de Courant-Friedrich-Levy (CFL) :

$$CFL = \Delta x \Delta t \leq 0.05$$

Le système est intégré sur chaque cellule et sur chaque pas de temps, soit donc :

$$\int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} \int_{y_{j-\frac{1}{2}}}^{y_{j+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F_x(U))}{\partial x} + \frac{\partial(F_y(U))}{\partial y} \right) dx dy dt = \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} \int_{y_{j-\frac{1}{2}}}^{y_{j+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} (S(U)) dx dy dt \quad (14)$$

Pour une question de stabilité numérique, la résolution se fera en deux étapes. On parle de « splitting dimensionnelle » ou décomposition du système en plusieurs étapes. La première étape consiste à résoudre suivant l'axe x :

$$\int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F_x(U))}{\partial x} \right) dx dt = \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} (S(U)) dx dt \quad (15)$$

La seconde étape consiste à considérer la solution précédemment obtenue comme second membre, ensuite résoudre à nouveau l'équation cette fois-ci suivant l'axe y :

$$\int_{y_{j-\frac{1}{2}}}^{y_{j+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F_y(U))}{\partial y} \right) dy dt = \int_{y_{j-\frac{1}{2}}}^{y_{j+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} (S(U)) dy dt \quad (16)$$

Pour faciliter la compréhension de la démarche, nous montrerons les étapes de résolution du système en une dimension.

### *III.3.3.1.1. Résolution du système Barré saint-venant suivant l'axe x*

De l'équation (15) précédente, on a :

$$\int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F_x(U))}{\partial x} \right) dx dt = \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} (S(U)) dx dt \quad (17)$$

Avec :

$$S(U) = S_z + S_p + S_f \quad (18)$$

Où :

- $S_z = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh\frac{\partial Z}{\partial x} \end{pmatrix}$  est le terme source prenant en compte la topographie ;
- $S_z = \begin{pmatrix} P-I \\ 0 \end{pmatrix}$  est le terme source pluie et infiltration ;
- $S_z = \begin{pmatrix} 0 \\ S_{fx} \end{pmatrix}$  est le terme source lié au frottement.

### III.3.3.1.2. Prise en compte de la topographie

La résolution du système de Barré Saint-Venant, en tenant compte uniquement de la topographie ne peut pas se faire par schéma splitting, qui consisterait à résoudre l'équation homogène, puis ajouter le terme source, car une telle approche présente de mauvais résultat lorsque u correspond à un état stationnaire :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_x(U)}{\partial x} = S_z \quad (19)$$

$$\begin{cases} u = 0 \\ \frac{\partial(\frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} = -gh\frac{\partial Z}{\partial x} \end{cases} \quad (20)$$

L'équation (20), se réduit à :

$$H = h+Z = \text{constante},$$

Où H est le niveau d'eau.

Cet état correspond physiquement à celui d'un plan d'eau au repos. Pour préserver cet état d'équilibre, on a opté pour un schéma en volume fini dit « schéma bien équilibré », qui consiste à une reconstruction hydrostatique. Proposé par Audusse (Audusse, 2004), on définit :

$$\begin{cases} h_{i+\frac{1}{2}G} = \max(h_i + Z_i - \max(Z_i, Z_{i+1}), 0) \\ h_{i+\frac{1}{2}D} = \max(h_{i+1} + Z_{i+1} - \max(Z_i, Z_{i+1}), 0) \\ U_{i+\frac{1}{2}G} = (h_{i+\frac{1}{2}G}, h_{i+\frac{1}{2}G} * u_i) \\ U_{i-\frac{1}{2}D} = (h_{i-\frac{1}{2}D}, h_{i-\frac{1}{2}D} * u_i) \end{cases} \quad (21)$$

Avec :

$h_{i+\frac{1}{2}G}$  (resp.  $h_{i-\frac{1}{2}D}$ ) : la hauteur d'eau reconstruite à gauche (resp. à droite) de chaque cellule ;

$U_{i+\frac{1}{2}G}$  (resp.  $U_{i-\frac{1}{2}D}$ ) : la solution reconstruite à gauche (resp. à droite) de chaque cellule.

Les hauteurs d'eau sont maintenues positives. Le schéma numérique se présente comme suit :

$$U_i^{n+1} - U_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( F_{x_{i+\frac{1}{2}G}}^n - F_{x_{i-\frac{1}{2}D}}^n \right) = 0 \quad (22)$$

où :

$$F_{x_{i-\frac{1}{2}D}}^n = F_{x_{i-\frac{1}{2}+S_{i-\frac{1}{2}D}}}^n \quad \left( \text{resp. } F_{x_{i+\frac{1}{2}G}}^n = F_{x_{i+\frac{1}{2}+S_{i+\frac{1}{2}G}}}^n \right) \quad (23)$$

Sont les flux numériques reconstruits aux interfaces de chaque cellule avec  $F_{x_{i-\frac{1}{2}}}^n$  (resp.  $F_{x_{i+\frac{1}{2}}}^n$ )

les flux numériques avant reconstruction ;

$$s_{i-\frac{1}{2}D} = \begin{pmatrix} 0 \\ P(h_i^n) - P(h_{i-\frac{1}{2}D}^n) \end{pmatrix} \quad \text{resp.} \quad s_{i+\frac{1}{2}G} = \begin{pmatrix} 0 \\ P(h_i^n) - P(h_{i+\frac{1}{2}G}^n) \end{pmatrix} \quad (24)$$

Sont les expressions conservatives où  $P(h) = \frac{1}{2}gh^2$ , est la pression hydrostatique.

### III.3.3.1.3. Ajout du terme de pluie et infiltration

Le terme de pluie est traité par un splitting qui consiste à résoudre l'équation :

$$\frac{dh}{dt} = P(h) - i(t) \quad (25)$$

On résout l'équation (25) en intégrant sur une cellule et sur la moitié du pas de temps :

$$\int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) dx dt = \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} (P(h) - i(t)) dx dt \quad (26)$$

On obtient :

$$h_i^{n+\frac{1}{2}} = h_i^n + \frac{dt}{2} P_i^n - \left( I \left( t^{n+\frac{1}{2}} \right) - I(t^n) \right) \quad (27)$$

L'hétérogénéité des paramètres d'infiltration et de la pluie va poser des problèmes au modèle de Horton. En effet, avec le ruissellement, l'apport en eau sur une cellule ne vient pas seulement de la pluie mais il peut aussi venir de l'écoulement venant d'une autre cellule. La quantité d'eau disponible à l'infiltration sur une cellule au temps  $t^n$  est alors :



- Stabilité : est la propriété nécessaire et suffisante, pour s'assurer de la convergence de la solution.

Plusieurs études (El Bouajaji, 2007) ont été faites sur les flux numériques. Ainsi, le flux numérique de Harten, Lax et van Leer (noté HLL) s'est avéré plus stable et facile à implanter (équation 33)

$$F(U_G U_D) = \begin{cases} F(U_G) & \text{si } 0 \leq c_2 \\ \frac{c_2 F(U_G) - c_1 F(U_D)}{c_2 - c_1} + \frac{c_1 c_2}{c_2 - c_1} (U_D - U_G) c_1, & c_1 < 0 < c_2 \\ F(U_D) & \text{si } 0 \leq c_1 \end{cases} \quad (33)$$

Avec :

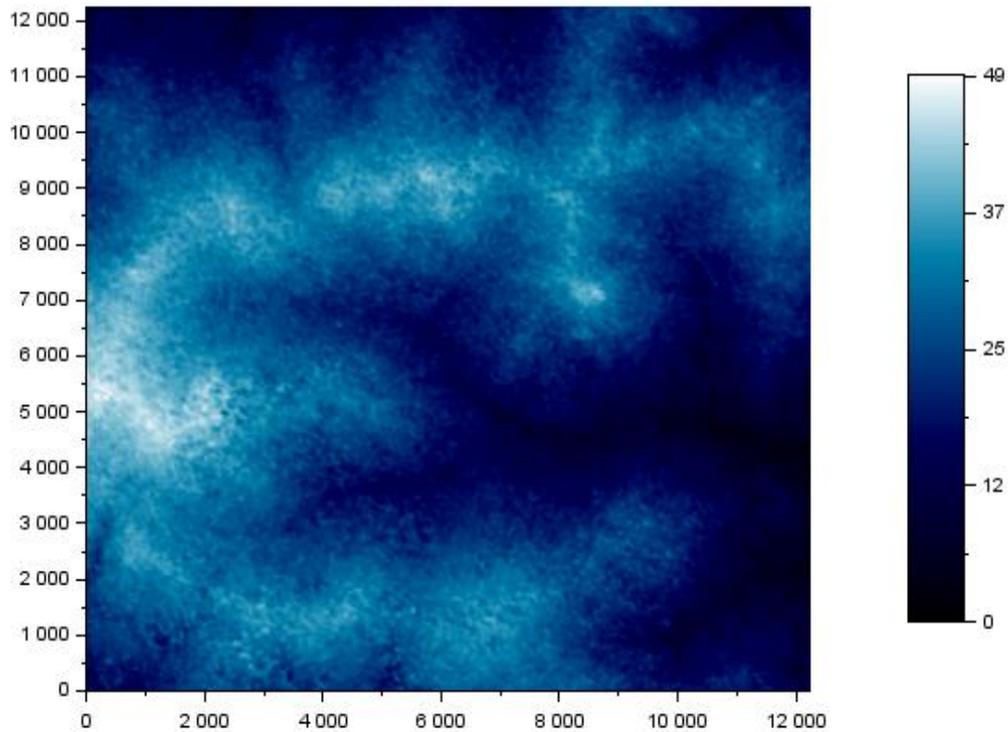
$c_{1U=U_G, U_D} \min_{j=1,2,3}(\min \lambda_j(U))$  et  $c_{2U=U_G, U_D} \max_{j=1,2,3}(\max \lambda_j(U))$ , paramètres fonctions des valeurs propres des matrices jacobiniennes de l'équation (14).

$U_G$  et  $U_D$  sont les solutions respectives à gauche et à droite de chaque cellule.

### III.3.4. Données de l'étude

#### III.3.4.1. Données topographiques

Pour cette étude, nous utiliserons les données topographiques STRM 30. Bien que ce MNT ne soit pas très indiqué pour cette étude, il sera utilisé à défaut d'avoir un MNT doté d'une résolution plus fine. Un traitement de la scène téléchargée a été effectué sur ArcGIS, afin de ressortir le bassin versant. Une fois le découpage du bassin effectué, nous avons ouvert le MNT créé sous Global Mapper, ainsi que le MNT de la scène téléchargée. Par la suite, sous l'onglet « Export Elevation Grid Format », nous avons spécifié les limites d'un carré contenant le bassin versant (ce carré qui sera par la suite la surface d'étude) et le maillage de l'étude qui est de 30 m suivant les x et y ; le fichier grid (en format 'xyz') est ainsi créé et correspond à la surface d'étude que nous ouvrons sous Excel. Les coordonnées des points extraits sont en projection UTM ; la surface est projetée dans un repère cartésien de 30 m d'espacement suivant les axes x et y. Pour cela, l'on a centré les latitudes par rapport à la valeur de la latitude la plus faible (celle-ci prenant la valeur 0 dans le nouveau repère), puis la même opération a été faite pour les longitudes. L'on obtient donc une surface cartésienne (x,y) d'origine P1(0,0) et d'extrémité Px(12240,12240) tel que présenté sur la figure 10.



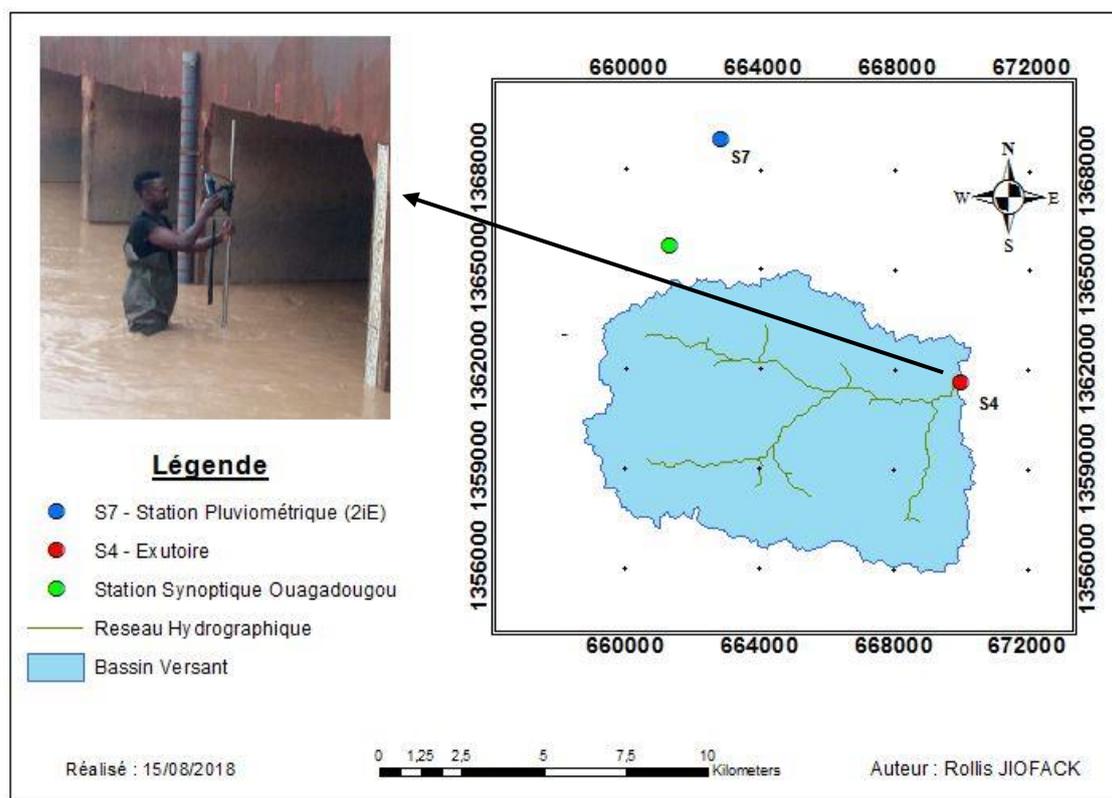
***Figure 10: Visualisation de la topographie sur Scilab***

### *III.3.4.2. Données de pluie et de hauteurs d'eau*

La figure 11 présente la localisation des stations du réseau d'observation utilisé pour cette étude. Les données de la station synoptique de Ouagadougou ont été fournies par l'ANAM et elles couvrent la période 1986 – 2014. Elles ont principalement servi à l'analyse du climat de la zone d'étude. Pour ce qui est de la caractérisation des crues, les données de pluie ont été fournies par la station pluviométrique située à 2iE. Quant aux hauteurs d'eau, nous disposons à l'exutoire du bassin versant d'un limnimètre et d'une station OBO qui fait un enregistrement automatique des hauteurs d'eau instantanée suivant un pas de temps de 5 min. Le tableau II présente les coordonnées géographiques des différentes stations constituant le réseau d'observation de l'étude.

**Tableau II:** Coordonnées géographiques du réseau d'observation hydrométéorologique de la zone d'étude

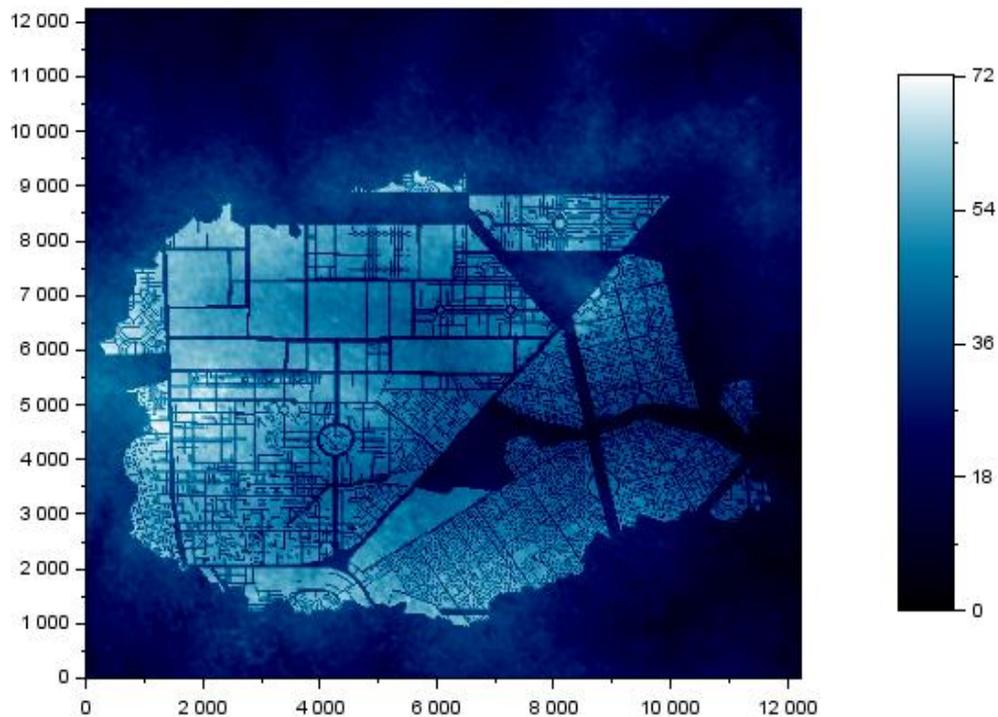
Nature	Localisation	Longitude	Latitude
Pluviomètre	Ouagadougou (2iE)	662792	1368877
Limnimètre	Saaba	669989	1361630
Synoptique	Ouagadougou (Aéroport)	661275	1365703



**Figure 11:** Carte du réseau d'observation de la zone d'étude

### III.3.5. Prise en compte du bâti dans l'outil numérique

Afin de se rapprocher au mieux de la réalité, le bâti a été intégré dans le modèle numérique car la zone d'étude est semi-urbanisée. Pour cela, à partir du fichier du plan du cadastre fournit par l'IGB, l'espace cadastral du bassin a été extrait, ensuite élevé de 25 m, en d'autres termes, nous avons surélevé les bâtiments tel qu'illustre la figure 12. Le modèle étant sensible à la topographie, ceci imposera à l'eau de ruisseler suivant les tracés des canaux d'assainissement, la voirie et le sol nu.



***Figure 12: Visualisation de la topographie avec la prise en compte du bâti sur Scilab***

### III.3.6. Support de simulation

Le support informatique utilisé pour les simulations numériques est l’outil Scilab. C’est un logiciel libre de calcul numérique multiplateforme fournissant un environnement de calcul pour des applications scientifiques. Il possède un langage de programmation orienté pour le calcul numérique de haut niveau. C’est sur cet outil qu’a été développé le code numérique qui servira dans la suite du travail à la simuler quelques évènements de crues observés.

## IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### IV.1. Caractérisation physique et hydrologique de la zone d'étude

Les caractéristiques physiques de la zone d'étude sont répertoriées dans le tableau III.

L'indice de Gravelius ( $K_G$ ), renseigne sur les caractéristiques de forme du bassin versant. Le bassin versant étudié à une valeur  $K_G$  de 1.45, cela traduit une forme générale allongée. Ceci se vérifie mieux par le fait que ce dernier a un périmètre ( $P$ ) de 45.56 Km avec pour longueur ( $L$ ) du rectangle équivalent 18.64 Km contre 4.14 Km de largeur ( $l$ ), soit un ratio de 4.5. Cet allongement induit des écoulements plus lents ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants et permet ainsi de se faire une idée sur la réponse hydrologique du bassin : l'hydrogramme de crue est de forme amortie.

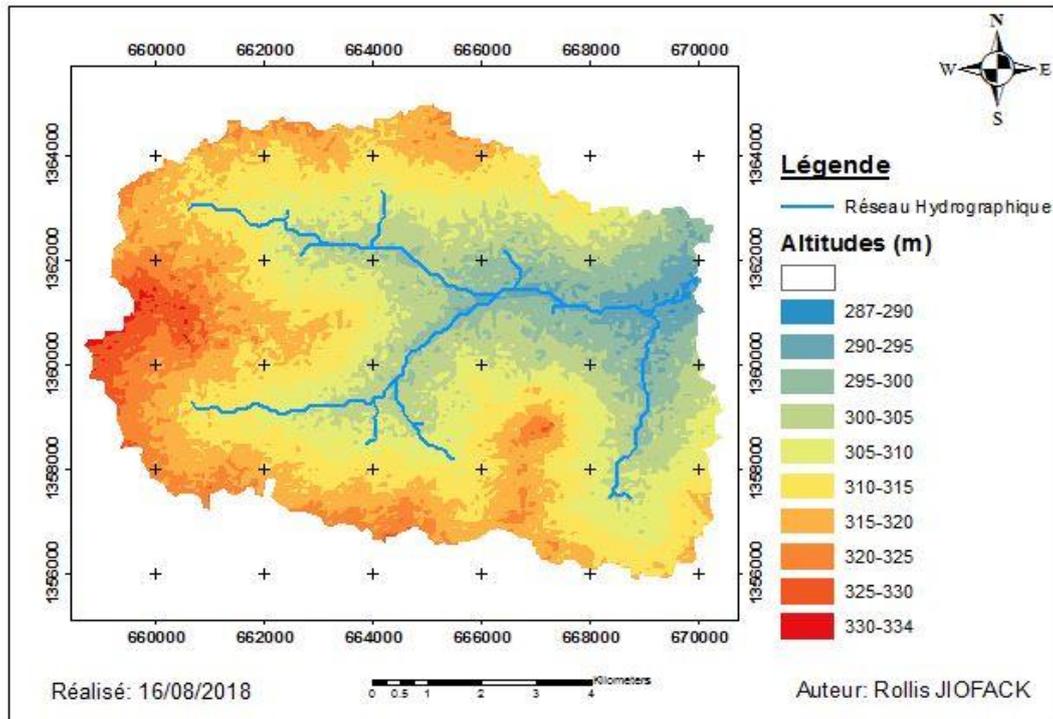
Quant aux caractéristiques du relief, on observe une différence très légère entre les altitudes médiane (311m) et moyenne (310m). De cela, nous pouvons conclure que l'hypsométrie de la zone se fait suivant une configuration symétrique, en d'autres termes, elle possède une pente régulière (Musy, 2005). L'indice de pente global quant à lui permet d'avoir un aperçu de la vitesse à laquelle l'eau se rend à l'exutoire. A cet indice se joint la dénivelée spécifique qui permet de dire que nous sommes en présence d'un relief faible qui favorise donc l'infiltration et le développement du réseau hydrographique.

**Tableau III: Caractéristiques physiques de la zone d'étude**

Caractéristiques physiques du bassin versant						
Caractéristiques de forme						
Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Indice de Gravelius ( $K_G$ )		Rectangle équivalent		
				L (Km)	l (Km)	
77.19	45.56	1.45		18.64	4.14	
Caractéristiques du relief						
Altitude Maximale (m)	Altitude Minimale (m)	Altitude Médiane (m)	Altitude Moyenne (m)	Indice de pente global $I_g$ (m/Km)	Dénivelées Spécifiques $D_s$ (m)	Classe du Relief
334	287	311	310	1.45	12.71	R2=Faible

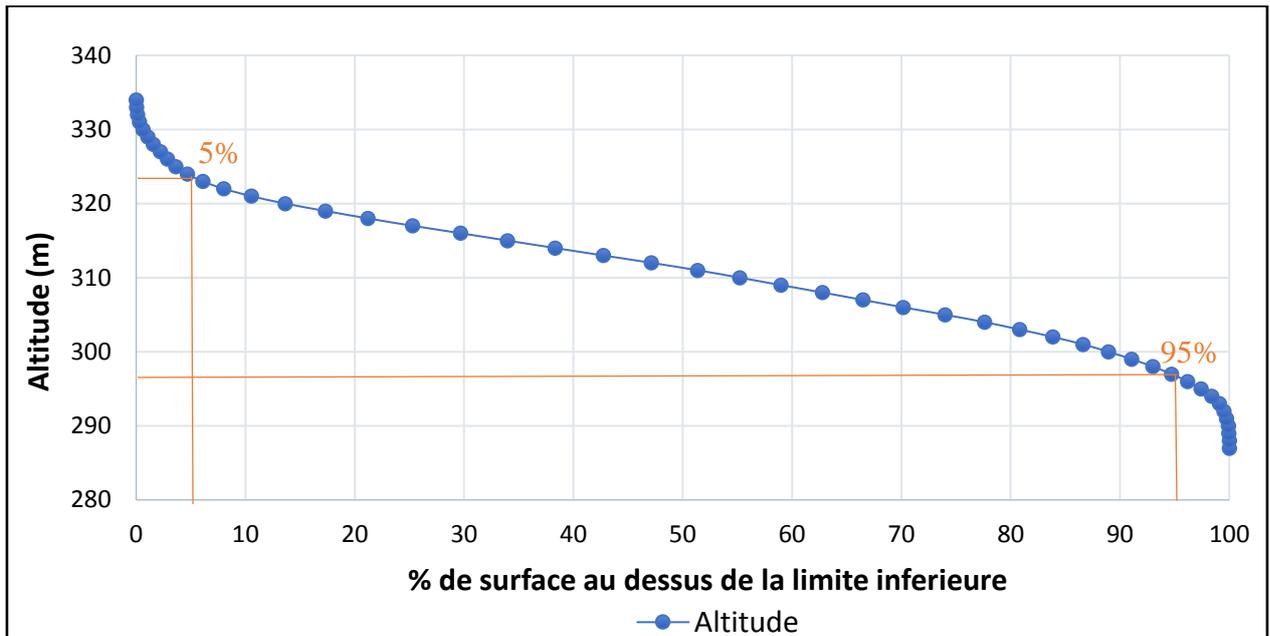
Tel qu'illustré sur la figure 13, le bassin versant s'étend sur une région dont les altitudes diminuent considérablement de l'Ouest vers l'Est avec une altitude moyenne d'environ 310 m. Dans l'ensemble, le bassin versant est caractérisé par un relief plat entrecoupé par de légères

dépressions. Ces dépressions sont des vallées fossiles du système du cours d'eau, et de quelques mares, entre autres. Les pentes sont faibles et varient entre 0.6% et 1%. La présence de ces faibles pentes sur le bassin versant rend difficile le ruissellement des eaux pluviales et l'évacuation des eaux usées, ceci constitue une des causes d'inondation.



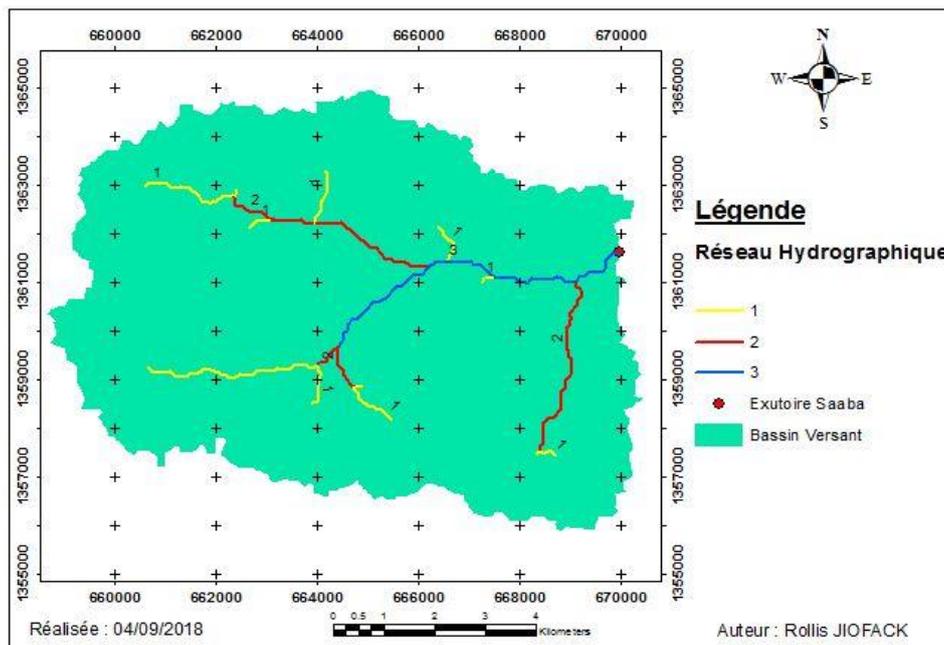
***Figure 13: Carte du relief***

La figure 14 représente la courbe hypsométrique de la zone d'étude. De cette courbe, nous pouvons conclure que la zone d'étude possède de faibles variations de pente, ce qui induit un faible développement du réseau de dépression et une pente moyenne sur le grand ensemble. Les caractéristiques du relief pouvant être tirées de la courbe hypsométrique sont consignées dans le tableau III.



**Figure 14: Courbe hypsométrique du bassin versant**

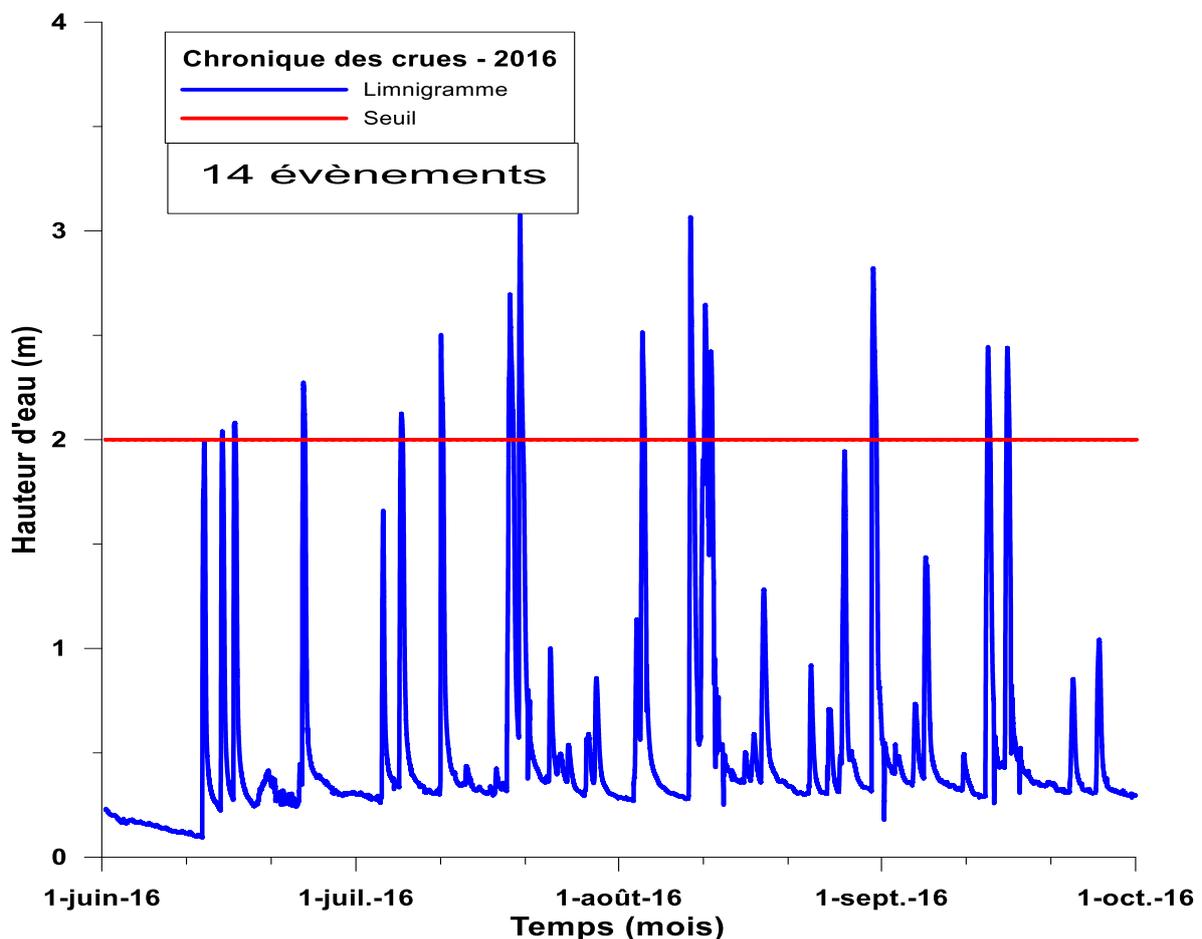
La figure 15 présente le réseau hydrographique de la zone d'étude, ainsi que les thalwegs avec leurs ordres respectifs. Il apparaît que le cours d'eau principal du bassin est d'ordre trois. Deux indicateurs peuvent être ainsi calculés par rapport à ces longueurs élémentaires : la densité de drainage et la densité hydrographique. Ainsi, la valeur de la densité de drainage est de l'ordre de 0.38 Km/Km<sup>2</sup>. Cette faible densité de drainage signifie que le cours d'eau n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé. Quant à la densité hydrographique, elle est de l'ordre de 0.45 et exprime la faible prépondérance des écoulements.



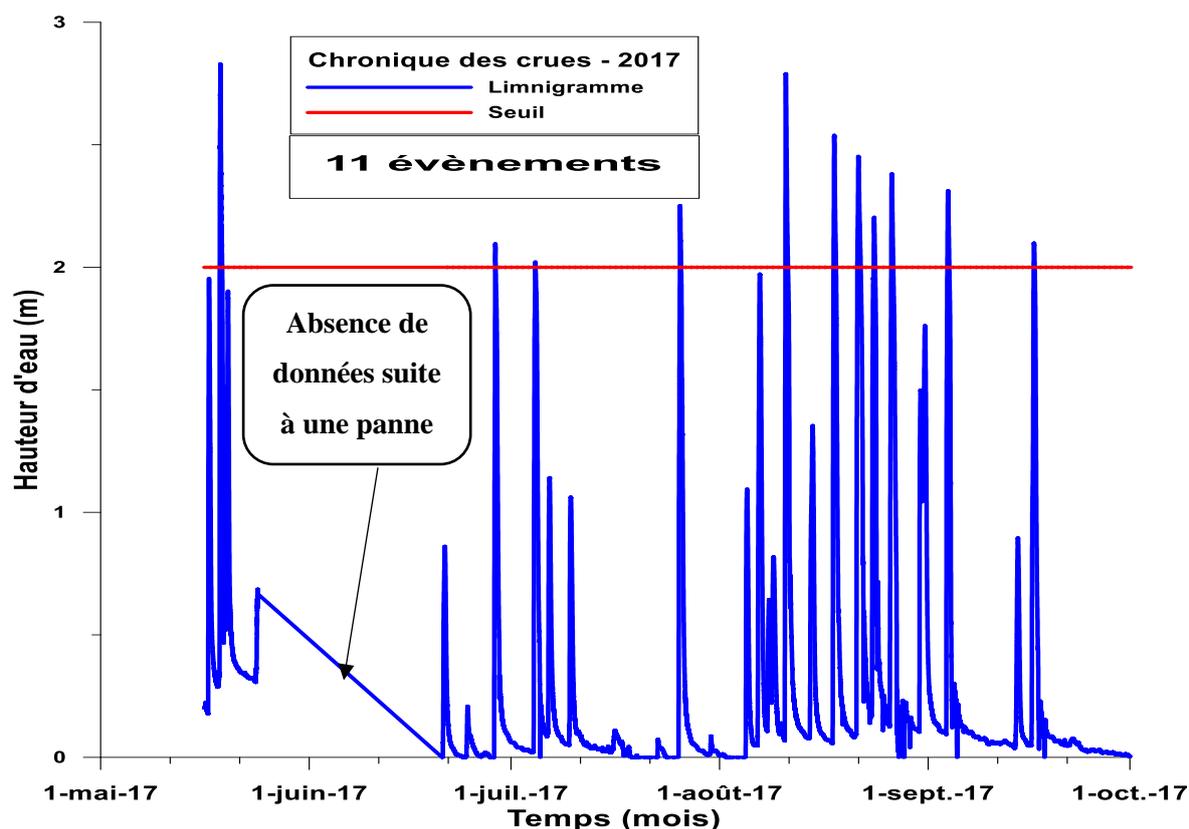
**Figure 15: Carte du réseau Hydrographique**

#### IV.2. Caractérisation des crues observées en 2016 et 2017

Les figures 16 et 17 présentent respectivement les chroniques des hauteurs des écoulements (limnigrammes) enregistrées pour les années 2016 et 2017. On observe la prédominance de certaines crues par rapport à d'autres. La plus importante crue de la chronique a été observée le 20/07/2016 (annexe 2.a) avec une hauteur maximale de 3.07 m. Nous mettons également en lumière les évènements des 9/08/2016 (annexe 2.c) et 18/05/2017 (annexe 2.f) d'importances similaires avec respectivement pour hauteur d'eau maximale 3.06m et 2.83 m. Par rapport à l'ensemble des évènements de chaque année, 56% des évènements de crue en 2016 ont été marqués par une hauteur maximale instantanée supérieure à 2 m contre 44 % en 2017.



**Figure 16: Chronique des crues de 2016 (1<sup>er</sup> Juin – 30 Septembre)**



**Figure 17: Chronique des crues de 2017 (16 Mai – 30 Septembre)**

Le tableau IV donne la répartition mensuelle des événements de crue. On observe que le mois d’août se démarque avec un maximum de crues observées sur l’ensemble de la série. L’on note donc que la variation annuelle des crues se fait suivant une fonction concave. Il y a une croissance du nombre de crues observées à partir de mai ; le pic est alors atteint en août, suivi d’une décroissance jusqu’en septembre (annexe 4).

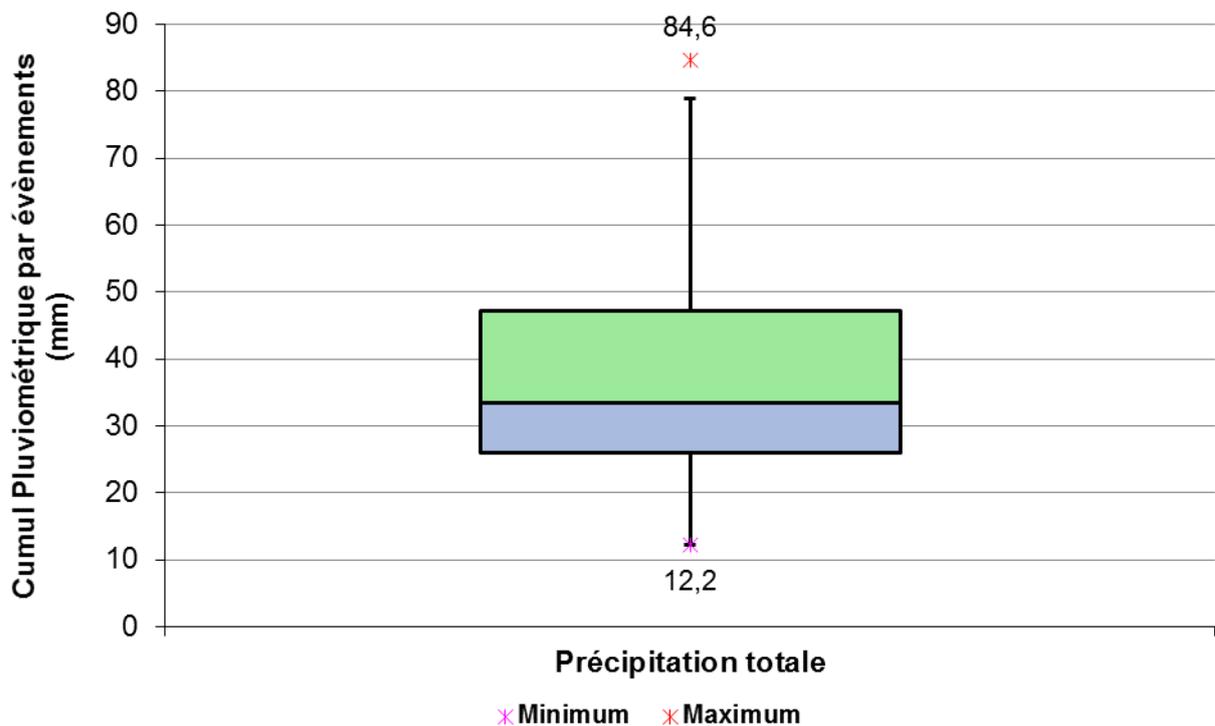
**Tableau IV: Nombre d’évènements de crues par mois avec une hauteur maximale supérieure au seuil de 2 m en 2016 et 2017**

	2016	2017
<b>Mai</b>	0	1
<b>Juin</b>	3	1
<b>Juillet</b>	4	2
<b>Août</b>	5	5
<b>Septembre</b>	2	2
<b>Total</b>	14	11

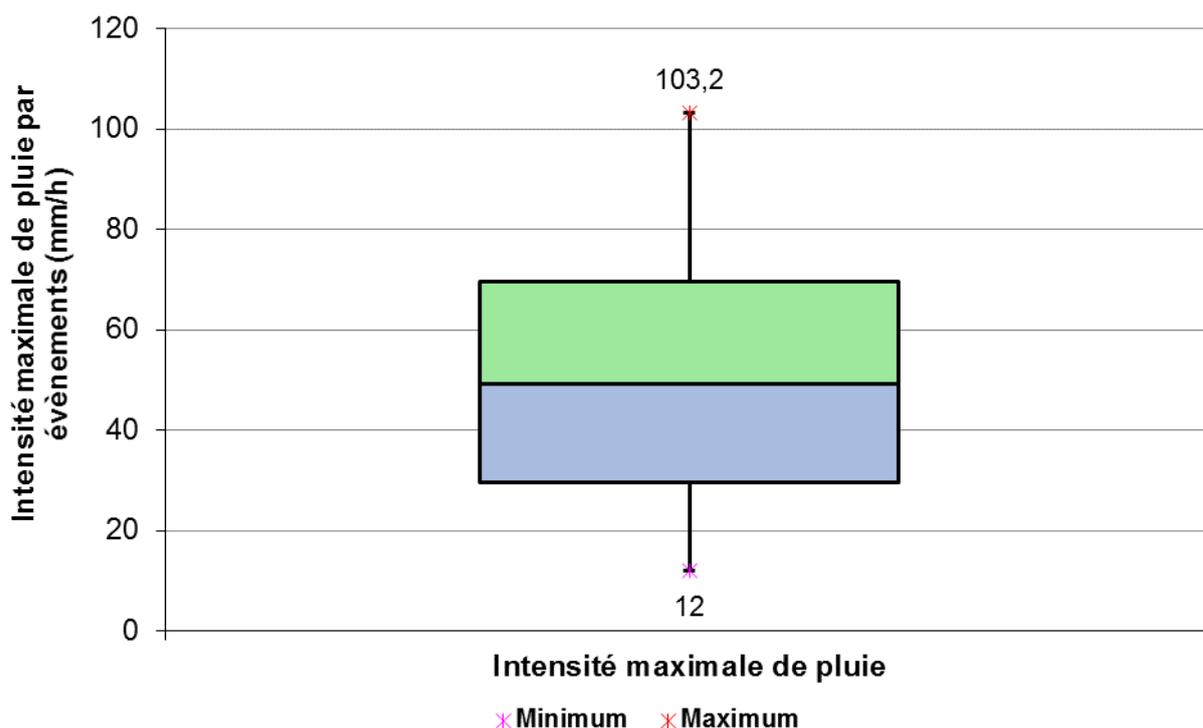
Les figures 18 et 19 montrent respectivement la dispersion des cumuls pluviométriques et des intensités maximales des évènements pluvieux ayant généré les crues retenues.

Les cumuls pluviométriques varient entre 12.2 mm et 84.6 mm correspondant respectivement aux évènements de crues enregistrés les 21/08/2017 (annexe 2.o) et 9/08/2016 (annexe 2.c). La médiane de la série est 33.5 mm, ce qui pourrait être considéré comme la valeur centrale de cumul pluviométrique pouvant générer une lame d'eau écoulée supérieur ou égale à 2m sur la zone d'étude. Toutefois, le cumul pluviométrique maximal ne correspondant pas à l'averse ayant généré la grande lame d'eau écoulée, ce qui nous conduit à d'autres causes d'inondation telles que le taux d'urbanisation et l'insuffisance de canaux de drainage.

L'intensité maximale de pluie varie entre 12mm/h et 103.2mm/h correspondant aux évènements de crues enregistrés les 11/08/2016 (annexe 2.c) et 17/08/2017 (annexe 2.n). La médiane qui est de 49.2mm/h renseigne sur la puissance des averses des évènements échantillonnés.



**Figure 18: Boîte à moustache - Précipitation totale événementielle ayant généré des lames d'eau écoulées supérieures à 2m**



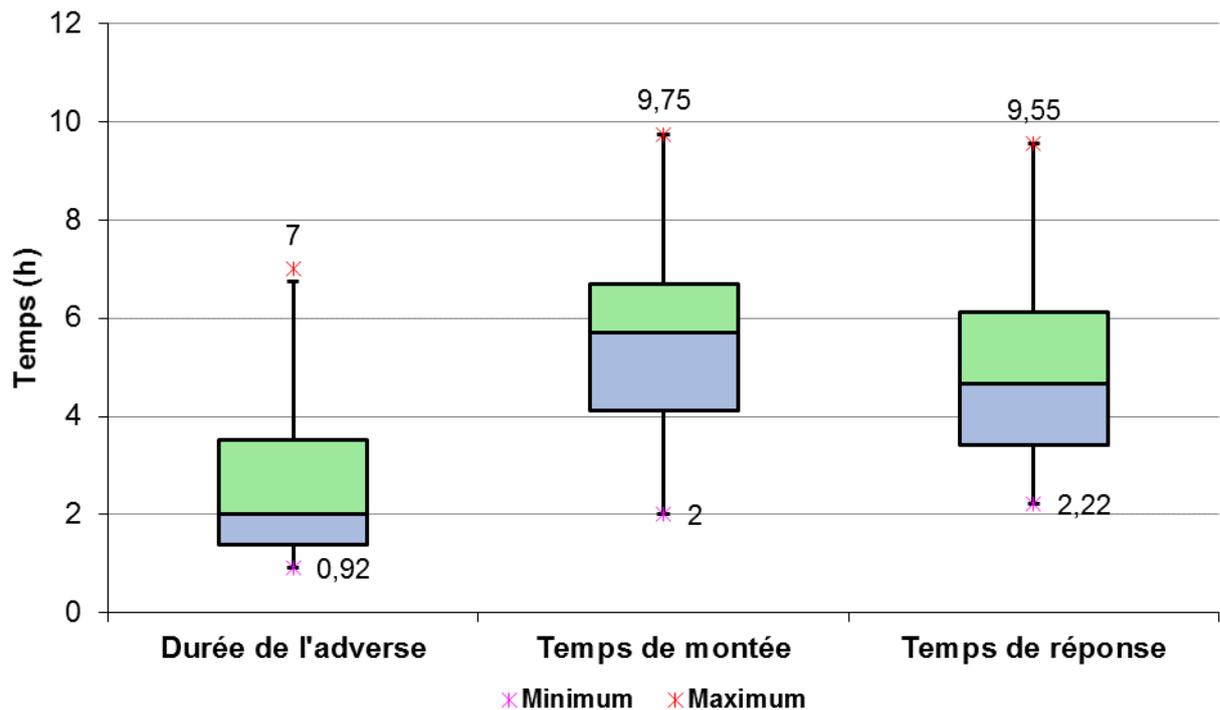
**Figure 19: Boîte à moustache - Intensité maximale d'évènements pluvieux ayant généré des lames d'eau écoulées supérieures à 2m**

La figure 20 présente une analyse statistique de base des paramètres : la durée de l'averse, le temps de montée et le temps de réponse.

La durée de l'averse varie entre 55min et 7h correspondant aux évènements de crues enregistrés les 25/07/2017 (annexe 2.l) et 18/07/2016 (annexe 2.a). Avec une médiane de 2h, ce paramètre se démarque comme ayant l'une des plus grandes dispersions statistiques de la série, ce étant dû au fait que certaines crues ont été générée par deux évènements pluvieux qui se sont succédés et de hauteurs pluviométriques importantes, à l'instar de la crue du 18/07/2016.

Le temps de montée varie entre 2h et 9h45min correspondant aux évènements de crues enregistrés les 10/07/2016 (annexe 2.i) et 16/09/2017 (annexe 2.s). Dans une stratégie de mise en place d'un système d'alerte précoce, la médiane qui est de 5h43min donne un indicateur de temps entre le début de la crue et le moment de l'impact maximal de la crue.

Le temps de réponse varie entre 2h13min et 9h33min correspondant aux évènements de crues enregistrés les 20/07/2016 et 16/09/2017. La médiane étant de 4h41min renseigne sur la valeur centrale de la durée que met le bassin pour réagir à une perturbation du signal pluviométrique.

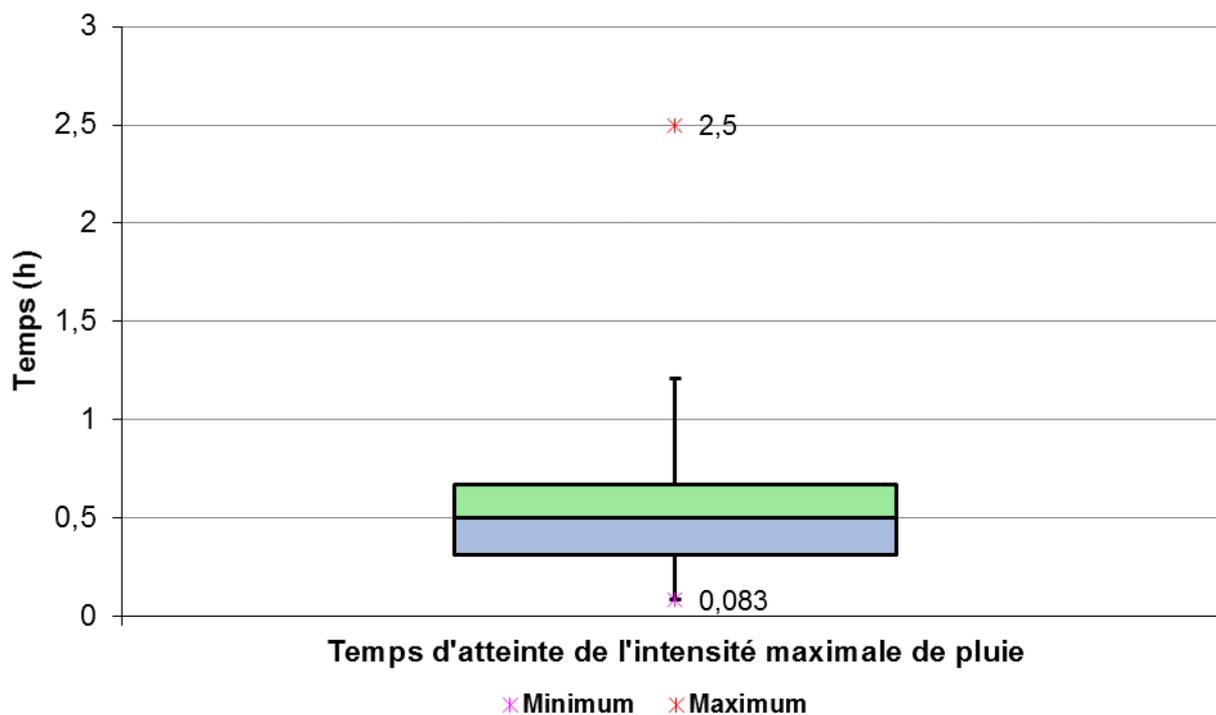


***Figure 20: Boîte à moustache - Temps de montée, Durée de l'averse et Temps de réponse des évènements de crues ayant des lames d'eau écoulées supérieures à 2m***

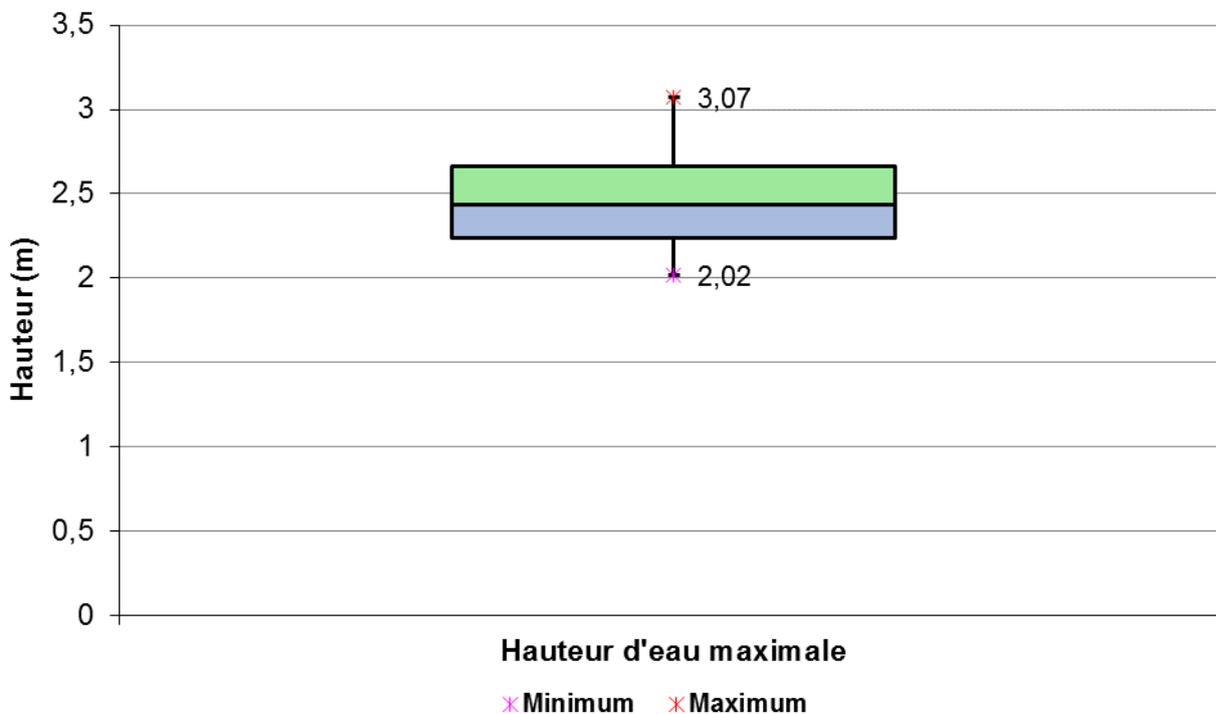
Les figures 21 et 22 présentent une analyse statistique de base des paramètres : temps d'atteinte de l'intensité maximale et hauteur d'eau maximale.

Le temps d'atteinte de l'intensité maximale (durée entre le début et le pic de l'averse) varie entre 5min et 2h30min correspondant aux évènements de crues enregistrés les 26/08/2017 (annexe 2.q) et 09/08/2016. Avec une médiane correspondant à 30min, on retient que pour la série, le pic d'intensité pluviométrique se trouve en général dans la première tranche horaire de l'averse.

La hauteur d'eau maximale varie entre 2.02m et 3.07m correspondant aux évènements de crues enregistrés les 04/07/2017 (annexe 2.k) et 20/07/2016. Avec une médiane de 2.44m, ce paramètre a la plus faible dispersion statistique et donne un aperçu sur l'impact de chacune des crues sur les habitations et activités économiques environnantes.



***Figure 21: Boîte à moustache - Temps d'atteinte de l'intensité maximale de pluie d'évènements de crue ayant générés des lames d'eau écoulées supérieures à 2m***



***Figure 22: Boîte à moustache - Hauteur d'eau maximale d'évènements de crue ayant générés des lames d'eau écoulées supérieures à 2m***

### IV.3. Analyse de la sensibilité de l’outil numérique de simulation des crues aux paramètres friction et d’infiltration

Il sera question dans ce volet d’évaluer la sensibilité du modèle aux paramètres friction et infiltration. Concernant les conditions de simulation des deux analyses de sensibilité, nous avons fait pleuvoir 60mm en continu sur une heure et nous avons observé le ruissellement pendant 5h. Les hauteurs d’eau et vitesses d’écoulement initiales sont supposées toutes nulles.

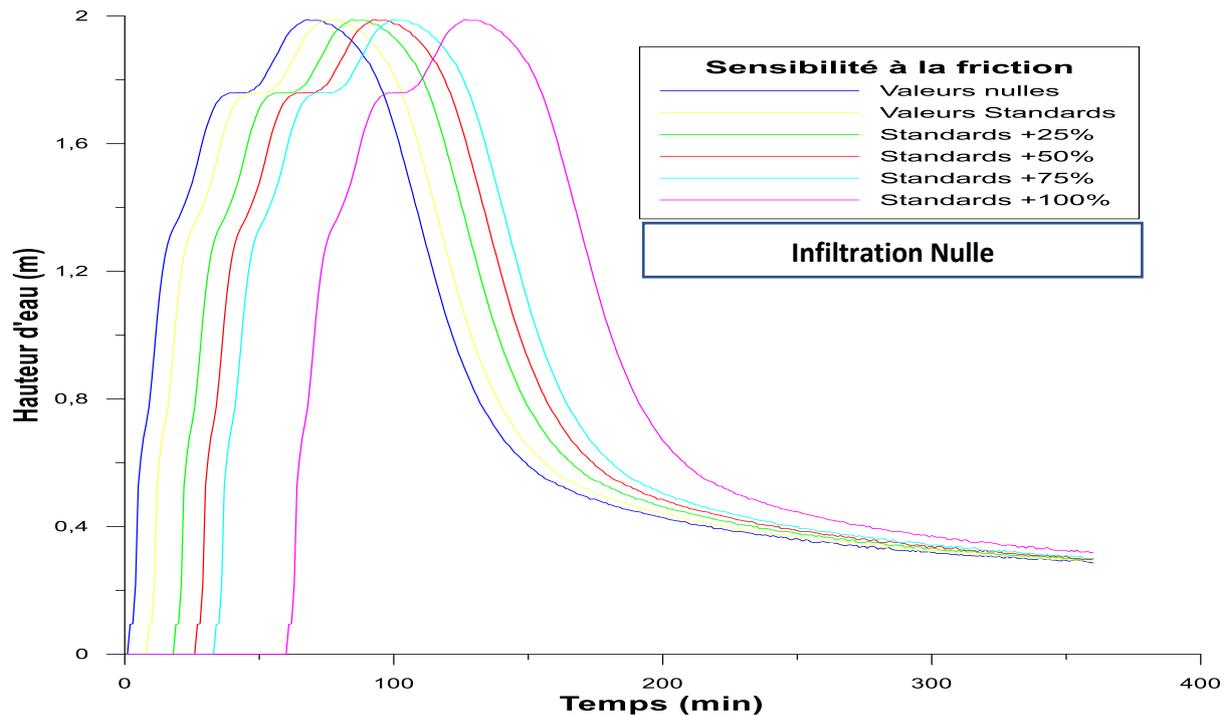
#### ❖ Analyse de la sensibilité du modèle aux paramètres de friction

L’étude de sensibilité du modèle au paramètre de friction s’est faite tout d’abord en considérant que la friction est nulle. Ensuite, nous avons fait varier les valeurs standards du coefficient de Manning des différents types d’occupation du sol, tout en les augmentant d’un certain pourcentage des valeurs considérées tel que présente le tableau V.

**Tableau V: Valeurs de friction choisies pour l’étude de sensibilité du modèle (source : FHWA, 2005)**

Occupation du sol	Coefficient de Manning ( $s/m^{1/3}$ )					
	Nul	Standard	+25 %	+50 %	+75 %	+100 %
<b>Urbanisé</b>	0	0.017	0.0212	0.0255	0.0297	0.034
<b>Cultivé</b>	0	0.14	0.175	0.21	0.245	0.28
<b>Végétalisé</b>	0	0.14	0.175	0.21	0.245	0.28
<b>Nu</b>	0	0.11	0.137	0.165	0.192	0.22

Les résultats obtenus sur la figure 23 laissent entrevoir une translation dans le temps des limnigrammes observés à l’exutoire. Plus la friction est importante, plus l’écoulement met du temps pour se former. Ainsi, une perturbation des différentes valeurs de friction sur l’ensemble du bassin suivant une augmentation de 25 %, 50 %, 75 % et 100 % des valeurs standards affecte de façon considérable la réponse hydrologique du modèle. Par ailleurs, ceci s’aligne parfaitement avec les résultats obtenus par Alcrudo (Alcrudo, 2010) qui a obtenu un déplacement du pic de l’hydrogramme en faisant varier la friction du bâti en zone urbaine.



**Figure 23: Sensibilité du modèle à la friction**

❖ **Analyse de la sensibilité du modèle aux paramètres infiltration**

L'étude de sensibilité du modèle à l'infiltration s'est faite en élaborant des scénarios d'occupation du sol et en supposant que le bassin versant dans son entièreté, posséderait une infiltration uniforme et égale à celle de l'une des occupations du sol.

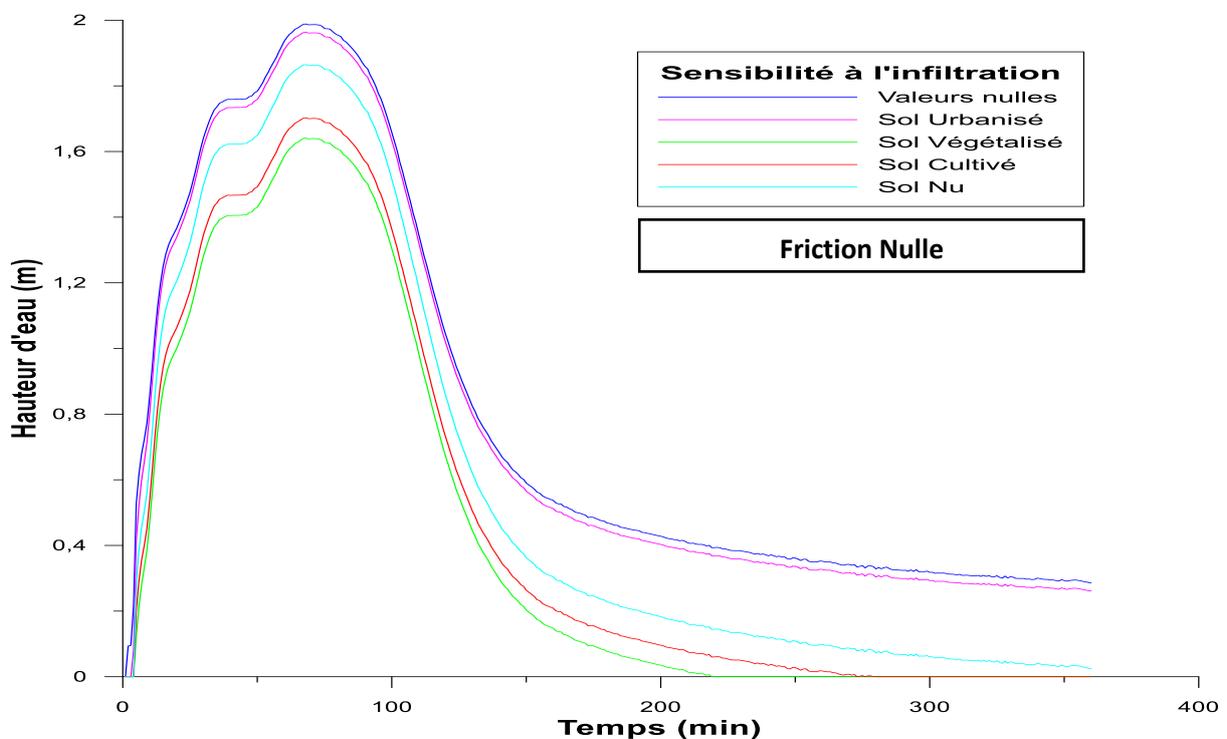
**Tableau VI: Valeurs d'infiltration utilisées pour l'étude de sensibilité du modèle (Source : Données de terrain)**

Occupation du sol	Io (mm/min)	If (mm/min)	r (min <sup>-1</sup> )
Urbanisé	2.95	0.22	0.503
Cultivé	3.46	0.54	0.116
Végétalisé	4.07	0.66	0.097
Nu	3.15	0.25	0.238

Les résultats obtenus et présentés sur la figure 24 laissent voir une variation de la hauteur d'eau à l'exutoire du bassin. L'augmentation du taux d'infiltration diminue la hauteur d'eau maximale observée à l'exutoire. Ainsi, selon qu'on considère que le bassin soit entièrement urbanisé, sol nul, cultivé ou végétalisé, on observe une diminution du pic du limnigramme, tout en gardant la même allure. Cette faible variation s'explique par le fait que la nature du sol est

majoritairement hydromorphe et à dominance argileuse ; ce qui lui confère une infiltration proche de la gamme des sols urbanisés.

En effet l'eau précipitée sur le bassin versant va se répartir en eau interceptée, infiltrée et écoulee. La quantité d'eau collectée puis transportée par le cours d'eau résulte des précipitations directes sur le bassin parvenant à son exutoire et l'infiltration est régie par la quantité d'eau infiltrée dans le sol. Parmi les principaux facteurs influençant l'infiltration, il y'a : le type de sol (structure, texture, porosité), la compaction de la surface du sol, la couverture du sol. Ainsi, un sol urbanisé, étant compact, dépourvu de couvert végétal et de faible porosité facilitera le ruissèlement direct du volume d'eau précipité contrairement à un sol végétalisé, qui possédant une plus grande porosité infiltrera un plus grand volume d'eau, d'où une baisse du pic de la hauteur d'eau à l'exutoire.

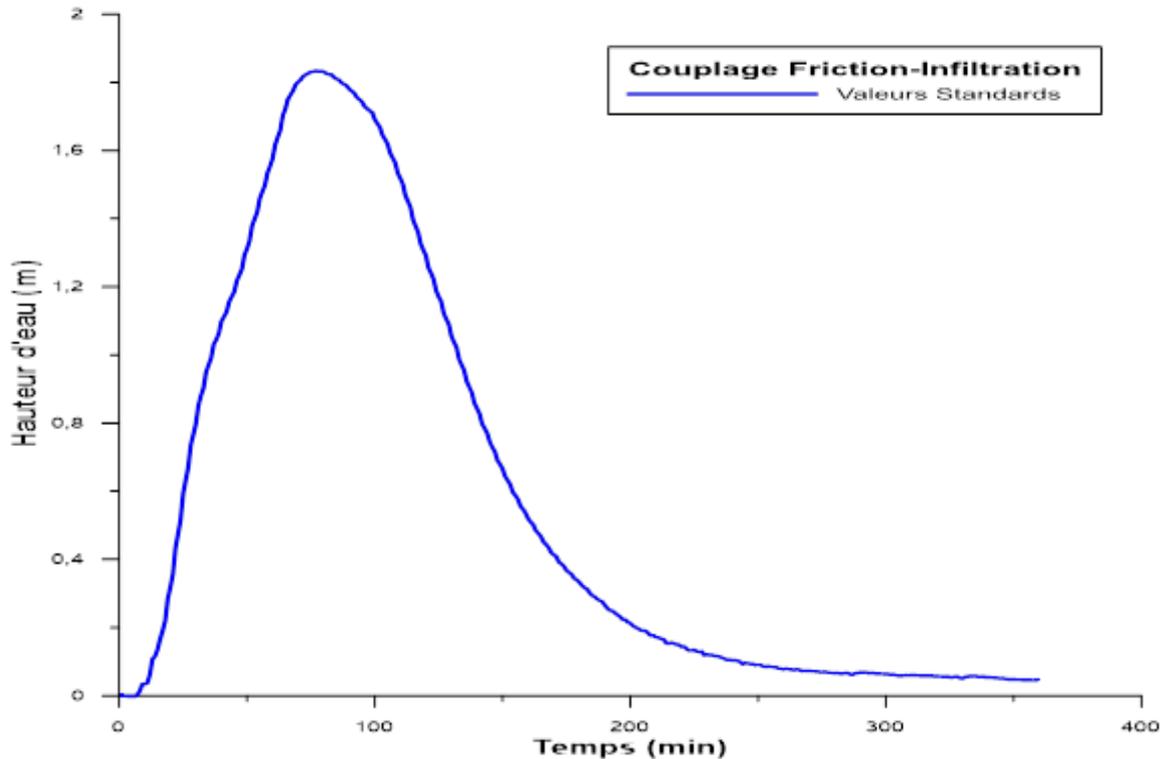


***Figure 24: Sensibilité du modèle à l'infiltration***

### ❖ **Sensibilité du modèle au couplage des paramètres Friction-Infiltration**

Après avoir fait les analyses de sensibilités du modèle aux paramètres infiltration et friction, nous avons fait une étude du comportement du modèle au couplage des deux paramètres. Les données de friction ont été prises conformément aux valeurs standards de la FHWA et les données d'infiltration ont été prises conformément aux données de terrain. Pour cette simulation, la spatialisation des valeurs de friction et d'infiltration s'est faite en fonction des types d'occupation du sol.

La figure 25 montre que le couplage des valeurs friction et d'infiltration a contribué à la modification de l'allure du limnigramme.



***Figure 25: Sensibilité du modèle au couplage Friction-Infiltration***

#### **IV.4. Simulation de quelques scénarios**

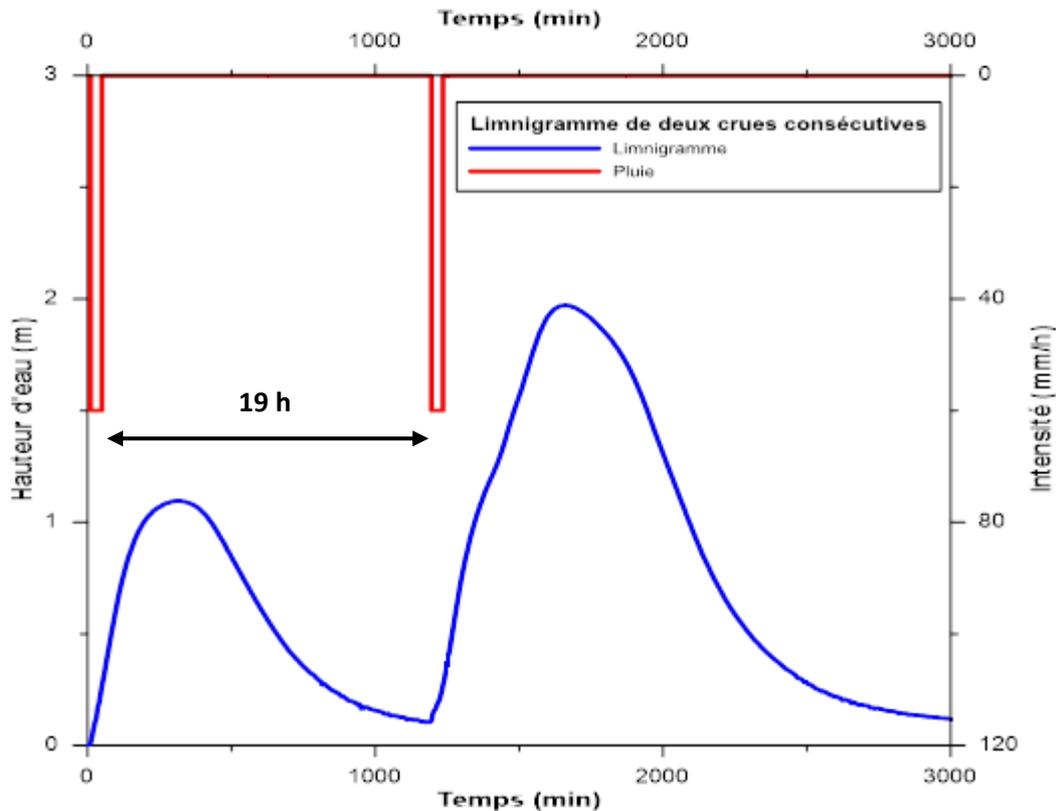
Dans ce volet les performances l'outil vont être testées suivant 2 scénarios pris dans la littérature. Le premier scénario portera sur la simulation de l'impact des conditions d'humidité du sol et le second portera sur la l'impact de la prise en compte du bâti. Pour chacun des scénarios, les hauteurs d'eau à l'exutoire et vitesses d'écoulement sont supposées nulles à l'instant initial.

##### **IV.4.1. Scénario 1 : Simulation de l'impact des conditions d'humidité du sol**

Parallèlement aux travaux de (Bonnifait et al, 2009), nous allons ici tester la capacité du modèle à prendre en compte l'impact des conditions d'humidité du sol par la simulation de deux crues consécutives. Concernant les conditions de simulation, nous avons créé un scénario de deux averses de 40 mm pour une durée de 40 min chacune et séparées de 19h ; le temps de simulation total est de 50h.

La figure 26 présente la réponse hydrologique du modèle par rapport au scénario considéré. L'analyse des limnigrammes laisse ressortir que pour une même hauteur pluviométrique, nous

avons deux hauteurs d'eau différentes. Ceci s'expliquerait par une parfaite prise en compte de la fonction de production par le modèle. Les conditions d'humidité antérieures ont une influence sur le limnigramme correspondant à la seconde averse. En effet, lors du passage de la seconde averse, le sol étant encore gorgé d'eau, la presque totalité du volume d'eau tombé a ruisselé ; le modèle prend donc parfaitement en compte la simulation d'une crue tenant compte de son antériorité. Les cartes représentant l'évolution spatio-temporelle de la hauteur d'eau durant le scénario se trouvent à l'annexe 5.

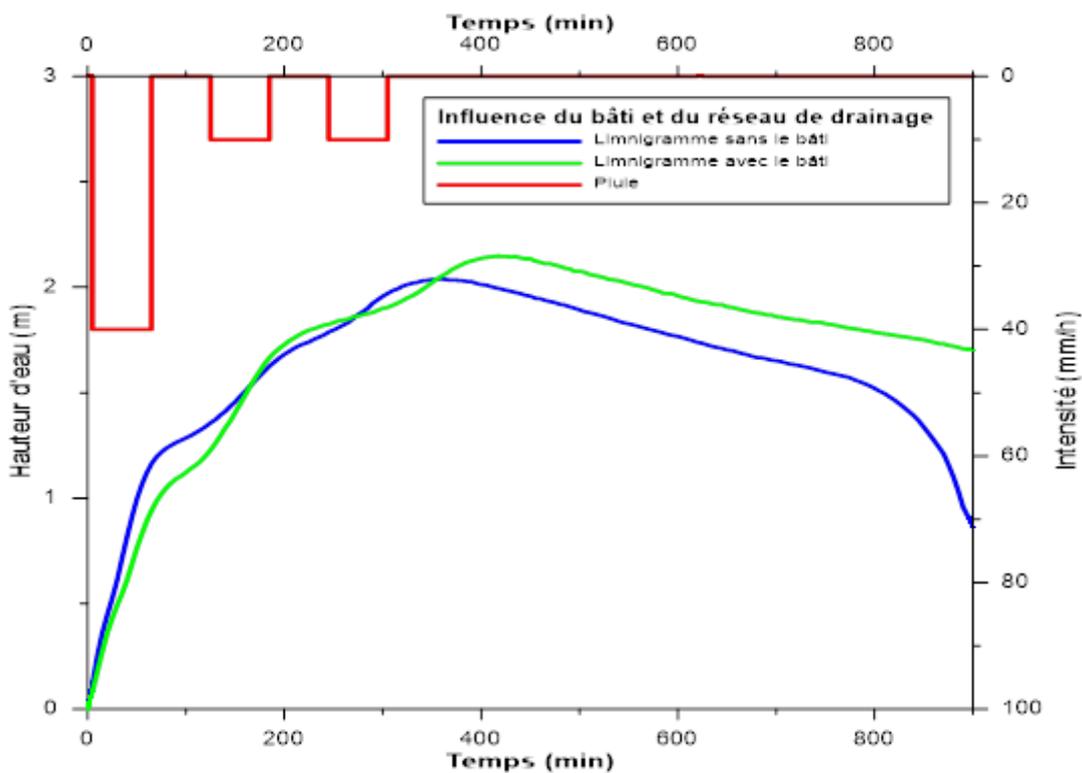


***Figure 26: Simulation de l'impact des conditions d'humidité du sol***

#### IV.4.2. Scénario 2 : Prise en compte du bâti et du réseau de drainage

Parallèlement aux travaux de Dewals (Dewals et al, 2008) qui a simulé une crue le long d'un canal de drainage des eaux pluviales dans la région de Walloon en Belgique, nous allons simuler un scénario de crue tout en intégrant le plan cadastral fourni par l'IGB. Le traitement des données s'est fait sous ArcGIS. Le bâti a été surélevé de 25m imposant ainsi à l'eau de ruisseler suivant les canaux d'assainissement (figure 12). Les hypothèses de simulations sont les suivantes : on a fait pleuvoir 40 mm en continu durant 1h, puis une interruption d'une heure. Ensuite, on a fait pleuvoir deux averses de 10 mm durant 1h chacune et séparées d'une interruption d'une heure. Le temps de simulation total est de 15h.

La figure 27 présente les résultats de la simulation. On note une nette différence entre les réponses hydrologiques (avec le bâti et sans le bâti), ce qui permet d'affirmer que l'urbanisation a modifié le chemin hydrologique du bassin. Les hauteurs d'eau maximales à l'exutoire sont de 2.15m pour la simulation avec le bâti, et de 2.03m pour la simulation sans le bâti. Cette légère différence du pic de la crue est due au fait que les valeurs de friction et d'infiltration sont les mêmes dans les deux simulations et prises conformément à la carte d'occupation du sol fournis par l'IGB. L'intégration du bâti et du réseau de drainage a induit des temps de montée et de réponse plus grands par la modification du réseau hydrologique du bassin. Les cartes représentant l'évolution spatio-temporelle de la hauteur d'eau durant le scénario se trouvent à l'annexe 6.



**Figure 27: Simulation de l'impact de la prise en compte du bâti et réseau de drainage**

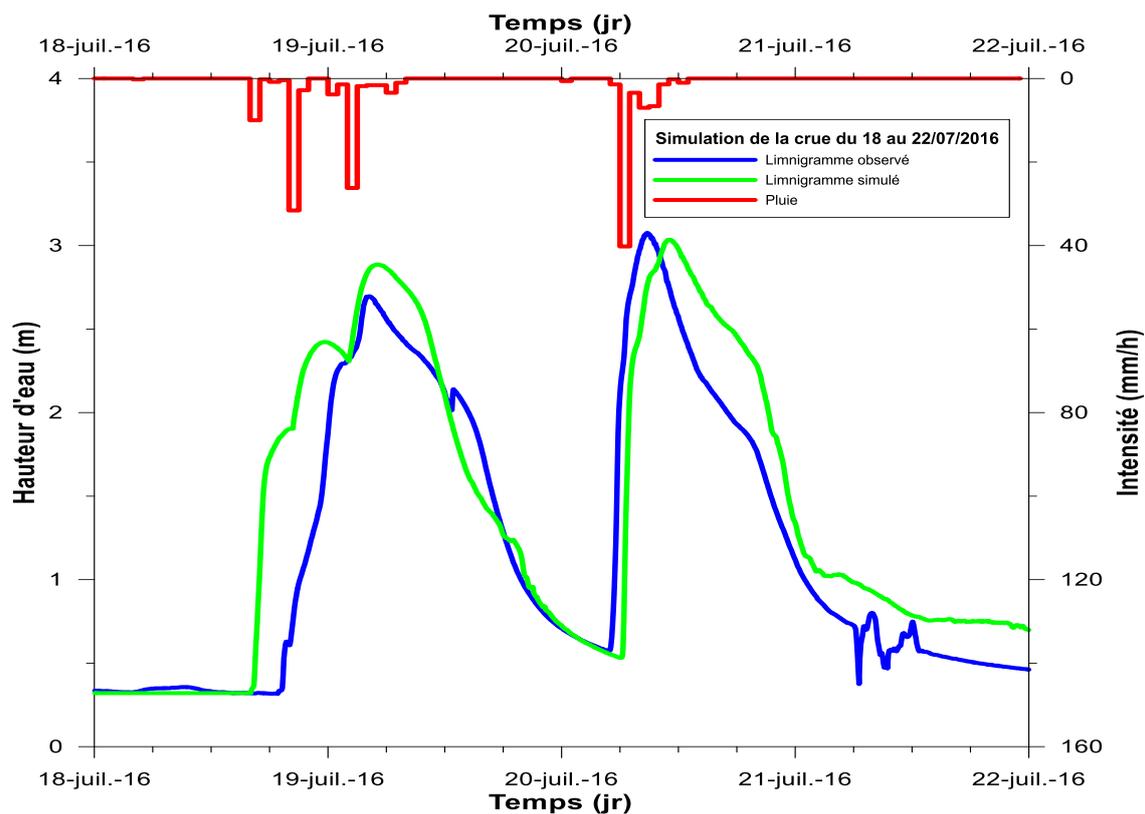
### **IV.5. Application de l'outil de simulation aux cas réels d'évènements de crue :**

Dans ce volet, nous allons faire la simulation de quelques cas réels de crues enregistrées. Disposant des chroniques des crues de 2016 et 2017, ainsi que des données de pluie correspondantes, nous avons choisi de simuler des évènements de crue pour chacune des années.

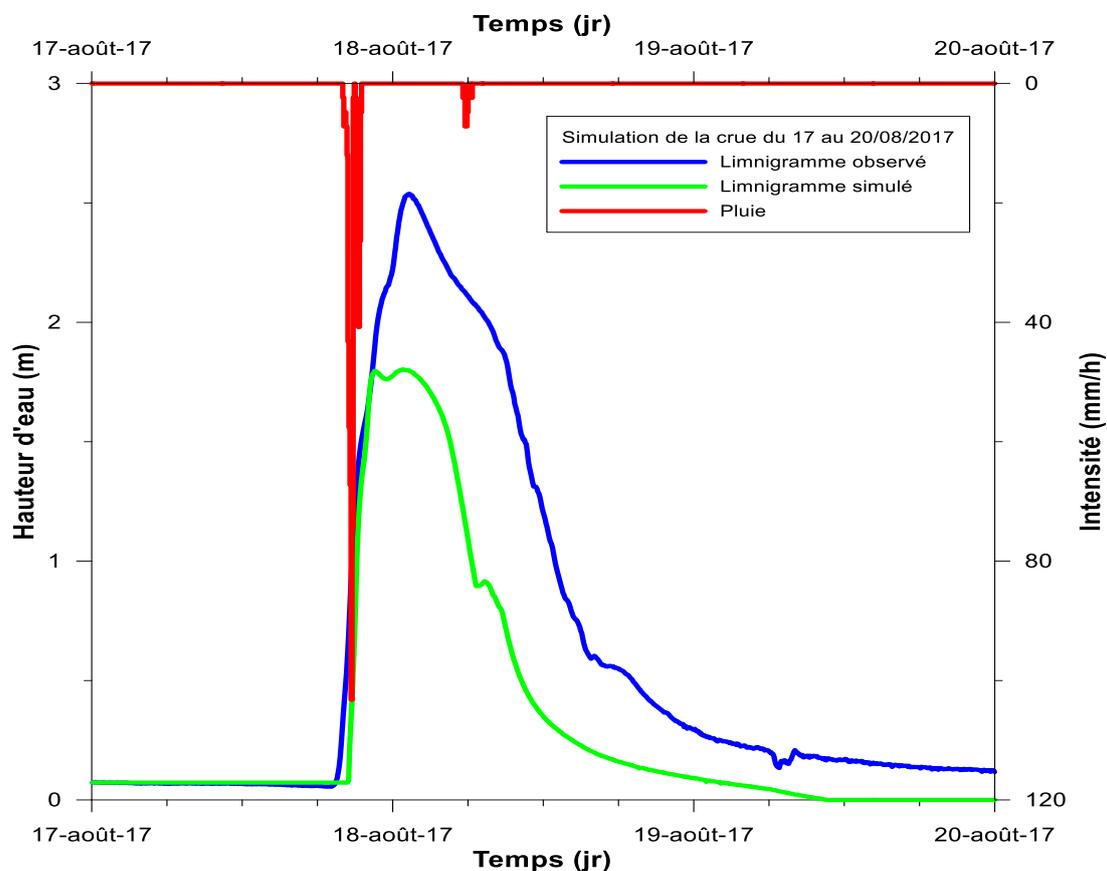
Les crues du 18 au 22/07/2016 ont été choisies conformément aux travaux de Keita (Keita, 2018), afin de valider l'amélioration des performances du modèle. Les dites crues ont généré des pics à l'exutoire de 2.7 m et 3.07 m pour des hauteurs pluviométriques respectives de 65.8 mm et 57.2 mm (figure 27). Les évènements pluvieux se sont déroulés entre 20h et 2h pour la crue du 18 au 19/07/2016 et entre 6h et 10h pour la crue du 20 au 22/07/2016 avec des intensités maximales respectives de 31.6 mm/h et 40.2 mm/h (figure 27). Pour cette simulation, la hauteur d'eau initiale a été supposée égale à 0.32m correspondant à la hauteur d'eau moyenne observée avant le début de la crue et les vitesses initiales d'écoulement sont supposées nulles.

La crue du 17 au 20/08/2017 a été choisie en vue de la particularité de l'évènement pluvieux qui lui est associé. Cet évènement pluvieux s'est déroulé entre 20h et 21h25, soit une durée de 1h25min et possède la plus grande intensité maximale des évènements analysés, soit 103mm/h entre 20h35 et 20h40 min. La crue du 17 au 20/08/2017 a généré un pic à l'exutoire de 2.54 m pour une hauteur pluviométrique de 43 mm (figure 28). Pour cette simulation, la hauteur d'eau initiale a été supposée égale à 0.07m correspondant à la hauteur d'eau moyenne observée avant le début de la crue et les vitesses initiales d'écoulement sont supposées nulles.

Les figure 28 et 29 présentent les limnigrammes observés et simulés respectivement pour les crues du 18 au 22/07/2016 et du 17 au 20/08/2017. La première remarque est que le modèle présente la capacité de reproduire un évènement réel observé. Le critère de Nash obtenu pour la simulation des crues du 18 au 22/07/2016 est de 0.73 comparativement aux résultats obtenus par Keita (Keita, 2018) qui, pour la même crue a obtenu les valeurs de Nash inférieures à 0.5 ; le modèle fournit donc des résultats satisfaisants. Pour la simulation de la crue du 17 au 20/08/2017, nous avons obtenu un Nash de 0.68, ce qui confirme que le modèle restitue de façon acceptable les hauteurs d'eau observées. Pour les deux évènements simulés, l'on observe un décalage entre les hydrogrammes simulés et observés, ceci serait dû à plusieurs raisons telles que : les erreurs engendrées suite à la discrétisation du domaine par la méthode des volumes finis, le maillage de la zone d'étude trop grand (30m), le plan cadastral qui n'a pas été mis à jour suite à l'occupation anarchique des zones dites non-lotis et par la variation spatio-temporelle des pluies à Ouagadougou. La station pluviométrique étant situé à 4.2 km de la zone d'étude, il se peut que les signaux pluviométriques ayant généré ces crues n'aient pas été bien captés par la station. La valeur ajoutée de nos travaux repose sur une meilleure prise en compte des valeurs de friction, des mesures in situ d'infiltration et l'intégration du bâti et du réseau de drainage. Les cartes représentant les évolutions spatio-temporelles de la hauteur d'eau durant les évènements correspondent aux figures 30 et 31.

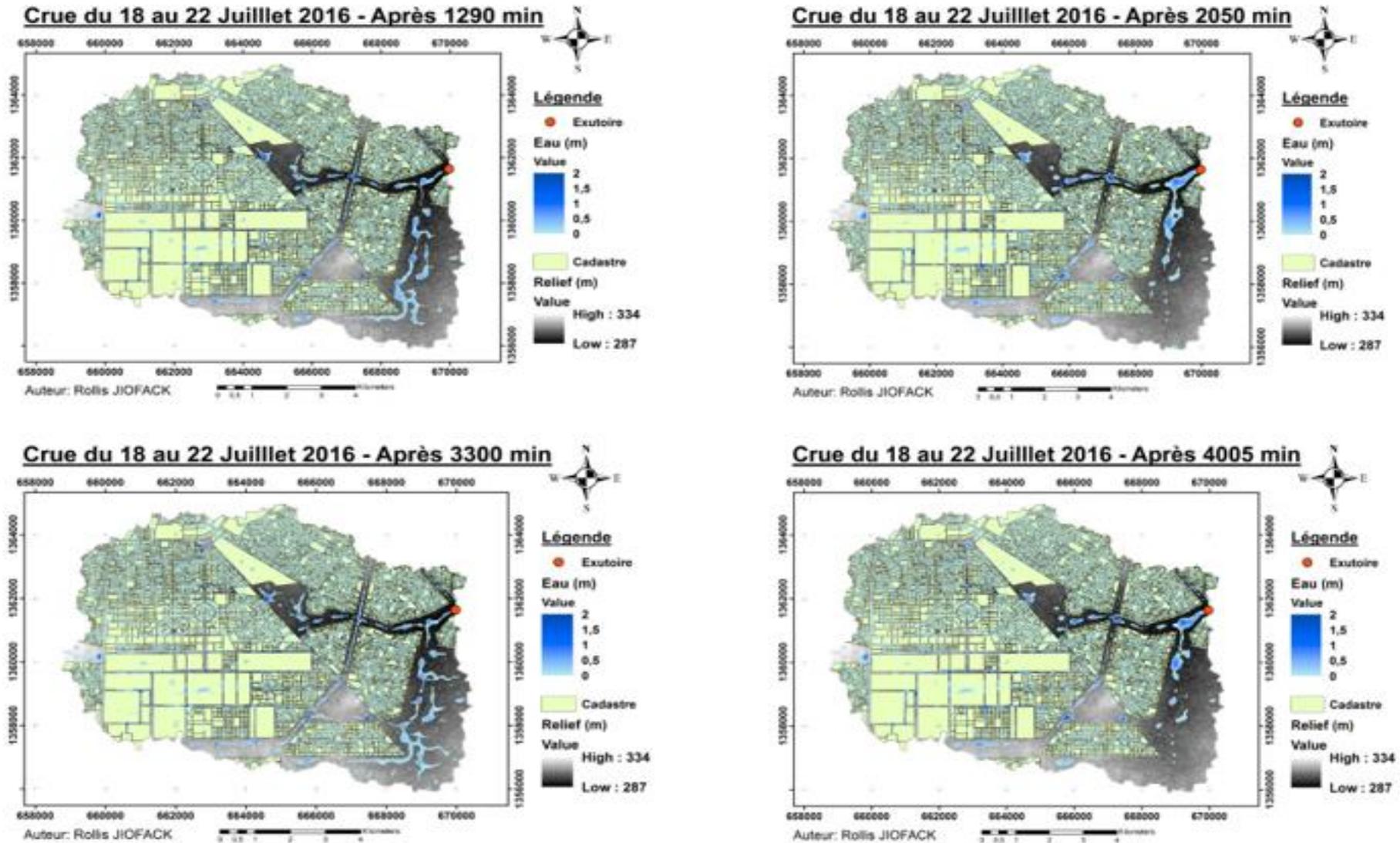


**Figure 28: Limnigrammes observé et simulé des crues du 18 au 22/07/2016**



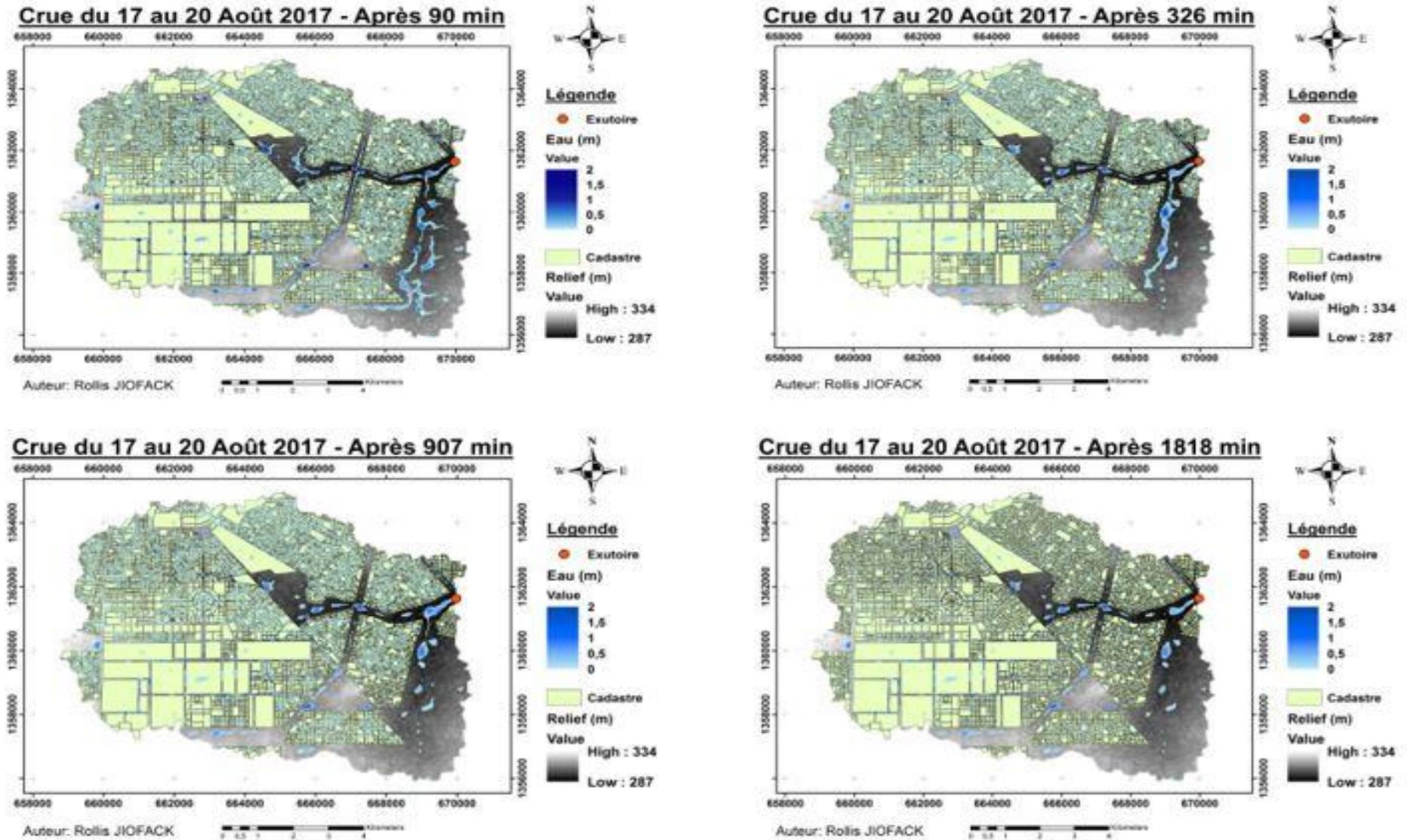
**Figure 29: Limnigrammes observé et simulé de la crue du 17 au 20/08/2017**

## Modélisation des crues dans une zone semi-urbaine de Grand-Ouaga (Burkina Faso)



*Figure 30: Cartes d'évolution spatio-temporelle des crues du 18 au 22 Juillet 2016*

## Modélisation des crues dans une zone semi-urbaine de Grand-Ouaga (Burkina Faso)



*Figure 31: Cartes d'évolution spatio-temporelle de la crue du 17 au 20 Août 2017*

## **V. CONCLUSION**

L'étude a porté sur la modélisation des crues dans une zone semi-urbaine de l'espace Grand-Ouaga.

La caractérisation de la zone d'étude à travers les paramètres de forme et l'analyse du réseau de drainage ont permis d'avoir une compréhension du comportement hydrologique de la zone d'étude. Ainsi, l'association d'une faible pente, d'un faible développement du réseau de drainage et d'un indice de Gravelius 1.45 induit un ruissèlement lent des eaux pluviales, un hydrogramme en cloche à l'exutoire du bassin versant et par conséquent un temps de base élevé. La caractérisation des crues quant à elle fait ressortir une grande dispersion statistique des paramètres de crues. Nous prenons en exemple les crues du 11/08/2016 et du 20/07/2016 qui ont respectivement pour hauteurs maximales d'écoulement 2.65 m et 3.07 m et pour précipitations totales respectives 15 mm et 57.2 mm, ce qui nous conduit à causes d'inondation autres que la hauteur pluviométrique telles que le taux d'urbanisation et l'insuffisance de canaux de drainage. De plus, sachant que le mois d'Août enregistre le maximum d'évènements pluvieux et de crues, l'on conclut aussi que le risque d'inondation dans la zone d'étude pourrait être lié à la succession d'évènements pluvieux.

Afin, de se rapprocher des conditions physiques réelles de la zone d'étude, nous avons intégré dans le code de simulation la prise en compte du bâti, des valeurs cataloguées du paramètre friction et des valeurs de terrain du paramètre infiltration. Les résultats obtenus montrent que le modèle est parfaitement sensible à la friction, à l'infiltration et à la présence du bâti et du réseau de drainage. De plus, les simulations des évènements de crue du 18 au 22/07/2016 et du 17 au 20/08/2017 ont permis d'évaluer les performances du modèle à travers le critère de Nash, on peut conclure que le modèle restitue de façon acceptable les hauteurs d'eau à l'exutoire d'évènements réels.

En guise de perspectives, nous recommandons des simulations intégrant des barrages et bassins de rétention afin d'atténuer le ruissèlement en aval et donc de réduire le risque d'inondation. Nous recommandons aussi la mise à jour du plan cadastral conformément aux réalités du terrain.

## VI. BIBLIOGRAPHIE

- Alcrudo, F. (2010). *Mathematical modelling techniques for flood propagation in urban areas*. Project report: IMPACT Project. p. 34).
- Ambroise, B. (1998). *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles* (Vol. 2). (\*H\*G\*A, Ed.) Bucarest, Roumanie, p.200. Consulté à l'adresse <http://www.keriel.org/BIB/manuels/Ambroise.pdf>
- Audusse, E. (2004). *Hyperbolic models and numerical analysis for shallow water flows*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, p.197. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008047>
- Bani, S. (2011). *Implications des facteurs physiques dans les risques d'inondation à Ouagadougou : Cartographie des zones à risques et mesures de preventions*. Mémoire de Master en Eau et de Environnement, Institut Internationale d'Ingenierie de l'Eau et Environnement (2IE), Ouagadougou, Burkina Faso, p.74.
- Bani, S., & Yonkeu, S. (2016). *Risques d'inondation dans la ville de Ouagadougou : Cartographie des zones à risques et méasures de prévention*. Journal Ouest-Africain des Sciences de Gestion, 1(1), 1-18.
- Bayala, L., & Ariste, L. (2009). *Monographie de la commune de Ouagadougou*. Rapport technique. Bureau Central du Recensement: Ouagadougou, Burkina Faso. p. 130
- Bonnifait, L., Guy, D., Matthieu, L., Brice, B., & Arielle, M. (2009). *Distributed hydrologic and hydraulic modelling with radar rainfall input : Reconstruction of the 8-9 September 2002 catastrophic flood event in the Gard region, France*. Advances in Water Resources, 32(7), 1077-1089. doi :10.1016/j.advwatres.2009.03.007
- Chézy, A. (1775). *Mémoire sur la vitesse de l'eau conduite dans une rigole donnée*. In : Bibliothèque de l'école des Ponts et Chaussées, dossier 847, p. 15, 33, 85
- CNFSH. (2000). *Dictionnaire francais d'hydrologie*. Dictionnaire en ligne, Comité Nationale Francais des Sciences Hydrologique, Commission de terminologie. Consulté à l'adresse <https://hydrologie.org/glu/indexdic.htm>
- CONASUR. (2009). *Rapport évaluation des impacts, des pertes et des besoins en reconstruction suite aux inondations du 1er Septembre 2009 au Burkina Faso*. Ouagadougou, p. 150.

- Dewals, B., Erpicum, S., Archambeau, P., Detrembleur, Sylvain., & Piroton, M. (2006). *Fluid-structure interaction modeling with a coupled 1D-2D free surface flow solver*. Article de revue, In Proceedings of Riverflow 06, Lisbon (Portugal), p. 8.
- Dewals, B., Erpicum, S., Archambeau, P., Detrembleur, S., & Piroton, M. (2008). *Detailed 2D numerical modeling for flood extension forecasting*. Article de revue, In Proceedings of the 4th International Conference on Fluvial Hydraulics : River Flow. p.10. Consulté à l'adresse <https://orbi.uliege.be/handle/2268/2647>
- El Bouajaji, M. (2007). *Modélisation des écoulements à surface libre : étude du ruissellement des eaux de pluie*. Mémoire de Master en calcul rapide et visualisation, Strasbourg : Université de Strasbourg, p. 43. Consulté à l'adresse <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00459336>
- Gangbazo, G., & Babin, F. (2000). *Pollution de l'eau des rivières dans les bassins versants agricoles*. Vecteur Environnement, 33(4), 47-57.
- GIEC. (2007). *Changements climatiques 2007. Rapport de synthèse. Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse*. Genève, Suisse. p.114. Consulté à l'adresse [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_fr.pdf)
- Hersch, Reginald & Fairbridge, Rhodes. (1998). *Encyclopedia of Hydrology and Water Resources*. Springer Science & Business Media, p. 26. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4497-6>
- Hervouet, J. M. (2003). *Hydrodynamique des écoulements à surface libre, modélisation numérique avec la méthode des éléments finis*. Paris : Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.
- INSD. (2009). *Analyse des résultats du recensement général de la population et de l'habitation de 2006*. Institut National de la Statistique et de la Démographie, p.409.
- INSD. (2015). *Annuaire Statistique 2015*. Institut national de la statistique et de la démographie, p.383.
- Kabore, F. (2016). *Evènements pluvieux extrêmes et inondations dans l'espace "Grand-Ouaga" au Burkina Faso*. Mémoire de Master en Eau et Environnement, Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et Environnement (2IE), Ouagadougou, Burkina Faso, p.77.
- Kafando, Y. (2006). *Transport urbain et santé des populations : le cas de Ouagadougou (Burkina Faso)*. Université d'Abomey Calavi (UAC), Cotonou, p.23-95.
- Kampf, S., & Burges, S. J. (2007). *A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models*. Water Resources Research, Vol 43, WO5423. <https://doi.org/10.1029/2006WR005370>

- Keita, Josue. (2018). *Modelisation des crues dans deux zones semi-urbanisees de l'espace « grand-ouaga au Burkina Faso*. Mémoire de Master en Eau et Environnement, Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et Environnement (2IE), Ouagadougou, Burkina Faso, p.63.
- Laganier, O. (2015). *Un couplage de modèles hydrologique et hydraulique adapté à la modélisation et à la prévision des crues à cinétique rapide - Adaptation au cas du bassin versant du Gardon (France)*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France, p.257. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01126972>
- Laganier, R., & Salvador, P. (2000). *La ville et les risques hydrologiques : exemple de la métropole lilloise*. In: Hommes et Terres du Nord, Hydrosystèmes, paysages et territoires, 2(2), 1-4. doi.org/10.3406/htn.2000.2972
- Lerat, J. (2009). *Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques ? Vers un modèle intégré de simulation des crues*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, p.390. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00392240>
- Makoko, M., & Mananga, M. (1986). *Etude préliminaire de l'érosion hydrique dans la ville de Kinshasa*. Revue zaïroise des sciences nucléaires, CGA-CRENK, 7(2), 88-109.
- Manning, R. (1891). *On the flow of water in open channels and pipes*. Transactions of the Institution of Civil engineers of Ireland.
- Mediero, L., Jimenez-Alvarez, A., & Garrote, L. (2010). *Design flood hydrographs from the relationship between flood peak and volume*. Hydrology and Earth System Sciences, 14(12), 2495-2505. doi.org/10.5194/hess-14-2495-2010
- Musy, A. (2005). *Cours d'hydrologie générale*. Cours en ligne, Ecole Polytechnique Fédérale, Laboratoire d'HYDRologie et AMénagements (HYDRAM), Lausanne, Suisse.
- OMM. (1992). *Glossaire International d'Hydrologie*. Organisation Mondiale Météorologique, Genève. OMM-N°385 Consulté à l'adresse website: [http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international\\_glossary/385\\_IGH\\_2012.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf)
- OMS. (2009). *Réponse de l'OMS aux inondations survenues à Agadez*. Bulletin d'information No N°64, Organisation mondiale de la Santé, Agadez, Niger. p.12
- PANA. (2007). *Plan d'Action National d'Adptation à la variabilité et aux changements climatiques*. Burkina Faso, p.84. Consulté à l'adresse <https://unfccc.int/resource/docs/napa/bfa01f.pdf>

- PNA. (2015). *Plan National d'Adaptation aux changements climatiques*. Burkina Faso, p.155. Consulté à l'adresse [https://www4.unfccc.int/sites/NAPC/Documents/Parties/PNA\\_Version\\_version%20francaise%20finale%20BF.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/NAPC/Documents/Parties/PNA_Version_version%20francaise%20finale%20BF.pdf)
- PNUD. (2008). *S'adapter à l'inévitable : action nationale et coopération internationale. Un rapport mondial sur le développement humain 2007/2008*, p. 36. Consulté à l'adresse [http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr\\_20072008\\_fr.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_20072008_fr.pdf)
- Rémenérias, G. (1960). *Hydrologie de l'ingénieur*. In: Annales de Géographie, t. 72, n°390, pp. 206-214. <https://doi.org/10.3406/geo.1963.16384>
- Riazanoff, S. (1989). *Extraction et analyse automatique de réseaux à partir de modèles numériques de terrain, contribution à l'analyse d'images de télédétection*. Thèse de doctorat. Université de Paris VII, p.84.
- Roche. (1963). *Hydrologie de surface* (éd. ORSTOM). (Gauthier-Villars, Ed) Paris. p.431
- Salavati, B. (2017). *Impact de l'urbanisation sur la réponse hydrologique des bassins versants urbains*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Sciences de la Terre. HAL. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01636190>
- Sall, C. T. (2011). *Résilience et innovation locale face aux changements climatiques : capitalisation des résultats du programme "Fonds de Soutien aux Stratégies Locales d'Adaptation (FSSA)"*. Sénégal: IED Afrique, p. 43.
- Sankara, B. T. (2010). *Variabilité climatique et gestion des ressources naturelles. Cas de la forêt classée et réserve partielle de faune de Gonse au Burkina Faso*. Maîtrise en Géographie, Université de Ouagadougou. Récupéré sur [https://www.memoireonline.com/01/13/6693/m\\_Variabilite-climatique-et-gestion-des-ressources-naturelles-Cas-de-la-fort-classee-et-reserve16.html](https://www.memoireonline.com/01/13/6693/m_Variabilite-climatique-et-gestion-des-ressources-naturelles-Cas-de-la-fort-classee-et-reserve16.html)
- Sarr, B. (2011). *Recrudescence des fortes pluies et des inondations dans un contexte de changement climatique*. Le Sahel face aux changements climatiques : Enjeux pour un développement durable. Centre Régional Agrhymet, Numéro spécial, 9-11.
- St-Hilaire, A., N., E.-J., Adlouni, S. N., Thiombiano, A. N., & Caissie, D. (2011). *Caractérisation des hydrogrammes de crues pluviales sur des petits bassins versants forestiers*. p.71.
- Tholin, A. L., & Keifer, C. J. (1959). *The hydrology of urban runoff*. Journal of the Sanitary Engineering Division.
- Vidal, J.-P. (2005). *Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale - Apports de l'intelligence artificielle*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique

de Toulouse, Toulouse, France, p.130. Consulté à l'adresse <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000116/vidaljp.pdf>

Vincent, M., & Yves, T. (1995). *Etude du fonctionnement hydrologique de bassins versants méditerranéens*. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, 229, 219-230.

Weisbach, J. A. (1847). *Principles of the Mechanics of Machinery and Engineering* (Vol. 1). (H. Bailliere, Ed.) London, U.K.: Library of Illustrated Standard Scientific Works. p.396.

Wisler, C. O., & Brater, E. F. (1959). *Hydrology*. (J. Wiley, Ed.) Chichester, West Sussex, UK. p.419.

Xiaoliu, Y. (2011). *Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France. p.231 Consulté à l'adresse <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00574117>

## VII. ANNEXES

### Annexe 1 : Notes de Calcul

#### ❖ Indice de compacité de Gravelius

$$K_G = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

- ❖  $K_G$  : Indice de Gravelius ;
- ❖ P : Périmètre du bassin versant en (km) ;
- ❖ A : Surface du bassin versant en (km<sup>2</sup>) ;

#### ❖ Dimension de rectangle équivalent

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{\left( 1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2 \right)} \right] \quad (2) \text{ et } l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2 \right)} \right] \quad (3)$$

#### ❖ Indice de pente global

$$I_G = \frac{H_5 - H_{95}}{L} \quad (4)$$

Avec :

$H_5$  : altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin ;

$H_{95}$  : altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin.

#### ❖ La densité de drainage

$$D_d = \frac{\sum_i^n L_i}{S} \quad (5)$$

- $D_d$  : densité de drainage [km/km<sup>2</sup>] ;
- $L_i$  : longueur élémentaire des thalwegs d'ordre i [km] ;
- S : surface du bassin versant [km<sup>2</sup>].

❖ La densité hydrographique

$$D_h = \frac{\sum N_i}{A}$$

Où :

$D_h$  : densité hydrographique [ $\text{km}^{-2}$ ] ;

$N_i$  : nombre de cours d'eau ;

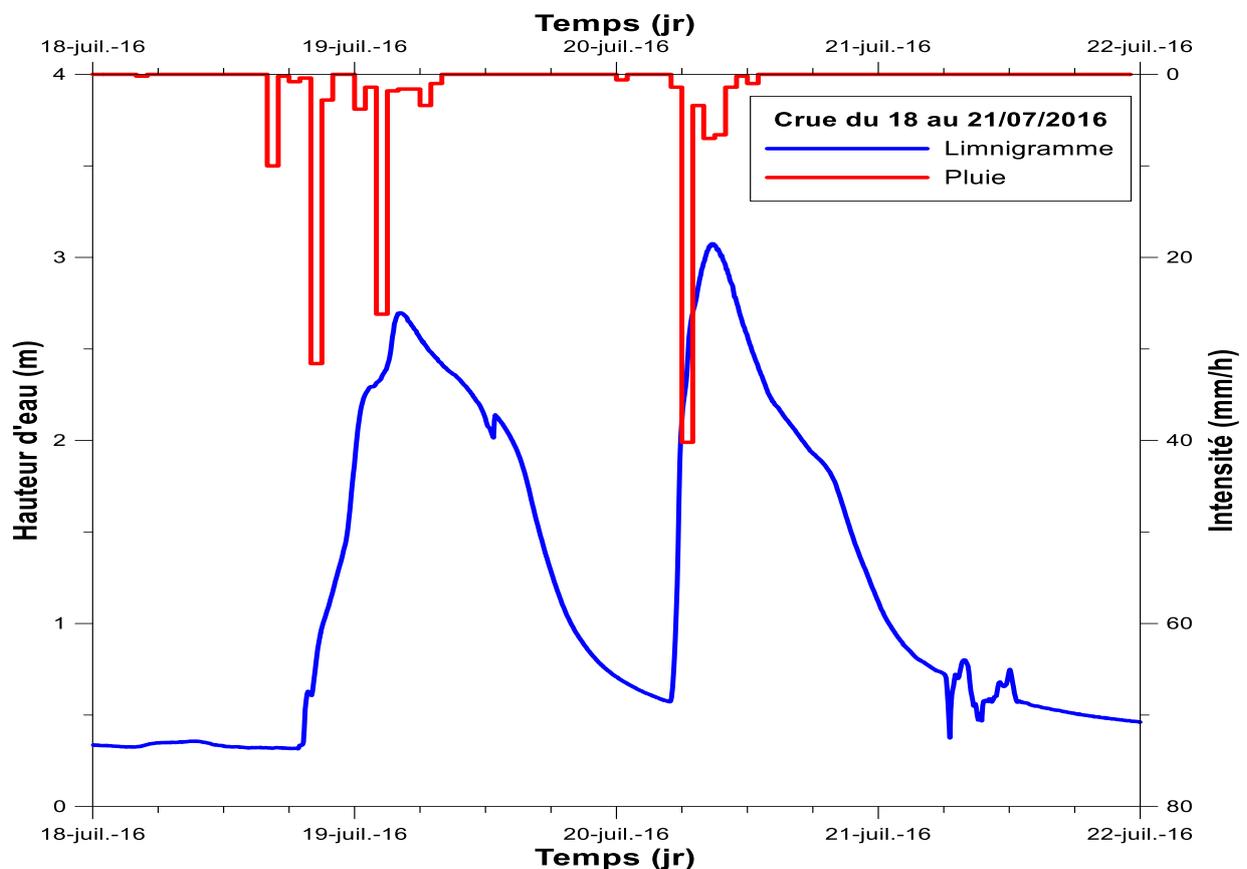
$A$  : superficie du bassin [ $\text{km}^2$ ].

Il existe une relation assez stable entre la densité de drainage  $D_d$  et la densité hydrographique  $D_h$ , de la forme :

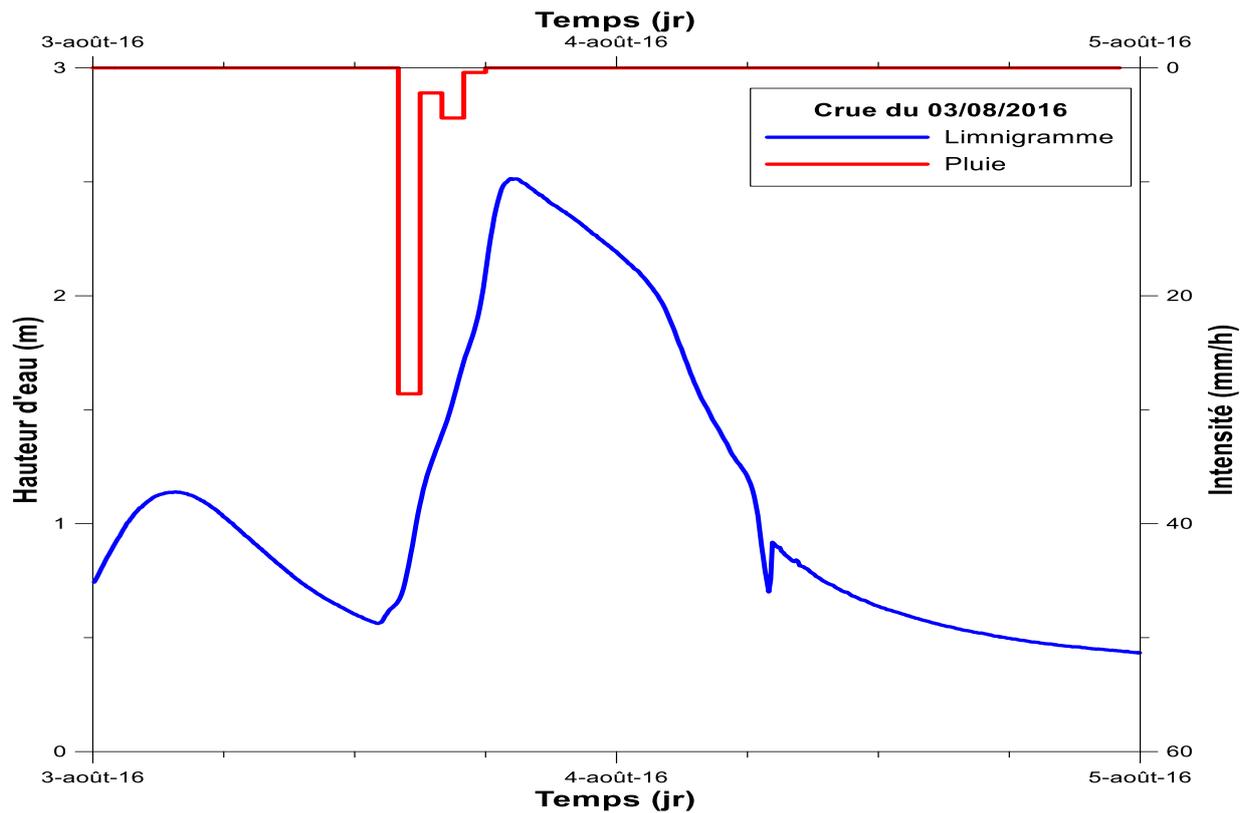
$$D_h = a.D_d^2$$

Où  $a$  est un coefficient d'ajustement.

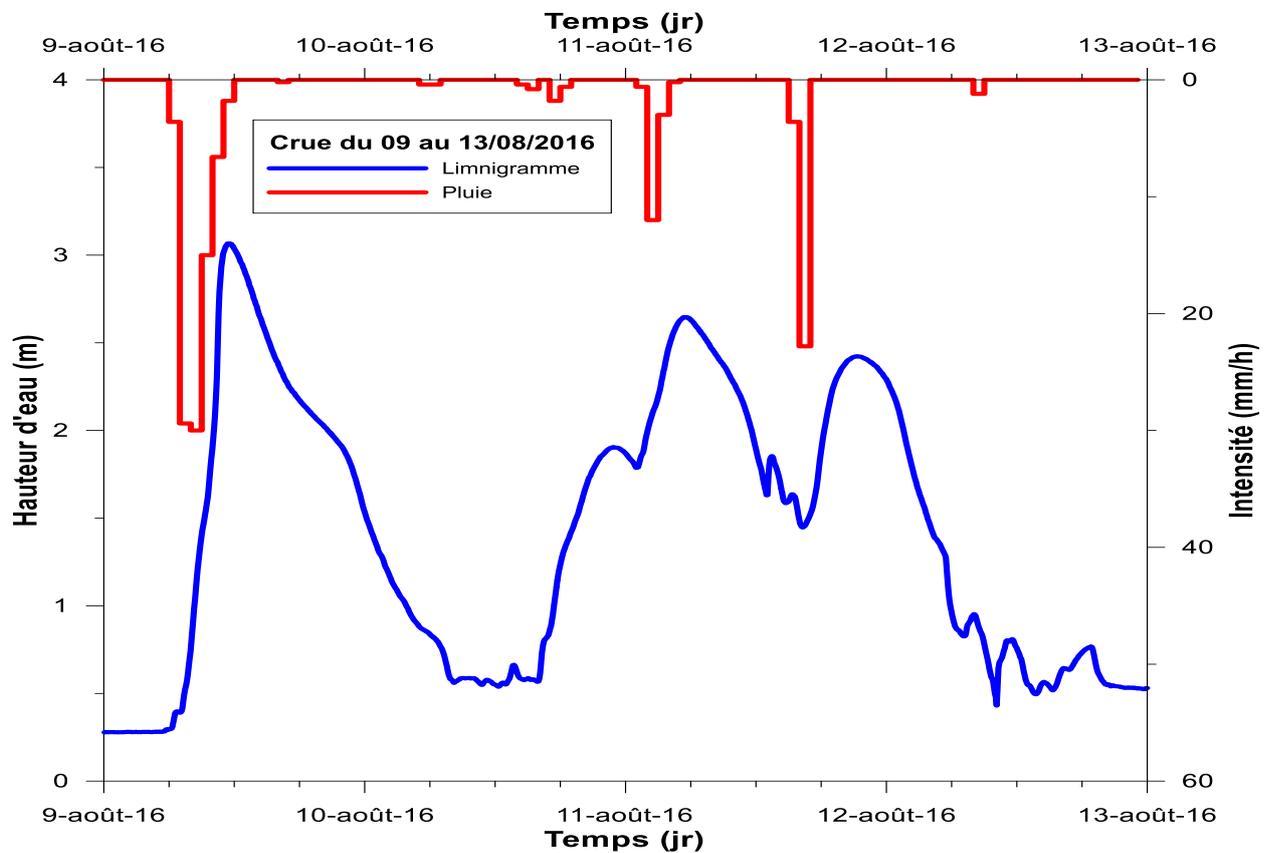
**Annexe 2 : Limnigrammes des crues**



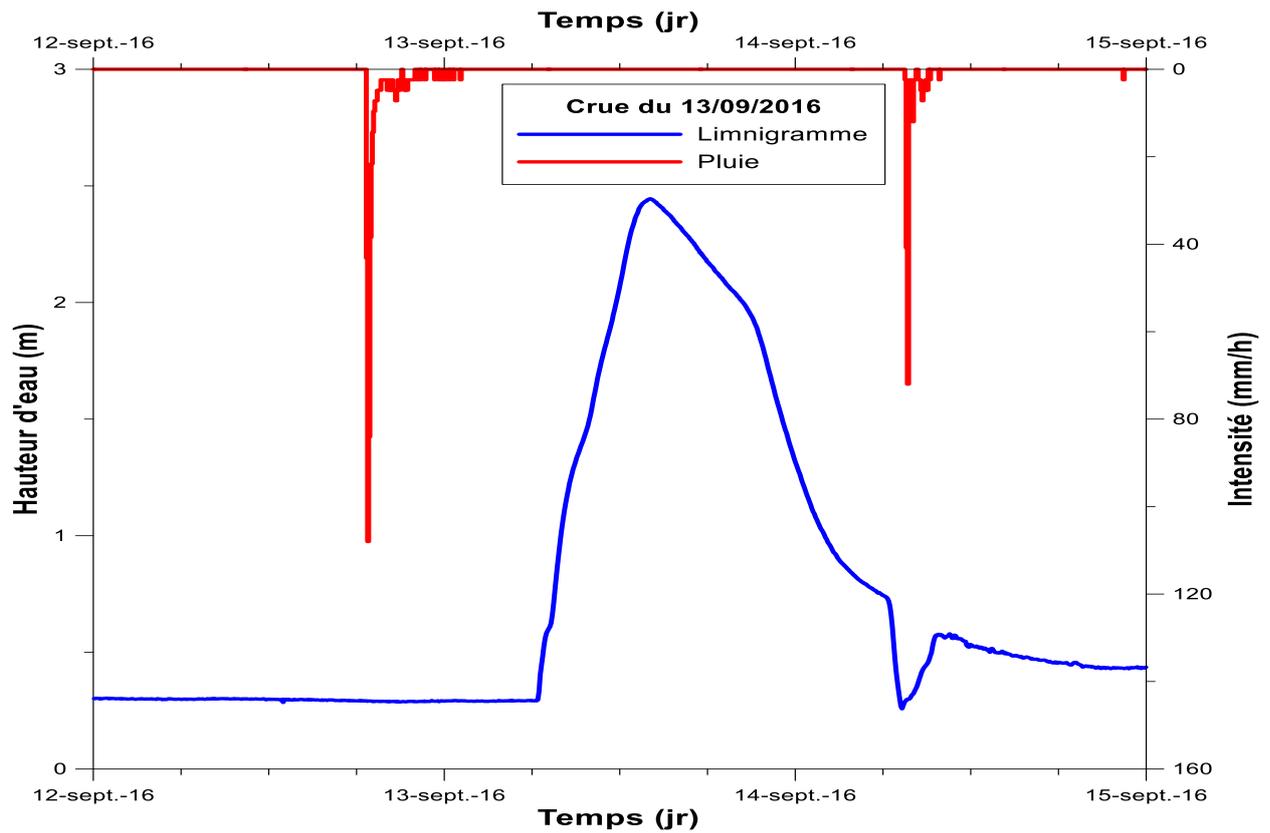
**a. Limnigramme de la crue du 18 au 21/07/2017**



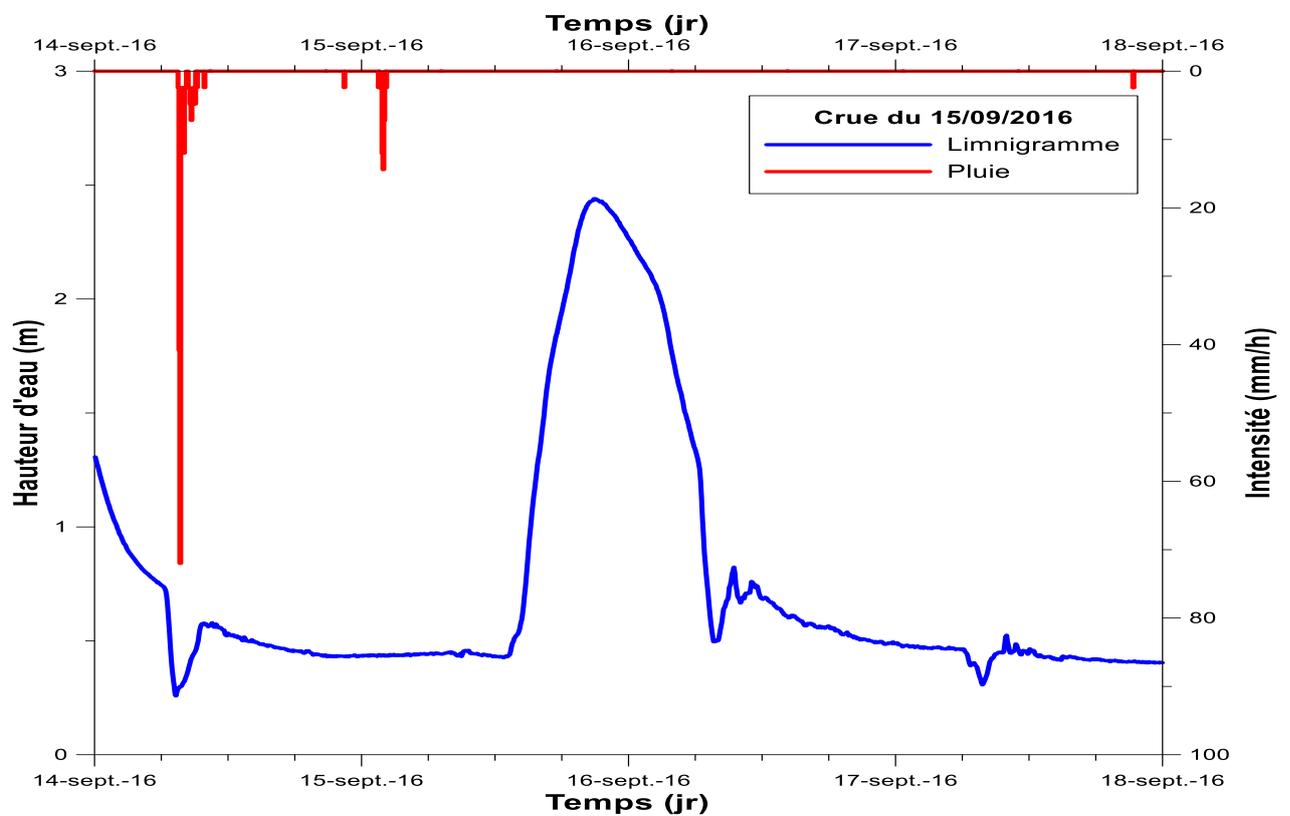
**b. Limnigramme de la crue du 03/08/2016**



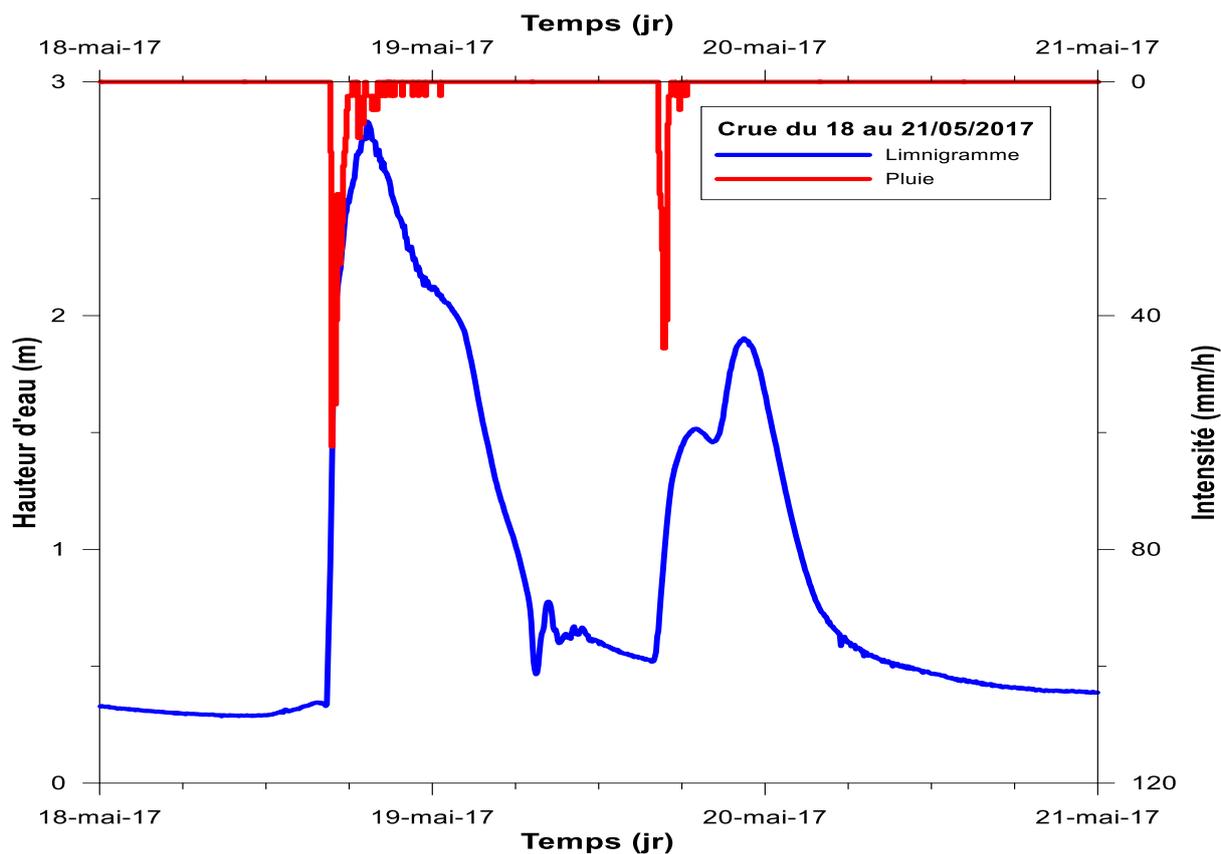
**c. Limnigramme de la crue du 09 au 13/08/2016**



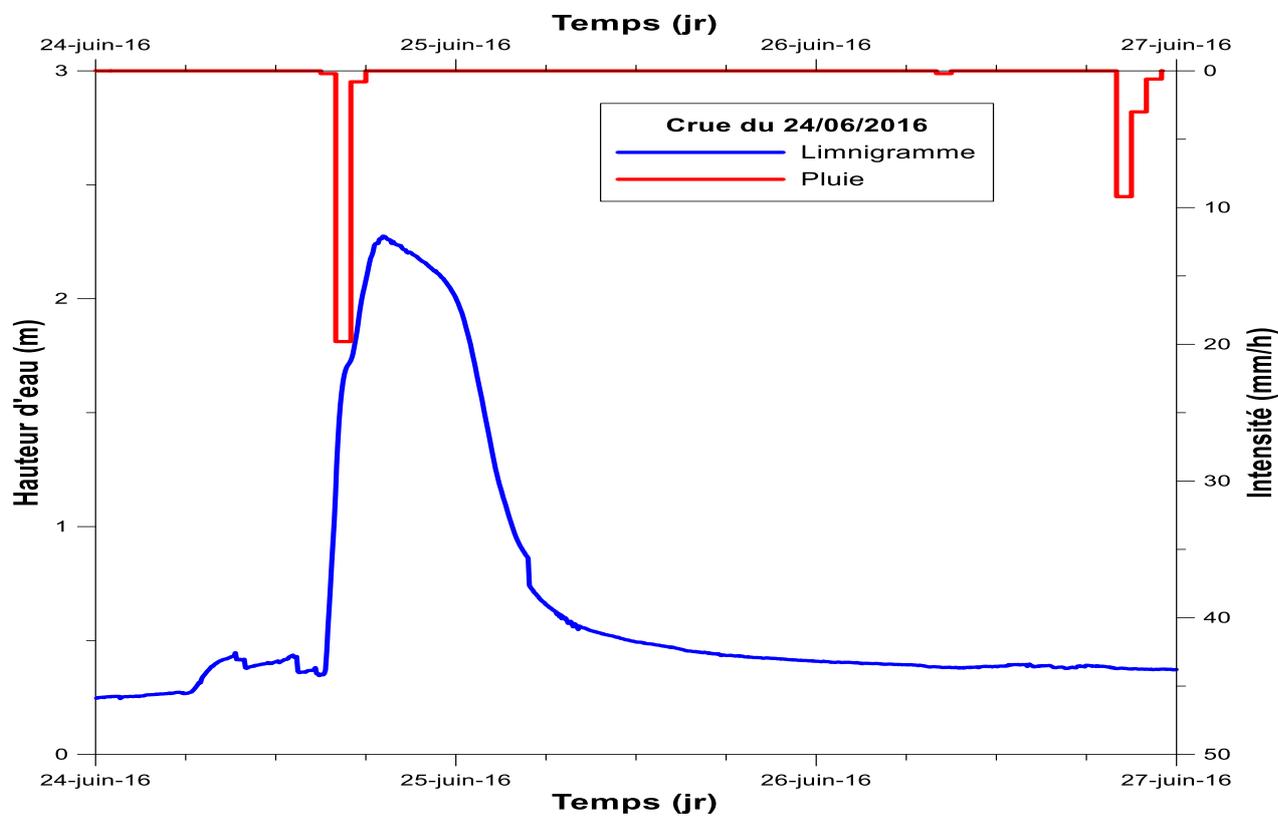
d. Limnigramme de la crue du 13/09/2016



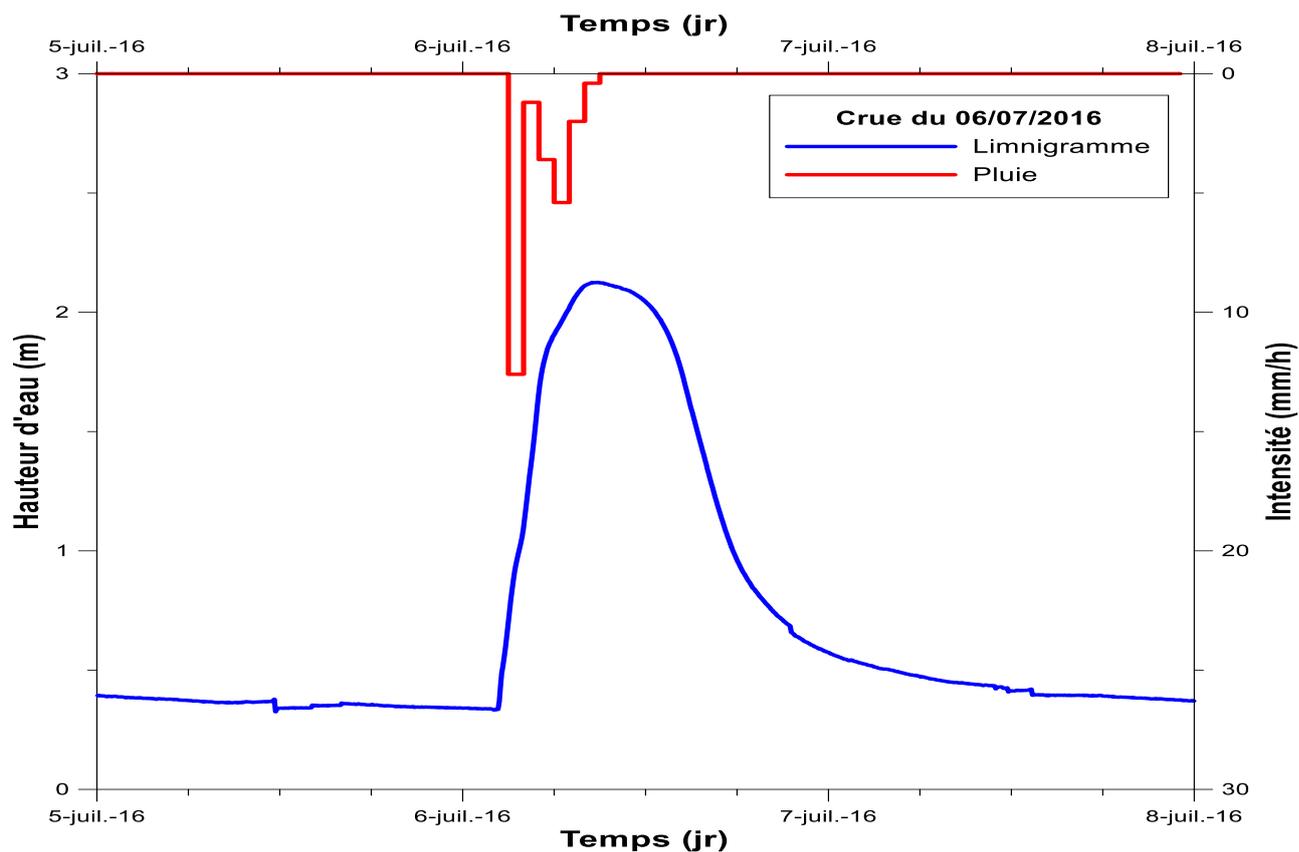
e. Limnigramme de la crue du 15/09/2016



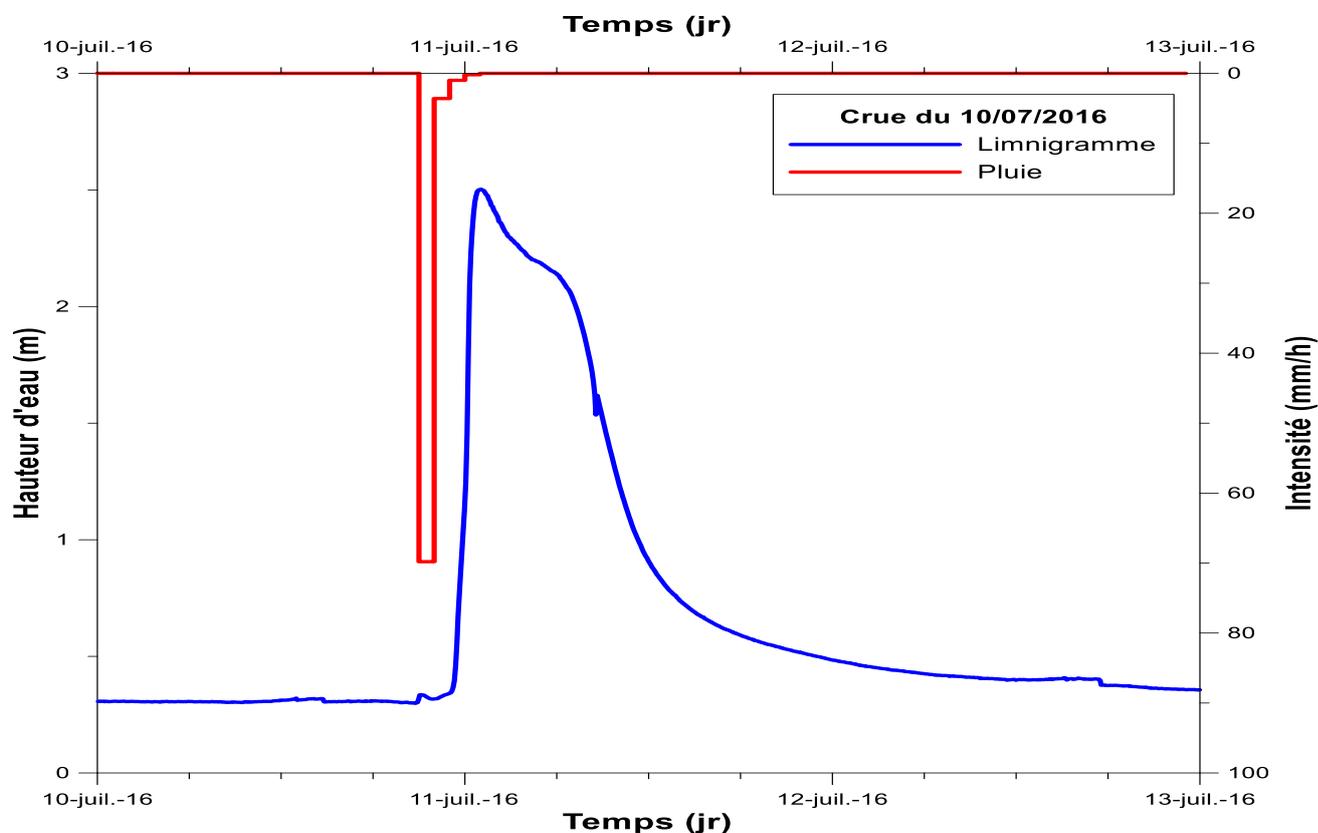
f. Limnigramme de la crue du 18/05/2017



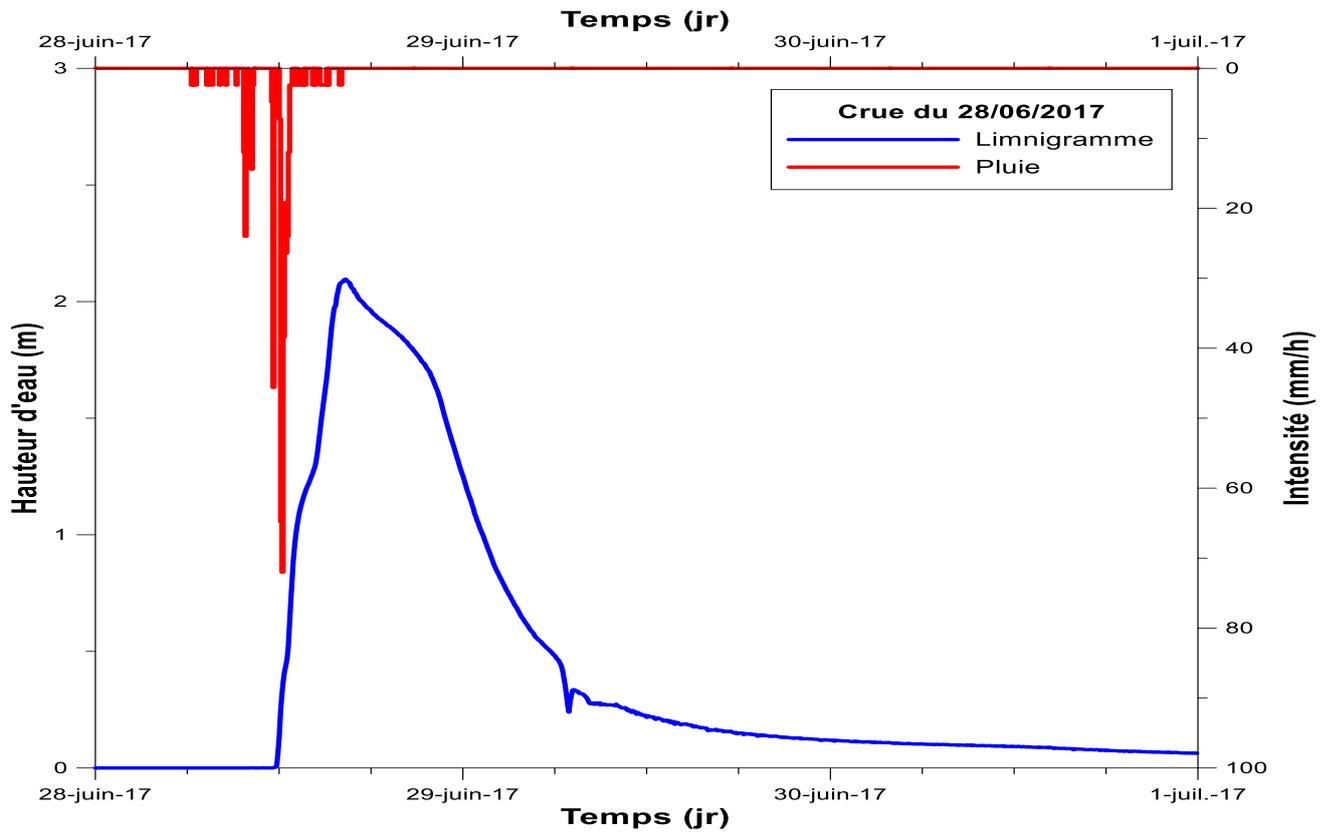
g. Limnigramme de la crue du 24/06/2016



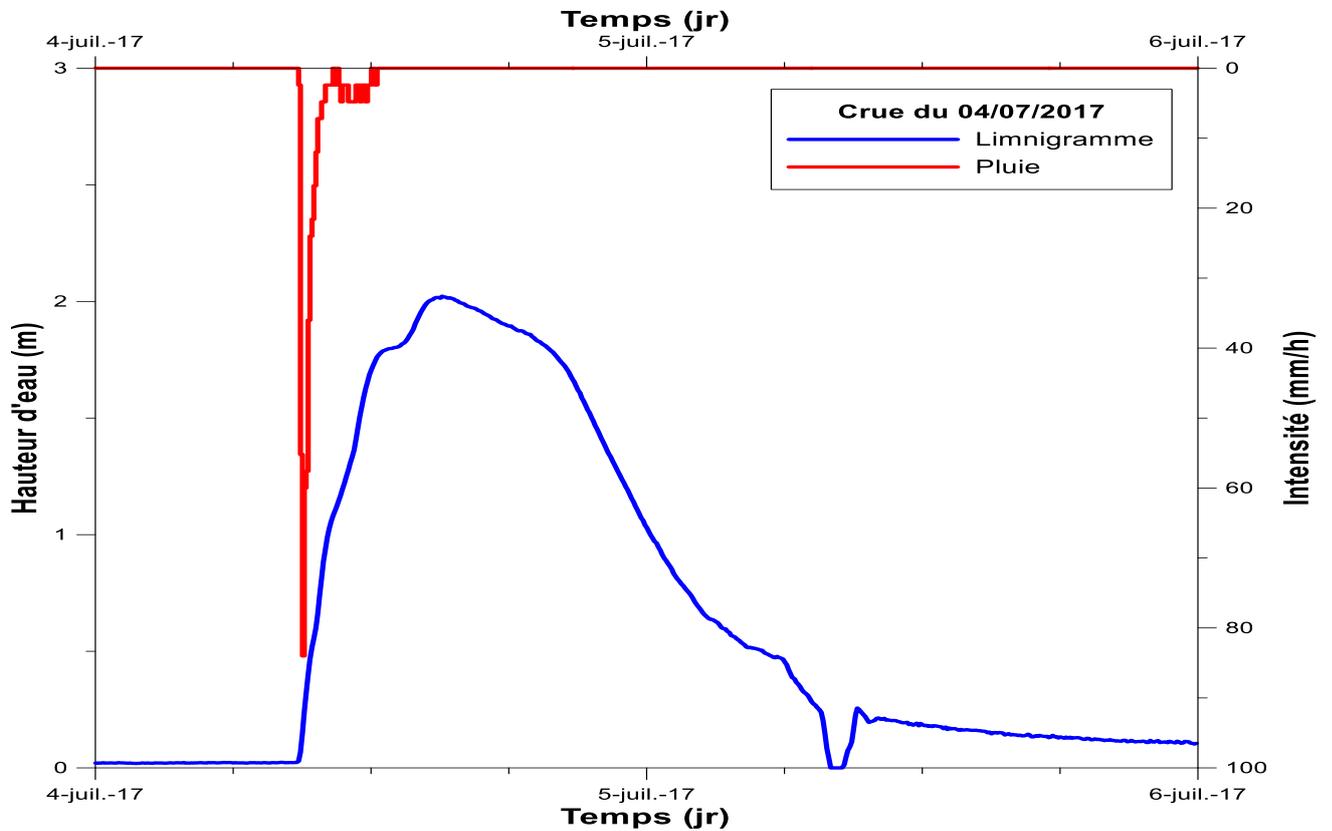
h. Limnigramme de la crue du 06/07/2016



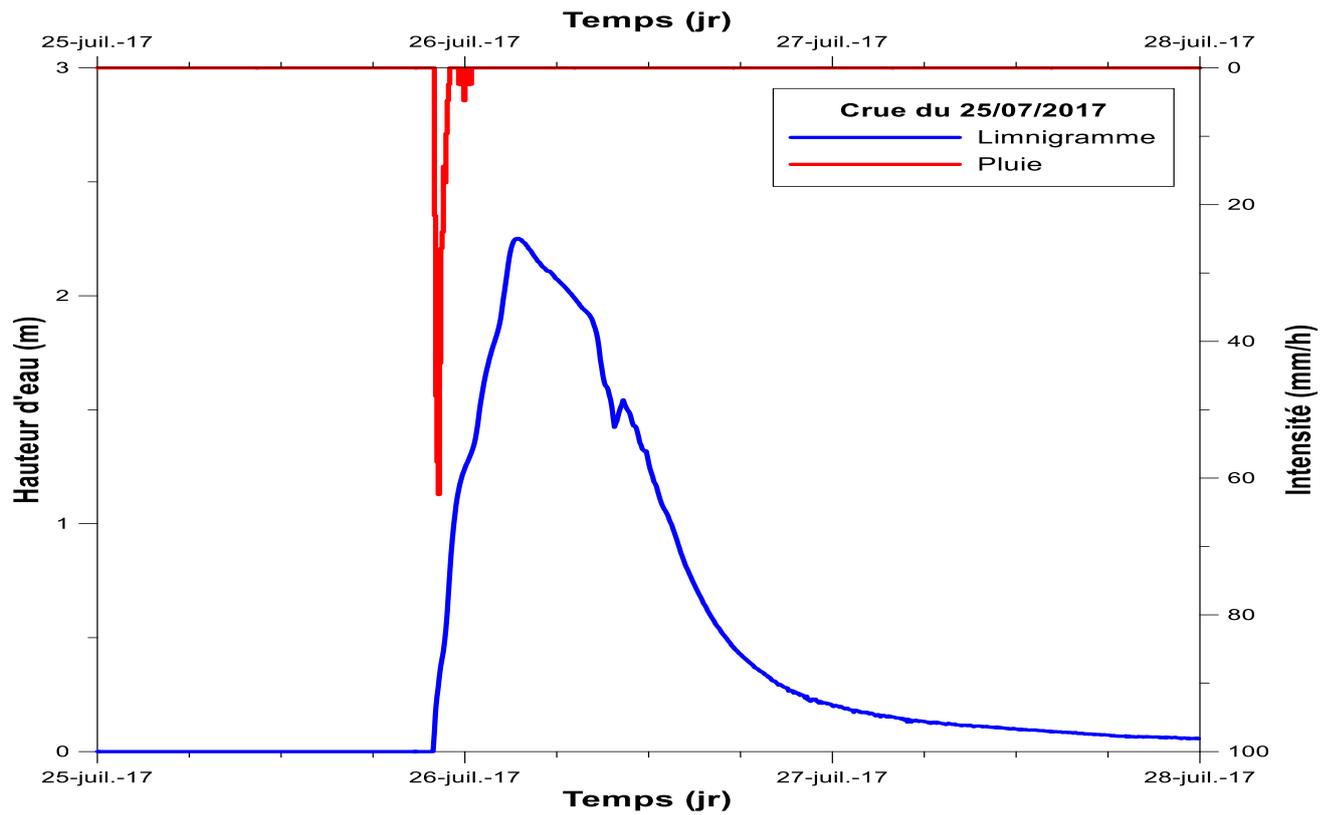
i. Limnigramme de la crue du 10/07/2016



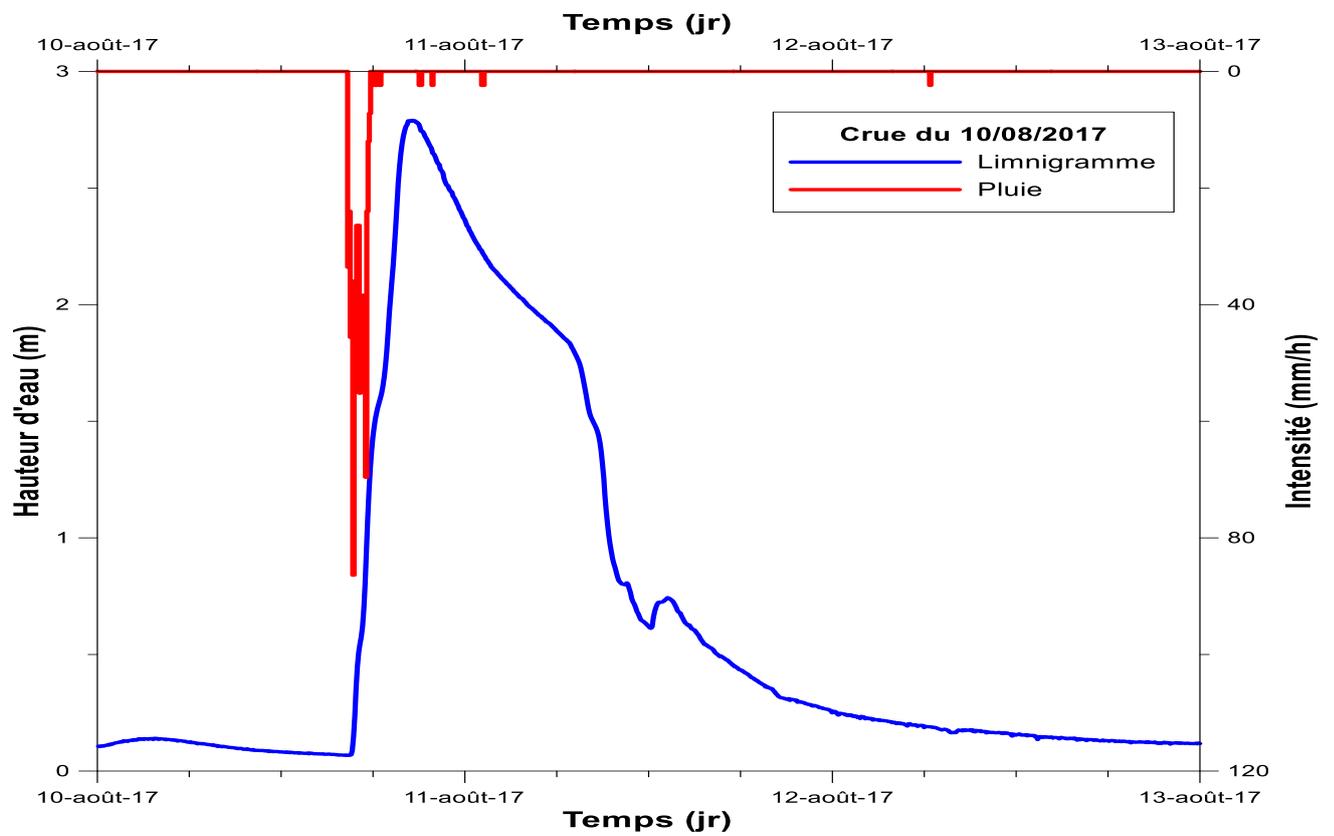
j. Limnigramme de la crue du 28/06/2017



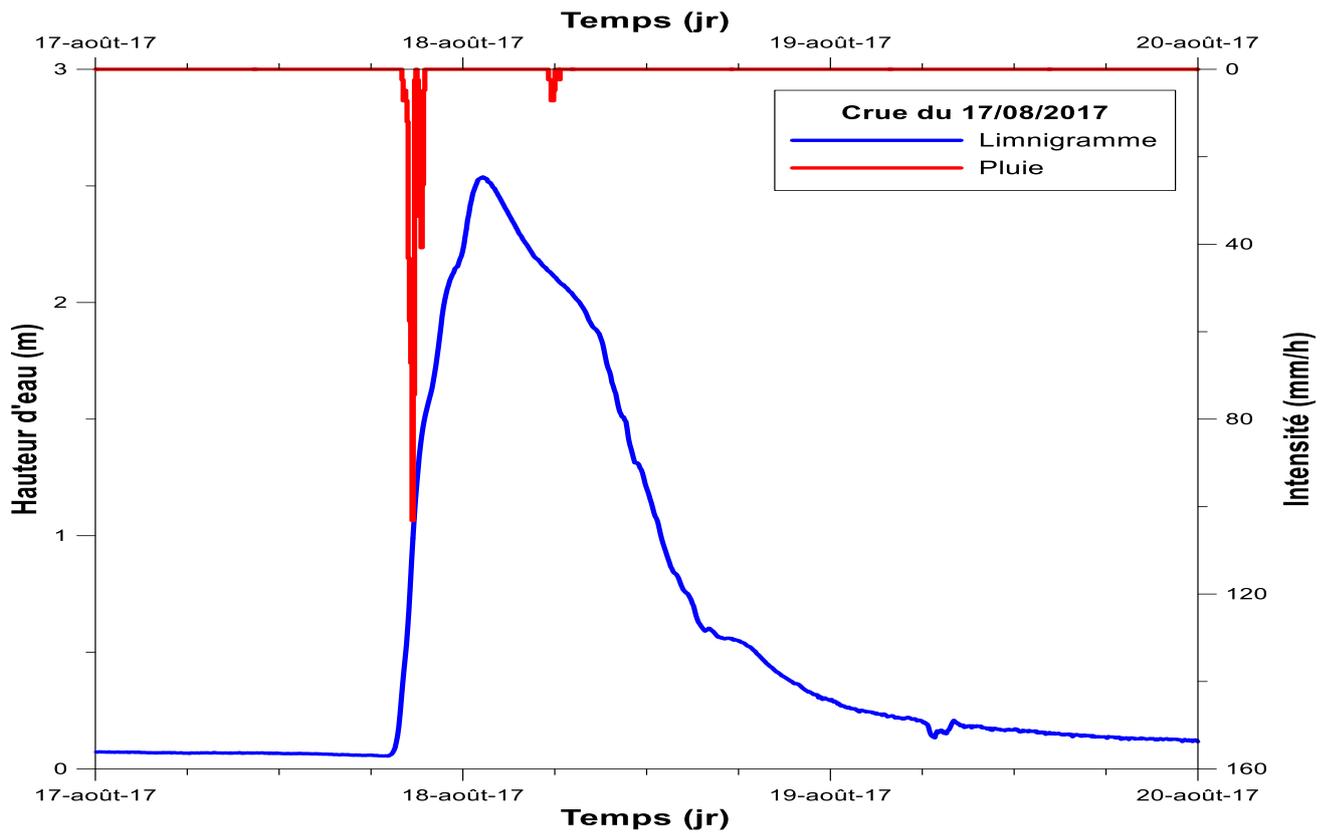
k. Limnigramme de la crue du 04/07/2017



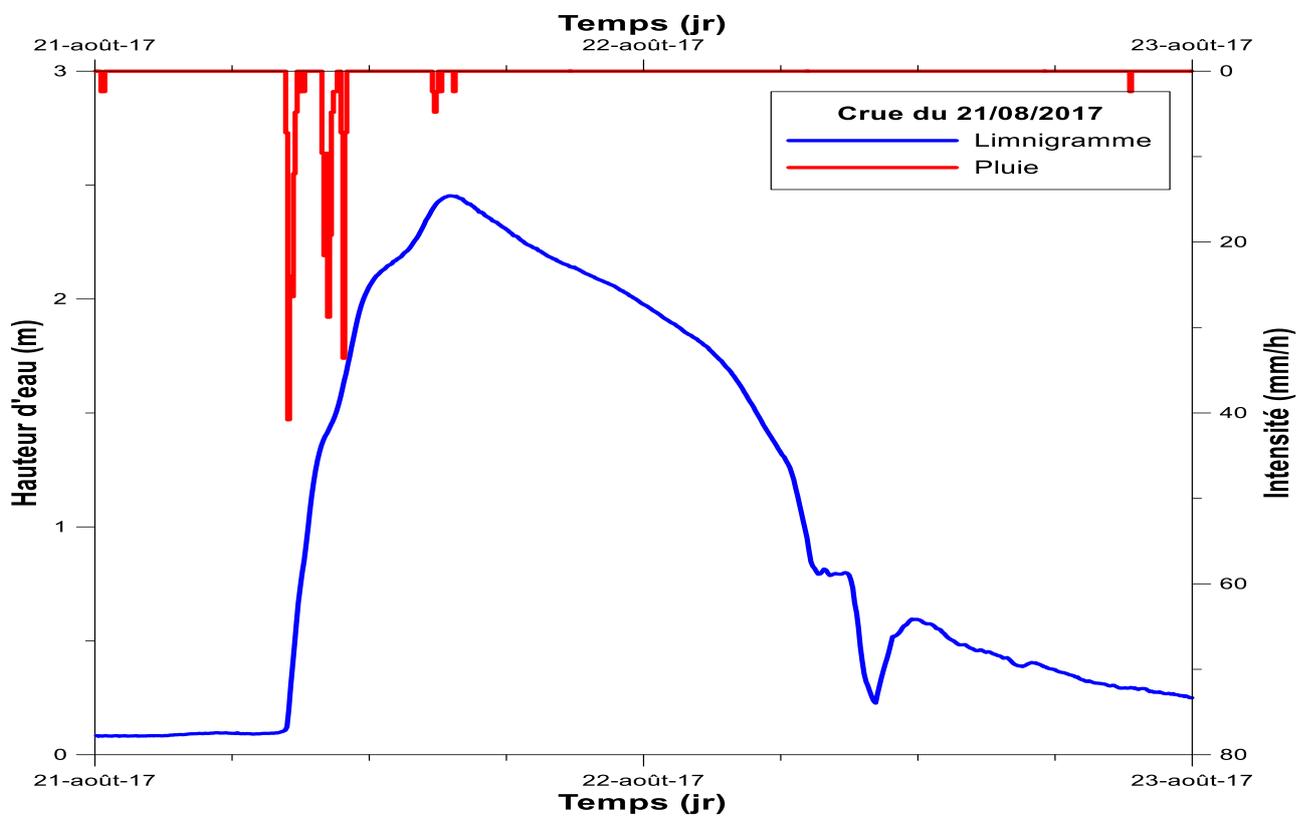
l. Limnigramme de la crue du 25/07/2017



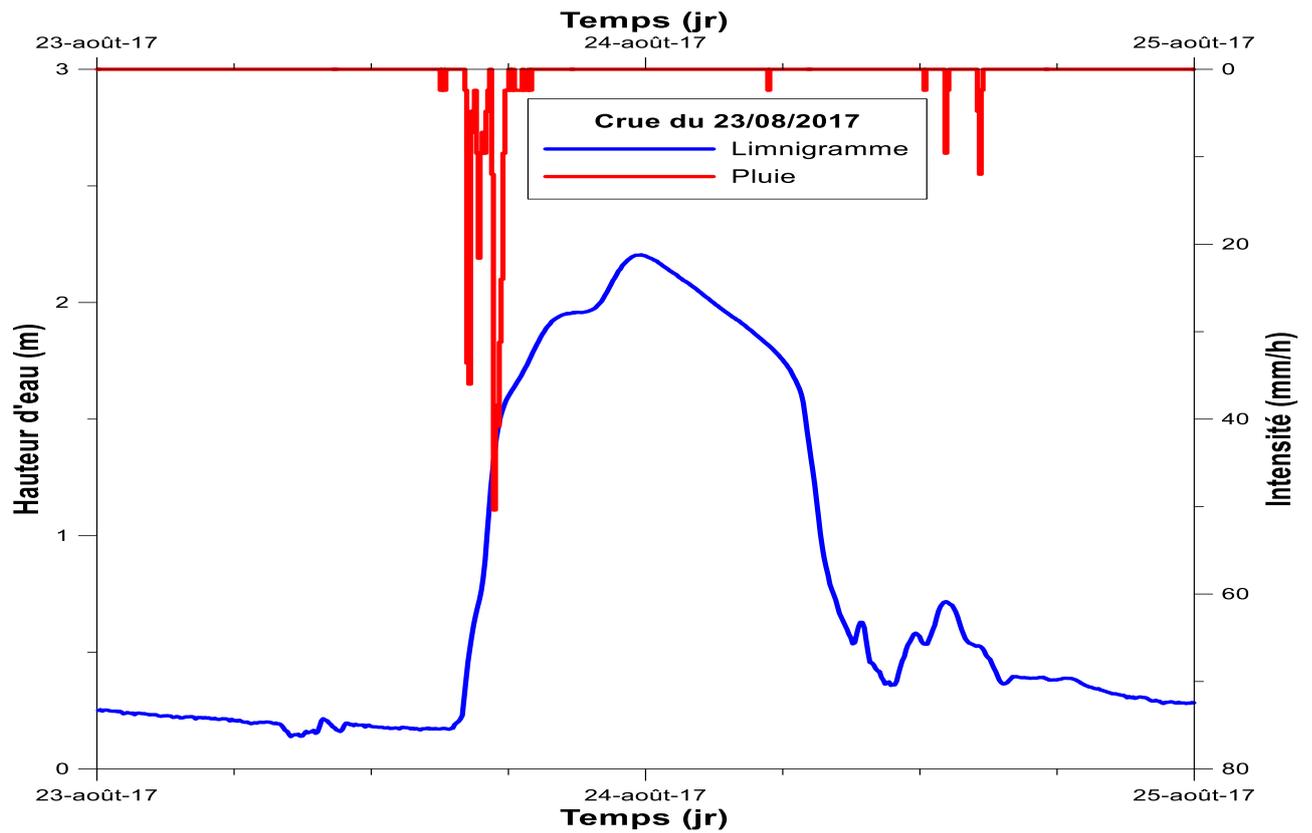
m. Limnigramme de la crue du 10/08/2017



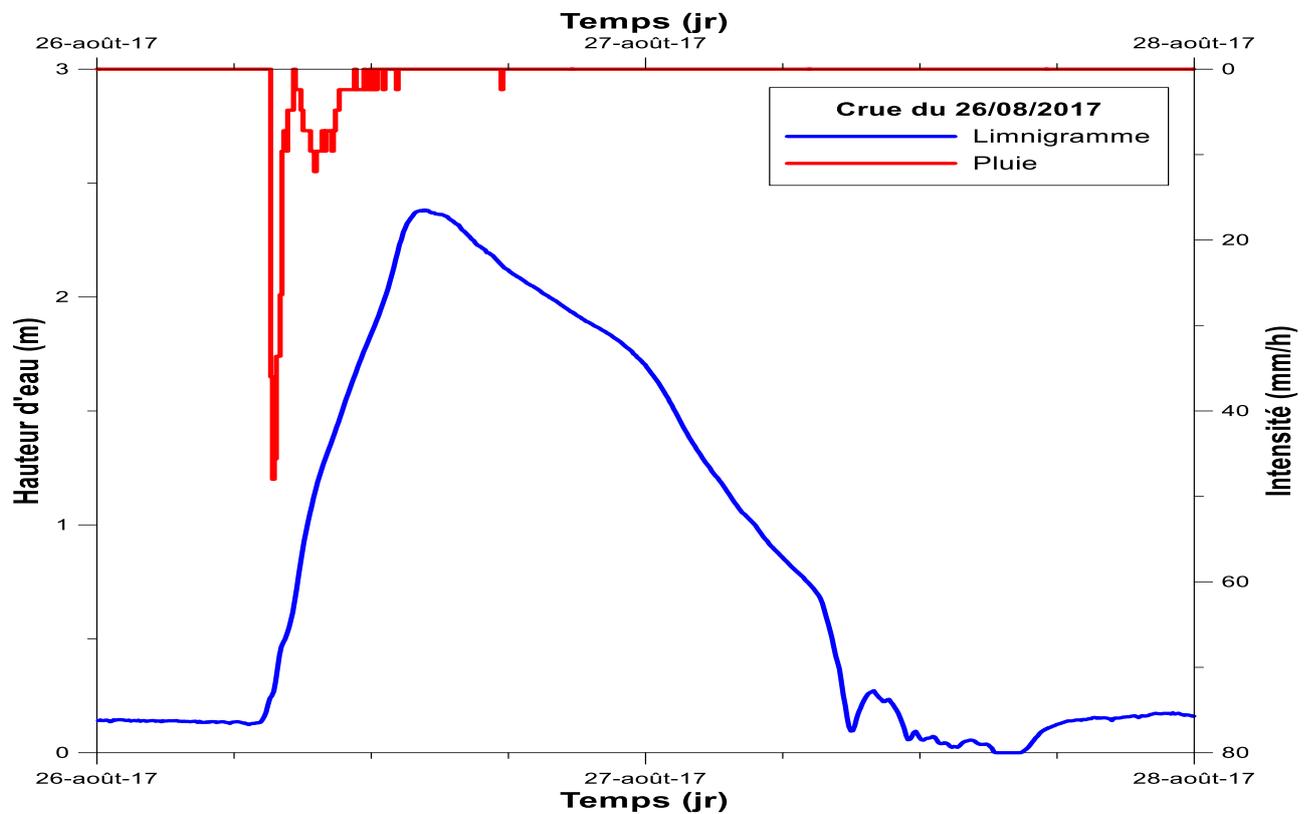
n. Limnigramme de la crue du 17/08/2017



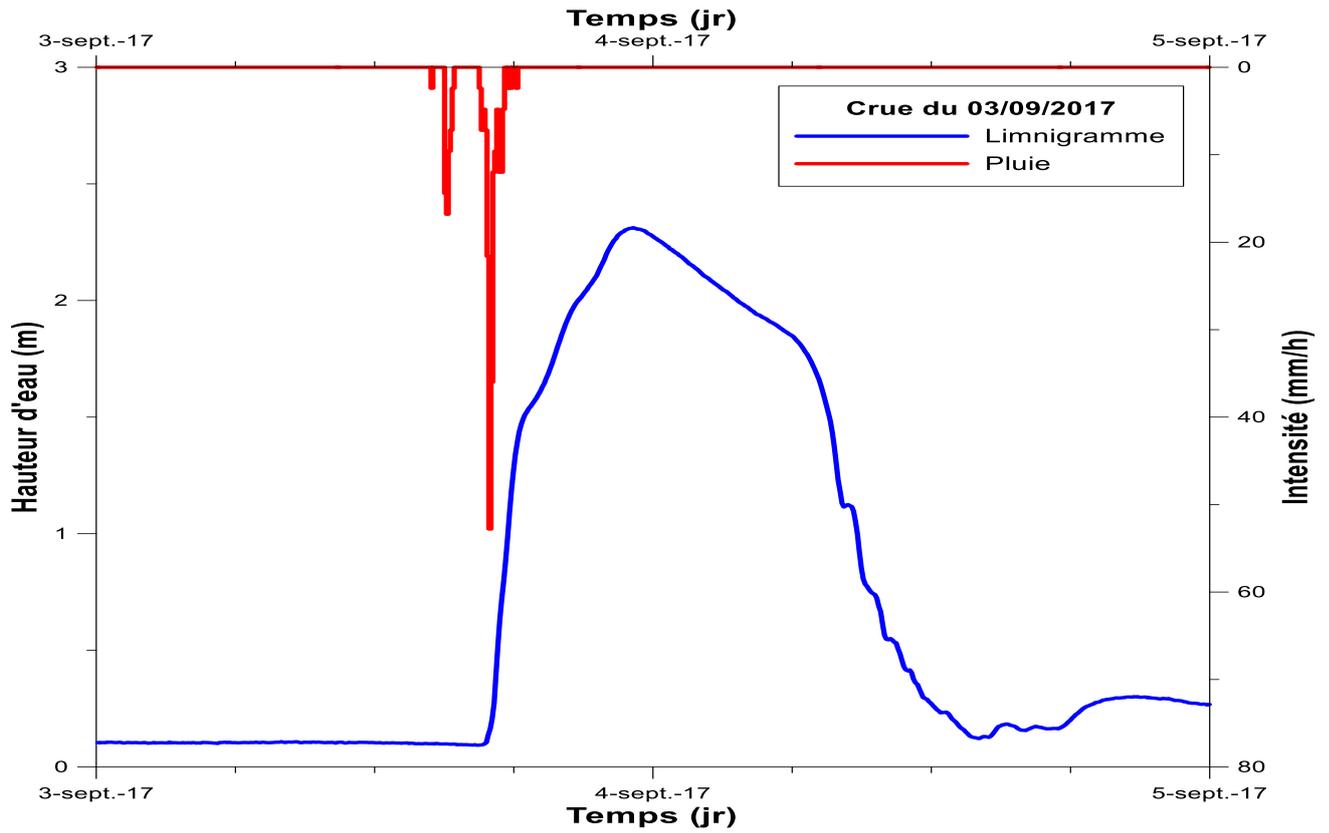
o. Limnigramme de la crue du 21/08/2017



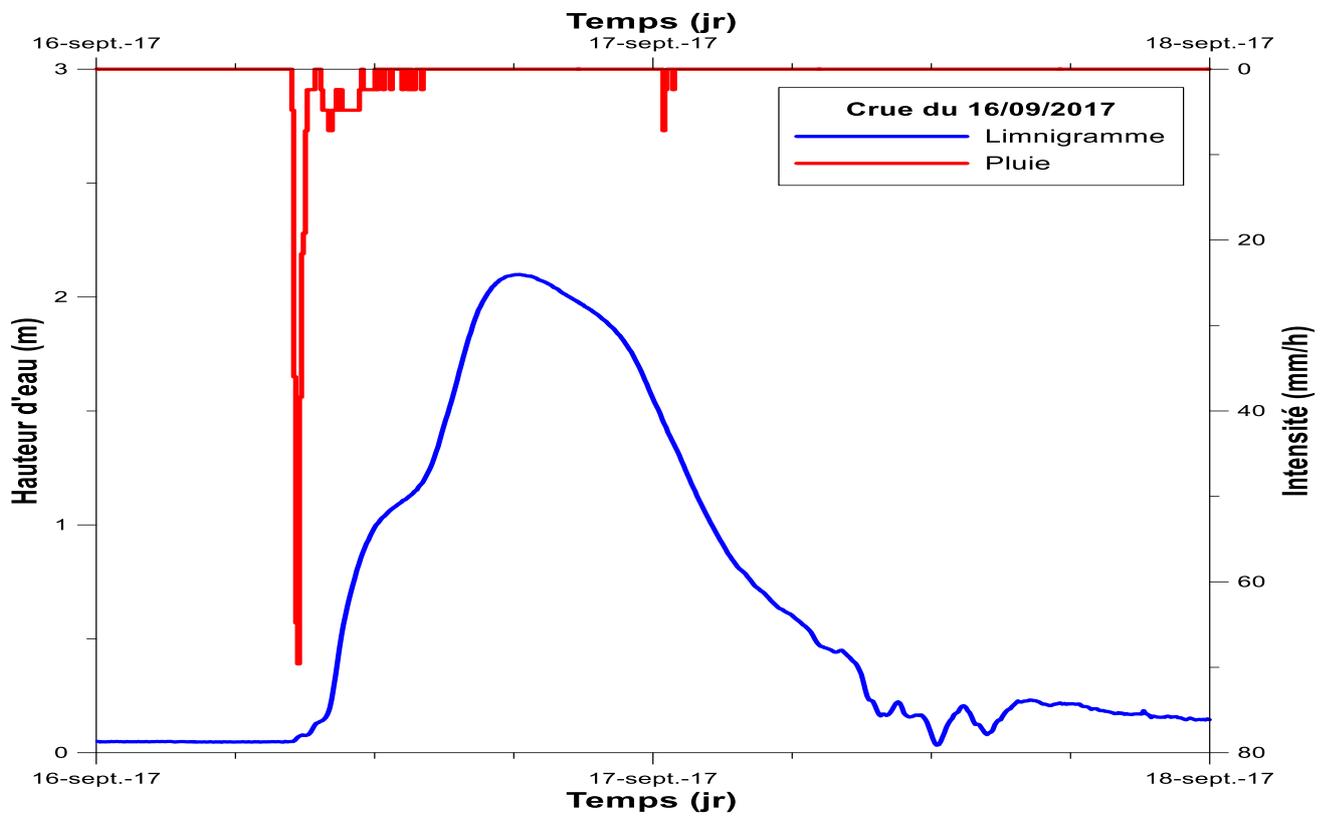
p. Limnigramme de la crue du 23/08/2017



q. Limnigramme de la crue du 26/08/2017

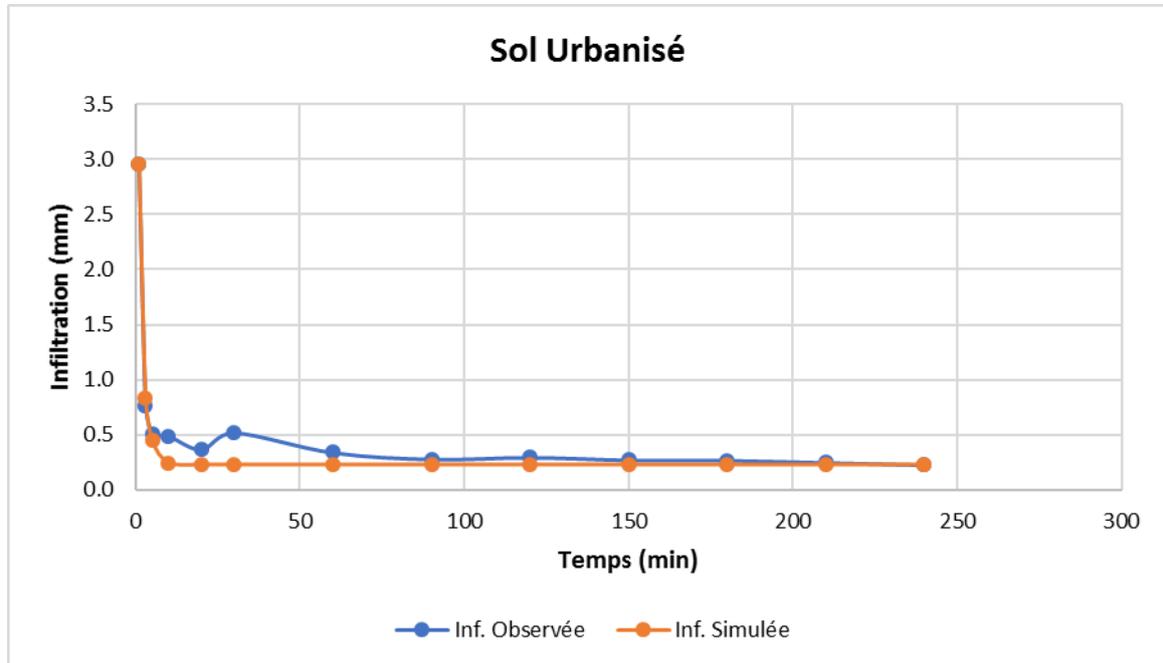


r. Limnigramme de la crue du 03/09/2017

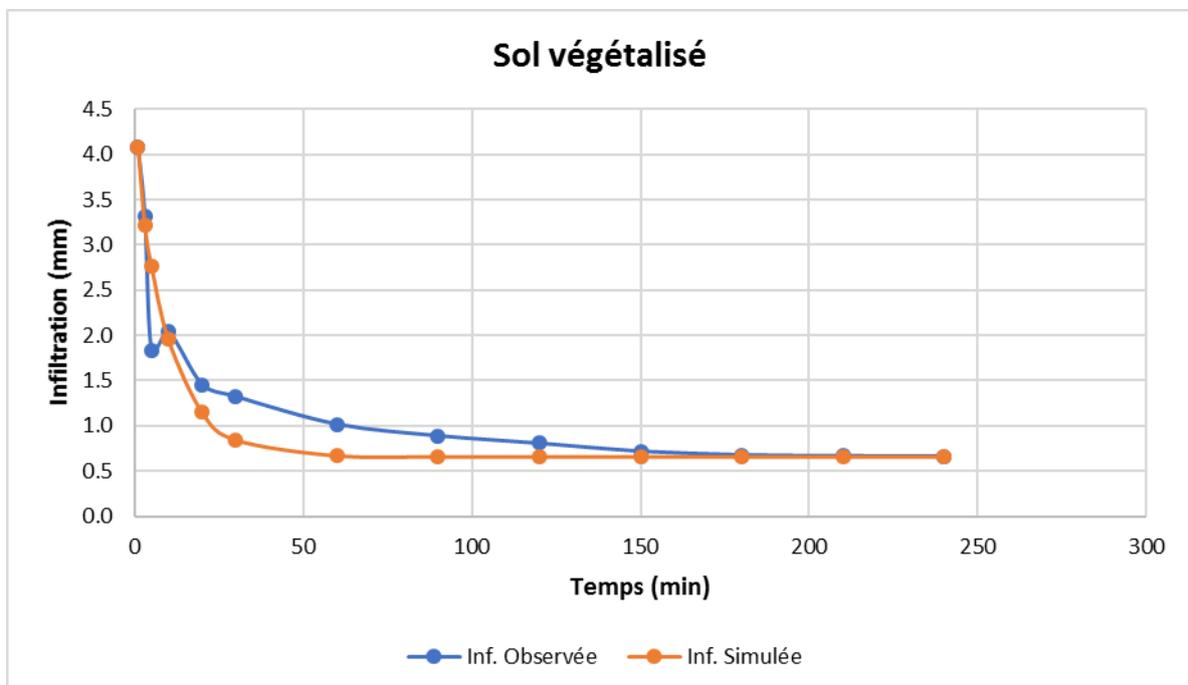


s. Limnigramme de la crue du 16/09/2017

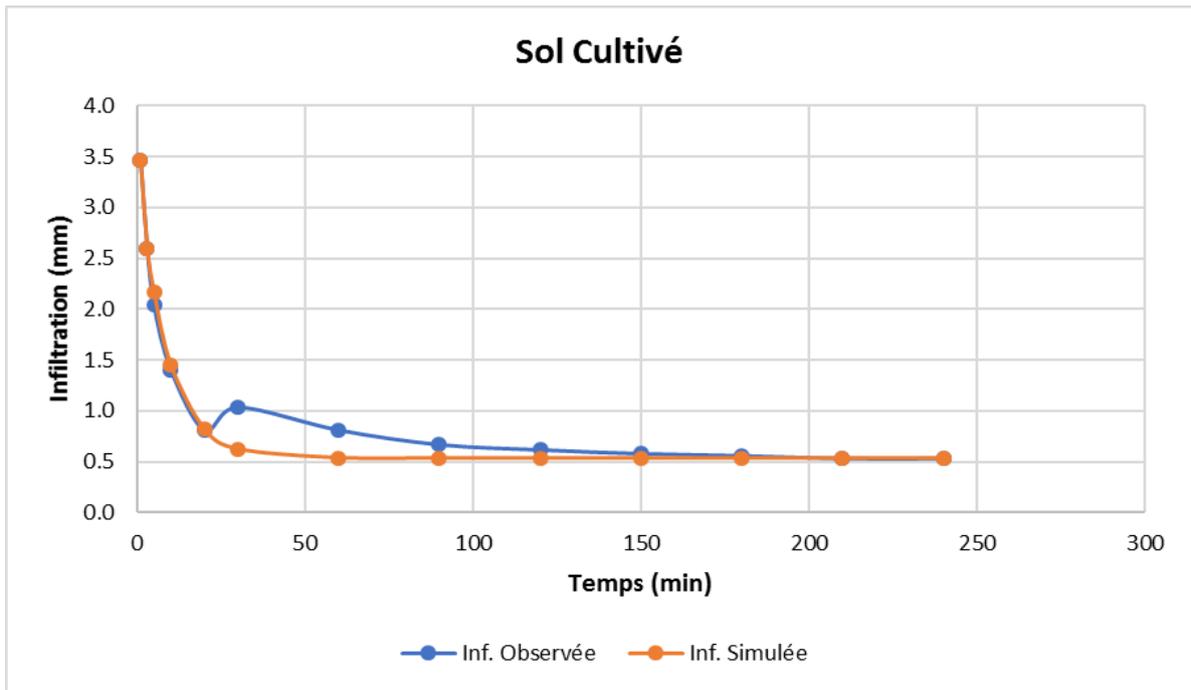
**Annexe 3 : Courbes des valeurs d'infiltration mesurées au double anneau**



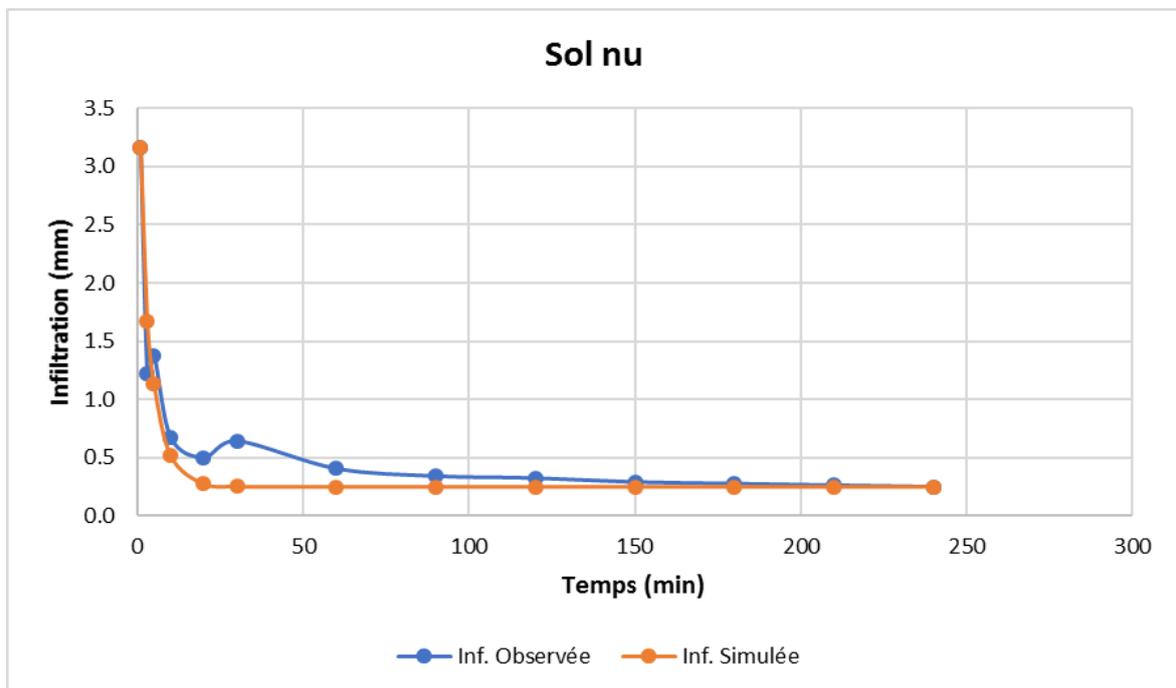
**a. Courbe des valeurs d'infiltration du sol urbanisé**



**b. Courbe des valeurs d'infiltration du sol végétalisé**

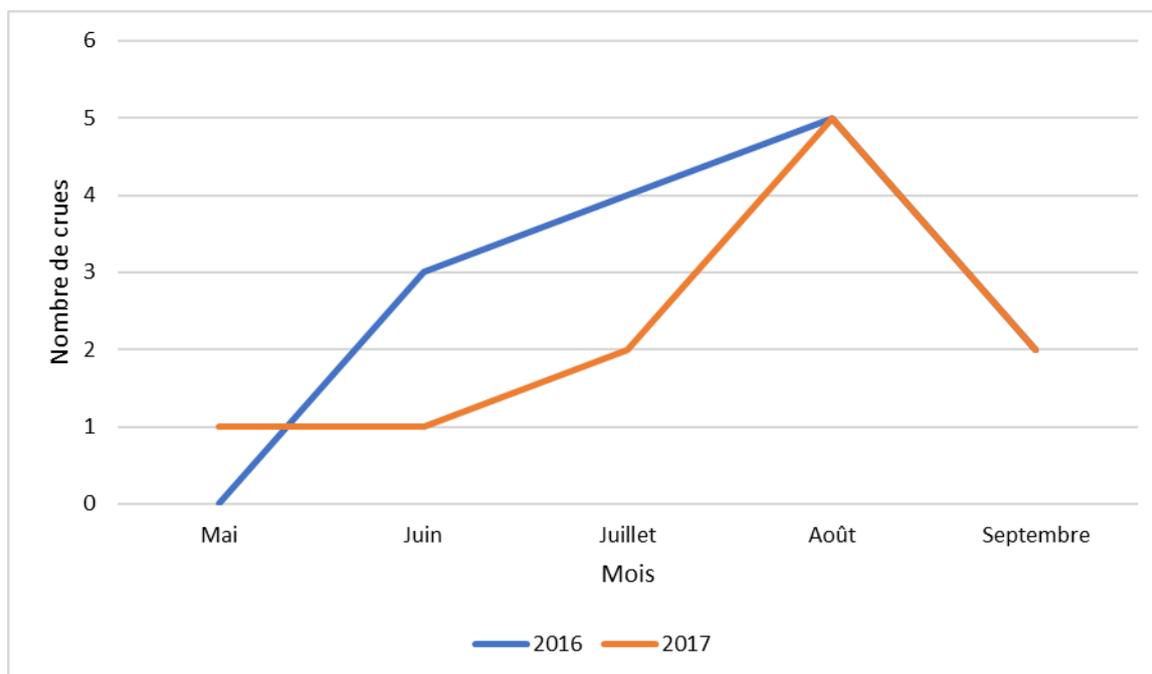


c. Courbe des valeurs d'infiltration du sol cultivé



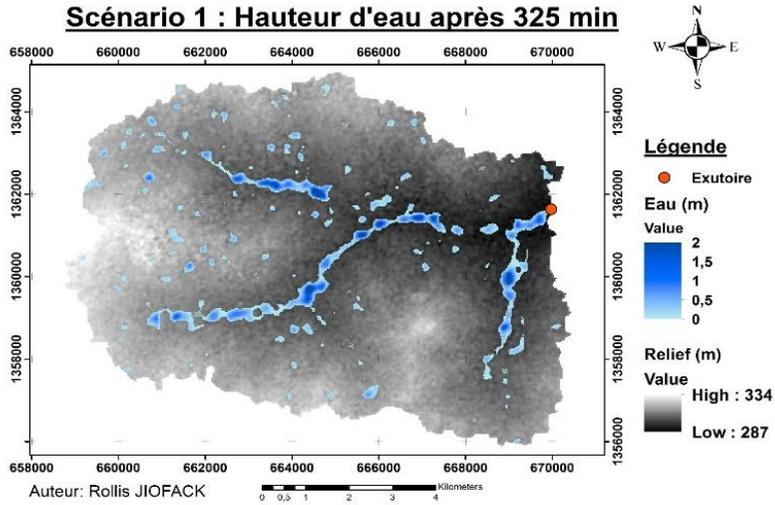
d. Courbe des valeurs d'infiltration du sol nu

**Annexe 4 : Courbe évolutive du nombre de crues sélectionnées**

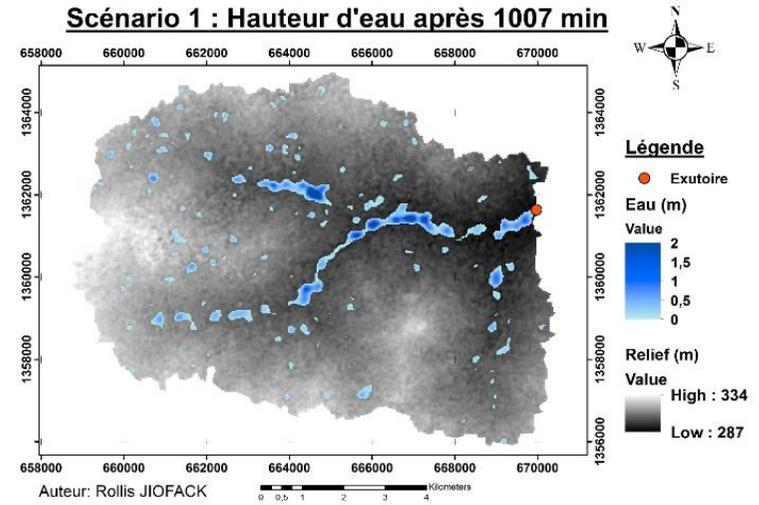


**Annexe 5 : Cartes d'inondations du scénario 1**

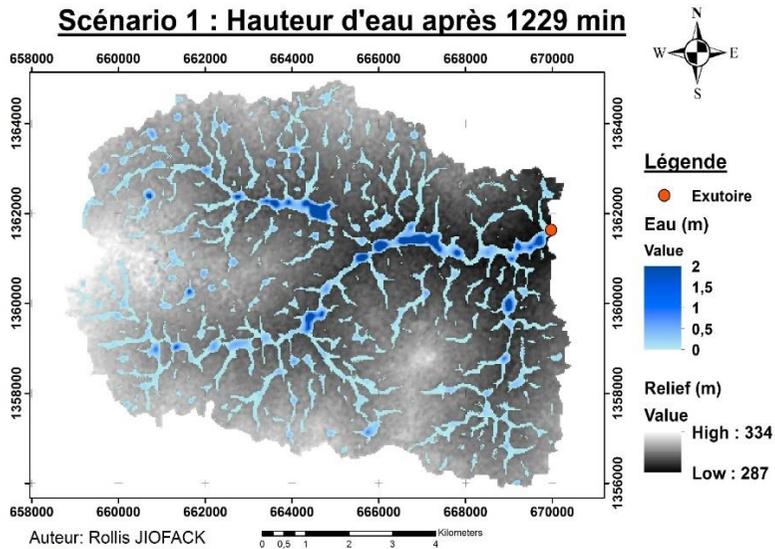
**Scénario 1 : Hauteur d'eau après 325 min**



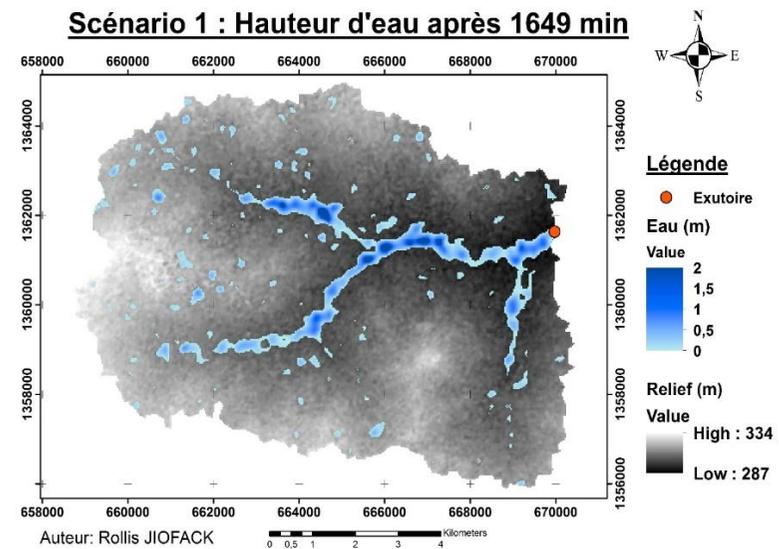
**Scénario 1 : Hauteur d'eau après 1007 min**



**Scénario 1 : Hauteur d'eau après 1229 min**

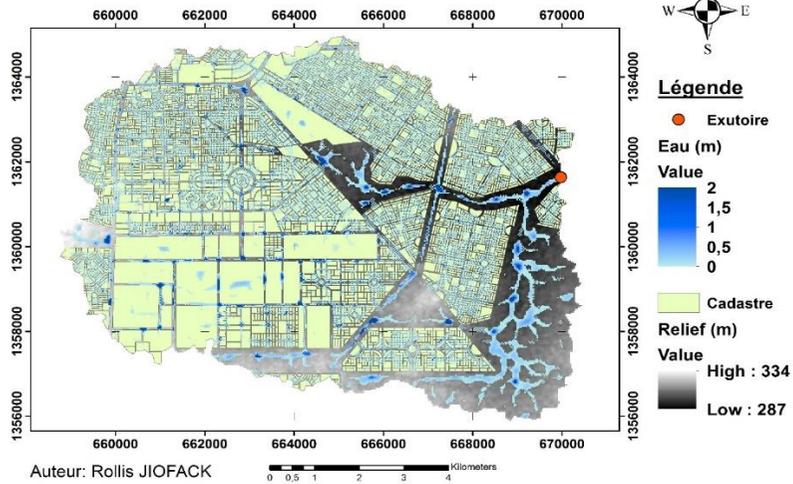


**Scénario 1 : Hauteur d'eau après 1649 min**

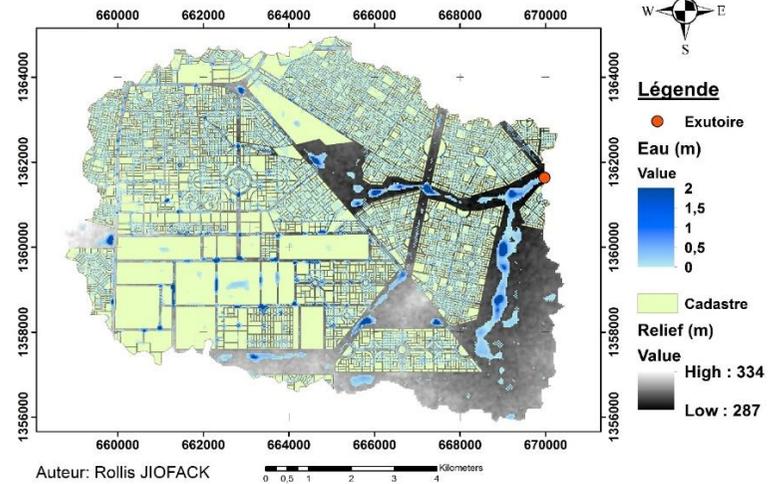


**Annexe 6 : Cartes d'inondations du scénario 2**

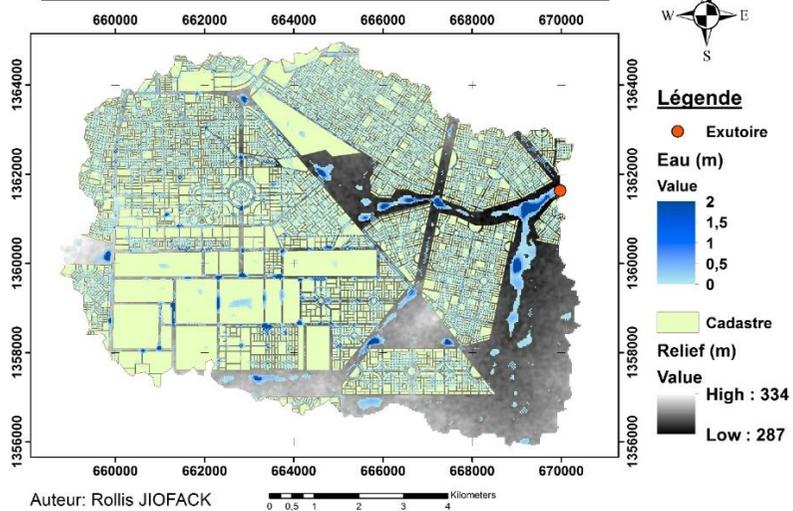
**Scénario 2 : Hauteur d'eau après 59 min**



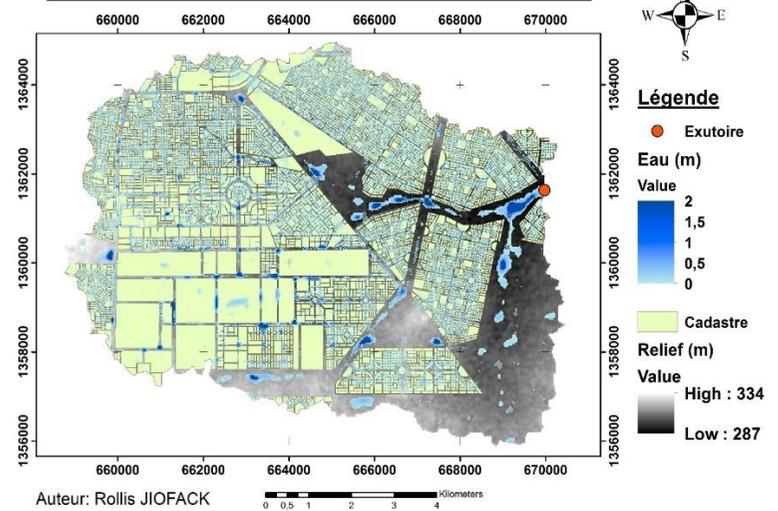
**Scénario 2 : Hauteur d'eau après 252 min**



**Scénario 2 : Hauteur d'eau après 542 min**



**Scénario 2 : Hauteur d'eau après 809 min**



**Annexe 7 : Quelques modèles de simulations d'inondation existants**

Modèle	Applicabilité	Forces	Limites	Equations Gouvernantes
<b>XP2D</b>	Il simule : les processus naturels de ruissellement pluviométrique ; les performances hydrauliques des systèmes de drainage et une analyse du transport de polluants dans les rivières, les plaines inondables et les eaux souterraines.	Routage unidimensionnel et bidimensionnel totalement intégré		Équation complète de St. Venant en une dimension ; Equations complètes en 2 dimensions de la dynamique des eaux peu profondes
<b>MIKE FLOOD and MIKE 21</b>	C'est un logiciel de simulation d'inondation, permettant de modéliser les rivières, les plaines inondables, les inondations dans les rues, les réseaux de drainage, les zones côtières, les brèches de digues et de barrages	Routage unidimensionnel et bidimensionnel totalement intégré		Varie selon le modèle intégré utilisé (MOUSE, MIKE 11 ou MIKE 21)
<b>USACE HEC-RAS</b>	La version actuelle du programme peut remplir quatre fonctions : (1) routage à écoulement stable, (2) routage à écoulement instable, (3) écoulement à la limite mobile pour l'analyse du transport des sédiments et (4) analyse de la qualité de l'eau.	Considère les effets des obstacles en aval tels que les effets de remous Les données de sortie peuvent être entrées dans le SIG pour produire des cartes d'inondation	Intensif en main-d'œuvre et prenant beaucoup de temps Des problèmes d'instabilité peuvent survenir	Les équations qui gouvernent varient en fonction de la fonction attribuée. HEC-RAS peut remplir quatre fonctions : Acheminement constant Routage à flux instable Débit limite mobile pour l'analyse du transport des sédiments

## Modélisation des crues dans une zone semi-urbaine de Grand-Ouaga (Burkina Faso)

		Permet le routage dynamique du réservoir		Analyse de la qualité de l'eau
<b>FLO-2D</b>	Ce logiciel peut simuler une rupture de barrage, une inondation en zone urbaine et sur des plaines inondables en 2 dimensions et un écoulement dans des canaux confinés	Routage bidimensionnel	Peut ne pas convenir aux zones où l'eau s'est accumulée ou si la surface de l'eau est très plate	Equation dynamique du moment d'onde ; Équation de continuité
<b>WinDAMB</b>	Analyse de l'érosion dans un réservoir en terre et végétatif pour déterminer la capacité de décharge du déversoir principal et auxiliaire	Estimation de l'érosion basée sur les paramètres d'entrée géotechniques et l'état de la végétation	Ne prend pas en compte le flux d'infiltration dû à l'érosion	N'achemine pas l'hydrogramme de brèche en aval et utilise l'acheminement de piscines de niveau pour la simulation d'une brèche dans un barrage
<b>NWSFLDWAV</b>	Analyse des ruptures et de l'érosion interne des canalisations ; De plus il peut analyser les écoulements dans des régimes d'écoulement mixte dans un système de voies navigables interconnectées	Considère les effets des obstacles en aval tels que les effets de remous	La calibration prend énormément de temps ; Ne prends pas en compte toutes les conditions fluviales complexes	Équations de St. Venant unidimensionnelles ; Equations dynamique implicite & explicite des ondes ; Equations de St. Venant à flux instable
<b>USACE HEC-HMS</b>	Rupture de barrage en béton et en terre	Facilité d'utilisation du programme ; Intrinsèquement stable	Le routage de piscines de niveau ne s'applique pas à certains réservoirs.	Equation de continuité et relation analytique ou empirique entre stockage de réservoir