



**FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT
DE SANON BURKINA FASO**

**MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPÉCIALITÉ INFRASTRUCTURES ET RÉSEAUX HYDRAULIQUE (IRH)**

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

Oumar ABDOU NOUHOU (20150401)

Travaux dirigés

Sous la Direction de : **Mahamadou KOÏTA** Maître de Conférences (CAMES)

Sous l'encadrement de : **Dial NIANG** Maître Assistant (CAMES)

Laboratoire Eau Hydrosystème et Agriculture (LEHSA)

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. Angelbert BIAOU**

Membres et correcteurs : **Dr Vivien Chaim DOTO
Mr Moussa FAYE**

Promotion

[2018/2019]

DÉDICACES

Je dédie tous ce travail à :

Mes parents pour leurs soutiens et leurs encouragements ;

Mes frères et sœurs ;

Mes enseignants, qui grâce à leurs enseignements m'ont permis d'arriver là où je suis ;

Mes amis, pour leurs présences à mes côtés depuis le départ.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble du personnel du laboratoire LEHSA-2iE et de IRC pour leur disponibilité et leur convivialité dans le travail.

Plus précisément je souhaiterais remercier mes maitres de stage Prof. Mahamadou KOÏTA, Dr Dial NANG, Dr Narcisse pour leurs aides pour la réussite de ce travail. Ils se sont montrés très à l'écoute, pédagogues et compréhensifs. Ils ont toujours répondu aux questions que je me posais. Leur bonne humeur quotidienne a rendu ce stage très agréable.

Mes remerciements vont également à l'équipe qui m'a assisté sur le terrain pour les différents travaux : M. Maïga SALFO, M. Jean Pierre ZONGO, Palingba Aimé Marie DOULKOM, Raymond Leonel KAMDEM, Monsieur Parias Frank Yannick SABDANO, et Fridolin IRAKEZA.

Je ne finirais pas mes remerciements sans adresser une mention spéciale à mes parents, qui m'ont soutenu, tout au long de mes études, Papa, Maman recevez ici l'expression de ma reconnaissance et de mes remerciements, puisse Dieu vous récompenser.

AVANT-PROPOS

Ce travail de mémoire de fin d'études a été réalisé dans le cadre du projet interafricain de recherche sur la ressource en eau souterraine dénommé **GRIBA (Groundwater Resources in Basement Rocks of Africa)** financé par l'Union Européenne (UE) et l'Union Africaine (UA). Lancé en 2012, ce projet a une durée de 3 ans et réunit des partenaires de 3 pays africains : le Bénin (l'Université d'Abomey Calavi), le Burkina Faso (l'Université de Ouagadougou et l'institut 2iE), l'Ouganda (la Direction de l'Eau et l'Université Makerere) ; ainsi que deux partenaires européens, à savoir la Queen's University de Belfast en Irlande du Nord et l'IRD. Dans le but de mieux connaître les ressources en eau souterraine en zone de socle africain, le projet GRIBA s'est fixé les objectifs suivants :

- **Quantifier les propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle** (y compris les volumes d'eau qui y sont stockés) grâce au développement d'une nouvelle approche qui s'appuie sur des outils complémentaires, notamment la méthode de Résonance Magnétique des Protonique (RMP) ;
- **Élaborer des scénarios de gestion durable des eaux souterraines.** La nouvelle connaissance des propriétés hydrogéologiques des aquifères permettra de construire des modèles prédictifs pour définir des scénarios d'exploitation appropriés ;
- **Soutenir la mise en place d'un réseau de chercheurs africains** concernés par les aquifères de socle.

RÉSUMÉ

Les liaisons entre les eaux de surface et les eaux souterraines jouent un très grand rôle en hydrologie et en hydrogéologie. Le but de ce travail est d'étudier le fonctionnement hydrologique, les interactions potentielles, et les relations existantes entre les eaux de surface et les eaux souterraines sur le bas du bassin versant de Sanon.

À cette fin nous avons commencé par caractériser le bassin versant, puis constituer un jeu de données en regroupant celles que nous avons pu trouver sur la zone en plus de celles que nous avons collectées : pluviométrie, mesures de débits, mesures de hauteur de nappe souterraine (continues et ponctuelles). Ensuite, nous avons mis en relation ces données à travers des superpositions d'hydrogrammes de pluie, de crue et de fluctuation des niveaux des nappes afin d'observer les différents inter-agissements existants entre elles.

Et Enfin nous nous sommes penchés plus particulièrement sur l'analyse de ces hydrogrammes et le fonctionnement de l'hydrosystème pour pouvoir faire nos interprétations.

Mots Clés :

1 – Bassin Versant

2 – Eaux de surface

3 – Eaux souterraine

4 - Hydrologie

5 – Sanon

ABSTRACT

The connection between surface water and groundwater is very important in hydrology and hydrogeology. The purpose of this work is to study the hydrological functioning, potential interactions, and existing relationships between surface water and groundwater in the bottom of the Sanon watershed.

To accomplish this, we began by characterizing the watershed, then assembled a set of data by grouping those we could find on the area in addition to those we had collected: pluviometry, flow measurements, groundwater depth measurements (continuous and spot). And then we related these data by superimposing hydrographs of rain, flood and fluctuation of groundwater levels in order to observe the different inter-actions between them.

And finally, we focused more specifically on the analysis of these hydrographs and the hydrosystem's functioning in order to make our interpretations.

Key words:

1 - Watershed

2 - Watercourse

3 - Groundwater

4 - Hydrology

5 – Sanon

LISTE DES ABREVIATIONS

LEHSA : Laboratoire Eaux, Hydrosystème et Agriculture

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

AEP : Adduction en Eau Potable

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

ERT : Electrical Resistivity Tomography

EM : Electromagnétique

GRIBA : Groundwater Ressources in Basement Rock of Africa

RMP : Résonance Magnétique des Protons

IRC : International Water and Sanitation Center

SOMMAIRE

Dédicaces.....	ii
Remerciements	iii
Avant-propos.....	iv
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
Liste des abreviations	vii
Liste des photos	10
Liste des tableaux.....	11
Liste des figures.....	12
I. Introduction.....	13
II. Synthèse Bibliographique	14
III. Situation géographique	15
3.1. Climat.....	16
3.2. Relief.....	19
3.3. Végétation	19
3.4. Géologie.....	19
3.5. Hydrogéologie.....	20
3.6. Pédologie	21
3.7. Situation socio-économique	22
IV. Matériels et Méthodes.....	23
4.1. Matériel.....	23
4.2. Méthodes.....	23
V. Résultats et discussion.....	29
VI. Conclusion et Recommandations.....	35
Références Bibliographie.....	36
ANNEXES.....	37

LISTE DES PHOTOS

Photos 1 : Station météorologique de Sanon.....	18
Photos 3: Collecte des données automatiques piézomètre S19.....	27
Photos 2: Mesure manuelle niveau du piézométrique.....	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Description des piézomètres	27
Tableau II : Paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant de Sanon	29
Tableau III : Coefficients de tarissement des hydrogrammes de ruissellement de Sanon de 2018-2019.....	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation du site de Sanon	16
Figure 2 : Zones climatiques du Burkina Faso (1980 -1990).....	17
Figure 3 : Moyennes pluviométriques mensuelles (2012 - 2016).....	17
Figure 4 : Carte géologique du Burkina Faso (Hottin et Ouédraogo, 1975).....	19
Figure 5 : Profil d'altération typique au sein de roches de socle (Maréchal et al., 2004).....	20
Figure 6 : Coupe lithologique d'un forage du site expérimental de Sanon (modifié d'après BRGM, 1991).....	21
Figure 7: Parabole de vitesse.....	25
Figure 8 : Localisation des piézomètres de SANON.	26
Figure 9 : Bassin Versant Sanon	29
Figure 10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Sanon	30
Figure 11 : Courbe de tarage du bassin versant de Sanon.....	31
Figure 12: Hydrogramme de crue du bassin versant de Sanon pour la pluie du 25 septembre 2018	31
Figure 13 : Courbe de tarissement de l'hydrogramme du 25 Septembre 2018	33
Figure 14 : Fluctuation du niveau piézométrique S8 et Débit de rivière 01 Septembre 2018.....	33

I. INTRODUCTION

L'importance de l'eau pour la vie et comme composante de l'écosystème mondial n'est plus à démontrer. L'histoire de l'eau et celle des hommes sont intimement liées. De ce fait, la recherche de points d'eau a longtemps mobilisé les énergies et les premières civilisations sont nées sur le cours des grands fleuves nourriciers. Aussi, cette ressource qui répond aux besoins fondamentaux de l'homme est un potentiel économique important particulièrement pour générer et entretenir la prospérité à travers certaines activités telles que l'agriculture, la pêche, la production d'énergie, l'industrie, le transport et le tourisme. Cependant, l'eau douce qui ne représente que 2,5% du volume total de l'eau de la planète (97,5% pour l'eau salée) est inégalement répartie à la surface de la Terre. C'est une ressource qui se raréfie dans beaucoup de régions du monde, notamment en Afrique subsaharienne. Par ailleurs, la demande en eau potable pour la satisfaction des besoins en eau de la population est de plus en plus forte.

Malheureusement, tout ceci se passe dans un contexte climatique où la pluie, principale pourvoyeuse de l'eau douce, présente une forte variabilité spatio-temporelle avec une tendance à la baisse sur une grande partie de l'Afrique (Paturel et al., 2010).

La question de l'eau reste pour le Burkina Faso, une question majeure de développement et la communauté internationale se mobilise aux côtés de l'État afin que l'eau potable et l'assainissement soient accessibles à tous, la sécurité alimentaire assurée et pour promouvoir la gestion intégrée des ressources en eau au plan national et transfrontalier.

Dans le bassin versant de Sanon, la problématique des ressources en eau est vitale pour les populations. En effet, la baisse de la pluviométrie, les sécheresses répétées, la pression démographique et les techniques de production inadaptées ont engendrés un déséquilibre écologique profond, avec l'aggravation de certains phénomènes comme, la destruction des habitats aquatiques, l'érosion éolienne et hydrique, les rejets de déchets et diverses pollutions, etc. C'est dans ce contexte que le projet GRIBA a décidé d'installer un dispositif expérimental pour un suivi des différentes ressources. Notre thématique qui s'inscrit dans cette dynamique, cherche à étudier le fonctionnement hydrologique de ce bassin en vue d'établir la relation eaux de surface-eaux souterraine. Cette recherche a eu pour objectif général la connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin de Sanon. Il s'agira spécifiquement de procéder :

- à la détermination des paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant ;
- à la caractérisation hydrologique des écoulements de surface ;

- à l'étude du fonctionnement hydrodynamique des eaux ;
- à l'établissement de la relation eaux de surface-eaux souterraines

Ce travail a été structuré en six (06) grandes parties :

La première et la deuxième partie sont consacrées respectivement à l'introduction et à la synthèse bibliographique/ Puis suivra la troisième partie regroupant le contexte général de la zone d'étude. Quant à la quatrième partie, elle présente le matériel et les méthodes. La cinquième partie quant à elle, présente les résultats et la discussion. Enfin, la sixième partie est consacrée à la conclusion et aux recommandations.

II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Plusieurs recherches ont été effectuées sur le site expérimental de Sanon. Il s'agissait notamment des mesures piézométriques, des essais de pompages, des analyses physico-chimiques et des mesures géophysiques (SE, trainé électrique, TRE et RMP). Ces activités ont été menées pour une grande part par le « BRGM-AQUATER en 1991 ; Compaoré en 1997 ; Vouillamoz en 2003 ; Toé en 2004 ; Outoumbe en 2014 ; Soro et al. (2015) et Yonli en 2016 ». Bien vrai qu'elles avaient des objectifs différents, elles ont toutes contribué à une meilleure compréhension du complexe atmosphère-sol-nappe. Les premiers travaux avaient comme objectif principal la recherche des zones favorables pour la réalisation des forages à débit productif afin de satisfaire les besoins en eau des cultures. Ainsi, 16 forages furent réalisés avec des débits de l'ordre de $1\text{m}^3/\text{h}$ (le plus faible) et de $12\text{m}^3/\text{h}$ (le plus important).

En 1997, une seconde étude fut conduite par Compaoré (1997) avec pour objectif principal l'évaluation de la fonction capacitive des altérites du bassin de Sanon. La porosité des altérites fut estimée à 2- 3%.

Quant aux travaux de Vouillamoz (2003) et Toé (2004), Ils ont permis d'évaluer l'apport des techniques géophysiques à l'étude des aquifères de socle. À cela s'ajoutent les travaux de Outoumbé en 2014 qui s'orientaient vers la caractérisation hydro-géophysique et la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du site.

En 2015 et 2016 respectivement les travaux de Soro et Yonli ont permis une meilleure compréhension du fonctionnement de cet aquifère qui se trouve localisé dans un milieu de socle fracturé.

En 2016 les travaux de Guilguet ont consisté à suivre le processus de transfert de l'eau de la zone à travers les mesures des composantes du bilan sur trois états de surface différents que sont : une parcelle dégradée, une parcelle de mil et une parcelle d'arachide. Cependant, le dysfonctionnement de certains appareils a limité ses travaux sur deux parcelles à savoir la parcelle dégradée et celle du mil.

Ces travaux ont été donc reconduits en 2017 par NOALI pour tenir comptes de toutes les parcelles mais aussi d'avoir une meilleure compréhension du bilan hydrique en ajoutant d'autres paramètres comme le suivi des paramètres hydraulique de surface et les propriétés physiques du sol. Des mesures de débit sur le cours d'eau afin d'élaborer une courbe de tarage ont été également entrepris.

III. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

Le site expérimental de Sanon (figure 1) est situé dans la province du Kourweogo (dans la région du plateau central), à 30 km au nord-ouest de la ville de Ouagadougou. Il est accessible en toutes saisons par une route bitumée sur environ 20 kilomètres jusqu'à Laye, puis par une piste secondaire en bifurquant par la gauche. Localisé par deux points de coordonnées géographiques $12^{\circ}26'18''\text{N}$; $1^{\circ}48'47''\text{W}$ et $12^{\circ}28'11''\text{N}$; $1^{\circ}43'81''\text{W}$, le site se situe dans une entité hydrologique (sous-bassin versant du Nazinon ou Volta Rouge) d'environ une dizaine de kilomètres carrés caractérisée par un relief très peu contrasté. Des cuirasses latéritiques culminant entre 350 et 370 m constituent les limites de cette entité hydrologique. La partie centrale du site est caractérisée par une large vallée à fond relativement plat de pente orientée de l'Est vers l'Ouest.

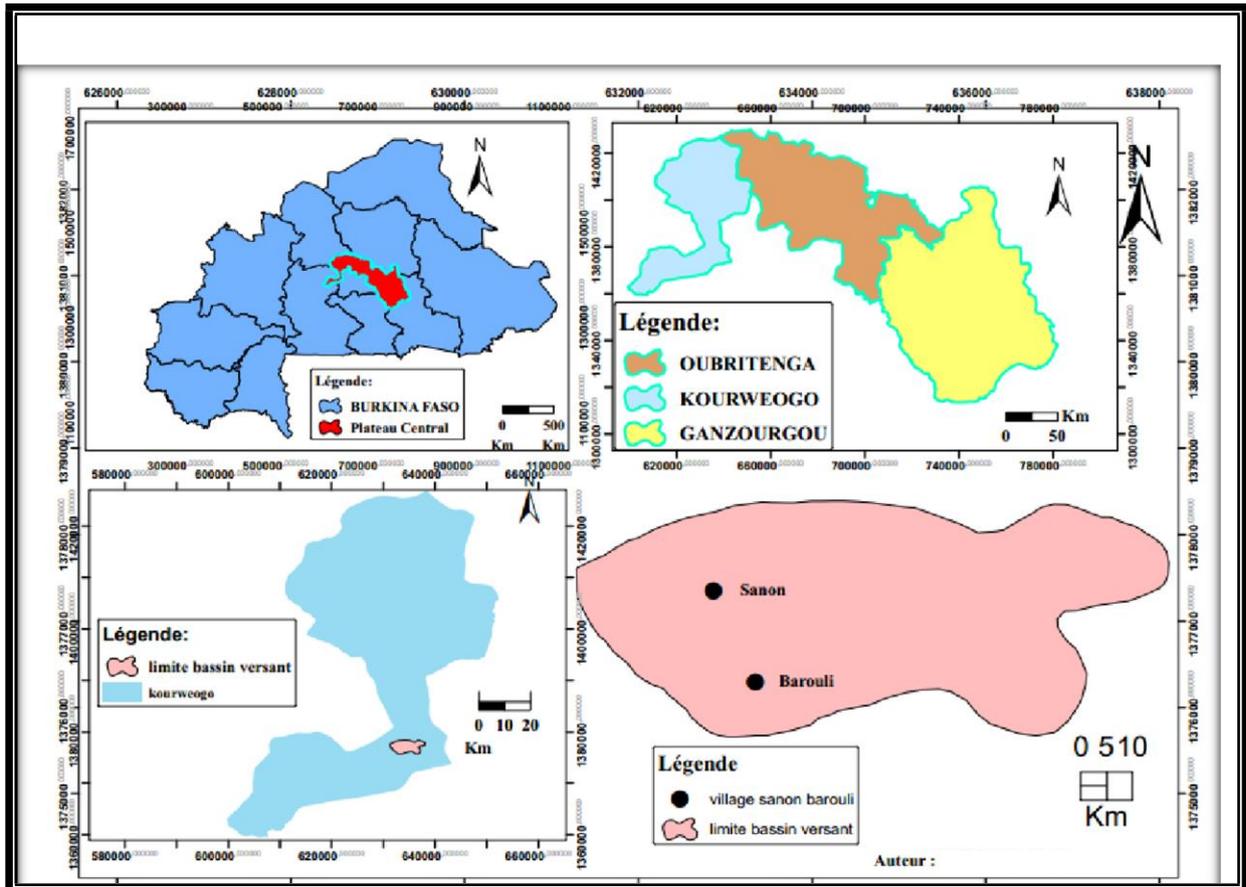


Figure 1: Localisation du site de Sanon

3.1. CLIMAT

Le bassin versant de Sanon est situé en zone climatique soudano-sahélienne (figure 2) avec la présence de deux saisons : une courte saison des pluies de 3 à 4 mois et une longue saison sèche s'étendant sur 8 à 9 mois dans l'année. La moyenne pluviométrique interannuelle est autour de 700 mm (1988 à 1994).

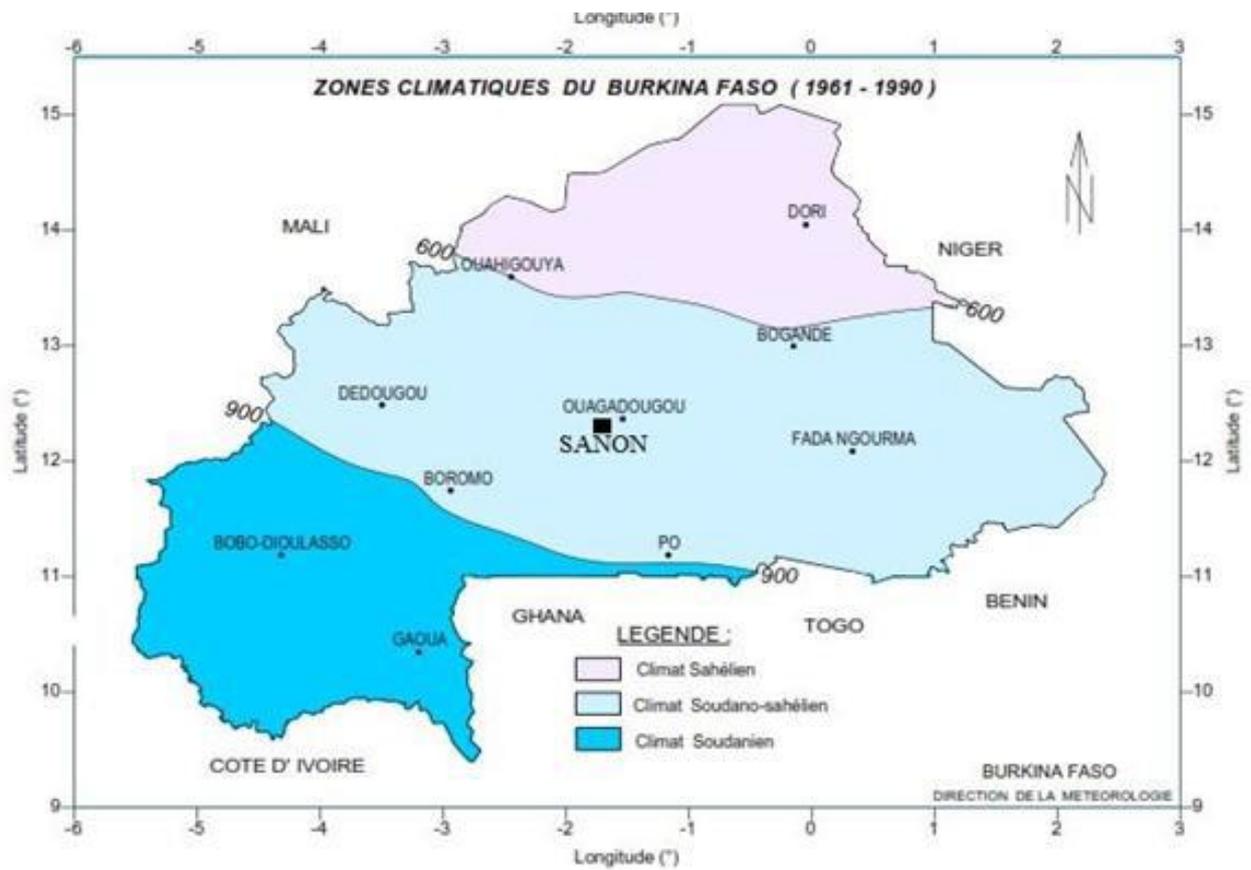


Figure 2 : Zones climatiques du Burkina Faso (1980 -1990)

Le suivi des données pluviométriques (figure 3) collectées depuis le démarrage du projet (2012 à 2016) montre que les mois les plus pluvieux sont juin, juillet, août et septembre avec le maximum au mois d'août avec un cumul pouvant atteindre les 300 mm.

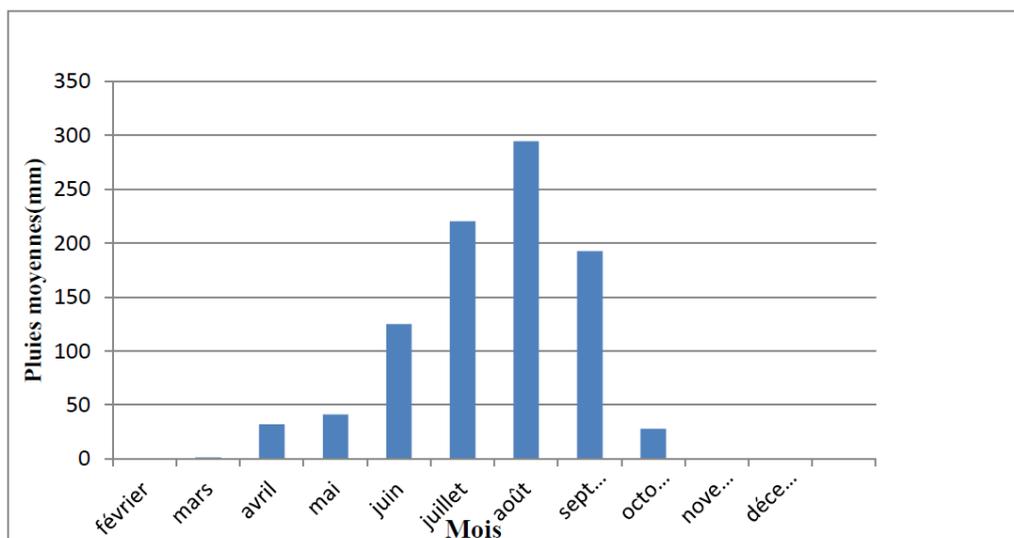


Figure 3 : Moyennes pluviométriques mensuelles (2012 - 2016)

La pluie moyenne interannuelle se situe entre 600 mm et 900 mm. Quant à l'évapotranspiration de référence, la moyenne inter mensuelle est de l'ordre de 136 mm (1988 à 1994) ce qui montre le caractère déficitaire du bilan hydrique sur plusieurs mois à l'exception des mois de juillet, août et septembre où la pluviométrie est largement supérieure à cette évapotranspiration de référence (Compaoré, 1997). Les températures maximales mensuelles varient entre 24.9°C (janvier) et 32.9°C (avril). (Soro et al.). Cependant, les températures maximales journalières peuvent atteindre 44°C au moment des pics de chaleur (avril généralement). Le minimum des températures mensuelles (15 °C à 20 °C) est observé durant la période d'harmattan de novembre à février (Compaoré, 1997). Quant aux vents, ils sont modérés avec des vitesses moyennes pouvant avoisiner les 2.5 m/s en mai et juin. Durant la saison des pluies, leur vitesse tourne autour de 1,3 m/s contrairement à la zone sahélienne où durant la même période nous enregistrons des tempêtes de sable dénudant fortement les sols. Sur le bassin versant de Sanon les paramètres climatiques ont été suivis à partir d'une mini station météorologique (photo 1).



Photos 1 : Station météorologique de Sanon

3.2. RELIEF

Le relief est constitué des collines latéritiques au sommet tubulaire culminant entre 360 et 370 m. Ces cuirasses latéritiques qui affleurent au nord et au sud du site dominant d'une cinquantaine de mètre de dénivelée une large vallée à fond relativement plat, de pente générale orientée vers l'ouest. Cette vallée est drainée par un cours d'eau temporaire coulant d'est en ouest, il s'agit d'un sous bassin du Nazinon un des affluents du Nakambé.

3.3. VÉGÉTATION

La végétation de la zone d'étude est caractérisée par la savane steppe arbustive. On rencontre les espèces telles que *Khaya senegalensis*, *Lanhea acida*, *Zizyphus Mauritiana*, *Anogeissus leocapus*, *Acacia albida*, *Ficus gnafalocarpa* (Ringtounda, 1991), des arbustes et arbres du genre *Pilostigma reticulatum* dans les zones non cultivées situées dans la vallée.

3.4. GÉOLOGIE

La géologie du Burkina Faso est constituée à plus de 80% de socle Cristallin et Cristalloyphyllien (figure 4) et recouvert en discordance par des formations sédimentaires sur les frontières avec le Mali, et le Niger au Nord, le Benin et le Togo au sud. Selon la carte géologique générale du Burkina Faso de 1975 (Hottin et Ouédraogo, 1975 in Toé (2004) ; Comparé (1997)). Le site de Sanon fait partie de cette zone cristalline.

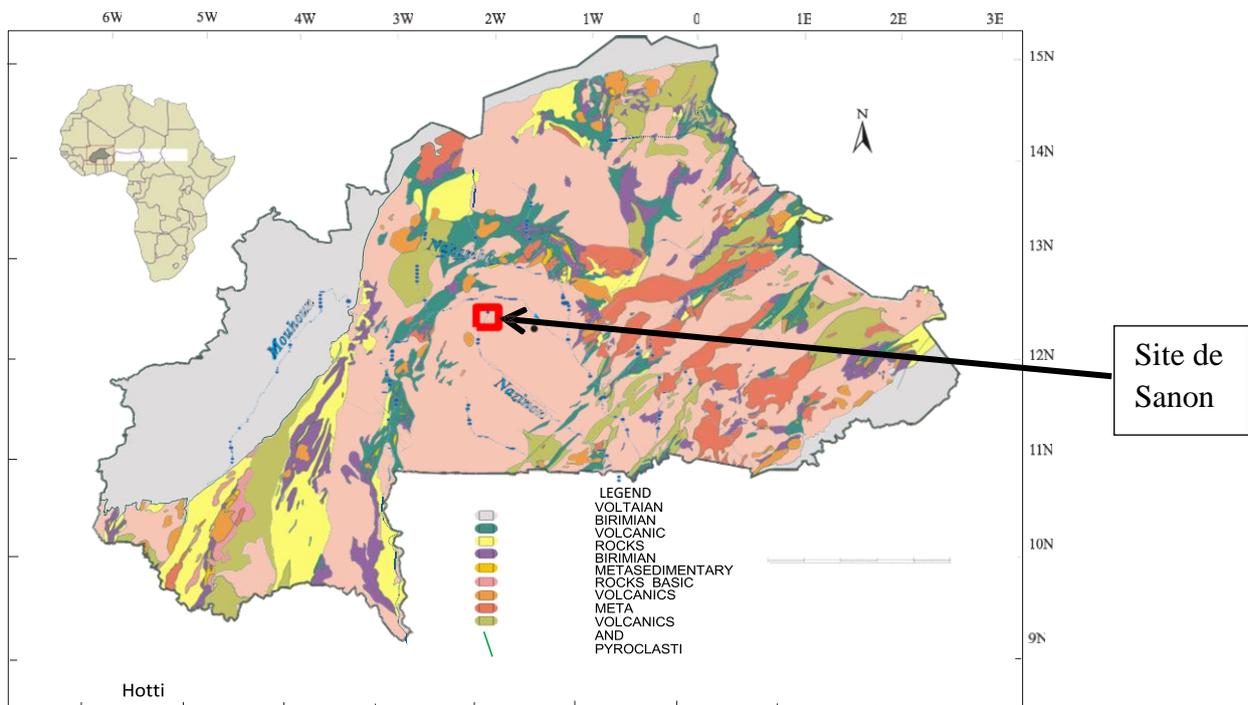


Figure 4 : Carte géologique du Burkina Faso (Hottin et Ouédraogo, 1975)

3.5. HYDROGÉOLOGIE

L'hydrogéologie du site de Sanon s'apparente au modèle conceptuel stratiforme proposé par Maréchal et al., 2004 ; Wyns et Lachassagne., 2005 ; et Dewandel et al., 2010. Ce modèle conceptuel d'aquifère à 3 couches (figure 5) est décrit du bas vers le haut comme suit :

- La roche saine, n'est perméable que très localement là où elle est affectée par des fractures d'origine tectonique, le plus souvent sub-verticales. La densité des fractures est plus faible que celles des fractures de la couche sus-jacente (Maréchal et al., 2004).
- La couche intermédiaire fissurée caractérisée par des fissures subhorizontales et sub-verticales où la densité décroît avec la profondeur (Delwandel et al., 2006) et assure une fonction transmissive (Chandra et al., 2008). En termes de production d'eau souterraine, les aquifères fissurés constituent une cible hydrogéologique prioritaire car ils assurent une fonction conductrice (forte transmissivité). Ils sont captés par de nombreux forages produisant des débits plus importants ($4.5\text{m}^3/\text{h}$ en moyenne et localement $18\text{m}^3/\text{h}$).
- Le manteau d'altérites (sapolite ou rigolite) provenant de la décomposition de la roche saine. C'est une couche poreuse, peu perméable et de nature capacitive (Wyns et al., 1999 ; Taylor and Howard, 2000 in Maréchal et al., 2004). Les aquifères des altérites quant à eux jouent un rôle capacitif (Compaoré, 1997). Ils ont une forte porosité d'interstices (Maréchal et al., 2004) constituant un réservoir d'eau important, mais malheureusement ils ne libèrent pas assez à cause de leur faible perméabilité. Capté par une dizaine de puits traditionnels (11 m de profondeur), il donne un débit d'exhaure faible (moins de 500 l/h).

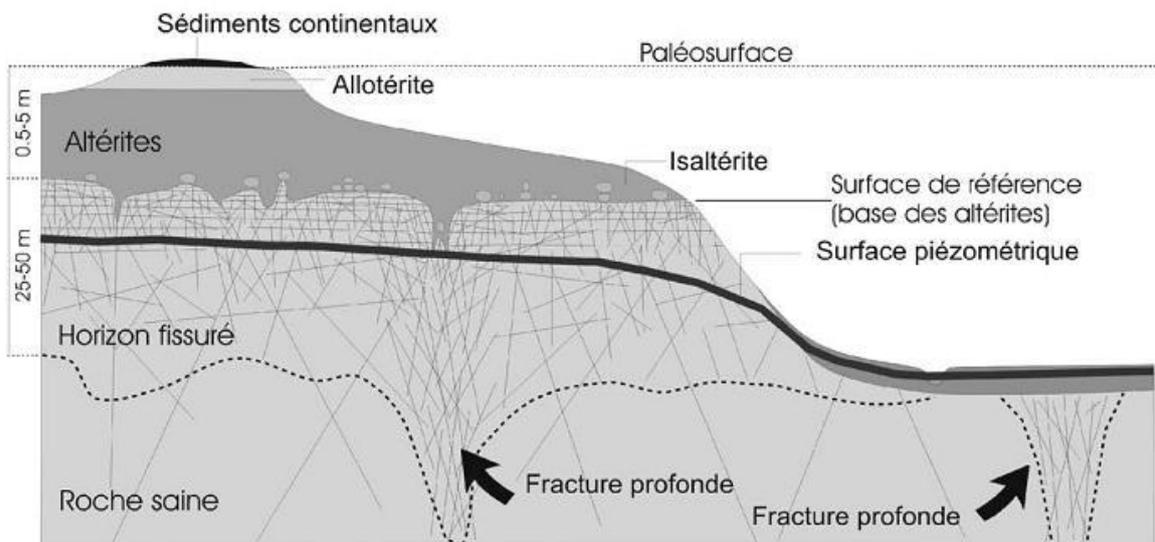


Figure 5 : Profil d'altération typique au sein de roches de socle (Maréchal et al., 2004)

3.6. PÉDOLOGIE

Les types de sols rencontrés dans le bassin versant sont généralement des sols homogènes. La composition structurale du sous-sol a été déterminée par des coupes lithologiques des forages (fig.6). L'horizon altéritique en couverture se compose le plus souvent d'une cuirasse d'épaisseur variant de 0 à 2 m, celui-ci est recouvert par des fines épaisseurs de sable absentes quand on se trouve au niveau des crêtes (Soro et al. 2015). Il se repose sur un horizon de silts et d'argiles latéritiques rouges ou jaunes (2 à 6 m) et une couche d'argile kaolinique plus épaisse (15 à 20 m) ; en dessous de ces formations apparaissent ensuite des arènes argilo-sableuses terminées par des arènes grenues (30 à 50 m) ; cette cuirasse est absente au centre du bassin (Compaoré et al. 1997).

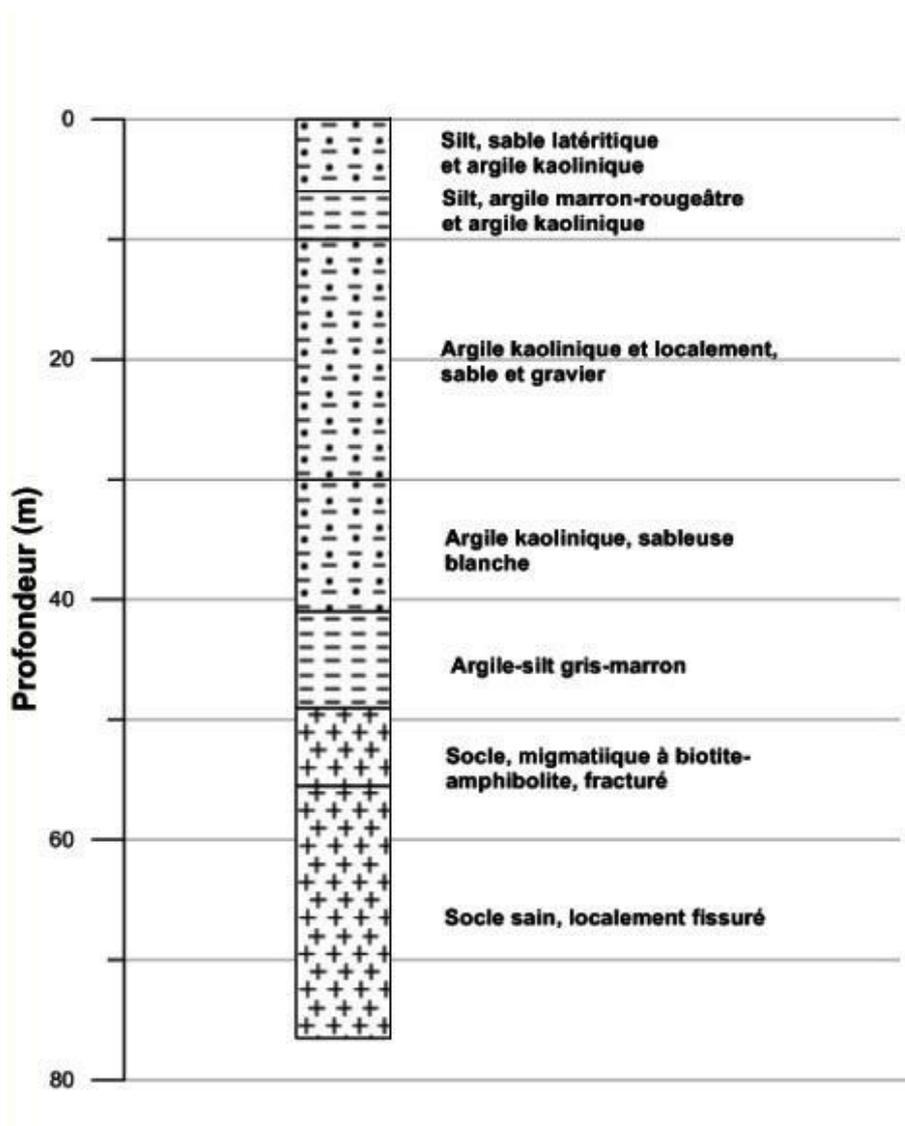


Figure 6 : Coupe lithologique d'un forage du site expérimental de Sanon (modifié d'après BRGM, 1991)

3.7. SITUATION SOCIO-ÉCONOMIQUE

En se référant aux chiffres du dernier recensement général de la population réalisé en 2006, la population du site d'étude était estimée à 3 688 habitants. Ce chiffre a été déterminé en cumulant la population des villages de Sanon (2456 habitants) et de Barouli (1 232 habitants) qui se trouvent à l'intérieure du site d'étude. Aujourd'hui (2017), cette population peut être estimée à 5 339 habitants avec une densité de 382 hbts/km². Ses habitants viennent de Malaga et sont en général des Mossis. L'agriculture est l'activité principale et elle est essentiellement pluviale et orientée vers l'autoconsommation. Elle mobilise tous les habitants pendant la saison des pluies mais malheureusement ne suffit à assurer la sécurité alimentaire de la population.

IV. MATÉRIEL ET MÉTHODES

4.1. MATÉRIEL

Divers types de matériels ont été utilisés pour les mesures des différents paramètres ainsi que pour la collecte des données nécessaires à l'étude. Il s'agit :

- Une sonde piézométrique pour les mesures manuelles ;
- Des sondes piézométriques pour les mesures automatiques installées au niveau des piézomètres et de l'exutoire ;
- Du matériel topographique ;
- Des parcelles de mil, d'arachide et latéritique où un dispositif de mesure du ruissellement a été installé ;
- Un débitmètre ;
- Une station météorologique ;
- Des pluviomètres ;
- Des logiciels pour le traitement des données (Google Earth, ArcGIS, Global Mapper, Microsoft office) ;
- Des tubes d'accès d'humidité pour la mesure de la teneur en eau ;
- Des lysimètres pour la mesure du drainage.

4.2. MÉTHODES

4.2.1. Paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant

Pour la délimitation et la détermination de la surface, du périmètre, du réseau hydrographique et quelques caractéristiques géomorphologiques du bassin versant, nous avons utilisé les logiciels Google Earth Global Mapper et ArcGIS.

Indice de forme ou de compacité (K_G) du bassin versant : Il correspond au rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même superficie et permet de comparer entre eux les bassins de superficie identique. Le coefficient de compacité de GRAVELIUS est exprimé à partir de l'équation 1 :

Formule	Légende
$K_G = 0,282 * \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (1)$	K_G = indice de compacité de Gravélius S =superficie du bassin versant en km^2 P =périmètre du bassin

Rectangle équivalent : C'est le rectangle ayant même surface et même périmètre que le bassin versant, sa longueur, ainsi que sa largeur sont données par les équations 2 et 3 :

Formule	Légende
$\text{Leq} = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16S}}{4} \quad (2)$	S=superficie du bassin versant en km ² P=périmètre en Km Leq=Longueur du rectangle équivalent en Km leq=Largeur du rectangle équivalent en Km
$\text{leq} = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16S}}{4} \quad (3)$	

Répartition hypsométrique : La courbe hypsométrique du bassin versant donne le pourcentage de la superficie S du bassin versant située au-dessus d'une altitude donnée H, celle-ci permettra de déterminer l'indice global de pente (I_g) qui caractérise le relief du bassin et il est défini par l'équation 4 :

Formule	Légende
$I_g = \frac{\text{Altitude5\%} - \text{Altitude95\%}}{L} \quad (4)$	I _g = indice global de pente (m/km) L= longueur du rectangle équivalent (km) Altitudes5% et 95% altitudes fournies par la courbe hypsométrique

Altitude moyenne : l'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique et elle est définie à partir de l'équation 5 :

Formule	Légende
$H_{\text{moy}} = \sum \frac{S_i \cdot h_i}{S} \quad (5)$	H _{moy} : altitude moyenne du bassin [m] S _i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km ²] h _i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] S : superficie totale du bassin versant [km ²].

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

Densité de drainage : La densité de drainage est le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la surface du bassin versant. Elle est obtenue à partir de l'équation 6.

Formule	Légende
$D_d = \frac{\sum L_i}{S} \quad (6)$	<p>Dd : densité de drainage [km/km²]</p> <p>$\sum L_i$: longueur totale des cours d'eau [km]</p> <p>S : superficie totale du bassin versant [m²].</p>

4.2.2. Caractérisation des écoulements de surface

Les mesures des hauteurs d'eau ont été faites à partir d'une sonde installée à l'exutoire et par lecture directe sur l'échelle limnimétrique se trouvant également à l'exutoire de notre bassin versant. Les débits dans le cours d'eau quant à eux ont été évalués à partir des jaugeages.

Les hauteurs sont transformées en débit à partir de la courbe de tarage en utilisant l'équation 7

Formule	Légende
$Q = V * S \quad (7)$	<p>Q : débit du cours d'eau [m³/s]</p> <p>S : superficie totale du bassin versant [m²].</p>

La figure 7 montre l'allure de la parabole de vitesse.

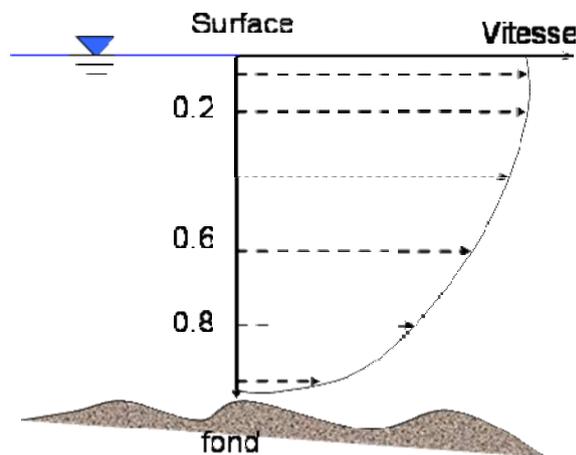


Figure 7: Parabole de vitesse

Ces différents jaugeages ont été effectués durant la campagne hivernale 2018-2019 en prenant en compte la variation de la hauteur sur l'ensemble de cette saison pluvieuse. Cette démarche nous a permis d'établir la courbe de tarage qui nous permettra de transformer toute hauteur d'eau sous forme de débit.

4.2.3. Étude hydrodynamique des eaux

Le réseau piézométrique est constitué d'une part de seize piézomètres réalisés par le BRGM au cours du projet « milieu fissuré II » (BRGM-Aquater, 1991) et d'autre part de cinq piézomètres qui ont été réalisés après ce projet. La localisation de l'ensemble des piézomètres est indiquée sur la figure 8 et le tableau I. Les piézomètres (photos 2 et 3) ont été réalisés à différentes profondeurs afin d'appréhender les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère suivant ces différentes couches (saprolite uniquement, couche fissurée uniquement et les deux à la fois). La partie « Est » du site d'étude ne possède pas de piézomètre parce qu'elle ne faisait pas partie de la zone d'investigation du BRGM. Les données piézométriques sont relevées chaque matin entre 7h00 et 9h00 manuellement.

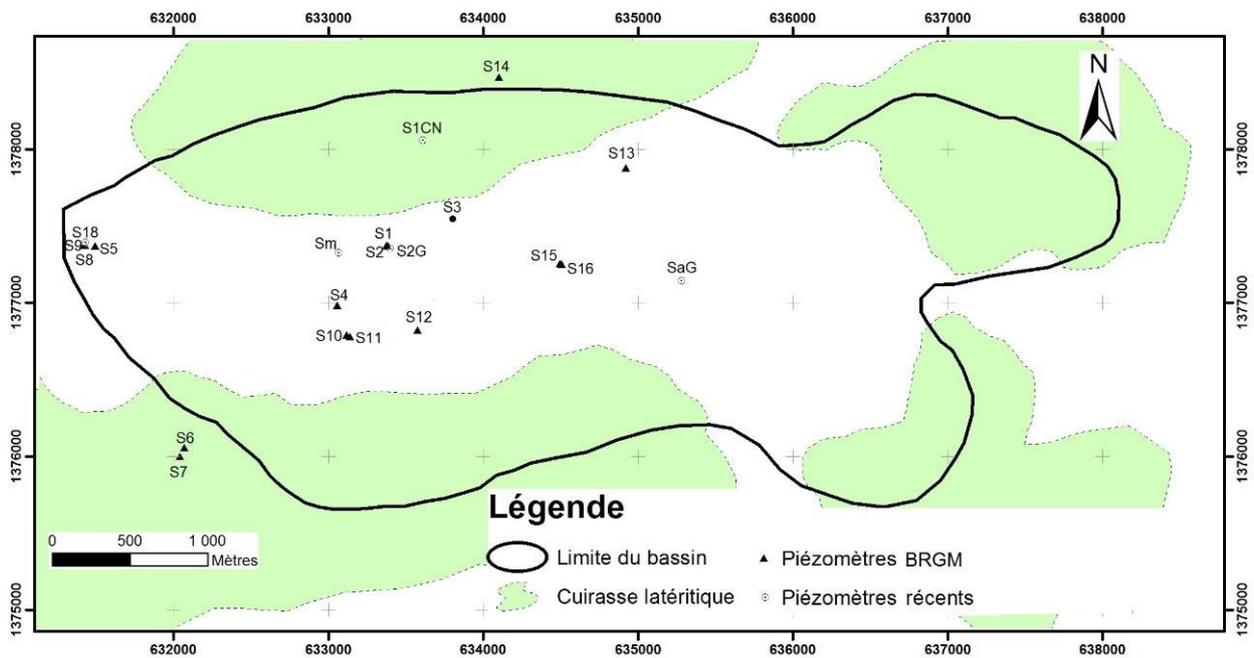


Figure 8 : Localisation des piézomètres de SANON.



Photos 3: Mesure manuelle niveau du piézométrique



Photos 2: Collecte des données automatiques piézomètre S19

Tableau I : Description des piézomètres

Piézomètres	Profondeur (m)	Horizon capté
S1	76,0	Couche fissurée
S2	34,0	Saprolite
S3	24,0	Saprolite
S4	63,0	Saprolite et couche fissurée
S5	65,0	Couche fissurée
S6	76,5	Couche fissurée
S7	67,5	Couche fissurée
S8	58,0	Saprolite et couche fissurée
S9	25,0	Saprolite
S10	63,0	Couche fissurée
S11	76,5	Couche fissurée
S12	72,0	Saprolite et couche fissurée
S13	63,0	Saprolite et couche fissurée
S14	45,0	Saprolite et couche fissurée
S15	81,0	Saprolite et couche fissurée
S16	67,5	Saprolite et couche fissurée
S18*	20,0	Saprolite
S1CN*	56,0	Saprolite et couche fissurée

S2G*	65,0	Saprolite et couche fissurée
SaG*	65,0	Saprolite et couche fissurée
Sm*	64,0	Saprolite et couche fissurée

Les données utilisées dans le cadre de notre travail sont essentiellement les niveaux piézométriques des piézomètres S19, S8 et S5 se situant tous à proximité de l'exutoire

4.2.4. Établissement de la relation eaux de surface-eaux souterraines

L'établissement de cette relation s'est fait en calculant le coefficient de tarissement et le volume disponible qui sont calculés respectivement à partir des équations 8, 9 et 10. La démarche adoptée se base sur la décroissance sous forme exponentielle du débit durant la phase de décrue.

Formule :	Légende
$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (8)$	α = coefficient de tarissement (J^{-1}) Q_0 = débit au temps t_0 (m^3/s) Q : débit au temps t (m^3/s)
$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q}{0,4343 (t - t_0)} \quad (9)$	t_0 : temps correspondant au début de tarissement (J)
$V = \frac{Q}{\alpha} \times 86400 \quad (10)$	t : temps correspondant à la fin de l'écoulement (J) V : volume d'eau disponible dans la nappe (m^3)

V. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1. Paramètres physiques et géomorphologiques :

Le bassin versant topographique de Sanon représenté par la figure 9 a pour paramètres physiques et géomorphologiques les valeurs reportées au tableau II.

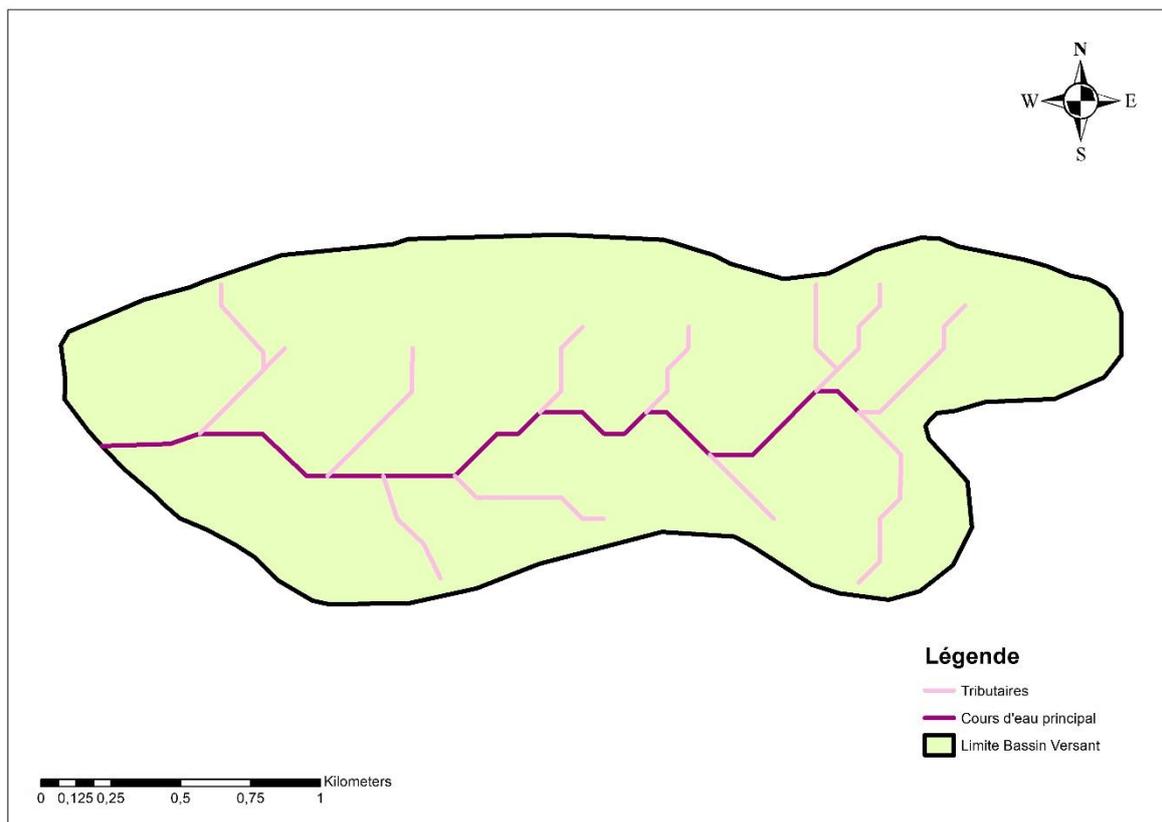


Figure 9 : Bassin Versant Sanon

Tableau II : Paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant de Sanon

Paramètres	Valeurs
Périmètre (km)	19.00
Surface (km ²)	15.89
Indice de compacité de Gravélius	1.33
Longueur rectangle équivalent (km)	7.33
Indice global de pente (m/km)	3.00
Densité de drainage (km/km ²)	1.40
Altitude maximale (m)	365
Altitude minimale (m)	333
Altitude moyenne (m)	344

Une typologie des bassins versants a été élaborée et les classes sont définies comme suit :

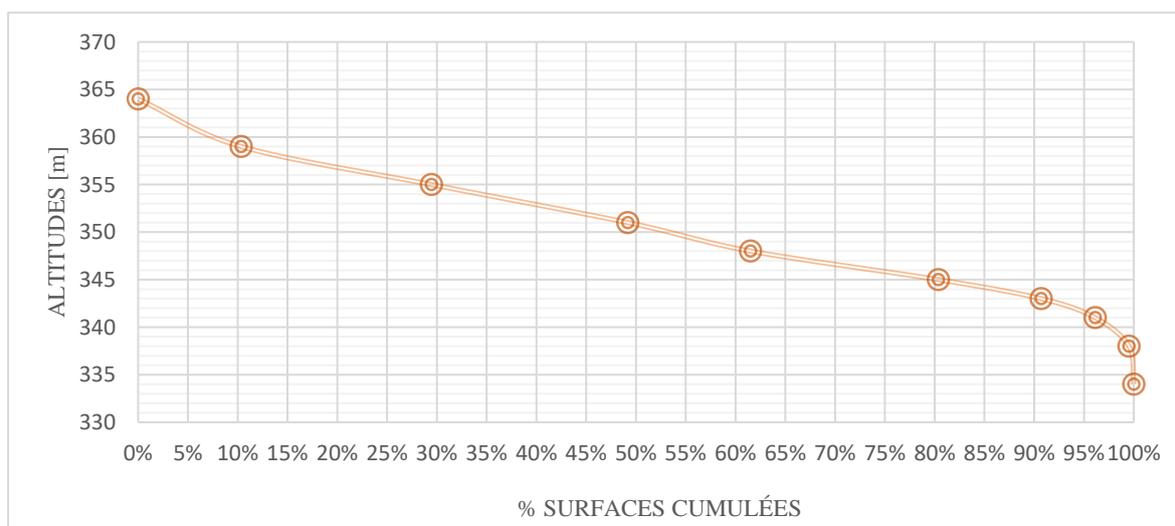
- très petit bassin versant $0 \leq S \leq 10 \text{ km}^2$
- petit bassin versant $10 \leq S \leq 200 \text{ km}^2$
- grand bassin versant $200 \leq S \leq 2000 \text{ km}^2$
- très grand bassin versant $S > 2000 \text{ km}^2$

En se basant sur cette classification, nous constatons que le bassin versant de Sanon fait partie de la classe des petits bassins versants. La valeur du coefficient de compacité de Gravélius (1.33) montre qu'il s'agit d'un bassin très allongé car étant très éloignée de 1.

Sur le bassin versant de Sanon, la valeur de 1.40 km/km^2 pour la densité de drainage traduit un réseau hydrographique très faible qui se manifeste uniquement après un événement pluvieux et cet écoulement disparaît quelques après cette pluie.

L'observation de la courbe hypsométrique (figure 10) montre une zone dominée en grande par une plaine.

Figure 10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Sanon



5.2. Caractérisation des écoulements de surface

Cette caractérisation des écoulements de surface s'est faite en traduisant les hauteurs d'eau lues à partir de la sonde et de l'échelle limnimétrique en débit. Nous avons remarqué qu'au niveau de ce cours d'eau principal, les écoulements débutent à partir de la hauteur 22 cm représentant notre zéro à l'échelle. La campagne de mesure a concerné la période allant de Juillet 2018 à Octobre 2018 où nous avons établi la courbe de tarage (figure 11) à partir de vingt-quatre (24) jaugeages.

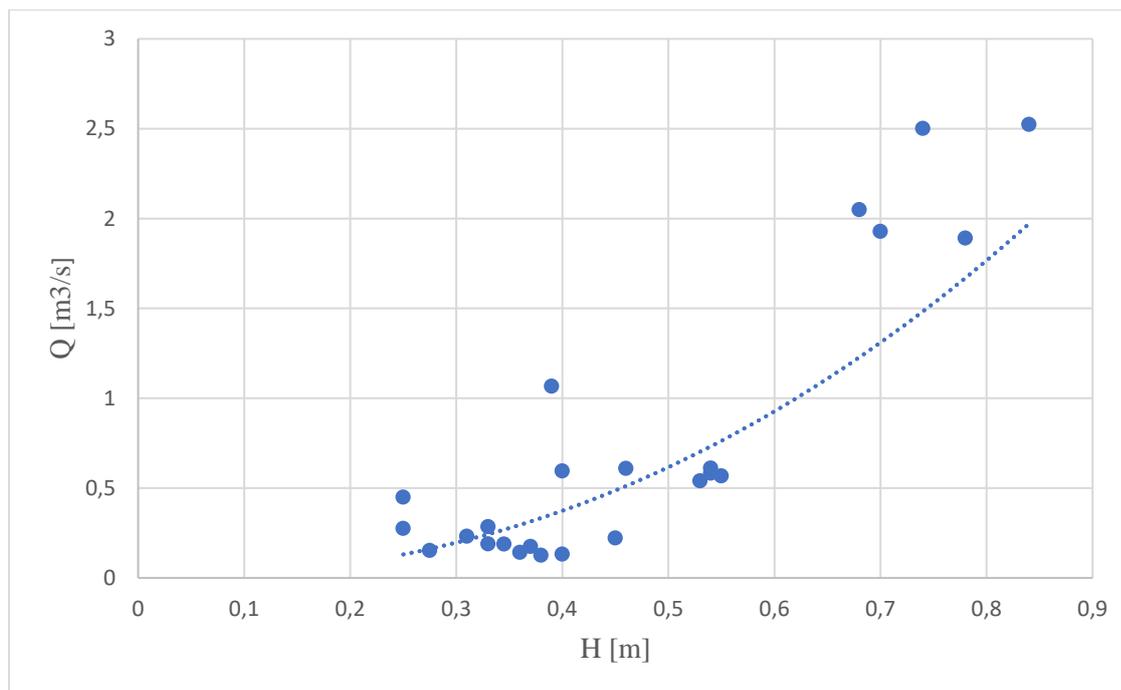


Figure 11 : Courbe de tarage du bassin versant de Sanon

La figure 12 présente l’hydrogramme de crue issue de la pluie du 25 septembre 2018 et les autres hydrogrammes de crue sont présentés en annexe.

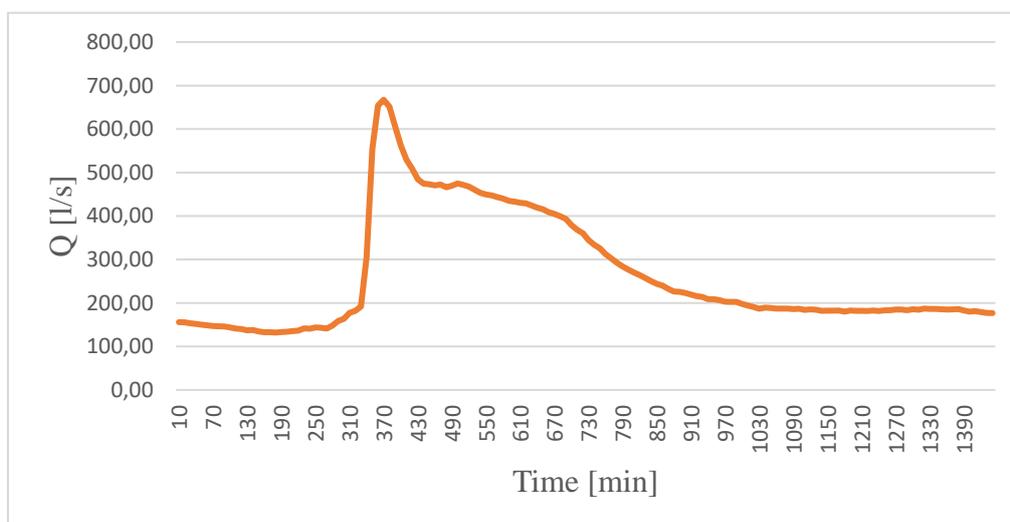


Figure 12: Hydrogramme de crue du bassin versant de Sanon pour la pluie du 25 septembre 2018

L’étude des hydrogrammes de crue issue des différentes pluies de la saison pluvieuse révèle que l’écoulement démarre dès que la pluie commence et finit quelques temps après cette pluie. Les hydrogrammes présentent un seul mode avec des débits de pointe proportionnels à l’intensité de la pluie c’est-à-dire plus le volume de la pluie est important plus le débit et le volume de la crue sont importants.

En plus, nous nous sommes intéressés sur l'étude des phénomènes de tarissement en vue de quantifier les volumes d'eau disponibles dans la nappe. Le tableau III contient l'ensemble des coefficients de tarissement obtenus durant cette année hydrologique 2018-2019 sur le site de Sanon.

Tableau III : Coefficients de tarissement des hydrogrammes de ruissellement de Sanon de 2018-2019

Date de pluie	Coefficient de tarissement (j^{-1})	Volume d'eau disponible dans la nappe (m^3)
25 juillet 2018	0,035	910368,42
26 juillet 2018	0,130	410854,88
29 juillet 2018	0,033	752631,55
30 juillet 2018	0,053	408006,55
7 août 2018	0,047	348779,36
8 août 2018	0,050	263554,69
10 août 2018	0,056	632677,66
13 août 2018	0,074	400700,49
28 août 2018	0,140	19715,98
29 août 2018	0,121	10006,09
30 août 2018	0,145	17837,49
1 septembre 2018	0,074	35129,36
2 septembre 2018	0,042	645977,73
3 septembre 2018	0,114	80590,32
6 septembre 2018	0,151	99483,88
7 septembre 2018	0,046	199470,60
8 septembre 2018	0,056	211547,84
9 septembre 2018	0,049	268184,59
10 septembre 2018	0,078	158131,83
11 septembre 2018	0,057	237022,60
14 septembre 2018	0,049	316948,77
15 septembre 2018	0,073	150926,30
21 septembre 2018	0,174	15395,42
22 septembre 2018	0,148	29868,20
23 septembre 2018	0,031	332829,27
25 septembre 2018	0,053	288373,16
29 septembre 2018	0,049	48025,27
3 octobre 2018	0,120	28868,76
5 octobre 2018	0,039	275275,29
14 octobre 2018	0,192	2694,16

Pour la crue du 25 septembre, la figure 13 montre la phase de tarissement. Nous remarquons une descente très rapide dans les premiers instants ce qui correspond à une vidange de la nappe avant la phase de stabilisation qui correspond au volume disponible dans la nappe. Les volumes d'eau obtenus aux différentes pluies sont reportés au tableau III.

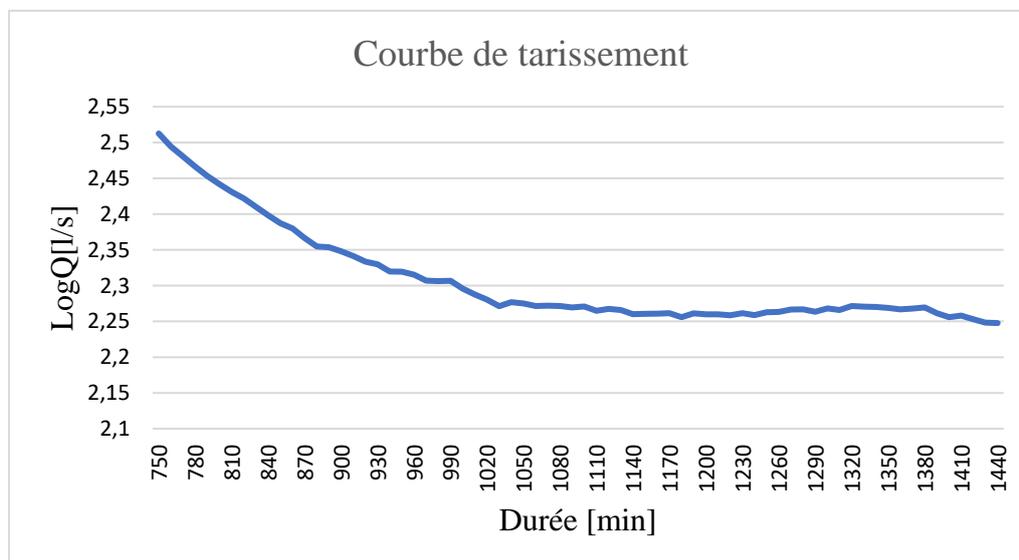


Figure 13 : Courbe de tarissement de l'hydrogramme du 25 Septembre 2018

5.3. Étude hydrodynamique des eaux souterraines :

Cette étude a été effectuée en étudiant un certain nombre de piézomètres où nous avons retenu comme critère de suivi le niveau statique. La figure 14 montre pour le piézomètre S8 les variations du niveau statique pour la journée du 1^{er} septembre 2018. Nous remarquons que pour une durée de 9 heures (14h10 à 23h10), une variation de l'ordre de 10 cm traduisant une réponse très importante de la nappe par rapport à la pluie. Les autres réactions de la nappe durant la campagne sont reportées en annexes.

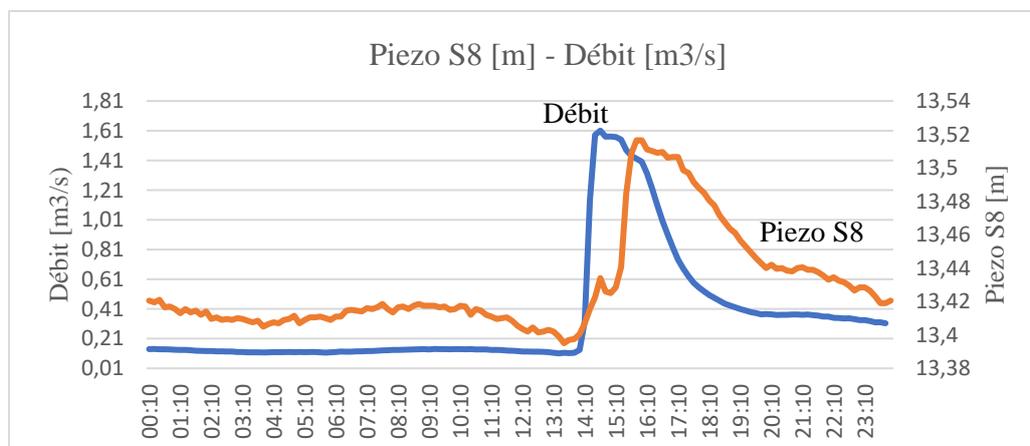


Figure 14 : Fluctuation du niveau piézométrique S8 et Débit de rivière 01 Septembre 2018

5.4. Interaction eau de surface eau souterraine

Les premiers résultats obtenus par la mise en corrélation de la pluviométrie, le cours d'eau et l'eau souterraine montrent l'existence d'échanges entre le cours d'eau et l'eau souterraine. En comparant le comportement des piézomètres et de la rivière par rapport à la pluie, nous remarquons une réaction très rapide du cours d'eau par rapport aux eaux souterraines où nous constatons un décalage des hydrogrammes (figure 14) même si les formes sont identiques. Nous remarquons un comportement différencié des piézomètres car si nous prenons par exemple le comportement des piézomètres S5 et S8, les réactions diffèrent par rapport à la pluie. Cela est dû essentiellement par le phénomène qui les caractérise, car pour le piézomètre S8 nous avons un écoulement rapide provenant de l'infiltration et pour le piézomètre S5 un écoulement lent provenant de la recharge. Ce qui nous amène à nous poser la question est ce que ces deux piézomètres captent-ils la même nappe. Cependant l'interprétation de nos résultats se limite seulement à un périmètre établi autour de l'exutoire du bassin versant, une étude assez large sur l'ensemble du bassin versant pourrait nous permettre de faire ressortir des éléments plus fiables pour établir la relation eaux de surface-eaux souterraines à partir de zones potentielles de recharge.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude effectuée sur le bassin versant de Sanon montre un milieu fragile où nous pouvons supposer une relation entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Sur ce bassin non permanent, nous avons constaté que les eaux de surface réagissent rapidement à la pluie. En dessous d'une hauteur d'eau à l'échelle limnimétrique comprise entre 0 à 12 cm il n'y a pas d'écoulement malgré la présence de l'eau. L'analyse des hydrogrammes de crue montre une réaction rapide des eaux de surface et les écoulements s'arrêtent quelques heures après la pluie. Ce qui concerne les eaux souterraines, la réaction est retardée par rapport aux eaux de surface et cette réaction est différente selon les piézomètres car nous avons constaté qu'au niveau de certains piézomètres nous avons des réponses rapides là où pour d'autres les réponses sont très lentes ce qui nous amène à croire l'existence de plusieurs nappes vu les différentes réactions. Ce comportement différencié des piézomètres ne nous permet pas d'être formel sur les différents processus d'interaction entre les deux types d'écoulement vu que l'étude des eaux souterraines ont principalement concerné les piézomètres proches de l'exutoire du bassin versant.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de cet hydrosystème, il faudrait prendre en compte l'ensemble de la nappe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Toé, G. (2004). Apports de nouvelles techniques géophysiques à la connaissance des aquifères de socle, Tomographie électrique, électromagnétisme fréquentiel, Résonance Magnétique Protonique : application au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Paris 6.

Yonli, H. F. (2016). Caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un aquifère de socle fracturé : Couplage essais de pompage-Résonance Magnétique des Protons (RMP). Mémoire de fin d'étude, Ouagadougou : (2iE).

Soro, D., KOITA M., BIAOU A., Outoumbé E., Koussoube Y., Alle C., Yacouba H., Guerin R., Vouillamoz J. M. (2015). Structure et géométrie aquifère de socle sous climat sahélien : cas du site expérimental de Sanon (Centre Nord du Burkina Faso). Colloque Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles. Du 11 au 13 Juin 2015 - La Roche-sur-Yon.

Compaoré, G. (1997). Évaluation de la fonction capacitive des altérites, site expérimental de Sanon : socle granito-gneissique sous climat de type soudano-sahélien. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France.

Vouillamoz, J.M. (2003). La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par Résonance Magnétique Protonique. Thèse de doctorat, Université Orsay, Paris XI.

Outoumbé, E. (2014). Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso). Mémoire de fin d'études Master, 2iE.

Outoumbé, E. (2014). Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso). Mémoire de fin d'études Master, 2iE.

NOALI Yienignia (2018). Étude du fonctionnement hydrique des sols du bassin versant de Sanon selon plusieurs états de surface. Mémoire de fin d'études Master, 2iE.

ANNEXES

Annexe I : Photos terrains collectes des données



Figure 16 : Mesure du débit du cours d'eau avec le moulinet hydrométrique



Figure 15 : Collecte données sonde piézométrique

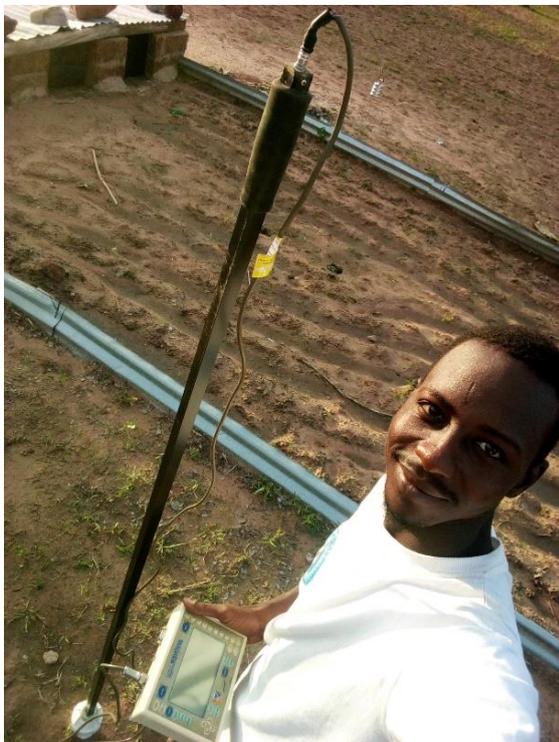


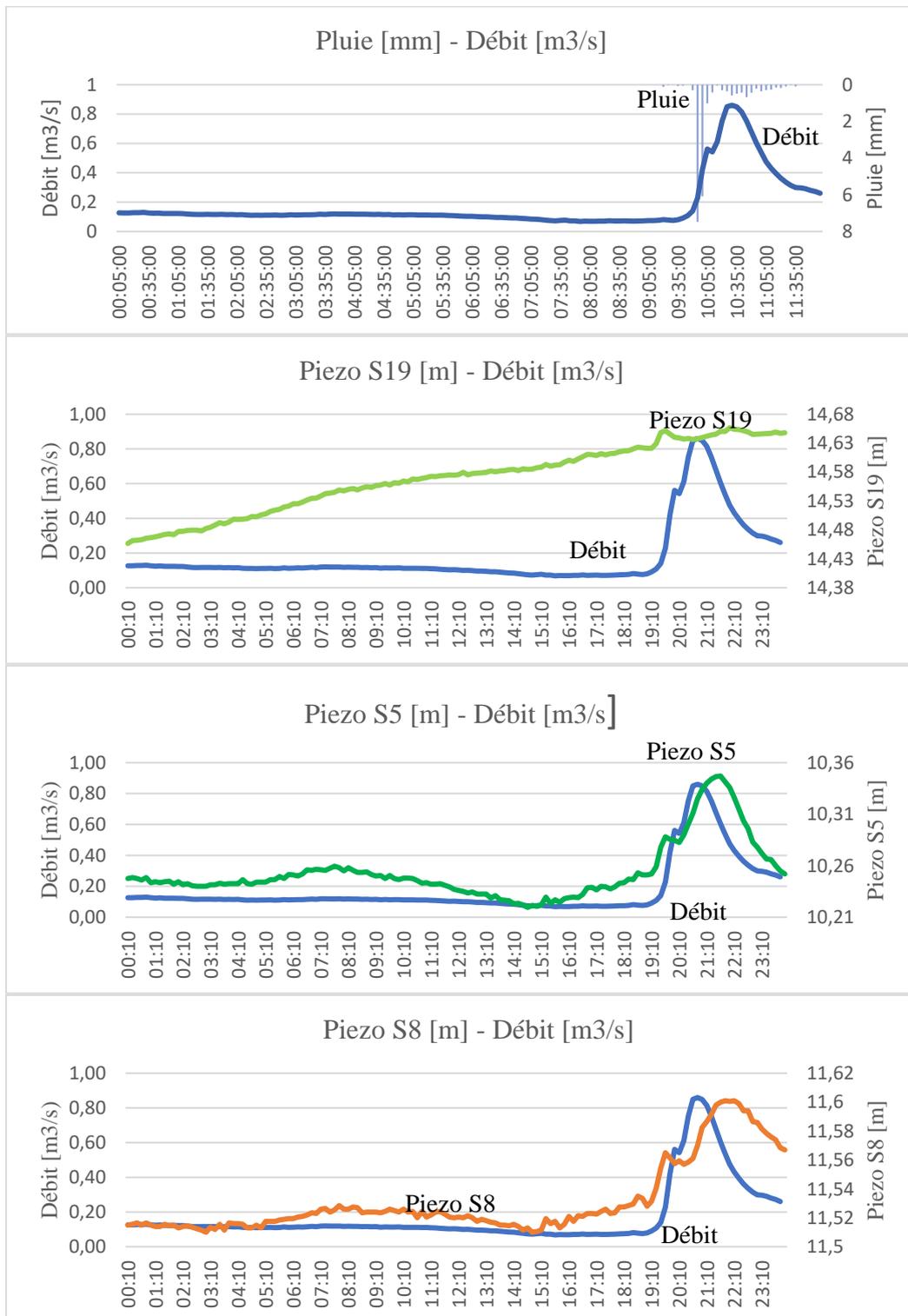
Figure 18: Mesure de teneur en eau



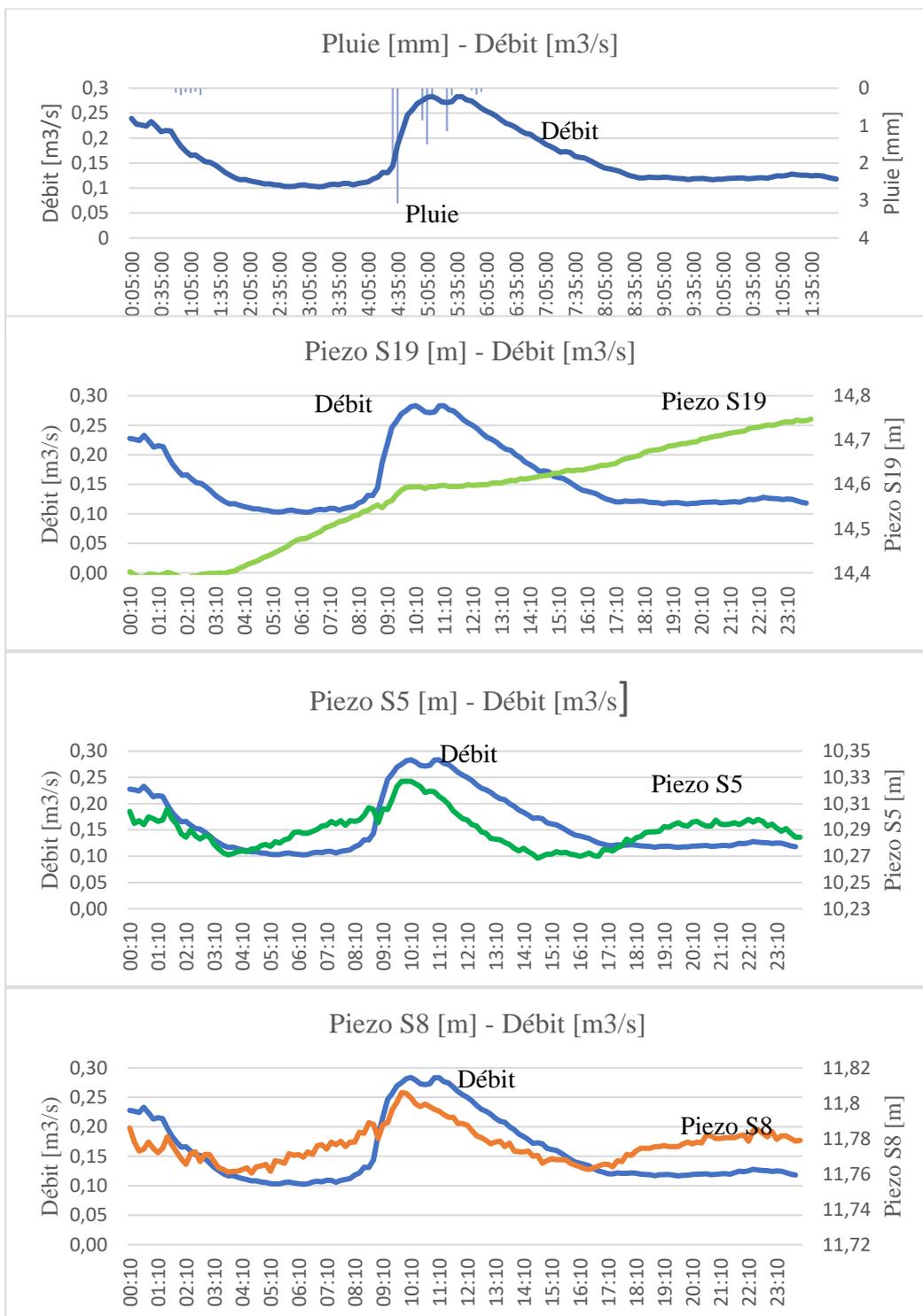
Figure 17 : Vidange fosse pacelle latérique

Annexe II : Pluviométrie - Hydrogramme de crue – Variation du niveau des nappes des piézomètres (Période de Juillet 2018)

03 Juillet 2018



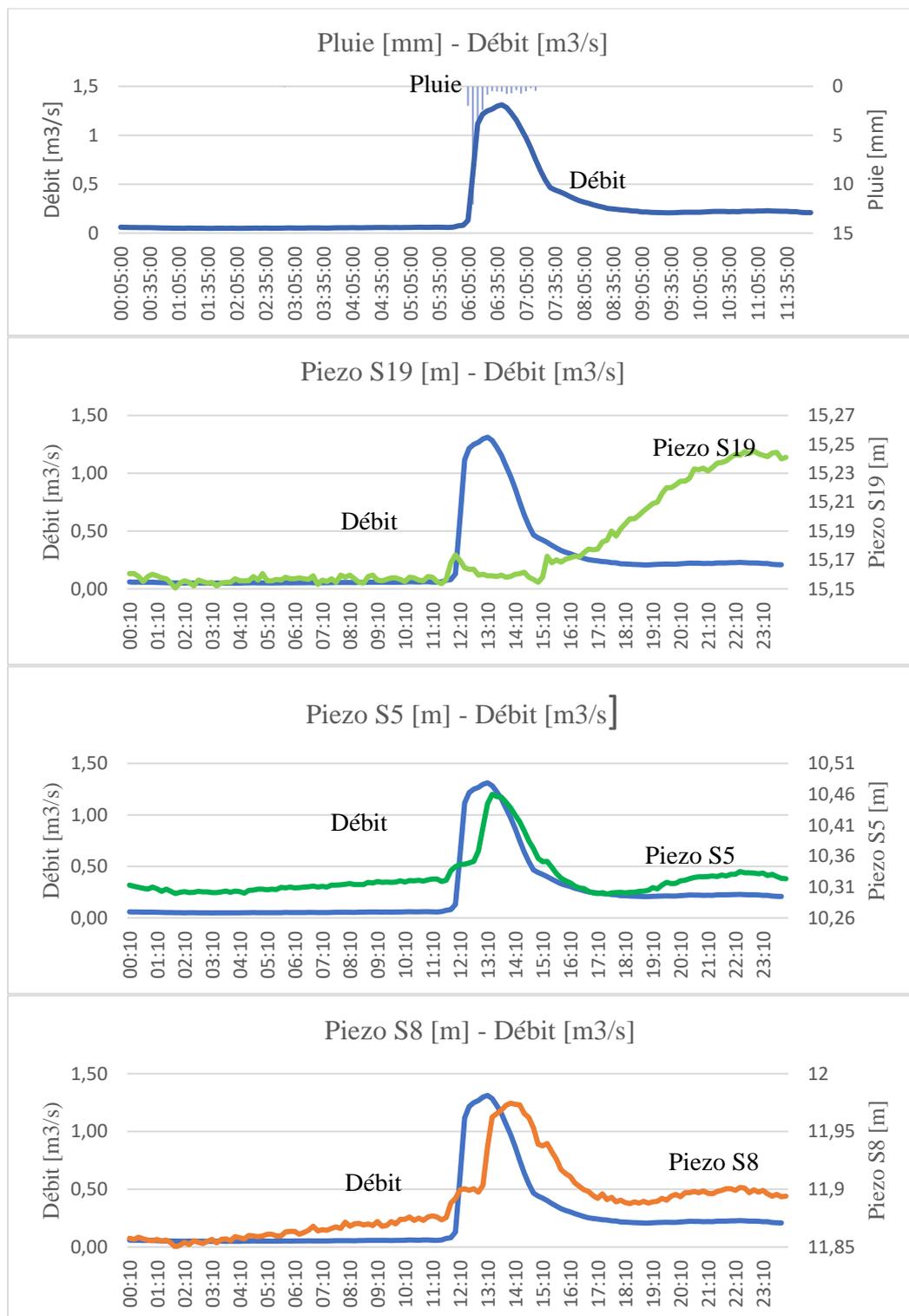
15 Juillet 2018



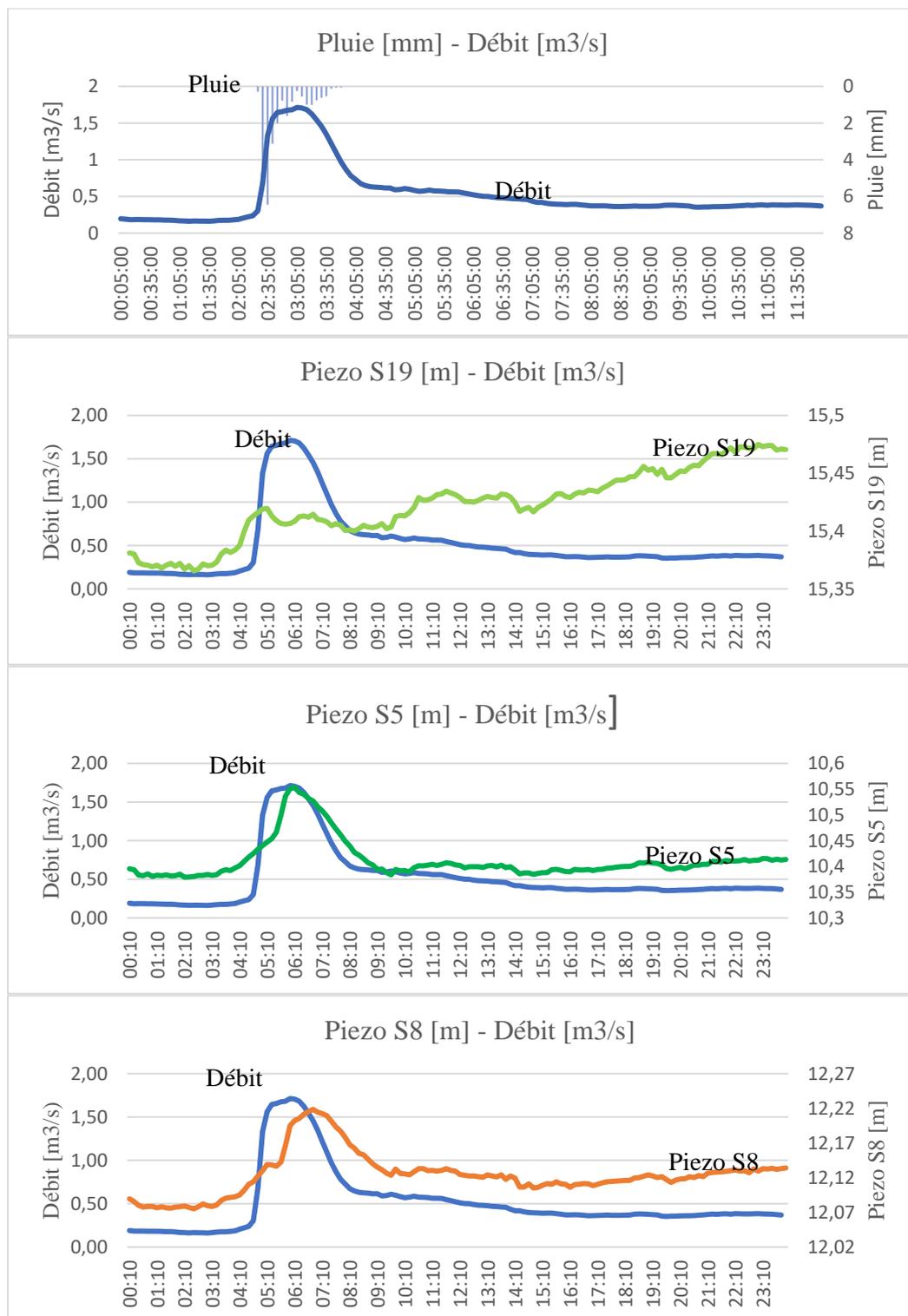
17 Juillet 2018



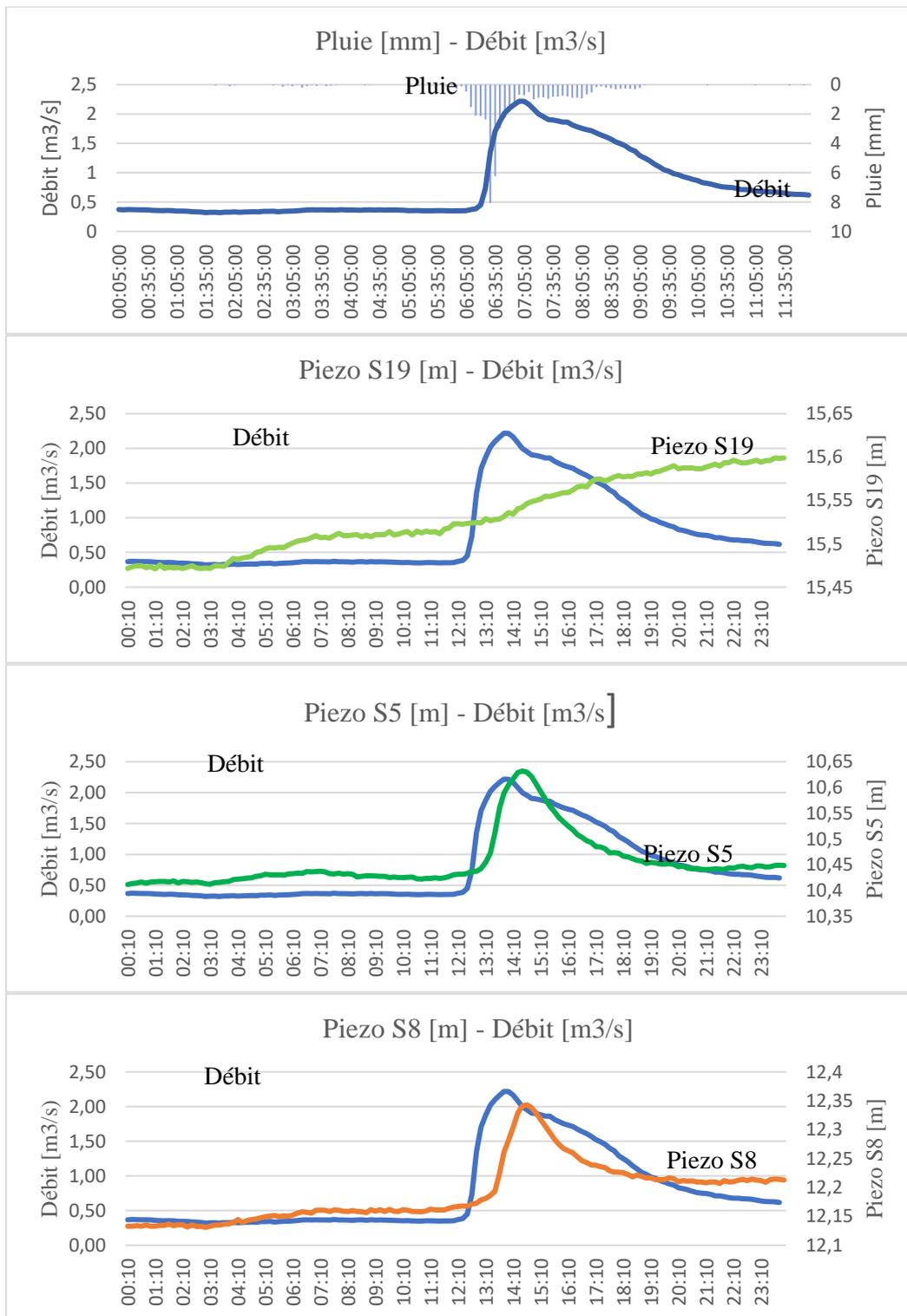
20 Juillet 2018



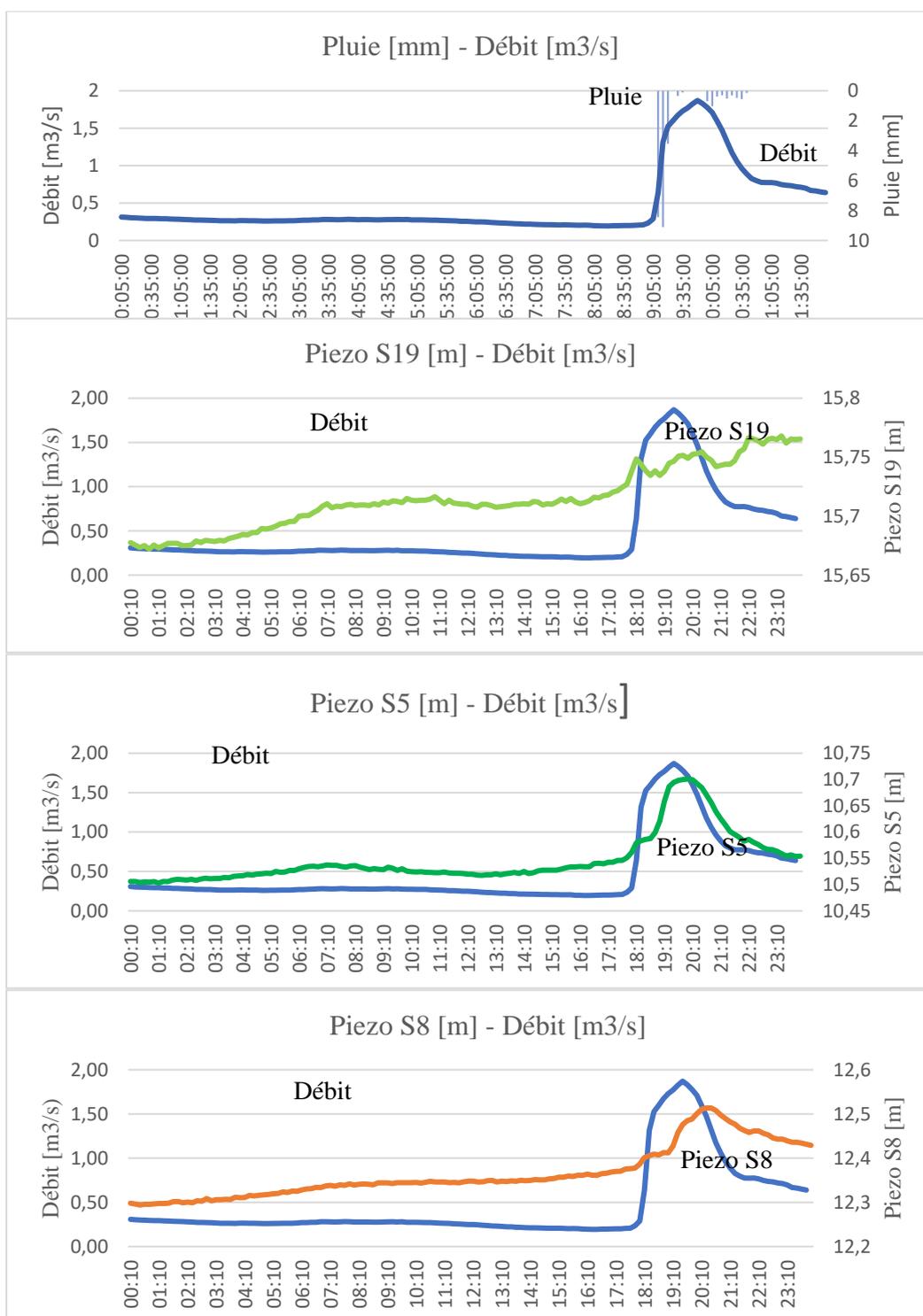
25 Juillet 2018



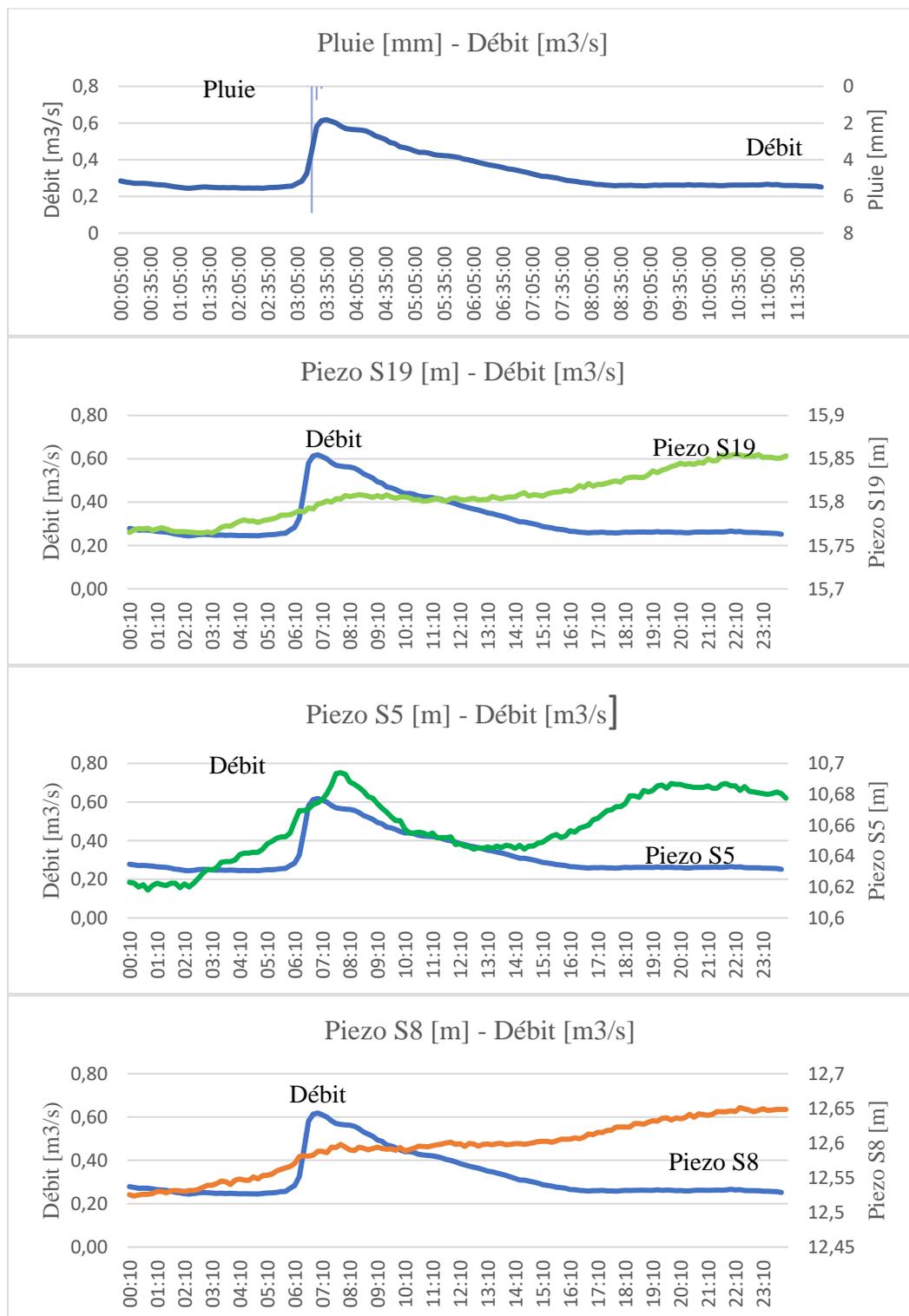
26 Juillet 2018



28 Juillet 2018



30 Juillet 2018



Annexe III : Données jaugeages (Période de Juillet 2018)

Rive Droite			
Jaugeages		Date	H échelle (cm)
1		25/07/2018	39
Verticales	Distances (m)	Profondeur (cm)	Vitesse (m/s)
1	0	6	0,2
		30	
2	0,25	8,2	0,3
		32,8	0,4
		41	
3	0,5	9	0,4
		36	0,5
		45	
4	0,75	11,4	0,6
		45,6	0,7
		57	
5	1	12,6	0,6
		50,4	0,7
		63	
6	1,25	13	0,6
		52	0,7
		65	
7	1,5	13,2	0,5
		52,8	0,7
		66	
8	1,75	13,2	0,6
		52,8	0,6
		66	
9	2	13,8	0,5
		55,2	0,6
		69	
10	2,25	14,6	0,5
		58,4	0,5
		73	
11	2,5	12,6	0,5
		50,4	0,6

		63	
12	2,75	12,8	0,5
		51,2	0,5
		64	
13	3	8,8	0,5
		35,2	0,4
		44	
14	3,25	5,2	0,2
		26	

Rive Gauche			
Jaugeages		Date	H échelle (cm)
1		25/07/2018	70
Verticales	Distances (m)	Profondeur (cm)	Vitesse (m/s)
1	0	6,4	0,2
		32	
2	0,25	10,8	0,6
		43,2	0,7
		54	
3	0,5	13,2	0,8
		52,8	0,8
		66	
4	0,75	16,4	0,8
		65,6	0,8
		82	
5	1	16,4	0,8
		65,6	0,8
		82	
6	1,25	16,8	0,7
		67,2	0,8
		84	
7	1,5	17,6	0,8
		70,4	0,9
		88	
8	1,75	17,2	0,8
		68,8	0,8
		86	
9	2	17,4	0,8
		69,6	0,9

		87	
10	2,25	17,4	0,8
		69,6	0,9
		87	
11	2,5	15,6	0,7
		62,4	0,7
		78	
12	2,75	14,7	0,8
		58,8	0,8
		73,5	
13	3	13,6	0,8
		54,4	0,7
		68	
14	3,25	9,8	0,5
		39,2	0,6
		49	

Rive Droite			
Jaugeages		Date	H échelle (cm)
2		26/07/2018	33
Verticales	Distances (m)	Profondeur (cm)	Vitesse (m/s)
1	0	4	0,1
		20	
2	0,25	6,4	0,1
		32	
3	0,5	6,6	0,1
		33	
4	0,75	8,8	0,1
		35,2	0,1
		44	
5	1	8,2	0,1
		32,8	0,1
		41	
6	1,25	10	0,1
		40	0,2
		50	
7	1,5	9,4	0,2
		37,6	0,2
		47	
8	1,75	9,2	0,2

		36,8	0,2
		46	
9	2	9	0,1
		36	0,1
		45	
10	2,25	9,2	0,2
		36,8	0,2
		46	
11	2,5	8,6	0,2
		34,4	0,2
		43	
12	2,75	6,7	0,2
		33,5	
13	3	4,2	0,1
		21	
14	3,25	2,2	0,1
		11	

Rive Gauche			
Jaugeages		Date	H échelle (cm)
2		26/07/2018	74
Verticales	Distances (m)	Profondeur (cm)	Vitesse (m/s)
1	0	8	0,3
		40	
2	0,25	11,8	0,9
		47,2	0,8
		59	
3	0,5	14	0,8
		56	0,8
		70	
4	0,75	16,6	0,9
		66,4	0,8
		83	
5	1	16,8	0,8
		67,2	0,9
		84	
6	1,25	17	0,9
		68	1
		85	
7	1,5	17,8	0,7
		71,2	0,6

		89	
8	1,75	17,8	1,1
		71,2	1,2
		89	
9	2	18,4	1
		73,6	1,1
		92	
10	2,25	18	1
		72	1,3
		90	
11	2,5	17,2	1
		68,8	1,3
		86	
12	2,75	16	1
		64	1,1
		80	
13	3	15	1
		60	1,1
		75	
14	3,25	11,6	0,6
		46,4	0,7
		58	

Rive Droite			
Jaugeages		Date	H échelle (cm)
3		28/07/2018	54
Verticales	Distances (m)	Profondeur (cm)	Vitesse (m/s)
1	0	2,2	0
		11	
2	0,25	6	0
		30	
3	0,5	11	0,1
		44	0,3
		55	
4	0,75	13	0,3
		52	0,4
		65	
5	1	14	0,3
		56	0,3
		70	
6	1,25	14,2	0,3

		56,8	0,3
		71	
7	1,5	14	0,4
		56	0,4
		70	
8	1,75	14	0,4
		56	0,4
		70	
9	2	15	0,4
		60	0,4
		75	
10	2,25	14,8	0,3
		59,2	0,4
		74	
11	2,5	13,8	0,3
		55,2	0,3
		69	
12	2,75	13,2	0,3
		52,8	0,4
		66	
13	3	11	0,2
		44	0,2
		55	
14	3,25	5,4	0,1
		27	
15	3,5	3	0
		15	

Rive Gauche			
Jaugeages		Date	H échelle (cm)
3		28/07/2018	54
Verticales	Distances (m)	Profondeur (cm)	Vitesse (m/s)
1	0	3	0
		15	
2	0,25	7,4	0
		37	
3	0,5	11,2	0,2
		44,8	0,2
		56	
4	0,75	12,4	0,3
		49,6	0,3

		62	
5	1	14	0,3
		56	0,4
		70	
6	1,25	14,4	0,3
		57,6	0,4
		72	
7	1,5	14,6	0,3
		58,4	0,4
		73	
8	1,75	14,2	0,3
		56,8	0,4
		71	
9	2	14,4	0,3
		57,6	0,3
		72	
10	2,25	14,2	0,3
		56,8	0,4
		71	
11	2,5	14,4	0,3
		57,6	0,3
		72	
12	2,75	12,2	0,3
		48,8	0,3
		61	
13	3	11,2	0,2
		44,8	0,2
		56	
14	3,25	7,4	0,1
		29,6	0,2
		37	
15	3,5	2,2	0
		11	

Rive Droite			
Jaugeages		Date	H échelle (cm)
4		30/07/2018	31
Verticales	Distances (m)	Profondeur (cm)	Vitesse (m/s)
1	0	4,9	0,1
		24,5	
2	0,25	4,7	0,1

		23,5	
3	0,5	7,3	0,2
		36,5	
4	0,75	8,8	0,2
		35,2	0,2
		44	
5	1	9,8	0,2
		39,2	0,2
		49	
6	1,25	9,4	0,2
		37,6	0,2
		47	
7	1,5	9,4	0,2
		37,6	0,2
		47	
8	1,75	9,4	0,2
		37,6	0,3
		47	
9	2	9,2	0,2
		36,8	0,2
		46	
10	2,25	9,8	0,2
		39,2	0,2
		49	
11	2,5	8,4	0,2
		33,6	0,1
		42	
12	2,75	6,6	0,1
		33	
13	3	4,2	0,1
		21	
14	3,25	2,2	0,1
		11	