



UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE

**UFR ENVIRONNEMENT**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

## MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**Simulation du fonctionnement hydrodynamique du  
fleuve Cavally à l'aide d'un modèle couplé 1D-2D dans la  
zone d'Ity (Zouan-Hounien)**

LABORATOIRE :

SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

**GOLI Menouan Wilfried**

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : Mme. TOURE Née YAO Affoué Berthe, Maître-Assistant,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. KOUASSI Kouakou Hervé, Maître-Assistant,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement

le :12/06/2020

## TABLE DES MATIERES

Pages

<b>DÉDICACES .....</b>	<b>iii</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>viii</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>10</b>
<b>PARTIE 1 : GENERALITES.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Situation géographique du bassin versant du fleuve Cavally.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Caractéristiques physiques du bassin versant du Cavally.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.1. Climat.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.2. Relief.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.3. Sols.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.4. Végétation .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.5. Réseau hydrographique.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.6. Géologie de la zone.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3. Activités Socio-économiques.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4. Généralités sur la modélisation des écoulements à surface libre .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.1 Modèles hydrauliques .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.2. Modèles conceptuels.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.3. Modèle mécaniste de Barré de Saint-Venant .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.4. Modèle hydraulique 1D .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.5. Modèle hydrauliques 2D.....</b>	<b>12</b>
<b>1.4.6. Description du modèle HEC-RAS .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4.7. Atout du modèle HEC-RAS .....</b>	<b>12</b>
<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>13</b>

<b>PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Matériel.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.1. Données hydrologiques .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.2. Données de terrain .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.3. Données topographiques .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.4. Logiciels de traitement des données .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Méthodes.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1. Modélisation des écoulements à surface libre en 1D.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2. Modélisation des écoulements à surface libre en 2D.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.3. Modélisation des écoulements à surface libre en 1D-2D .....</b>	<b>23</b>
<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>28</b>
<b>PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1. Résultats .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.1. Fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally après intégration des         ouvrages .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.2. Cartes des zones inondables du fleuve Cavally avant et après l'intégration des         ouvrages hydraulique .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2. Discussion .....</b>	<b>45</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>49</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>54</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>54</b>

## DÉDICACES

À mon père GOLI Kouamé pour son écoute, ses conseils et son soutien ;

À ma maman chérie Assi chiépo Yolande qui a toujours pris soin de nous et pour toutes ses prières ;

À mes frères et sœurs Jacque-Arnold, Marie-Dominique, Emmanuel, Marie-Madelaine pour leur encouragement ;

À ma grande famille et mes amis ;

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux dirigeants de l'Université Jean Lorougnon Guédé avec à leur tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon (UJLoG) pour les efforts fournis dans le cadre de l'amélioration de notre formation académique. Nos remerciements vont également à l'endroit des personnes suivantes :

-Docteur KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences, Directeur de l'UFR Environnement et Directeur scientifique de ce mémoire ; nous disons grand merci pour la bonne gestion de l'UFR Environnement et pour sa détermination à garantir un encadrement de qualité aux étudiants de cette formation.

-Docteur DIBI Brou, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour avoir accepté de nous accueillir dans son laboratoire.

-Docteur YAO Affoué Berthe, notre encadreur, pour les conseils, critiques, remarques et le sens du travail bienfait qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

-Docteur KOUADIO Zilé Alex, Responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement, pour ses conseils pertinents et ses critiques qui nous ont permis de surmonter les obstacles ;

-Docteur MANGOUA Oi Mangoua Jules, Responsable du parcours « Master Génie de l'Eau et de l'Environnement » pour les nombreux conseils qu'il n'a cessés de nous prodiguer depuis notre arrivée dans ce parcours.

-Docteur BROU Loukou Alexis, ses conseils scientifiques et ses critiques constructives ont été d'une importance capitale à la réalisation de ce travail.

-Docteur Kouassi Kouakou Hervé, instructeurs de ce mémoire de master dont la qualité des observations a permis d'améliorer ce travail.

Nous tenons à remercier spécialement le doctorant KOFFI Bérenger pour l'encadrement technique de ce mémoire. Ses conseils et son amour du travail bienfait ont été très bénéfiques pour moi durant la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également tous les enseignants et doctorants du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE). Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude pour tous les efforts fournis à notre endroit.

À tous les étudiants de master 2 de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement en particulier Atcho Ange Victorine et Akaffou Franck Hervé, nous disons merci pour leur aide et leur soutien.

Nous ne saurons clore cette série de remerciements sans penser aux familles OURAH et ADON, dont l'hospitalité et la chaleur depuis notre arrivée à Daloa ont été pour nous une source de motivation. Puisse Dieu vous le rendre au centuple.

## **LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS**

**ADCP** : Acoustic Doppler profiler

**CNRA** : Centre National de Recherche Agronomique

**GPS** : Système de géolocalisation par Satellite

**HEC-RAS** : Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

**LIDAR** : Ligth Detection and Raging

**MNT** : Modèle Numérique du Terrain

**OMM** : Organisation Météorologique Mondiale

**SMI** : Société des mines d'Ity

**SODEMI** : Société Pour Le Développement Minier de la Côte D'Ivoire

**STRM** : Shuttle Radar Topography Mission

**UNESCO** : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la Culture

## LISTE DES TABLEAUX

**Pages**

<b>Tableau I</b> : Caractéristiques géométriques des canaux de dérivation. ....	20
<b>Tableau II</b> : Débits et périodes de retour. ....	22
<b>Tableau III</b> : Valeur caractéristiques du critère de Nash et de la RMSE avant et après la construction des ouvrages hydrauliques. ....	44

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Situation géographique du bassin versant du Cavally (Brou, 2019) .....	5
<b>Figure 2</b> : Diagramme ombrothermique de la station de Zouan-Hounien (1971-2015). .....	6
<b>Figure 3</b> : Carte des pentes du bassin versant du Cavally (Brou, 2019). .....	7
<b>Figure 4</b> : Réseau hydrographique du bassin versant du fleuve Cavally à la station de Taté (Brou, 2019). .....	8
<b>Figure 5</b> : Formation géologique dans la localité d'Ity (source :SNC-LAVALIN INC, 2015). 9	
<b>Figure 6</b> : Activité d'orpillage au niveau de Daapleu à la périphérie de la SMI (15-12-2019). .....	10
<b>Figure 7</b> : Localisation des stations hydrométriques (Brou, 2019). .....	16
<b>Figure 8</b> : Vue 3D de l'image LIDAR couplée avec l'image STRM (N'Guessan, 2019) .....	17
<b>Figure 9</b> : Volume de contrôle élémentaire pour la dérivation de la continuité (HEC-RAS, 2016).....	18
<b>Figure 10</b> : Dimensionnement du pont dans HEC-RAS. ....	21
<b>Figure 11</b> : Hydrogramme de crue de 1988 à la station hydrométrique d'Ity. ....	23
<b>Figure 12</b> : Zone de maillage 1D-2D avant (A) et après (B) l'intégration des ouvrages hydrauliques. ....	24
<b>Figure 13</b> : Structures latérales des canaux de Bakatouo (A), Walter (B), Daapleu (C) et de Coline Sud (D). ....	25
<b>Figure 14</b> : Structure latérale du modèle. ....	26
<b>Figure 15</b> : Distribution des vitesses pour la période de retour de 10 et 20 ans.....	30
<b>Figure 16</b> : Distribution des vitesses pour la période de retour de 50 et 100 ans.....	31
<b>Figure 17</b> : Répartition des vitesses dans le lit du cours d'eau avant dérivation du Cavally... 32	
<b>Figure 18</b> : Distribution bidirectionnelle des vitesses dans les zones de construction des canaux de dérivation de Bakatouo (A) ; Walter (B) ; Daapleu (C) et Colline Sud (C) avant dérivation du Cavally. ....	33
<b>Figure 19</b> : Répartition des vitesses dans le lit du cours d'eau après dérivation du Cavally... 34	
<b>Figure 20</b> : Distribution bidirectionnelle des vitesses dans les canaux de dérivation de Bakatouo (A) ; Walter (B) ; Daapleu (C) et Colline Sud (C) après dérivation du Cavally.....	35
<b>Figure 21</b> : Distribution des profondeurs maximales du fleuve Cavally avant intégration des ouvrages hydrauliques pour la crue de 1988. ....	36
<b>Figure 22</b> : Variation de la profondeur maximale dans le lit mineur du fleuve dans la zone d'Ity avant la coupure des méandres pour la crue de 1988. ....	37

<b>Figure 23</b> : Distribution des profondeurs maximales du fleuve Cavally après intégration des ouvrages hydrauliques pour la crue de 1988. ....	38
<b>Figure 24</b> : Variation de la profondeur maximale dans le lit mineur du fleuve dans la zone d'Ity après la coupure des méandres pour la crue de 1988. ....	39
<b>Figure 25</b> : Etendue des altitudes de surface libre de l'eau (ASL) des inondations du fleuve Cavally avant la réalisation des ouvrages hydrauliques pour la crue de 1988. ....	40
<b>Figure 26</b> : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée avant coupure des méandres pour la crue de 1988. ....	41
<b>Figure 27</b> : Etendue des altitudes de surface libre de l'eau (ASL) des inondations du fleuve Cavally après la réalisation des ouvrages hydrauliques pour la crue de 1988. ....	42
<b>Figure 28</b> : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée après coupure des méandres pour la crue de 1988. ....	43
<b>Figure 29</b> : Ligne d'eau simulée et observée du mois de juillet 2015. ....	43
<b>Figure 30</b> : Ligne d'eau simulée et observée Février 2019. ....	44

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

L'eau est une ressource très importante pour le développement de la vie sur la planète Terre. Le développement de la quasi-totalité des activités socio-économiques dépend de sa disponibilité ; alors que cette ressource subit de forte pression dans beaucoup d'endroits sur la planète (UNESCO, 2020), notamment en Afrique Subsaharienne où elle devient de plus en plus rare (Baron, 2010).

En Côte d'Ivoire, une intensification des contrastes saisonniers (sécheresses, précipitations extrêmes) est observée ces dernières décennies (Brou *et al.*, 2005 ; Boko-Koidia *et al.*, 2016). Parallèlement à l'évolution du climat, la pression des activités anthropiques sur le milieu naturel augmente rapidement et cela affecte inévitablement les ressources d'eau tant du point de vue qualitatif (pollution domestique et industrielle), que quantitatif (augmentation des prélèvements). En effet, l'augmentation de la population et des activités économiques à proximité des cours d'eau a entraîné une amplification des risques d'inondation sur de nombreux bassins versants (Chen & Liu, 2017). Face à la récurrence des crues, leur compréhension et leur prévision représentent un moyen intéressant de prévention des risques d'inondation.

Le bassin versant du Cavally notamment dans la localité de Zouan-Hounien, est soumis à des activités anthropiques de tout genre (Konan *et al.*, 2020). Parmi ces activités, l'exploitation minière industrielle, l'orpillage et la construction d'ouvrages hydrauliques contribuent fortement à la modification du fonctionnement hydrologique des cours d'eau. Le fleuve Cavally présente beaucoup de méandres dans cette zone et son lit est fortement perturbé par des orpailleurs clandestins opérant dans le lit du fleuve avec des motopompes pour draguer le sable du fond. De plus, la Société des Mines d'Ity (SMI), s'appuie également sur cette ressource pour ses activités d'exploitation de minerai et envisage de couper plusieurs méandres et de construire des canaux de dérivation à ces endroits. L'impact de ces aménagements sur le fonctionnement hydrodynamique du cours d'eau a été analysé par Kouassi *et al.* (2019). Cette étude qui s'est appuyée sur un modèle hydraulique 1D-2D a montré que les conditions hydrauliques (niveaux d'eau, vitesses) dans le canal de dérivation restent presque identiques à celles du fleuve Cavally après l'intégration des ouvrages. Cependant, cette étude a mis en évidence l'ampleur de la propagation d'ondes de crue et de probables zones inondables près du périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (SMI). Compte tenu de l'importance de cette ressource dans le développement des activités minières de la SMI, il est nécessaire d'approfondir la compréhension du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally dans cette zone. Ainsi, la modélisation couplée 1D/2D reste l'outil de première approche pour comprendre le comportement hydrodynamique du cours d'eau dans le lit mineur et le lit majeur. C'est pour

## INTRODUCTION

répondre à cette préoccupation que cette étude dont le thème est « *Simulation du fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally à l'aide d'un modèle couplé 1D-2D dans la zone d'Ity Zouhan-Hounien* » a été initiée.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact des ouvrages hydrauliques sur le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally. De façon spécifique il s'agira de :

- Évaluer les paramètres hydrodynamiques du fleuve Cavally avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques ;
- Cartographier les zones inondables du bassin versant du fleuve Cavally à Ity.

Le présent mémoire est structuré en trois parties :

- la première partie porte sur les généralités de la zone d'étude ainsi que les notions liées à la thématique abordée ;
- la deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisées ;
- la troisième partie présente les résultats obtenus et les discussions qui en découlent.

Nous terminerons ce travail par une conclusion suivie des perspectives de l'étude.

# **PARTIE 1 : GENERALITES**

## GENERALITES

### 1.1. Situation géographique du bassin versant du fleuve Cavally

Le bassin versant du Cavally est situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, entre 6°8' et 7°9' de latitude Nord, et entre 7°9' et 8°4' de longitude Ouest (Figure 1). Le fleuve Cavally prend sa source en Guinée, au nord du Mont Nimba, à une altitude voisine de 600 m (Girard *et al.*, 1970). Il a une longueur de 700 km et son lit sert de frontière naturelle entre le Libéria et la Côte d'Ivoire dans son cours moyen (au sud de Toulépleu) et dans son cours inférieur. Trois pays dont la Côte d'Ivoire, la Guinée et le Libéria se partagent le bassin versant du Cavally. La Côte d'Ivoire possède environ 15000 km<sup>2</sup> du bassin versant (Tricart *et al.*, 1973).

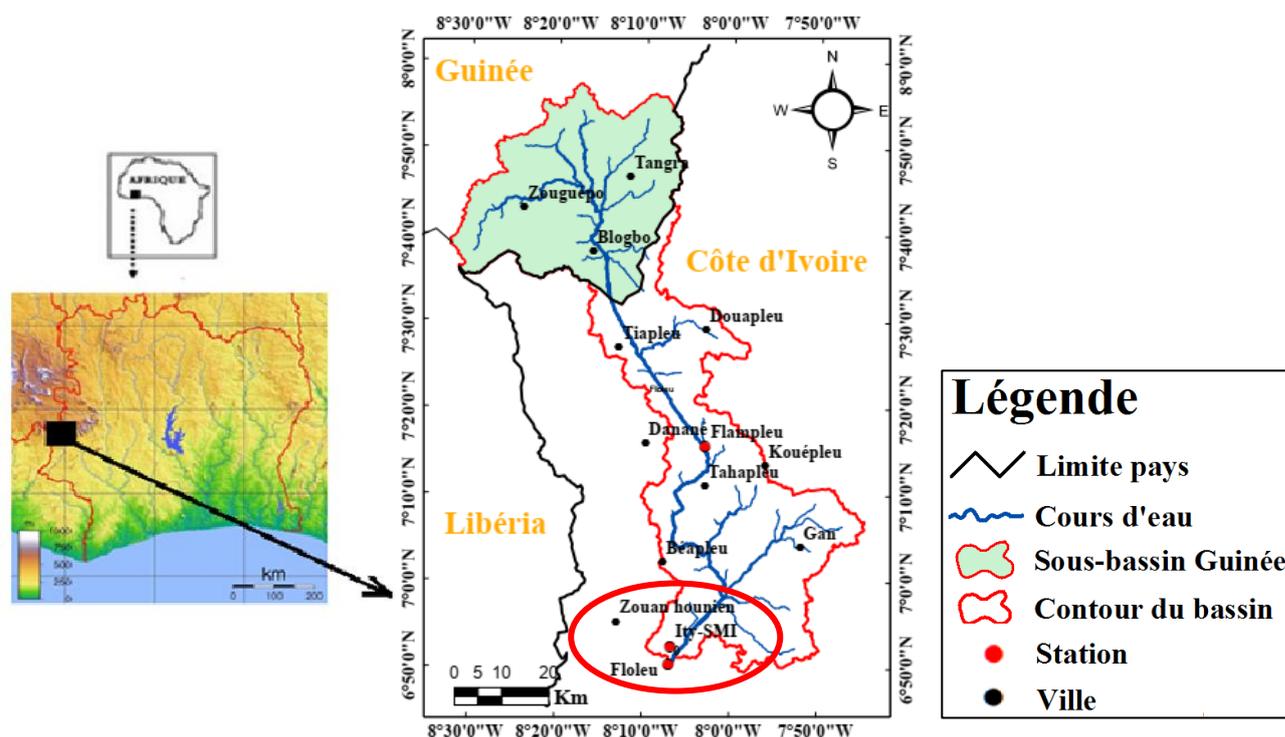


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Cavally.

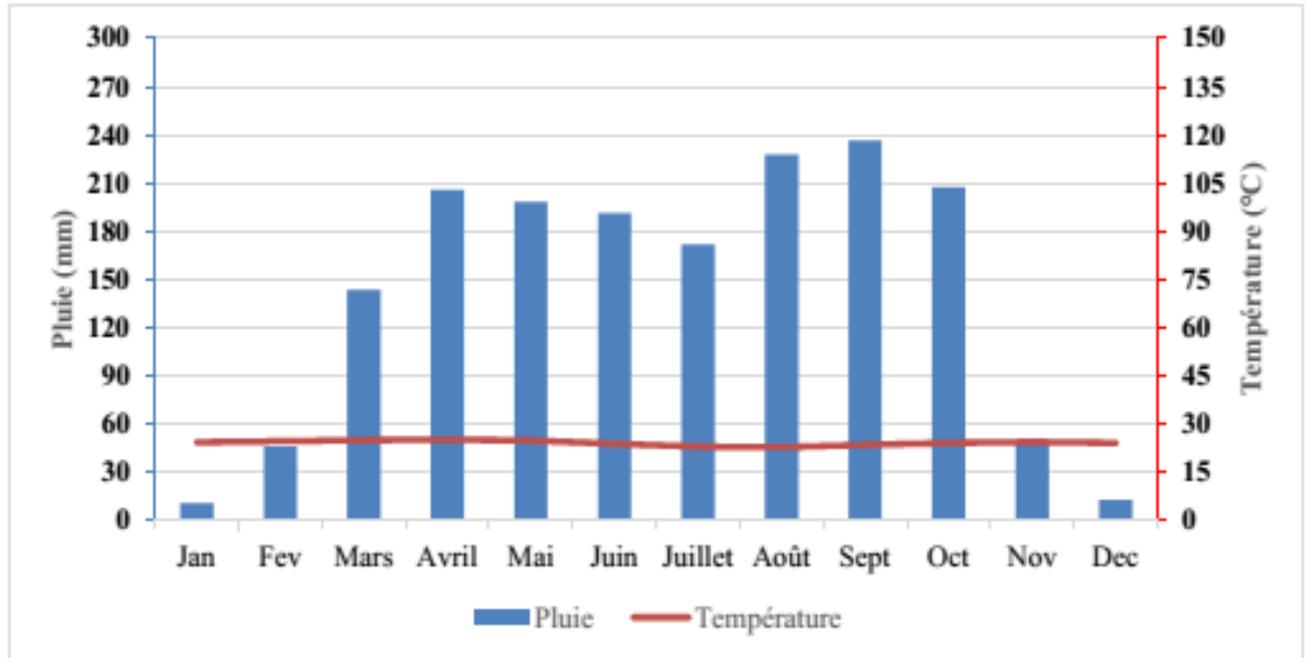
### 1.2. Caractéristiques physiques du bassin versant du Cavally

#### 1.2.1. Climat

Le bassin versant du Cavally appartient à deux types de climat : le climat de montagne dans sa partie nord jusqu'à Zouan-Hounien et le climat équatorial de transition dans sa partie sud à partir de Toulépleu jusqu'à l'embouchure (Girard *et al.*, 1970). Dans la partie Nord, on rencontre un climat de montagne avec deux saisons : une saison pluvieuse de mars à octobre et une saison sèche de novembre à février avec une précipitation moyenne annuelle de 1866 mm (1970-2015) (Figure 2). Le mois le plus sec est janvier avec une pluviométrie moyenne en-dessous de 15 mm. Le mois de septembre est le plus humide avec une pluviométrie moyenne de 236 mm. La température moyenne annuelle est de 25,6 °C. Ce régime se rapproche des

## GENERALITES

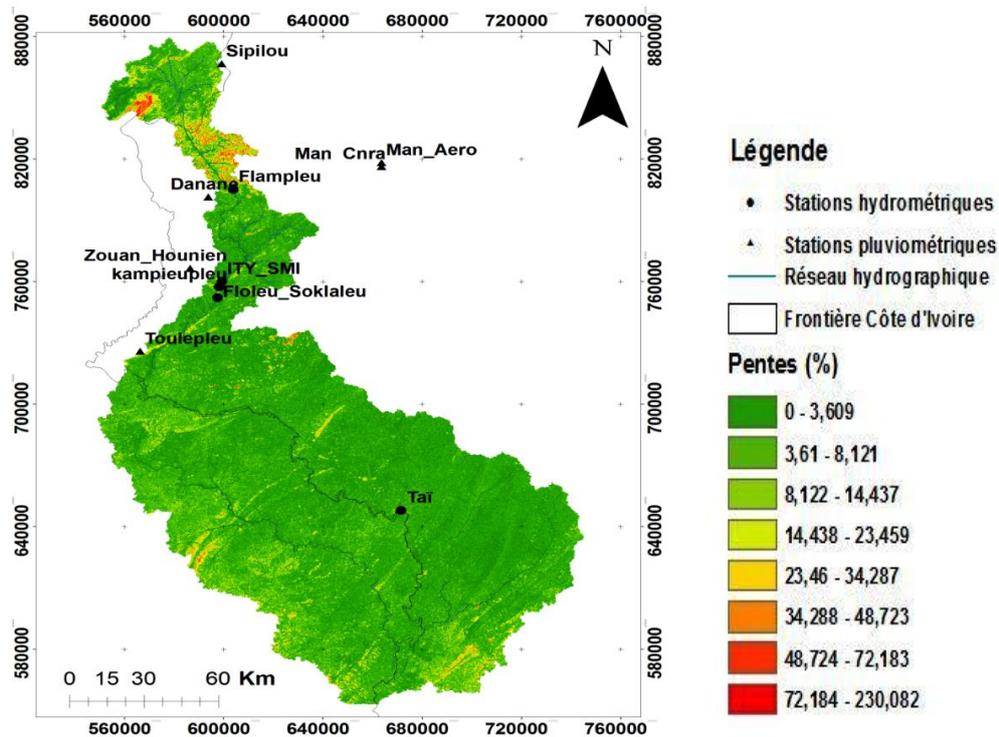
limites entre celui du type tropical de transition et équatorial de transition (Avenard *et al.*, 1971 ; Girard, 1974)



**Figure 2 :** Diagramme ombrothermique de la station de Zouan-Hounien (1971-2015).

### 1.2.2. Relief

Le relief est très accidenté sur le tiers de la superficie du bassin versant du Cavally avec des altitudes dépassant parfois les 1000 m dans ses parties Nord et Centre (CNRA, 2009). La pente moyenne est de 0,85 m/km. Au point de vue hypsométrique, seulement 16 % du bassin se trouve au-dessus de 400 m, 27 % au-dessus de 300 m et plus de la moitié du bassin est au-dessus de 200 m. Dans sa partie Sud, il présente de vastes plaines et de nombreux et larges bas-fonds. La Figure 3 présente l'ensemble des pentes rencontrées sur l'ensemble du bassin versant du Cavally.



**Figure 3 :** Carte des pentes du bassin versant du Cavally (Brou, 2019).

### 1.2.3. Sols

Les sols de type ferrallitique à fertilité chimique moyenne, sont largement dominants. Il y existe aussi des sols développés sur des roches basiques, (potentiellement riches), des sols hydromorphes (bas-fonds) et des sols minéraux (montagnes) (CNRA, 2009).

### 1.2.4. Végétation

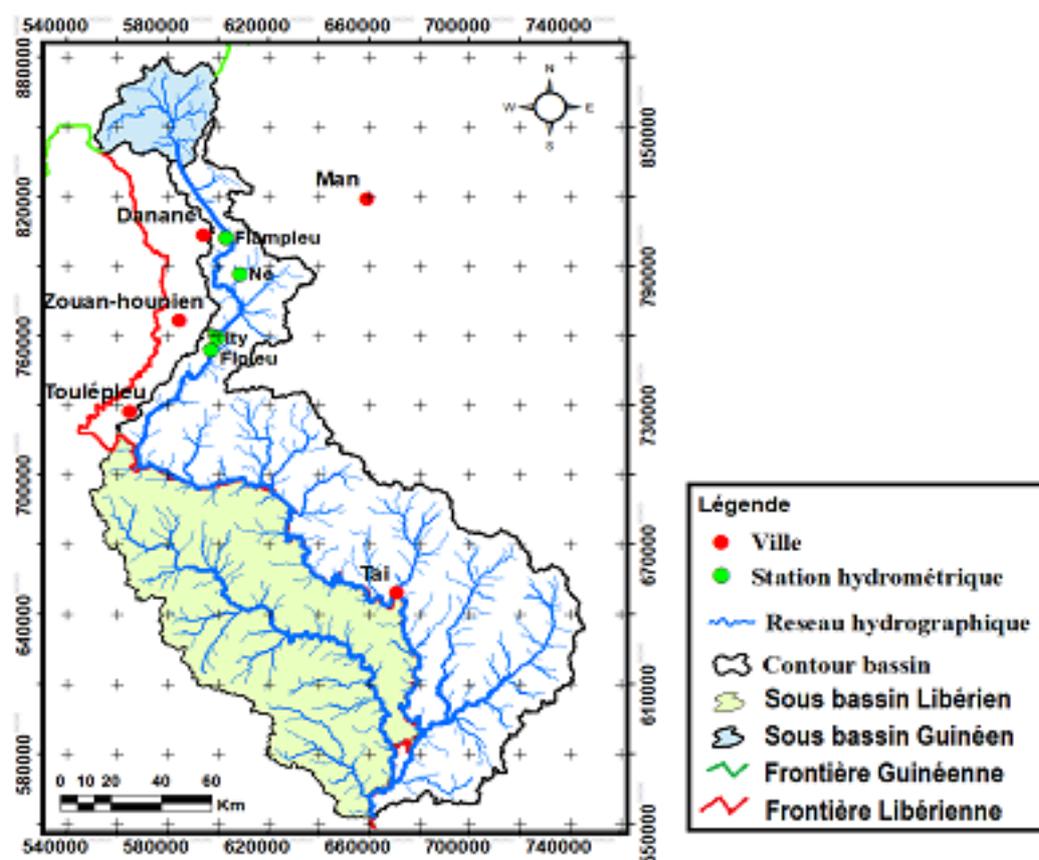
La végétation de forêt dense caractérise le bassin versant du Cavally. Une biodiversité assez importante fait partie intégrante de ce bassin. Cette vaste zone forestière couvre à la fois le Liberia, la Côte d'Ivoire et la Guinée (Ettien, 2010). On note dans cette forêt la présence d'une variété d'espèces d'arbres dont les plus importants sont l'Iroko *Chlorophora Excelsa*, le Bété *Mansonia Altissima*, le Samba *Triplochiton Scelroxylon*, le Framiré *Terminali aIvorensis*, l'Acajou de Grand Bassam *KhayaIvorensis*, le Miangon *Heritiera Utilis*, le Tiamia *Entandrophragma Angolense*, le Fromager *Terminalia Ivorensis* (Ettien, 2010).

### 1.2.5. Réseau hydrographique

La région de Zouan-Hounien est drainée par le fleuve Cavally, caractérisé par un réseau hydrographique dense constitué d'une multitude de petits cours d'eau dont les plus importants sont : le Nilpi, le Doui, le Zo, le Klo (Tricart *et al.*, 1973) (Figure 4). Au lieu où le Cavally

## GENERALITES

prend sa source, il est nommé Djougou, il reçoit en rive gauche le Dire. Jusqu'à Toulépleu, il ne reçoit que de très petits affluents. Avant la zone des rapides de Taï, le Cavally reçoit en rive gauche, le Doui, le Coin, le Doué, le Débé, et en rive droite le Dren. A Taï, il reçoit le N'Cé. Après quoi, une zone de rapides commence et s'étend jusqu'à Grabo. Le Hana et le Neka viennent grossir le Cavally en rive gauche et le Douobé, le Gbeh et le Gi en rive droite (Tricart *et al.*, 1973).



**Figure 4 :** Réseau hydrographique du bassin versant du fleuve Cavally à la station de Taté (Brou, 2019).

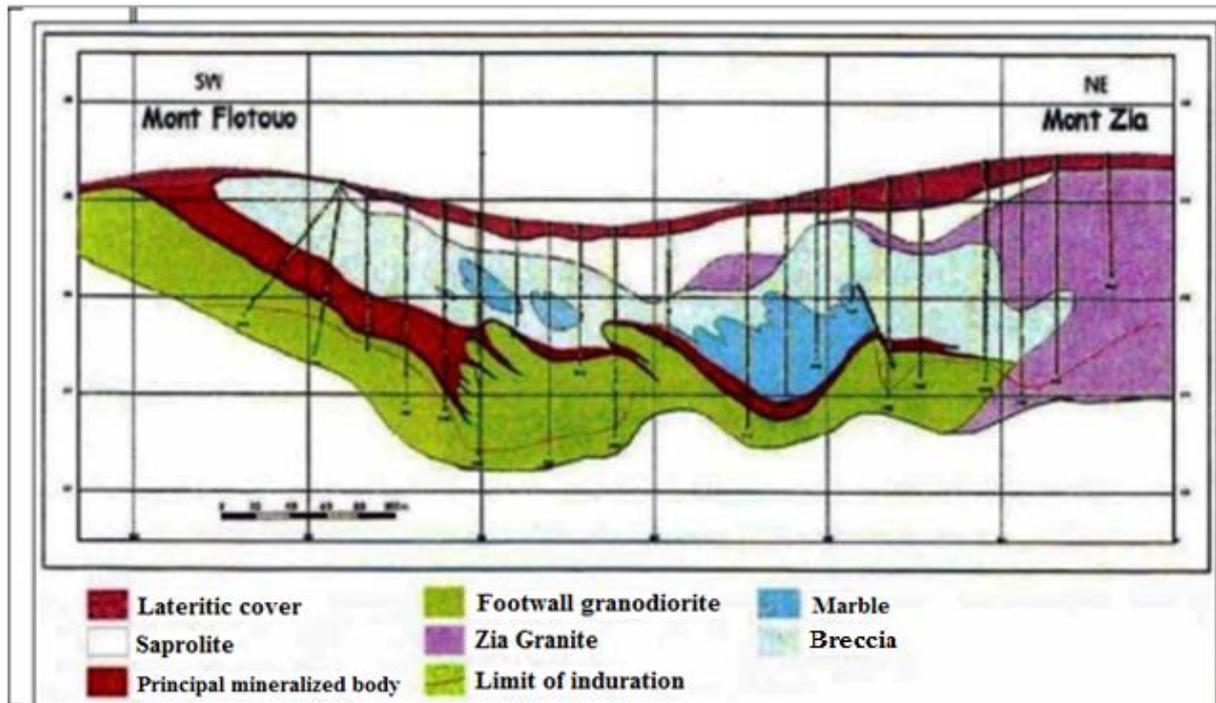
### 1.2.6. Géologie de la zone

La SODEMI dans les années 1962 et 1968 avait entrepris des travaux de prospection qui ont révélé une forte minéralisation en or dans le secteur d'Ity ou dans les années 1940 et 1950 les activités d'orpaillages existait déjà (Papon, 1973). La crise socio politique ivoirienne de 2002 à intensifier les activités d'orpaillages. Le composant dominant fait partie de la séquence Ity, avec des metabasalts dans un environnement à grains fins et carbonatés près de la base donnant lieu à une séquence sédimentaire avec des quantités variables d'horizons carbonatés.

Cette séquence est traversée par des intrus mafiques (gabbros et granodiorites de deux événements magmatiques distincts) qui sont en contact avec les roches métamorphiques carbonatées dont celles-ci présentent une relation spatiale avec la minéralisation.

## GENERALITES

Les faciès de Skarn et de Hornfels sont généralement associés à des roches carbonatées de proximité en contact avec la plaque granodiorite dans la région de Flotou. La zone subit des intempéries et la terre est couverte d'un profil latéral épais. Le saprolite varie de 50-120 m d'épaisseur et recouvert d'au moins 10 m l'horizon latéritique (sensu stricto). La latérite est minéralisée dans les zones de fosse. Aussi, les caractéristiques karstiques sont importantes dans la séquence de carbonate en raison de l'altération d'un hypogène riche en carbonate et en sulfate (Figure 5), (Quan, 2015).



**Figure 5 :** Formation géologique dans la localité d'Ity (source :SNC-LAVALIN INC, 2015).

### 1.3. Activités Socio-économiques

L'agriculture est l'activité principale rencontrée dans la région de Zouan-Hounien. Les produits de base sont essentiellement le cacao, le café, le manioc, le riz et la banane plantain. L'orpaillage clandestin fait également partie des activités économiques de la région. Il est pratiqué le long du fleuve Cavally avec l'usage de motopompes pour extraire le sable au fond du fleuve Cavally (Figure 6).



**Figure 6 :** Activité d'orpaillage au niveau de Daapleu à la périphérie de la SMI (15-12-2019).

### **1.4. Généralités sur la modélisation des écoulements à surface libre**

#### **1.4.1 Modèles hydrauliques**

La modélisation est la représentation simplifiée d'un système complexe (Soualmia *et al.*, 2016). A chaque stade de la modélisation des approximations sont réalisées : perception du phénomène, formalisation en un cadre conceptuel, traduction dans un langage de programmation. En somme, un modèle hydraulique est une sorte de modèle numérique qui résout les équations qui régissent l'écoulement par des moyens numériques (Chow, 1959). (Fillali, 2012).

#### **1.4.2. Modèles conceptuels**

Dans un modèle conceptuel on ne cherche pas à comprendre en détail les phénomènes physiques qui se produisent au sein de l'écoulement, cependant on considère le réseau dans sa globalité (boîte noire) ; c'est-à-dire comme un simple transformateur entrée-sortie. En général, on dispose de valeurs d'entrée et des grandeurs de sortie qui permettent de fixer les paramètres du modèle (Fillali, 2012). Ils traduisent seulement les conséquences des phénomènes se produisant dans le système et par conséquent, ils permettent de contourner les difficultés dues à la complexité hydraulique. Les modèles conceptuels donnent une explication comportementale et non mécaniste des phénomènes.

### 1.4.3. Modèle mécaniste de Barré de Saint-Venant

Les équations en eau peu profonde (ou équations de Saint Venant) sont les équations du mouvement des fluides souvent utilisées pour modéliser de longues vagues telles que les inondations et des ondes de tempête (Chareb, 2005 ; Araud, 2012 ; Ngo, 2014). Ils supposent une vitesse horizontale uniforme verticale et une accélération verticale négligeable (c'est-à-dire, une distribution de pression hydrostatique), ce qui les rend valides lorsque la longueur d'onde est beaucoup plus grande que la profondeur de l'eau. Ils sont un ensemble d'équations aux dérivées partielles non linéaires, constitué de l'équation de continuité (Eq.1) et des équations de la quantité de mouvement (Eq.2 et Eq.3), décrites dans le plan horizontal comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) + \frac{\partial}{\partial t}H + q = 0 \quad \text{Eq 1}$$

Où  $t$  désigne le temps,  $u$  et  $v$  sont les composantes respectivement dans les directions  $x$  et  $y$ ,  $q$  est le débit élémentaire et  $H$  est la dénivellation de la surface libre de l'eau.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u \quad \text{Eq 2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v \quad \text{Eq 3}$$

Où  $u$  et  $v$  sont les vitesses dans les directions cartésiennes,  $g$  est l'accélération gravitationnelle,  $\nu_t$  est le coefficient de viscosité tourbillonnaire horizontale et  $c_f$  est le coefficient de frottement de fond.

### 1.4.4. Modèle hydraulique 1D

La plupart des modèles unidimensionnels (1D) à lits composés tiennent compte des pertes de charges par frottement comme HEC-RAS 4.1 ou Mike 11, d'autres tentent de prendre en charge les pertes par frottement et les pertes dues aux macro turbulences issues de la différence de vitesse entre les lits comme Mage 5 (Ghavasieh *et al.*, 2006) et les plus évolués cherchent à simuler les trois pertes de charges comme Axeriv, Mike Hydro River ou HEC-RAS,5.03. Cependant, la caractéristique principale des codes 1D est qu'ils moyennent la hauteur d'eau (et pour certains la vitesse) sur chaque profil en travers perpendiculaire aux lits mineur et majeur du cours d'eau (Chareb, 2005 ; Kasuri, 2014) Cette caractéristique s'explique par leurs structures ainsi que les équations qui les régissent : elles sont constituées d'un ensemble de profils en travers perpendiculaires aux écoulements. En période de crues les champs de vitesses

sont loin d'être uniformes pour une section en travers donnée. Cela est due au fait que les surfaces libres réelles sont loin d'être horizontales. D'où leur principale faiblesse.

### **1.4.5. Modèle hydrauliques 2D**

Les modèles bidimensionnels (2D ou 2D-H) tentent de reproduire ces variations (surfaces libres et champs de vitesses) : ils sont construits sur un réseau maillé qui permet de donner les grandeurs hydrauliques (vitesse et hauteur d'eau) pour chaque cellule du réseau (Archambeau, 2006 ; Boudjelal *et al.*, 2015). Les équations qui régissent ces modèles sont moyennées sur la hauteur (d'où 2D-H pour 2D-hauteur) et donnent des champs de vitesse pouvant varier dans le plan mais pas sur la hauteur. Ces modèles à priori sont intéressants mais sont très gourmands en temps de calcul. Ils sont beaucoup plus utilisés dans le domaine de la propagation des crues (Bates & Anderson, 1993 ; Montz & Grunfest, 2002 ; Archambeau, 2006 ; Erpicum, 2006 ; Tamisier *et al.*, 2017).

### **1.4.6. Description du modèle HEC-RAS**

HEC-RAS signifie Hydrologic Engineering Center's River Analysis System. C'est un modèle qui a été développé par les ingénieurs de l'armée américaine. Il permet d'effectuer des calculs d'écoulements à surface libre en régime permanent ou transitoire à travers les équations de Saint-Venant (USACE, 2010). Ce modèle s'est déjà montré très performant pour ce type d'étude, et bon nombre d'entreprises et de laboratoires le considèrent comme l'outil idéal de première approche (Brou, 2019). Il consiste en général à déterminer la hauteur d'eau dans la rivière à chaque débit entrant et aussi quelques variables caractéristiques d'un écoulement fluvial, comme la charge, la vitesse de l'eau, ou autre. Les profils en long sont calculés à l'altitude de leurs profils en travers, ils sont perpendiculaires au sens de l'écoulement et présentent des coordonnées et des altitudes topographiques. Ils décrivent la forme et l'allure de la rivière (Brou, 2019). Par rapport à d'autres modèles de simulation, HEC-RAS tient compte des calculs en présence des ouvrages dans la rivière pendant la simulation et garde en général les topographies extraites des données du système géographique. Le temps de calcul de HEC-RAS pour une simulation est plus rapide (USACE, 2016).

### **1.4.7. Atout du modèle HEC-RAS**

L'objectif principal du programme HEC-RAS est très simple. En effet, il est conçu pour exécuter le calcul hydraulique unidimensionnel et bidimensionnel pour tous les réseaux de canaux naturels et artificiels par le calcul des hauteurs de la surface libre de l'eau en toute section d'intérêt pour un ensemble de données d'écoulement en régime permanent ou par des

## GENERALITES

hydrogrammes de propagation des crues par la simulation de l'écoulement en régime non permanent (Chareb, 2005 ; USAGE, 2016).

### **Conclusion partielle**

La région de Zouan-Hounien est caractérisée par un climat équatorial de transition avec deux saisons : une saison pluvieuse de mars à octobre et une saison sèche de novembre à février avec une précipitation moyenne annuelle de 1866 mm (1970-2015). La température moyenne annuelle est de 25,6 °C. Le relief est très accidenté avec des altitudes dépassant parfois les 1000 m. La pente moyenne est de 0,85 m/km. Les sols sont de type ferrallitique, développés sur des roches basiques. Les activités économiques sont dominées par l'agriculture. Néanmoins, les populations s'adonnent aussi à l'orpaillage clandestin le long du fleuve Cavally. Après les généralités qui nous ont permis d'avoir une notion de la zone d'étude, les atouts et les équations qui régissent le modèle hydraulique HEC-RAS, nous passons à présent à la deuxième partie consacrée au matériel et méthodes adoptées.

# **PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES**

## **2.1. Matériel**

Le matériel de l'étude est composé de :

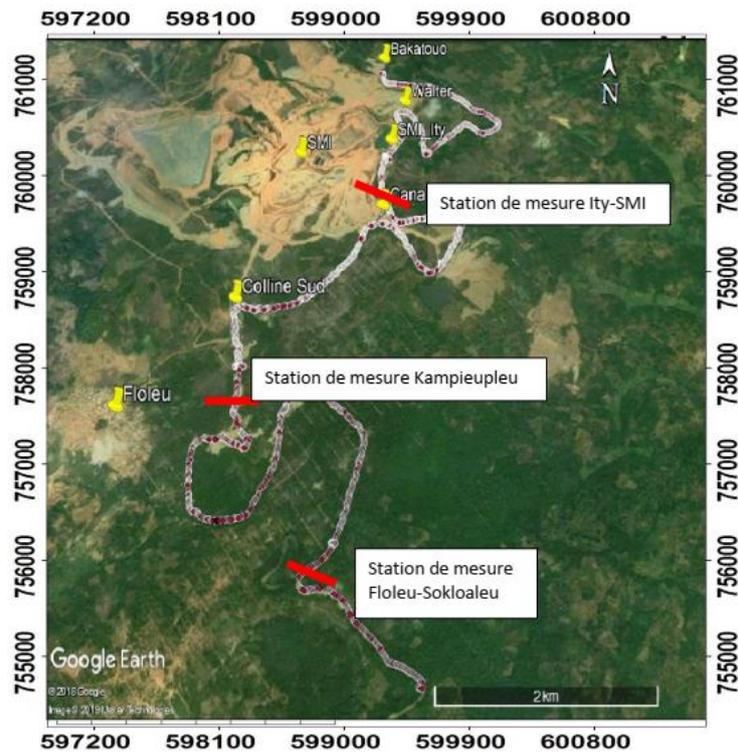
- ✓ d'un GPS différentiel modèle STONEX S8 Plus de 5 mm de précision horizontale statique et 10 mm de précision statique verticale ;
- ✓ un courantomètre ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) pour les mesures de débit ;
- ✓ un hors-bord pour le déplacement sur le plan d'eau ;
- ✓ un moulinet au saumon de type C31 pour enregistrer les vitesses ;
- ✓ un appareil photo numérique a permis la prise de vue.

### **2.1.1. Données hydrologiques**

Les données historiques de débits et de niveau d'eau au pas de temps journalier ont été fournies par la Direction de l'Hydrologie (DH) de Côte d'Ivoire. Ce sont les données qui ont été collectées à la station d'Ity. Ces données sont disponibles sur la période 1980-2001 ; soit 21 ans de données.

### **2.1.2. Données de terrain**

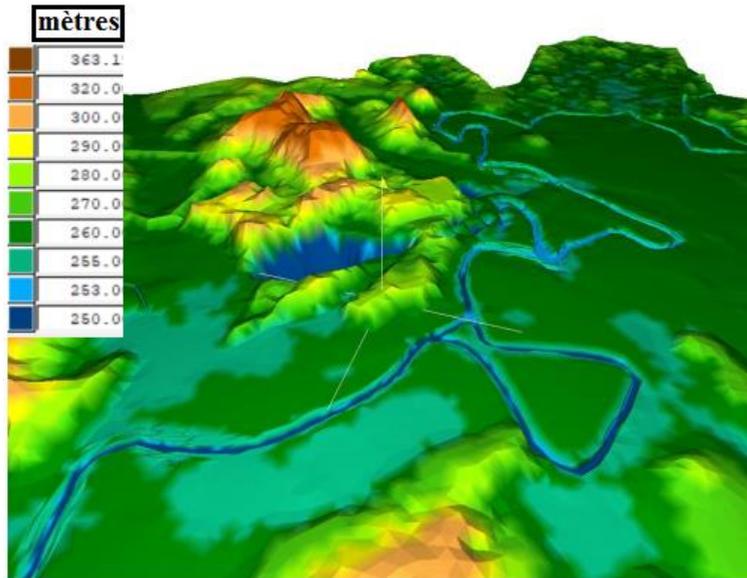
De 2015 à 2019 plusieurs campagnes de mesure ont été effectuées sur une section du fleuve Cavally entre Bakatouo et Floleu-Soklaleu (Figure 7). Elles ont concerné des mesures de débit du cours d'eau, les vitesses du courant, les niveaux d'eau, des levés bathymétriques et le prélèvement des échantillons de sédiments. Ces mesures ont été effectuées en période de hautes eaux entre juillet et octobre et en période de basses eaux entre février et mars. Une première campagne s'est déroulée du 19 juillet au 17 octobre 2015. Ces mesures ont été effectuées chaque semaine durant les trois mois. Une deuxième campagne de collecte de données s'est déroulée du 24 au 26 octobre 2018. Une troisième campagne de mesure s'est déroulée en période d'étiage du 18 février au 1er mars 2019. Au cours de ces campagnes, les stations de Flampleu et d'Ity ont été réhabilitées. Toutes ces campagnes de mesures se sont déroulées lors des travaux de thèse de Brou (2019). Les données de terrain ont été fournies par le laboratoire des sciences et technologies de l'environnement.



**Figure 7 :** Localisation des stations hydrométriques (Brou, 2019).

### 2.1.3. Données topographiques

Un modèle numérique de terrain MNT-SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission) d'une résolution de 90 m a servi à délimiter le bassin versant du Cavally. Une image *Ligth Detection and Ranging* (LIDAR) de résolution 0,50 m a été mise à notre disposition par la Société des Mines d'Ity (SMI) (Figure 8). Cette image Lidar a été couplée à l'image STRM 90 m pour faire un ajustement du modèle numérique d'élévation pour la réalisation du modèle de propagation des crues.



**Figure 8 :** Vue 3D de l'image LIDAR couplée avec l'image STRM (N'Guessan, 2019)

#### 2.1.4. Logiciels de traitement des données

Les logiciels utilisés pour cette étude sont :

- HEC-RAS 5.04 pour la modélisation du fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally ;
- Arcgis 10.4 a été utilisé pour la réalisation des cartes de propagation des crues ;
- Excel a permis d'élaborer les graphiques

## 2.2. Méthodes

### 2.2.1. Modélisation des écoulements à surface libre en 1D

La modélisation hydraulique en 2D avec HEC-RAS ne permet pas d'insérer les ouvrages hydrauliques, elle ne le permet qu'en 1D. La modélisation de l'influence des ouvrages hydrauliques a donc été réalisée à l'aide du modèle en 1D. Les ouvrages concernés sont le canal de dérivation et le pont de Daapleu, les canaux de dérivation de Bakatouo, Walter et colline sud. Les dimensions des canaux de dérivation retenues sont celles de (Brou, 2019). Concernant les dimensions du pont, elles ont été calculées lors d'une étude réalisée par le cabinet Knight Piésold consulting et tiré du rapport d'étude de Dave (2017).

#### 2.2.1.1 Equations mises en jeu dans le modèle 1D

HEC-RAS est un modèle qui est beaucoup utilisé dans le domaine de l'hydraulique à surface libre. Il utilise les équations de Saint-Venant 1D pour relier les hauteurs d'eau, les débits, les

vitesses. Ces équations se déduisent des équations de Navier-Stokes grâce à des simplifications liées à la morphologie du cours d'eau (USAID, 2013).

#### ❖ Equations de Saint-Venant 1D en écoulement non permanent

Dans cette étude, les écoulements sont considérés comme non permanents vu que les variations des paramètres hydrauliques sont fonction du temps (débits, niveaux d'eau, profondeurs, vitesses). Dans ce cas, les équations mises en jeu sont celles de la conservation de la masse et celles de la conservation de la quantité de mouvement. Ces équations correspondent à la résolution des équations de Saint-Venant 1D par la méthode des différences finies (Chareb, 2005). Pour obtenir ces équations on fait un bilan sur un petit volume de contrôle (Figure 9). Elles sont décrites par les équations (Eq.4 et Eq.5) qui sont respectivement énoncer ci-dessous :  
Equation de la conservation de la masse :

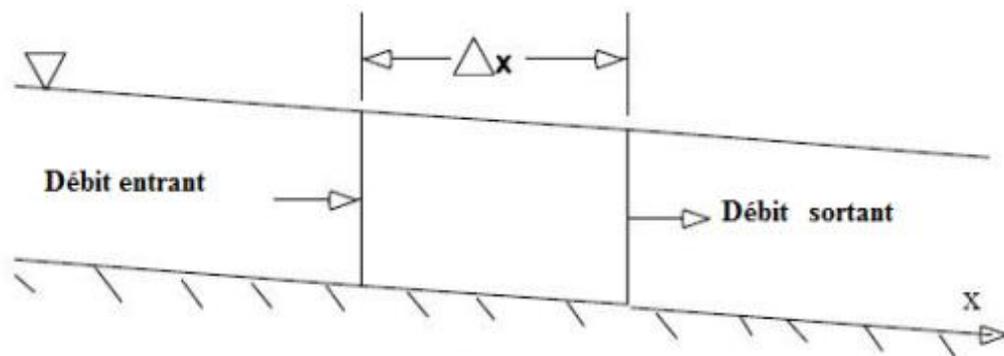
$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_i = 0 \quad \text{Eq 4}$$

Equation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad \text{Eq 5}$$

Avec :  $A_T$  : section mouillée ( $m^2$ ) ;  $Q$  : Débit ( $m^3/s$ ) ;  $q_i$  : débit linéaire ;  $t$  : temps (s) ;  $x$  : distance longitudinale (m) ;  $z$  : côte du plan d'eau ;  $S_f$  : Angle de frottement représentatif entre deux sections ;  $\frac{\partial z}{\partial x}$  : Pente du fond du canal.

La résolution des équations du modèle 1D est basée sur la théorie des différences finies.



**Figure 9** : Volume de contrôle élémentaire pour la dérivation de la continuité (HEC-RAS, 2016).

### 2.2.1.2 Données d'entrée du modèle

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

- ✓ le modèle numérique d'élévation (MNT) a été créé par la fusion du levé LiDAR aérien et d'un modèle numérique d'élévation SRTM 90. Le SRTM 90 a été ajusté de -3,85 m pour obtenir le même système de référence que le LiDAR ;
- ✓ la ligne d'eau mesurée en 2015 a été utilisée pour le calage et la ligne d'eau mesurée en 2019 pour la validation du modèle ;
- ✓ les paramètres de calage sont : le coefficient de Manning constitue le principal paramètre de calage du modèle. Dans le cadre de cette étude la valeur du coefficient de Manning choisie est : 0,06 pour le lit majeur et 0,052 pour le lit mineur. Ces valeurs sont fonctions du type de sol, de la rugosité du lit du fleuve, de la présence et de l'absence de végétation dans le lit et les berges du fleuve (Chow, 1959) ;
- ✓ l'hydrogramme de crue de l'année 1988 a été utilisée pour les simulations en écoulement non permanent ;
- ✓ une pente moyenne de fond de 0,000194 m/m a été utilisée pour le lit du cours d'eau.

### 2.2.1.3 Intégration des ouvrages hydrauliques dans le modèle

L'intégration des ouvrages hydrauliques est une étape essentielle dans la réalisation de cette étude. L'intégration des ouvrages dans le modèle HEC-RAS, ne peut être possible qu'à partir d'un modèle hydraulique 1D. Les dimensions des canaux de dérivation ont été tirées de travaux effectués par (Brou, 2019). Les dimensions se présentent comme suit :

#### ❖ Critères de dimensionnement des canaux

Les critères de dimensionnement des différents canaux sont traduits dans le Tableau I. Ces critères sont les suivants :

- ✓ une période de retour de 2 ans soit un débit de 246 m<sup>3</sup>/s, ce choix se justifie par le fait que le Cavally sort naturellement de son lit mineur à partir d'un débit de 240 m<sup>3</sup>/s en référence aux analyses hydrologiques effectuées ;
- ✓ un coefficient de forme de 0,07 ;
- ✓ une pente de 0,003 m/m ;
- ✓ un fruit des berges de 2,5 ;
- ✓ une vitesse moyenne admise dans le canal  $V=1,5$  m/s ;
- ✓ un coefficient de rugosité de 0,01.

**Tableau 1** : Caractéristiques géométriques des canaux de dérivation.

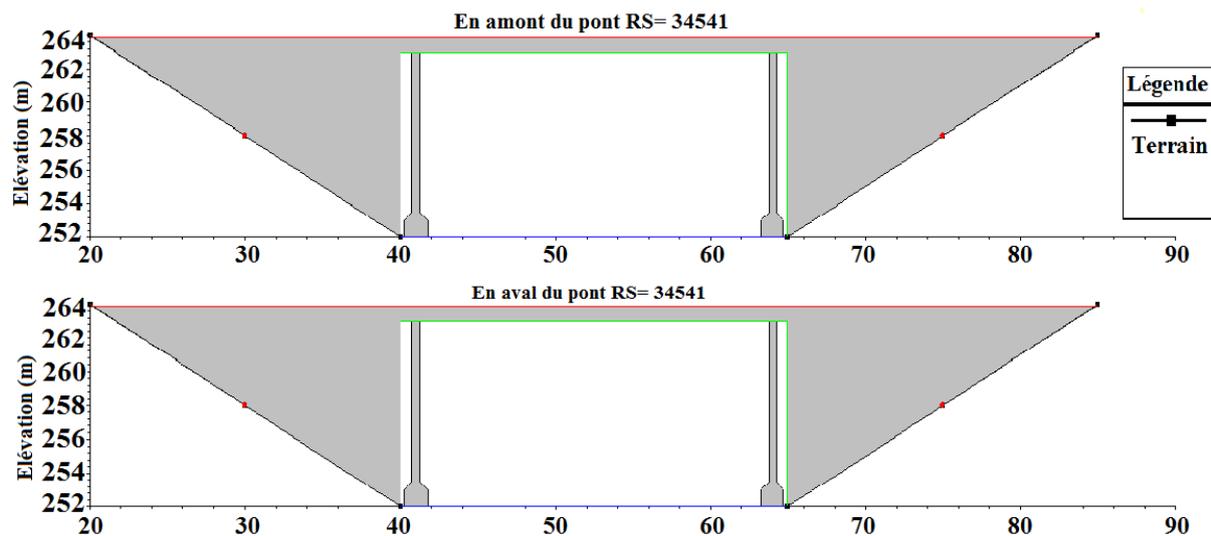
<b>Canaux</b>	<b>Base (m)</b>	<b>Profondeur (m)</b>	<b>Fruit des berges</b>	<b>Longueur (m)</b>	<b>n (s/m<sup>(1/3)</sup>)</b>
<b>Bakatouo</b>	25	8,5	3H :1V	783	0,06
<b>Walter</b>	25	9,5	3H :1V	550	
<b>Daapleu</b>	22	6,5	2,5H :1V	280	
<b>Colline Sud</b>	22,7	6,9	2,5 :H1V	503	

#### ❖ Critères de dimensionnement du pont de Daapleu

Les dimensions du pont sont issues du rapport de mission de l'entreprise canadienne Knight Piésold consulting. Une société spécialisée dans le domaine du génie civil. Le pont a été dimensionné pour une période de retour de 100 ans.

Les paramètres de conception suivants ont été adoptés (Figure 10) :

- Largeur du pont = 4,5 m (trafic à une seule voie (3,5 m) et accès piétons (1 m)) ;
- Masse nominale des véhicules sur le pont = 5 tonnes ;
- Niveau d'inondation prévu pour une période de retour de 100 ans= RL 263,6 m ;
- Niveau de conception (base du tablier du pont) 100 ans plus franc-bord (1 000 mm) = RL 263,1 m. RL264.1 m ;
- Construction d'un déversoir d'urgence dans la voie d'accès pour permettre l'équilibre d'un débit de crue de 500 ans ;
- Largeur minimale de la base du canal de dérivation = 25 m.



**Figure 10 :** Dimensionnement du pont dans HEC-RAS.

#### 2.2.1.4. Conditions initiales du modèle 1D

La simulation s'est faite sur une période de 3 mois. A un temps  $t = 0$ , on choisit deux dates soit une date de début et une date de fin en fonction de la période des hydrogrammes de crue utilisée. Ensuite on renseigne quatre autres temps, soit un intervalle de temps d'entrée et un intervalle de temps de fin. Un pas de temps variable a été utilisé pour les calculs en fonction des objectifs visés. Les simulations sont effectuées en amont à la station hydrométrique d'Ity à partir des débits de crue de 1988 ; l'année où la plus grande crue a été observée. Selon le pas de temps définis les simulations peuvent durer de quelques minutes à plusieurs jours.

#### 2.2.1.5. Conditions aux limites du modèle 1D

Les conditions aux limites du modèle sont les suivantes :

- ❖ En amont : l'hydrogramme de crue de l'année 1988. Le choix de cette période se justifie par la cohérence des données et la crue la plus importante enregistrée sur le bassin versant ;
- ❖ En aval : une pente longitudinale de 0,000194 m/m a été imposée comme condition aux limites.

#### 2.2.2. Modélisation des écoulements à surface libre en 2D

La modélisation de la propagation des crues en 2D permet de mieux apprécier la distribution spatiale de l'inondation. Elle fait ressortir l'étendue de l'inondation (surface libre de l'eau), la distribution des lignes de courant (la vitesse) et la répartition de la profondeur de l'inondation.

### 2.2.2.1. Equations mises dans le modèle 2D

#### ❖ Equation de continuité

L'équation de continuité se formule comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) + \frac{\partial}{\partial t}H + q = 0 \quad \text{Eq 6}$$

Où  $t$  est le time  $u$  et  $v$  sont les composantes selon les directions  $x$  et  $y$ ,  $q$  est le débit élémentaire et  $H$  est la dénivellation de la surface libre de l'eau.

#### ❖ Equation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_i \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad \text{Eq 7}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_i \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad \text{Eq 8}$$

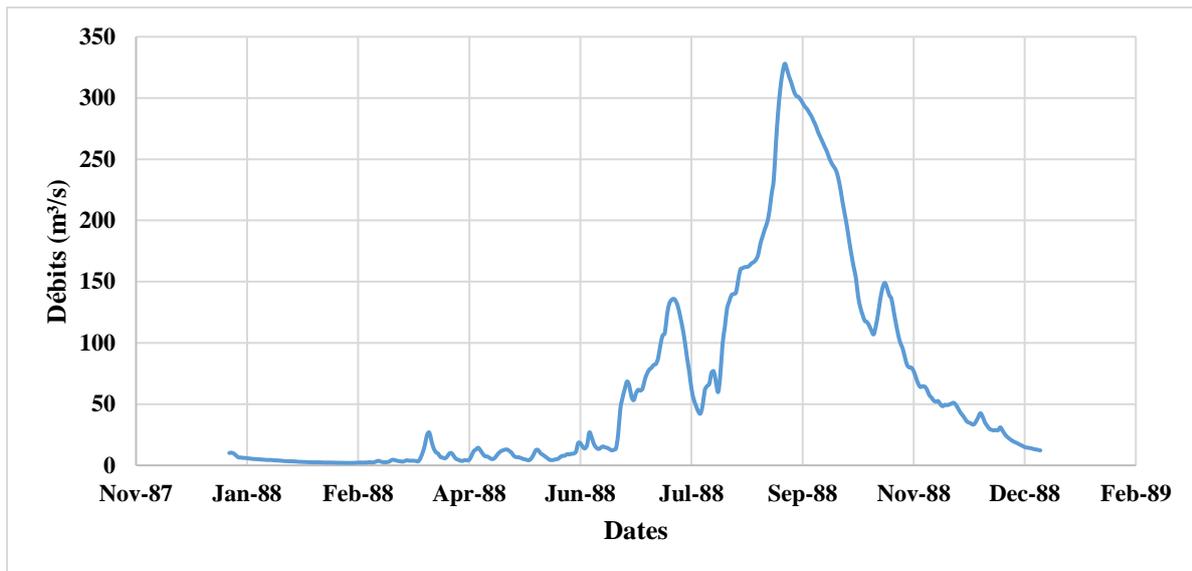
Où  $u$  et  $v$  sont les vitesses dans les directions cartésiennes,  $g$  est l'accélération gravitationnelle,  $v_i$  est le coefficient de viscosité tourbillonnaire horizontale,  $c_f$  est le coefficient de frottement de fond, et  $f$  est le paramètre de Coriolis.

### 2.2.2.2. Conditions initiales

Les conditions initiales appliquées au modèle 2D sont identiques aux conditions initiales du modèle 1D. Les périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans ont servi à effectuer les différentes simulations. Le Tableau II présente les différentes périodes de retour. L'hydrogramme de crue de l'année 1988 qui a servi aux simulations est présenté par la Figure 11.

**Tableau 2 :** Débits et périodes de retour.

<i>Période de retour (ans)</i>	<i>Débits (m<sup>3</sup>/s)</i>
100	365
50	353
20	334
10	316



**Figure 11** : Hydrogramme de crue de 1988 à la station hydrométrique d'Ity.

### 2.2.2.3. Calage du modèle 2D

Les données utilisées pour l'étalonnage du modèle sont :

- La ligne d'eau de 2015 a été utilisée pour le calage du modèle ;
- Un coefficient de Manning de  $(0,052 \text{ s/m}^{1/3})$  a été utilisé pour le lit mineur. Celui du lit majeur est de  $(0,006 \text{ s/m}^{1/3})$  pour le lit majeur ;
- La pente du fond du canal du fleuve Cavally qui est de  $0,000194 \text{ m/m}$ .

Un pas de temps d'une heure (1h) a été imposé lors de la simulation. Ce pas de temps en effet offrait moins d'instabilité dans la simulation. En effet, après différentes simulations le pas de temps (1h) est le meilleur choix car il offre moins d'instabilité.

### 2.2.2.4. Validation du modèle 2D

La validation du modèle a consisté à utiliser des données autres que celles utilisées lors de la calibration tout en utilisant les mêmes paramètres obtenus lors de la calibration. La ligne d'eau de 2019 a été utilisée pour la validation du modèle.

### 2.2.3. Modélisation des écoulements à surface libre en 1D-2D

Les couplages 1D/2D sont des modélisations qui combinent un modèle 1D du lit mineur du cours d'eau de manière à intégrer les ouvrages hydrauliques dans les calculs et un modèle 2D pour les zones de propagation des crues en lit majeur. Les deux modèles communiquent par des liaisons de types « seuil latéral » sur le linéaire des berges.

### 2.2.3.1. Maillage du modèle couplé 1D-2D avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques

Le maillage utilisé couvre la portion du fleuve Cavally depuis la station d'Ity jusqu'à la station de Floleu. La taille des mailles carrées a été fixée à 30 m x 30 m (Figure 12). Le maillage s'est fait sur un modèle numérique d'élévation de résolution 90 m couplé à une image LIDAR de 0,50 m de résolution dans le but de faire un ajustement du modèle numérique d'élévation pour la réalisation du modèle de propagation des crues 1D-2D.

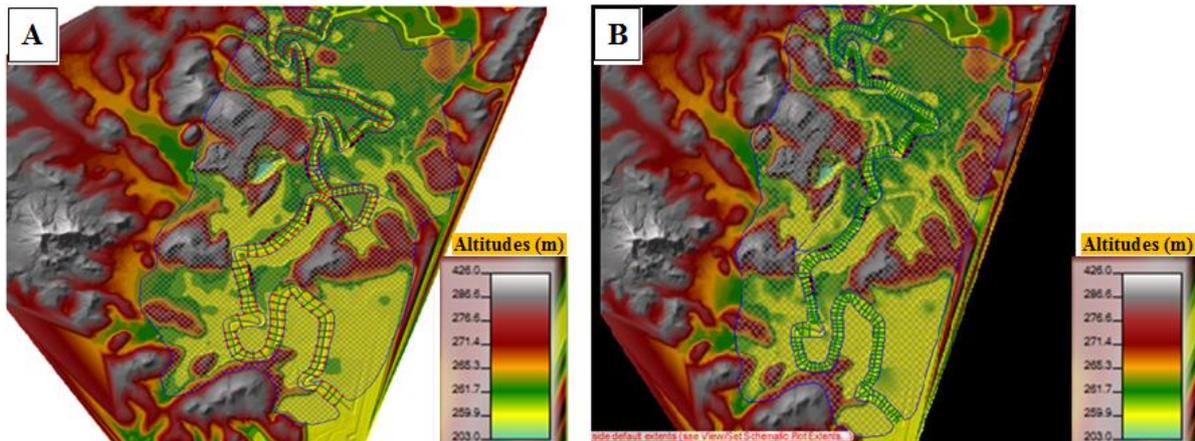
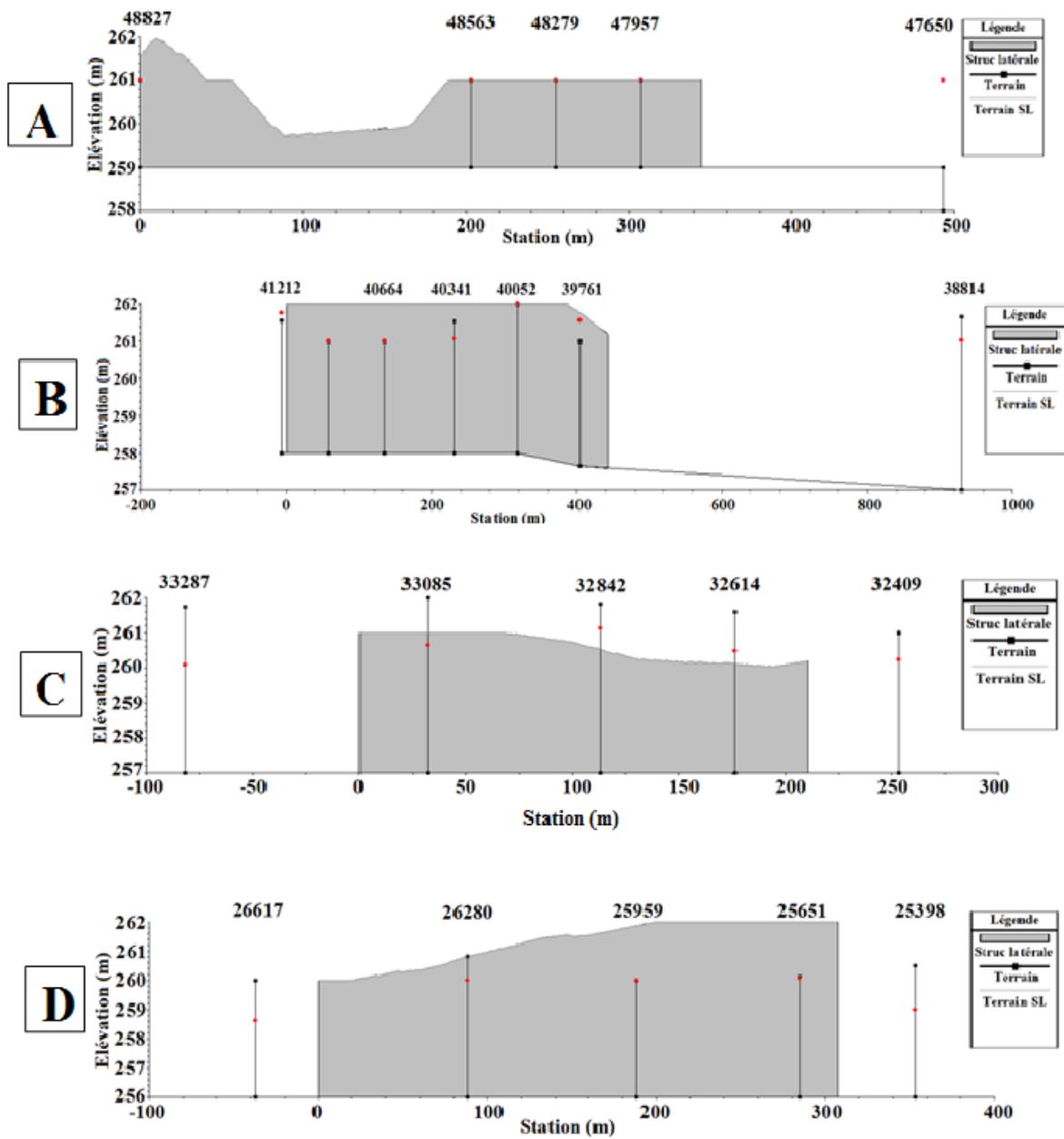


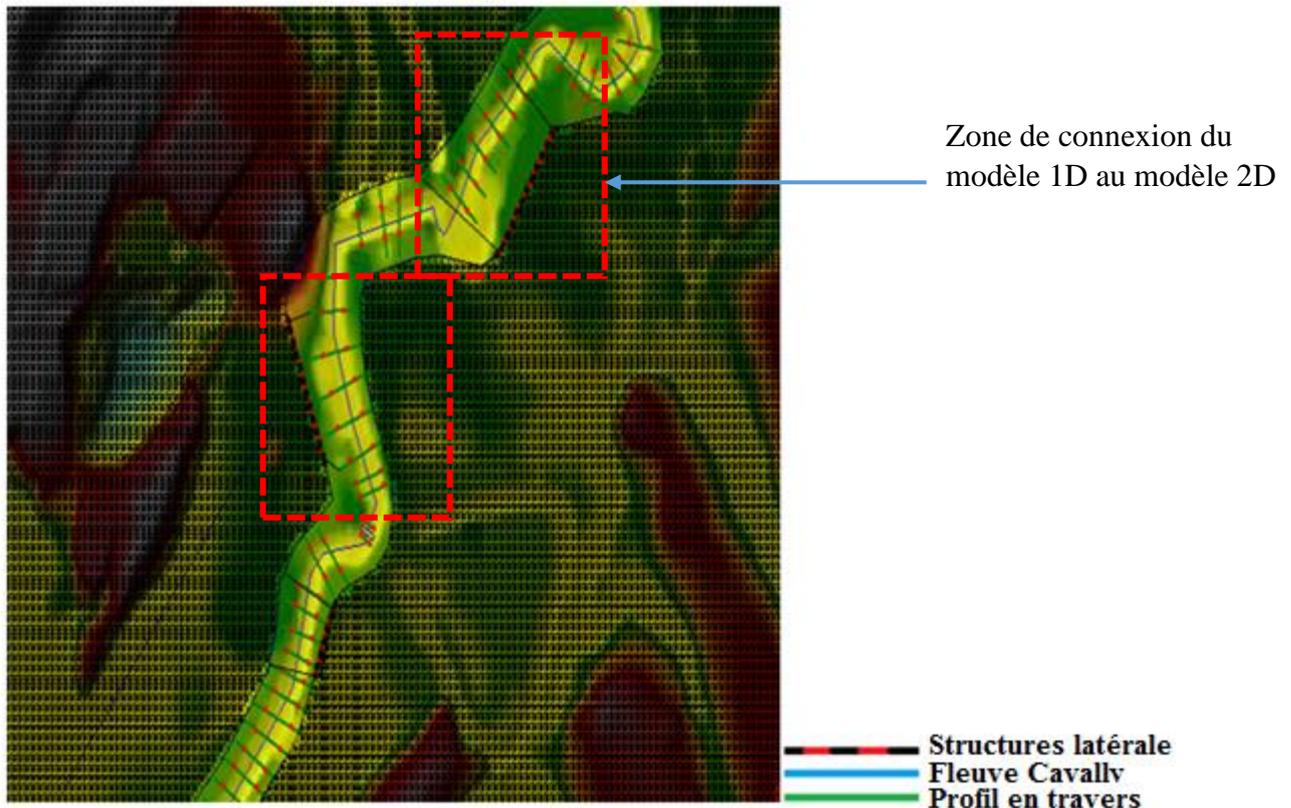
Figure 12 : Zone de maillage 1D-2D avant (A) et après (B) l'intégration des ouvrages hydrauliques.

### 2.2.3.3. Implantation des structures latérales

La structure latérale sert de connexion entre le modèle 1D et le modèle 2D. Elle a été modifiée de manière à ce que l'élévation de la structure latérale ne dépasse pas l'élévation du maillage de la zone 2D connectée ce qui n'est pas autorisé dans HEC-RAS. Elle permet de faire la connexion entre le modèle 1D et le modèle 2D (Figure 13 et 14).



**Figure 13** : Structures latérales des canaux de Bakatouo (A), Walter (B), Daupleu (C) et de Coline Sud (D).



**Figure 14** : Structure latérale du modèle.

#### 2.2.3.4. Calage et validation du modèle couplé 1D-2D

##### ❖ Calage

Les travaux antérieurs réalisés par (Koffi, 2016 ; Brou, 2019) ont permis d’avoir une bonne connaissance des paramètres de calage qui conviennent à la section du Cavally à la périphérie de la SMI. Ces paramètres sont les suivants :

- Le coefficient de Manning ( $0,052 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ ) pour le lit mineur et  $0,06 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$  pour le lit majeur donne des résultats satisfaisants ;
- Les données de débits de la période du 1 août au 30 septembre 1988 ont été utilisées pour les simulations du modèle hydraulique du cours d’eau ;
- Les données de la ligne d’eau de juillet 2015 ont servi au calage du modèle.
- Un pas de temps d’une heure (1h) a été imposé lors de la simulation dans le but de rendre le modèle plus stable.
- Après la simulation du modèle, les débits, les vitesses et niveaux d’eau ont été générés par le modèle selon la direction x et y.

### ❖ Validation

La validation du modèle a consisté à tester le modèle en utilisant des données autres que celles utilisées lors de la calibration tout en utilisant les mêmes paramètres obtenus lors de la calibration. Les données de lignes d'eau mesurée en 2019 ont servi pour la validation des résultats.

#### 2.2.3.5. Evaluation de la performance du modèle

L'évaluation du modèle se fait par l'analyse de deux (2) critères numériques (coefficient de NASH et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et les comparaisons graphiques (ligne d'eau observées et simulées).

### ❖ Coefficient de Nash

Le coefficient de NASH est calculé pour quantifier la précision de la simulation du modèle. Son expression est donnée par l'équation 9 :

$$NASH = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - q_{oi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_0)^2}} \quad \text{Eq 9}$$

Où :  $q_{ci}$  et  $q_{oi}$  sont respectivement les débits calculés et observés au jour  $i$  ;  $q_{ci}$  ,  $q_{oi}$  sont les moyennes respectives de  $q_{ci}$  et  $q_{oi}$  sur les  $n$  jours servant au calcul du coefficient de NASH. Ce coefficient représente l'unité moins, le rapport de la variance résiduelle à la variance des débits observés. Lorsque les débits simulés  $q_{ci}$  sont identiques aux débits observés  $q_{oi}$ , il vaut 1.

### ❖ Erreur quadratique moyenne (RMSE)

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été utilisée pour évaluer la qualité de l'ajustement des simulations du modèle aux données observées (Equation 10). L'objectif de base est de minimiser l'erreur lors de la comparaison des valeurs simulées avec les données observées ; ainsi, des valeurs de RMSE proches de zéro indiquent un ajustement parfait et une performance satisfaisante du modèle. Son expression est la suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad \text{Eq 10}$$

Avec :

$n$  est le nombre total d'observations,

$y_i$  est la  $i$ ème valeur observée,

$\bar{y}_i$  est la  $i$ ème valeur simulée respective.

### ❖ Critères graphiques

Les critères de comparaison graphique sont un ensemble de méthodes graphiques mises en œuvre afin de vérifier le synchronisme entre la ligne d'eau simulée et observée.

#### 2.2.3.6. Conditions aux limites

Les conditions limites qui ont été imposées dans le modèle 1D demeurent les mêmes que celles imposées dans le modèle couplé 1D-2D. En effet, le modèle couplé 1D-2D utilise les conditions aux limites du modèle 1D.

#### Conclusion partielle

L'analyse de l'influence des ouvrages hydrauliques sur le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally dans la zone d'Ity a été réalisée par le modèle hydraulique HEC-RAS couplé 1D-2D. Ce modèle a l'avantage de simuler la propagation des ondes de crues dans le lit mineur et le lit majeur du cours d'eau. La mise en œuvre de cette approche a permis d'obtenir plusieurs résultats. L'exploitation de ceux-ci fait l'objet de la troisième partie du mémoire.

# **PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION**

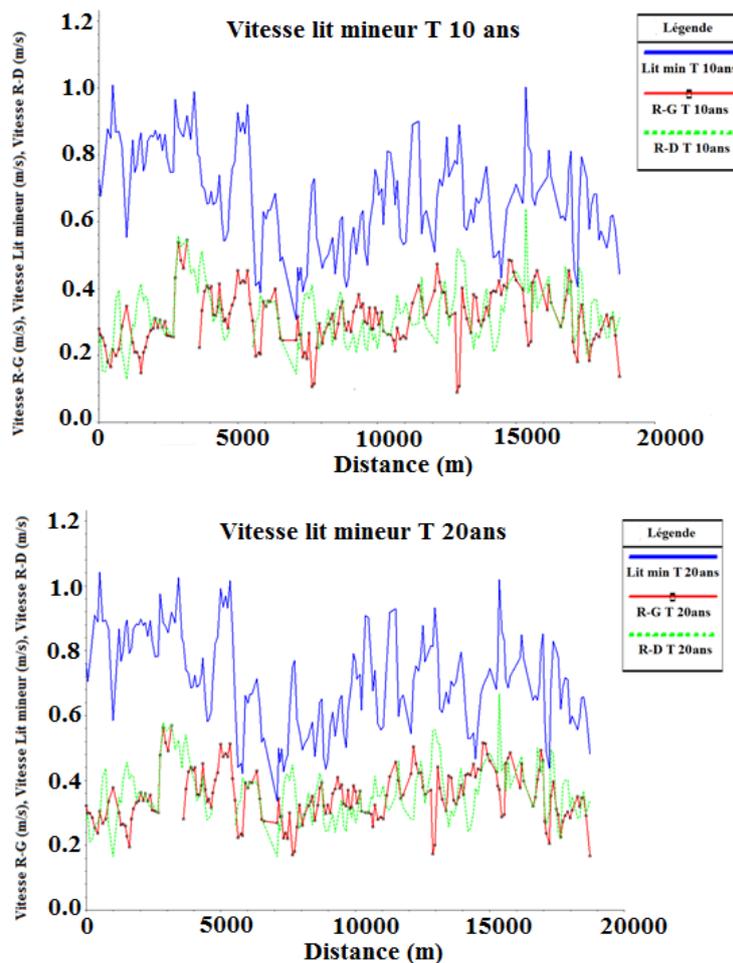
**3.1. Résultats**

**3.1.1. Fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally après intégration des ouvrages**

**3.1.1.1. Distribution des vitesses de propagations des crues**

Pour une crue décennale, les vitesses observées dans le lit du cours d'eau sont comprises entre  $0,31 \text{ m.s}^{-1}$  et  $1 \text{ m.s}^{-1}$  tandis que sur les berges, la vitesse de propagation des crues varie entre  $0,09 \text{ m.s}^{-1}$  et  $0,64 \text{ m.s}^{-1}$ . On constate que, les vitesses observées dans le lit mineur sont plus importantes que celles observées sur les berges.

Pour une période de retour de 20 ans, la tendance reste la même. Au niveau du lit du cours d'eau, les vitesses varient de  $0,34 \text{ m.s}^{-1}$  à  $1,04 \text{ m.s}^{-1}$ . Au niveau des berges la vitesse est comprise entre  $0,17 \text{ m.s}^{-1}$  et  $0,67 \text{ m.s}^{-1}$ . On observe une augmentation des vitesses de  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$  au niveau du lit mineur et une augmentation  $0,03 \text{ m.s}^{-1}$  au niveau du lit majeur par rapport à la période de retour de 10 ans (Figure 15).



**Figure 15** : Distribution des vitesses pour la période de retour de 10 et 20 ans.

## RESULTATS ET DISCUSSION

La crue d'une période de retour de 50 ans pourrait entrainée des vitesses de propagation des crues de l'ordre de  $0,36 \text{ m.s}^{-1}$  à  $1,08 \text{ m.s}^{-1}$  dans le lit du cours d'eau. Au niveau des berges, ces vitesses varient de  $0,19$  à  $0,69 \text{ m.s}^{-1}$ ; soit une augmentation de  $0,04$  et  $0,02 \text{ m.s}^{-1}$  respectivement au niveau du lit du cours d'eau et des berges par rapport à la période de retour de 20 ans. Les vitesses dans le lit du cours d'eau restent également plus importantes que celles observées au niveau des berges.

Pour 100 ans, on observe des vitesses dans le lit du cours d'eau variant entre  $0,38 \text{ m.s}^{-1}$  et  $1,12 \text{ m.s}^{-1}$ . Au niveau des berges, ce sont des vitesses de l'ordre de  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$  à  $0,71 \text{ m.s}^{-1}$ . De la crue décennale à la crue centennale, on constate une augmentation des vitesses de  $0,04 \text{ m.s}^{-1}$  au niveau du lit du cours d'eau et de  $0,02 \text{ m.s}^{-1}$  (Figure 16).

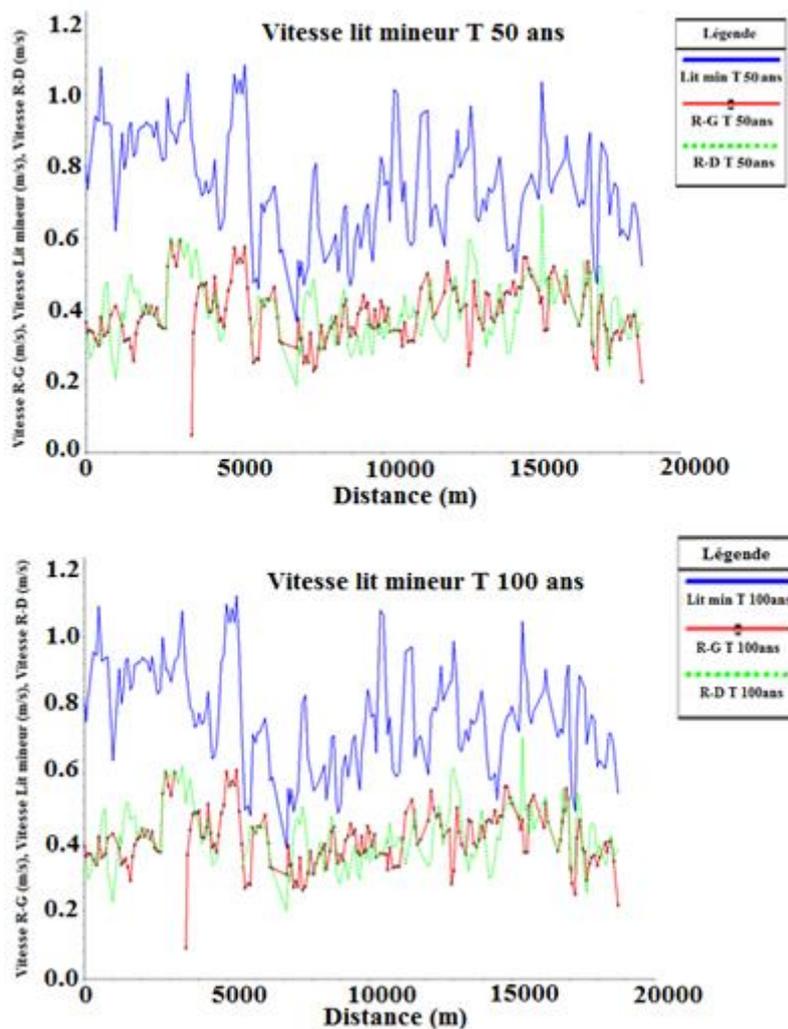
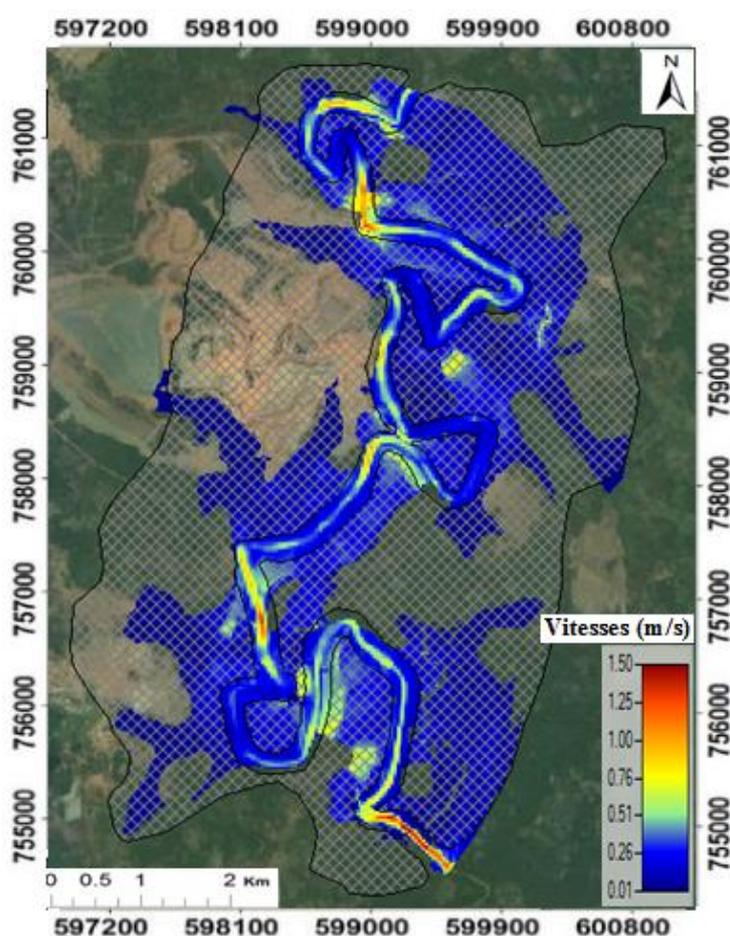


Figure 16 : Distribution des vitesses pour la période de retour de 50 et 100 ans.

### 3.1.1.2. Analyse des vitesses au niveau des canaux de dérivations en écoulement non permanent

#### ❖ Avant la coupure des méandres

La Figure 17 présente la répartition des vitesses au niveau du lit mineur du cours d'eau et des plaines inondables de la zone d'étude. La valeur des vitesses maximales dans le lit mineur du cours d'eau est de  $1,04 \text{ m.s}^{-1}$  au voisinage de la mine d'or et en amont du canal de Bakatouo. Les plus faibles vitesses sont observées en aval du cours d'eau ( $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ ). Au niveau des plaines inondables les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de  $0,10$  à  $0,13 \text{ m.s}^{-1}$ . Les plus faibles vitesses de propagation des crues sont estimées à  $0,06$  et  $0,11 \text{ m.s}^{-1}$ .

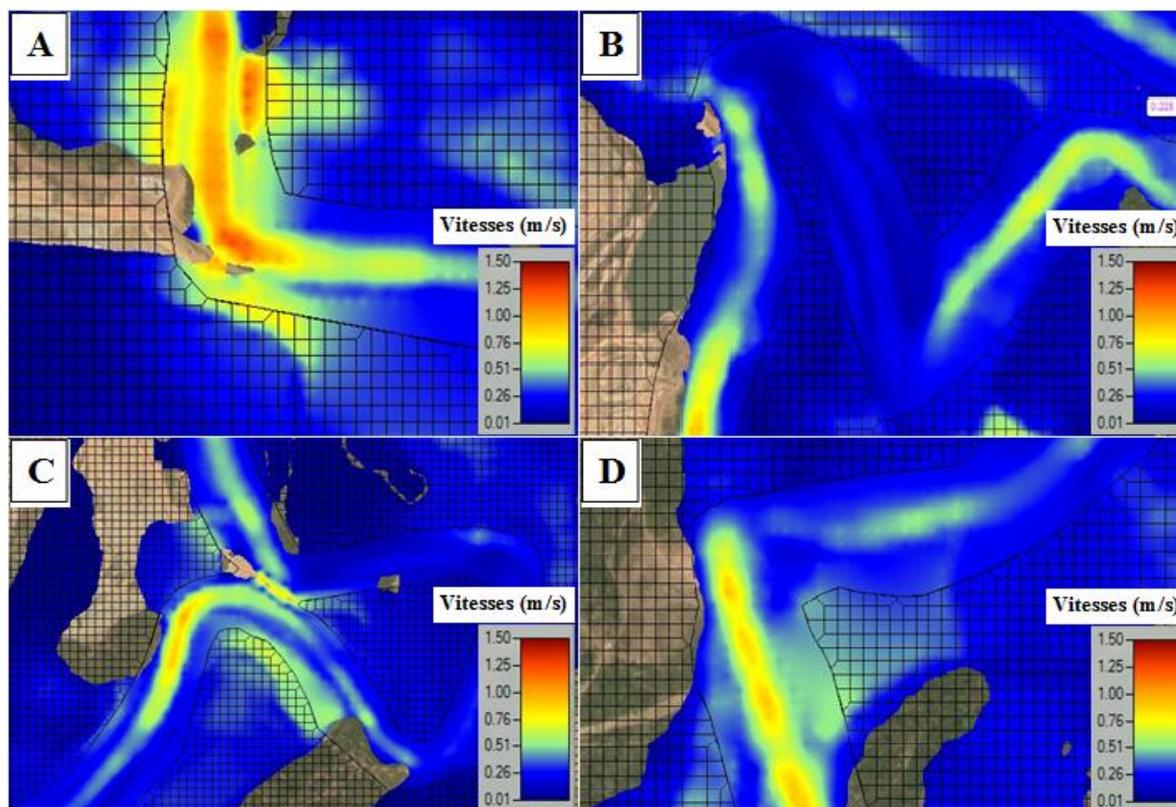


**Figure 17 :** Répartition des vitesses dans le lit du cours d'eau avant dérivation du Cavally.

La répartition des vitesses au niveau des différents méandres avant la réalisation des travaux de dérivations sur la section du cours d'eau à la périphérie de la SMI est présentée par la Figure 18. Au niveau du méandre de Bakatouo (A), les vitesses observées sont comprises entre  $0,24 \text{ m.s}^{-1}$  et  $1,48 \text{ m.s}^{-1}$ . Au niveau du méandre de Walter les vitesses sont comprises entre  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$  et  $0,83 \text{ m.s}^{-1}$ . Les méandres de Daapleu et de Coline Sud enregistrent des vitesses comprises

## RESULTATS ET DISCUSSION

respectivement entre  $0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $1,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et des valeurs de vitesses comprises entre  $0,07$  et  $0,47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  au niveau de Coline Sud. De façon générale, les vitesses les plus élevées sont observées au niveau des méandres.

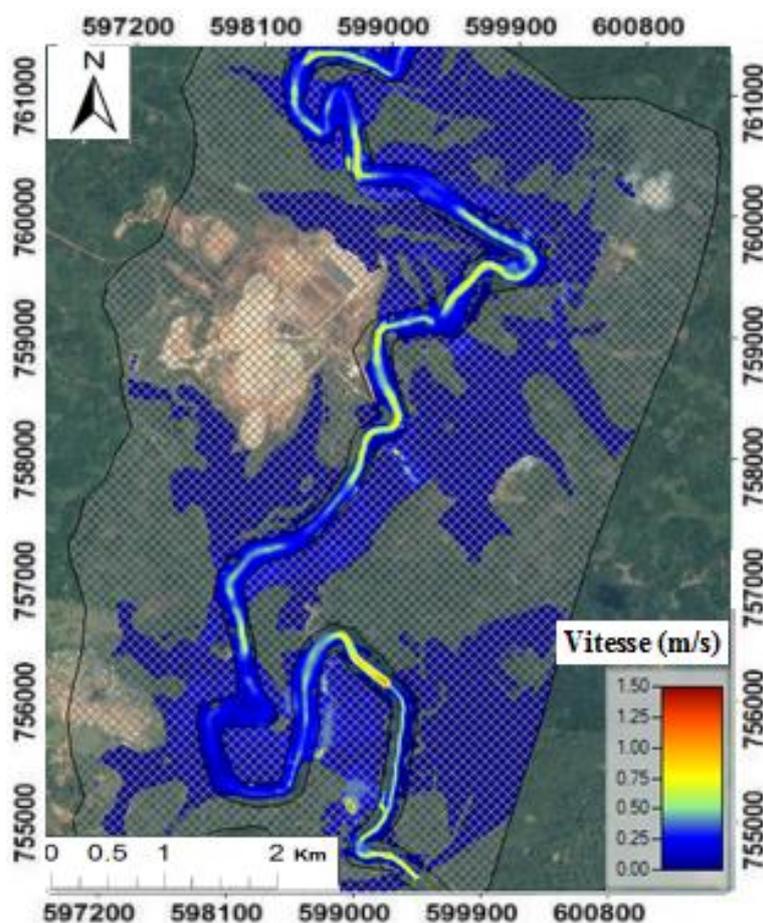


**Figure 18** : Distribution bidirectionnelle des vitesses dans les zones de construction des canaux de dérivation de Bakatouo (A) ; Walter (B) ; Daapleu (C) et Colline Sud (C) avant dérivation du Cavally.

### ❖ Après la coupure des méandres

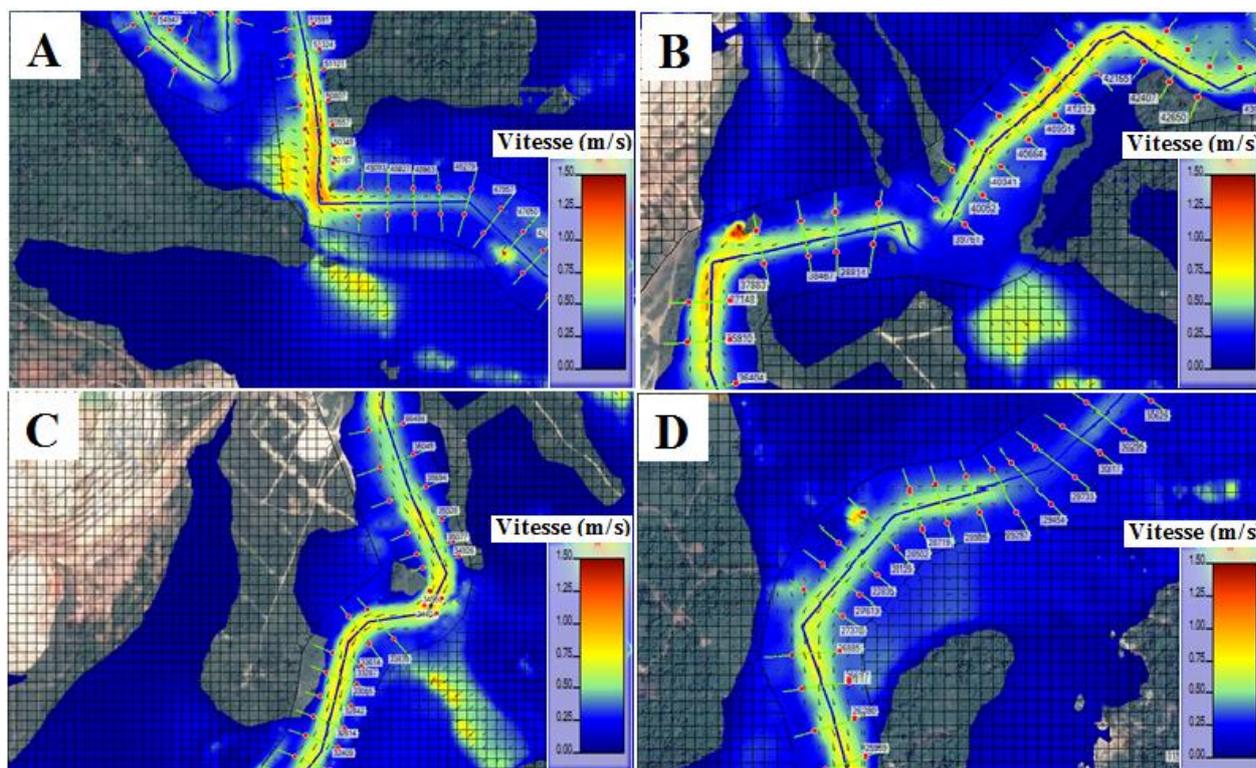
Après la coupure des méandres (Figure 19), les vitesses maximales de propagations dans le lit mineur du cours d'eau sont de l'ordre de  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  au voisinage de la mine d'or. Les plus faibles valeurs de vitesse sont observées en aval du cours d'eau  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Au niveau des plaines inondables les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de  $0,61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $0,71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les vitesses les plus faibles sont estimées à  $0,54$  et  $0,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 19 :** Répartition des vitesses dans le lit du cours d'eau après dérivation du Cavally.

La Figure 20 présente la répartition des vitesses au niveau des différents canaux de dérivation réalisés sur la section du cours d'eau à la périphérie de la SMI. Au niveau du Canal de Bakatouo (A), les vitesses observées sont comprises entre  $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Au niveau du canal de Walter les vitesses sont comprises entre  $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les canaux de Daapleu et de Coline Sud enregistrent des valeurs de vitesses comprises respectivement entre  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pour le canal de Daapleu et comprises entre  $0,5$  et  $1,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pour le canal de Coline Sud. Les vitesses les plus élevées dans le cours d'eau sont localisées au niveau des canaux de dérivation sur l'ensemble du cours d'eau.



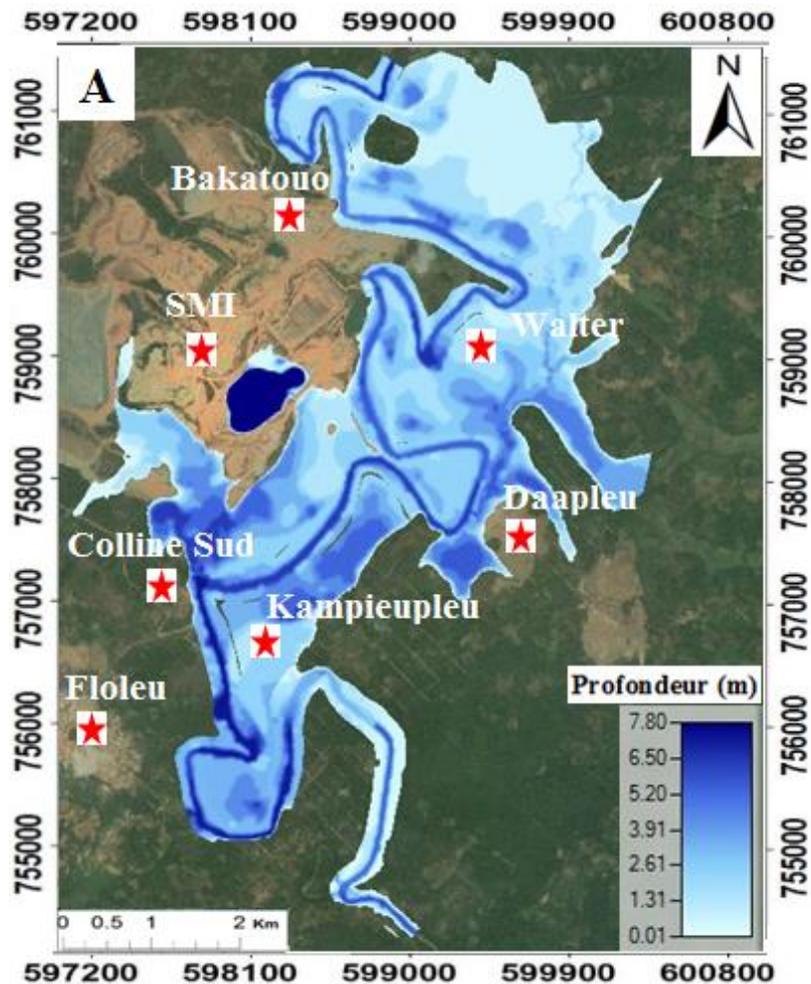
**Figure 20** : Distribution bidirectionnelle des vitesses dans les canaux de dérivation de Bakatouo (A) ; Walter (B) ; Daapleu (C) et Colline Sud (C) après dérivation du Cavally.

### 3.1.2. Cartes des zones inondables du fleuve Cavally avant et après l'intégration des ouvrages hydraulique

#### 3.1.2.1. Répartition des profondeurs avant la coupure des méandres

La distribution spatiale des profondeurs dans les zones inondables avant l'intégration des ouvrages hydrauliques dans le lit du cours d'eau est présentée par la Figure 21. Dans les conditions initiales la profondeur maximale observée au niveau des plaines inondables est de 6,3 m avec une moyenne de  $2,62 \pm 1,91$  m. Les profondeurs les plus importantes sont observées au niveau du lit mineur, les profondeurs les plus faibles sont observées au niveau des plaines inondables (Figure 22).

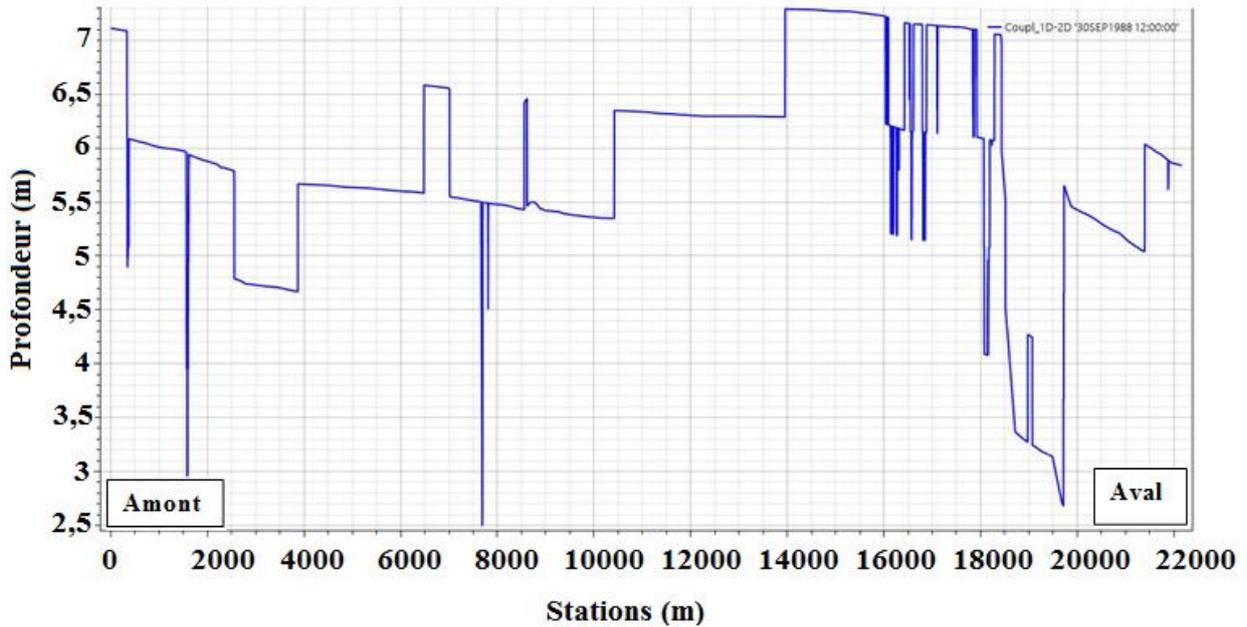
## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 21** : Distribution des profondeurs maximales du fleuve Cavally avant intégration des ouvrages hydrauliques pour la crue de 1988.

Avant la coupure des méandres la profondeur maximale est estimée à 7,29 m au niveau du lit mineur. La profondeur moyenne est de  $3,2 \pm 1,59$  m. Les profondeurs les plus importantes sont observées au niveau du lit mineur du cours d'eau (Figure 22).

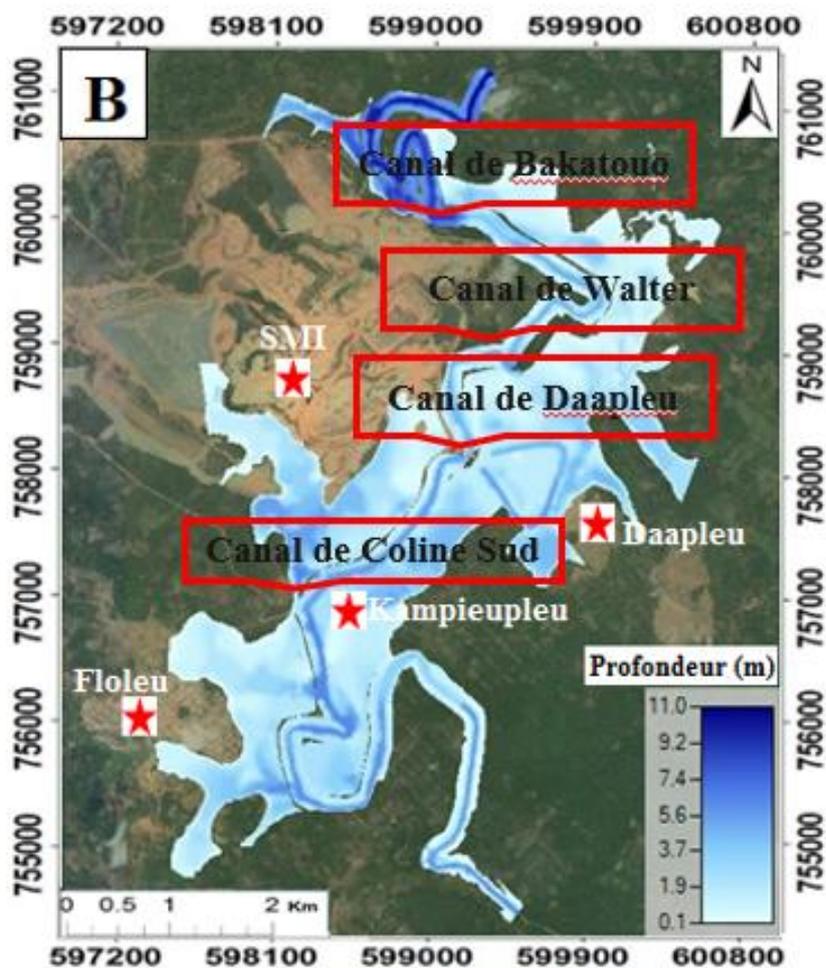
## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 22 :** Variation de la profondeur maximale dans le lit mineur du fleuve dans la zone d'Ity avant la coupure des méandres pour la crue de 1988.

### 3.1.2.2. Répartition des profondeurs après la coupure des méandres

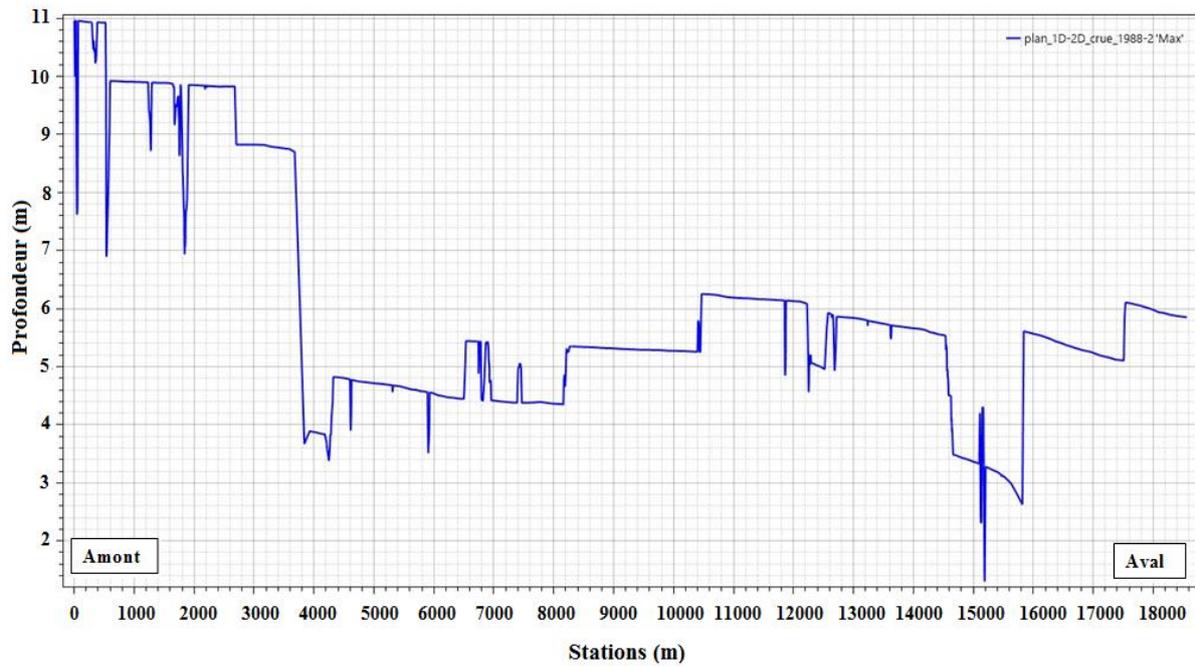
La Figure 23 présente la distribution spatiale des profondeurs d'inondation après l'intégration des ouvrages hydrauliques dans le lit du cours d'eau. La profondeur maximale observée dans les plaines d'inondation après intégration des ouvrages hydrauliques est de 5,37 m avec une moyenne de  $2,22 \pm 1,65$  m. Les profondeurs les plus élevées sont localisées au niveau du lit mineur, les profondeurs les plus faibles sont observées au niveau des plaines inondables.



**Figure 23 :** Distribution des profondeurs maximales du fleuve Cavally après intégration des ouvrages hydrauliques pour la crue de 1988.

La profondeur maximale après la coupure des méandres est estimée à 10,96 m au niveau du lit mineur. La profondeur moyenne est de  $5,57 \pm 4,27$  m. Les profondeurs les plus importantes sont enregistrées au niveau du lit du cours d'eau (Figure 24).

## RESULTATS ET DISCUSSION

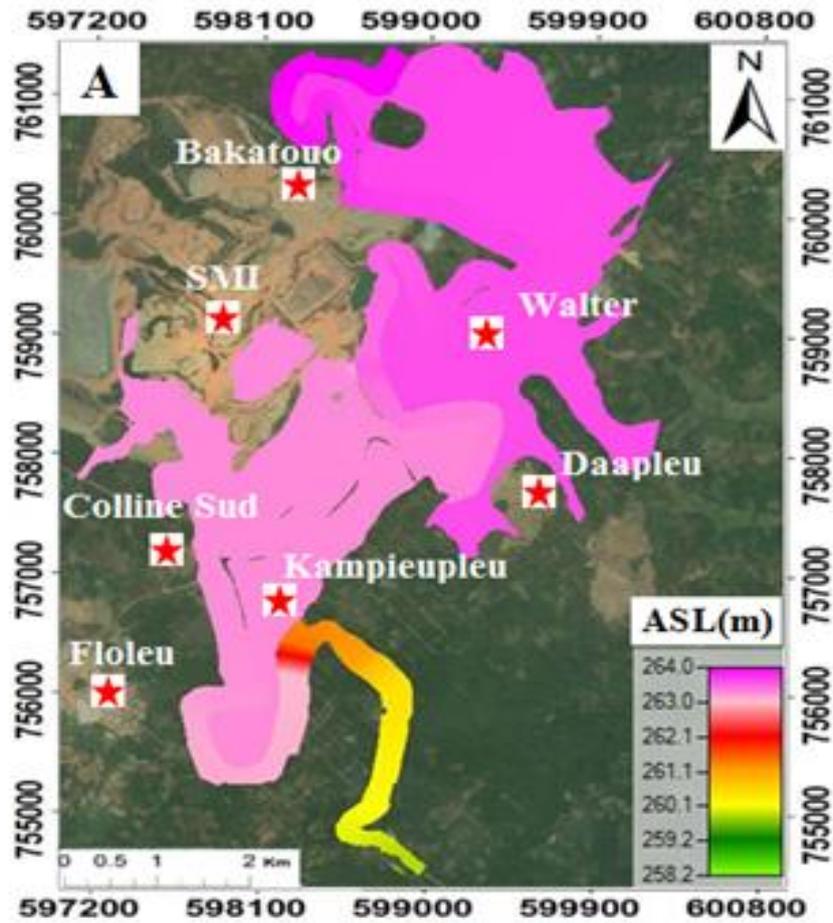


**Figure 24 :** Variation de la profondeur maximale dans le lit mineur du fleuve dans la zone d'Ity après la coupure des méandres pour la crue de 1988.

### 3.1.2.3. Répartition des altitudes à la surface libre de l'eau avant la coupure des méandres

Les superficies inondées avant la réalisation des ouvrages hydrauliques sont présentées par la Figure 25. Avec une élévation moyenne de 262,37 m, la superficie inondée avant la coupure des méandres est de 16,63 km<sup>2</sup>.

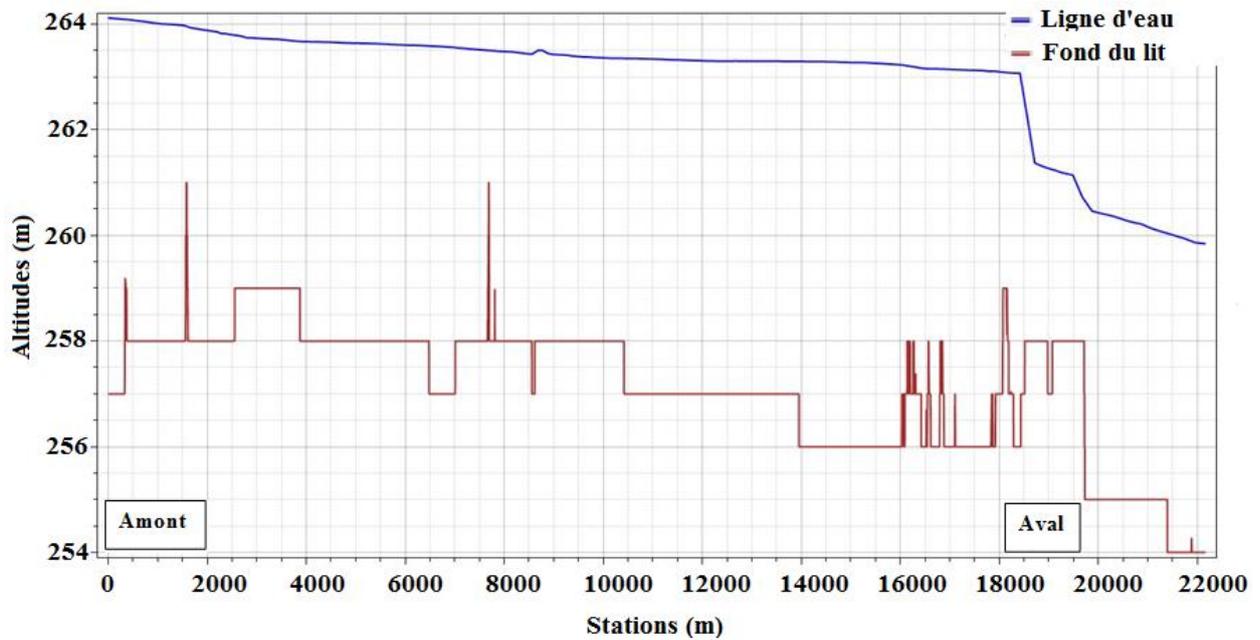
## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 25 :** Etendue des altitudes de surface libre de l'eau (ASL) des inondations du fleuve Cavally avant la réalisation des ouvrages hydrauliques pour la crue de 1988.

Le profil en long de la section du Cavally étudié avant la coupure des méandres est présenté par la Figure 26. Ce profil en long montre que le niveau d'eau maximal de 264,12 m avec un niveau d'eau moyen de  $262,37 \text{ m} \pm 0,44 \text{ m}$ . Les cotes les plus élevées sont observées en amont du cours d'eau et les altitudes les plus faibles en aval.

## RESULTATS ET DISCUSSION

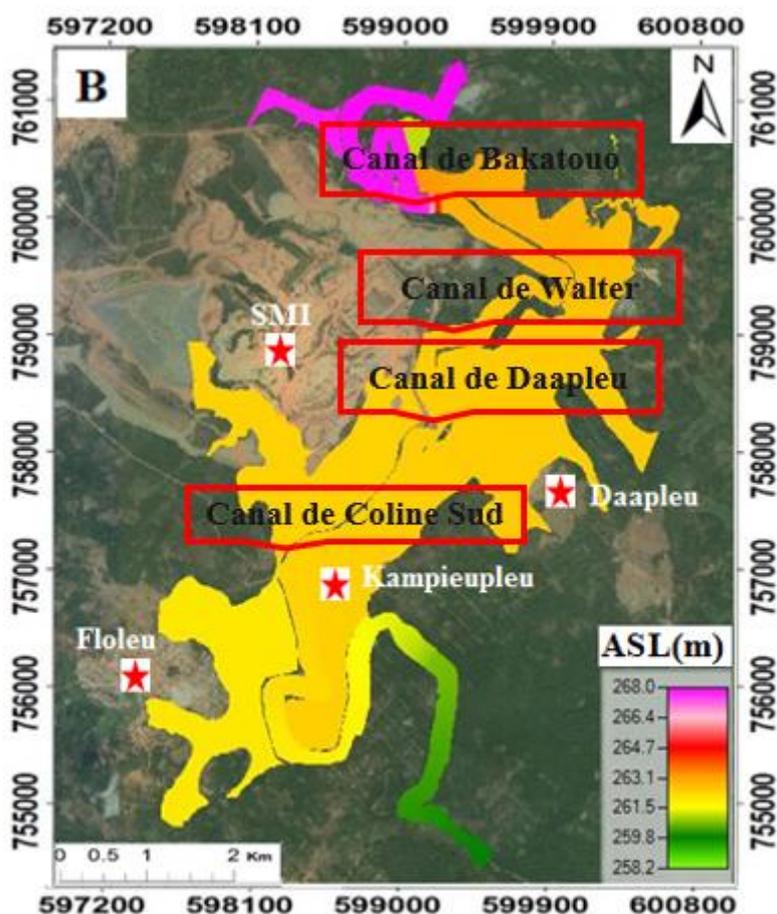


**Figure 26 :** Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée avant coupure des méandres pour la crue de 1988.

### 3.1.2.4. Répartition des altitudes à la surface libre de l'eau après la coupure des méandres

La Figure 27 présente les superficies inondées après la réalisation des ouvrages hydrauliques. L'altitude moyenne de 262,23 m répartie sur toute la zone inondable avec une superficie inondée de 15,44 Km<sup>2</sup> après l'intégration des ouvrages hydrauliques.

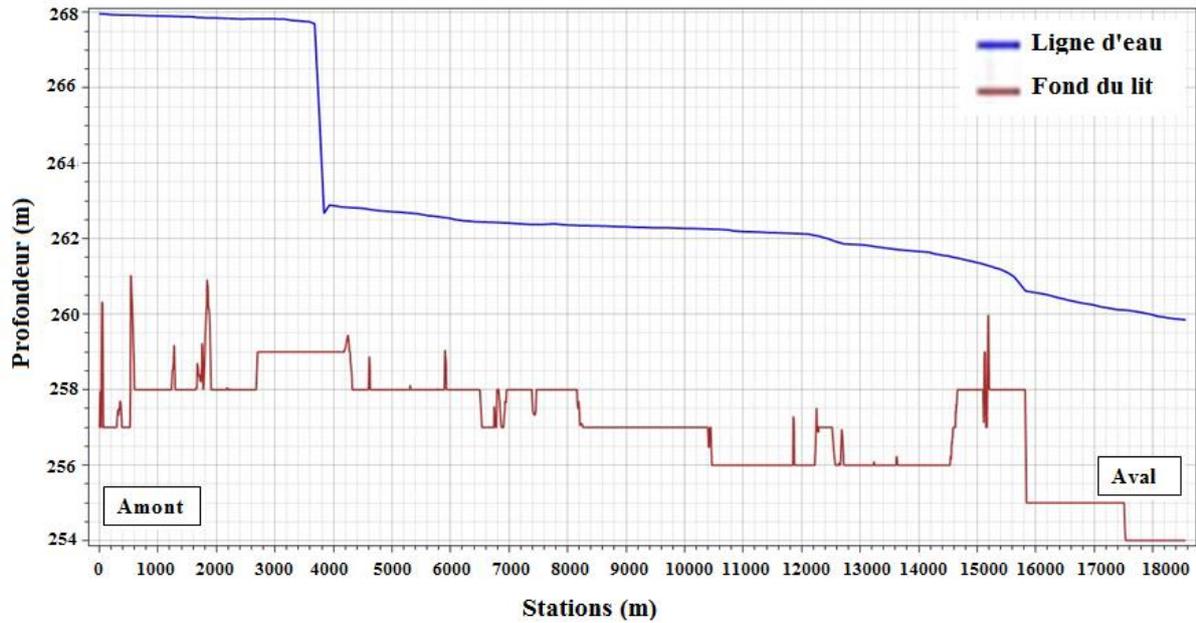
## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 27 :** Etendue des altitudes de surface libre de l'eau (ASL) des inondations du fleuve Cavally après la réalisation des ouvrages hydrauliques pour la crue de 1988.

La Figure 28 présente le profil en long de la section du Cavally étudié après la coupure des méandres. Le niveau maximal enregistré sur ce profil est de 267,96 m avec un niveau d'eau moyen de  $262,23 \pm 0,85$  m. Les altitudes les plus faibles sont enregistrées en aval et les côtes les plus élevées sont observées en amont du cours d'eau.

## RESULTATS ET DISCUSSION

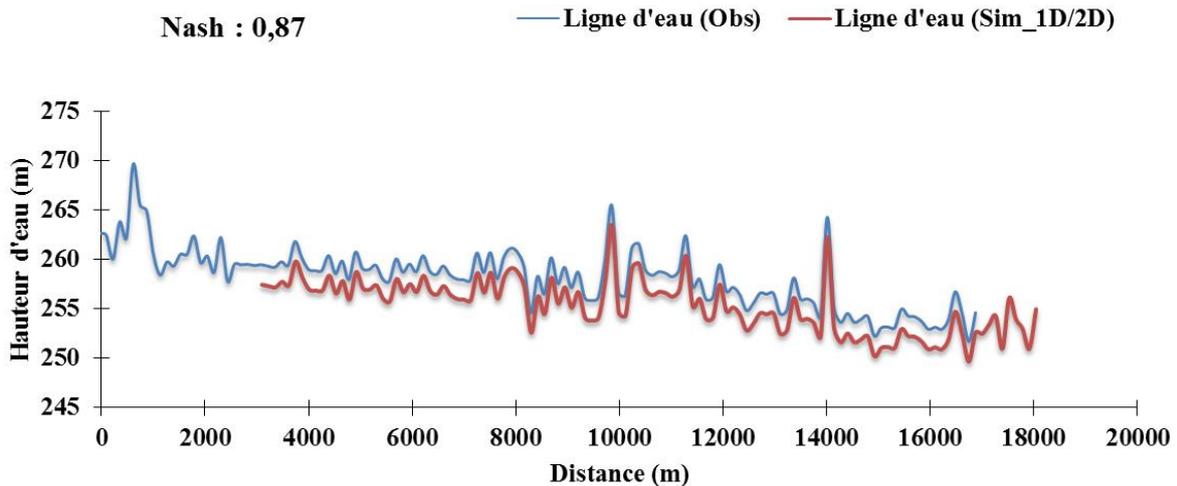


**Figure 28** : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée après coupure des méandres pour la crue de 1988.

### 3.1.2.5. Calage du modèle 1D-2D avant intégration des ouvrages hydrauliques

#### ❖ Coefficient de Nash

Le coefficient de Nash permet de déterminer la corrélation entre la ligne d'eau simulée par le modèle et la ligne d'eau observée sur le terrain (Figure 29). La valeur du coefficient de Nash de 0,87. La valeur du critère de Nash obtenu indique une bonne calibration du modèle. Le modèle reproduit fidèlement la dynamique du cours d'eau



**Figure 29** : Ligne d'eau simulée et observée du mois de juillet 2015.

### 3.1.2.6. Validation du modèle 1D-2D après intégration des ouvrages hydrauliques

#### ❖ Coefficient de Nash

La Figure 30 présente la corrélation entre la ligne d'eau simulée par le modèle et la ligne d'eau observée sur le terrain. La valeur du coefficient de Nash obtenu est de 0,83 ; ce qui montre que le modèle simule bien la ligne d'eau observée sur le terrain.

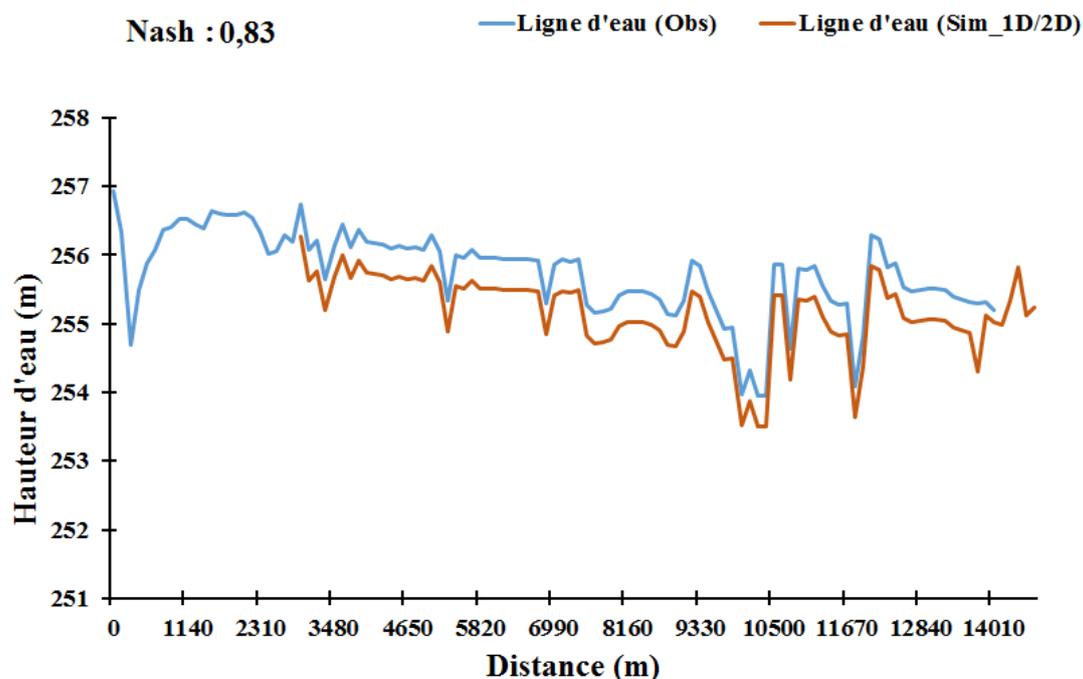


Figure 30 : Ligne d'eau simulée et observée Février 2019.

#### ❖ Ecart quadratique (RMSE) avant et après construction des ouvrages hydrauliques

Le calcul de la RMSE est un critère numérique d'évaluation de la performance du modèle hydrodynamique 1D-2D. La valeur de la RMSE avant la construction des ouvrages hydrauliques est de 0,081. Après la réalisation des ouvrages hydraulique la RMSE a une valeur de 0,065 (Tableau III).

Tableau 3 : Valeur caractéristiques du critère de Nash et de la RMSE avant et après la construction des ouvrages hydrauliques.

	NASH	RMSE
Avant coupure des méandres	0,87	0,081
Après coupure des méandres	0,83	0,065

### 3.2. Discussion

Le modèle 1D-2D a été réalisé dans le but de simuler le fonctionnement hydrodynamique du Cavally dans la zone d'Ity (Zouan-Hounien).

L'objectif visé est de simuler le fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally à travers un modèle couplé 1D-2D avant et après la coupure des méandres du Cavally dans le cadre des aménagements prévus sur le cours d'eau.

Dans une première approche, le modèle de propagation des crues révèle que, les vitesses sont sensiblement les mêmes sur la portion du cours d'eau étudié tandis qu'une différence de quelque mètre est observée au niveau de la profondeur et de la surface libre (ASL) de l'eau sur la portion du cours d'eau étudié. Le modèle couplé 1D-2D simule bien les vitesses de propagation des cours d'eau. Les vitesses dans les canaux avant l'intégration des ouvrages hydrauliques sont comprises entre 0,34 m.s<sup>-1</sup> et 1,12 m.s<sup>-1</sup>. Après intégration des ouvrages hydrauliques, les vitesses de propagation des crues varient entre 0,5 m.s<sup>-1</sup> et 1,3 m.s<sup>-1</sup>. Ces vitesses sont quasiment similaires à celles mesurées sur le Cavally en période de crue. Les vitesses observées assurent la capacité d'auto curage des canaux. Les résultats obtenus sont similaires aux travaux réalisés par plusieurs auteurs dans le domaine de la modélisation des ouvrages hydrauliques sur des cours d'eau (Kane *et al.*, 2017 ; Goktas *et al.*, 2018 ; Kouassi *et al.*, 2019). Selon ces auteurs, l'installation ou la construction d'un ouvrage hydraulique sur un cours d'eau ne devrait pas causer une perturbation significative des paramètres hydrodynamiques de ce cours d'eau.

Dans une seconde approche le modèle de propagation des crues 1D-2D montre que les profondeurs et les altitudes de surface libre de l'eau (ASL) de la portion étudiée du cours d'eau sont significatives pour la crue de 1988. Les plus hautes élévations de la surface libre de l'eau sont observées en amont de la zone d'exploitation de la SMI. Cela s'explique par le fait que les cotes les plus élevées sont situées à la périphérie de la mine. L'étendue des plaines inondables varie selon l'élévation de la surface de l'eau de 263,29 m à 263,63 m et de 261,89 m à 263,22 m, respectivement pour les modèles réalisés avant et après la coupure des méandres, soit une variation de (0,41 m). Cette variation de surface libre de l'eau est insignifiante par rapport aux variations de surface libre du cours d'eau (6 à 7 m) Ces élévations de la surface libre de l'eau s'étendent sur des dizaines de kilomètres à proximité du lit du Cavally. Les zones situées dans un rayon de 5 km autour de la mine sont les plus exposées. Cependant, des altitudes de surface libre de l'eau importantes sont observées en amont du canal de Bakatouo. Cela pourra se justifier par le fait que le débit de la rivière au niveau du canal est beaucoup plus élevé par rapport à la capacité de charge du canal (Indrawati *et al.*, 2018).

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent d'une manière générale que le modèle reproduit bien les conditions d'écoulement du milieu, avec des coefficients de Nash qui sont de 0,87 et 0,83 respectivement pour le modèle 1D-2D réalisé avant et après la construction des ouvrages. Ces résultats sont jugés satisfaisants car selon Hostache *et al.*, (2007) et Koffi *et al.*, (2016), l'application d'un modèle est dite très satisfaisante pour des valeurs du critère de Nash comprises entre 0,8 et 0,9.

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été utilisée pour évaluer la qualité de l'ajustement des simulations du modèle aux données observées. Plus la RMSE est proche de zéro, elle indique un ajustement parfait et une performance satisfaisante du modèle. Ainsi, des valeurs de la RMSE (0,081 et 0.065) déterminée pour le cas du modèle hydrodynamique 1D-2D avant et après intégration des ouvrages hydrauliques indiquent un ajustement entre les valeurs simulées et les données observées. En effet, Vozinaki *et al.*, (2017) soutiennent que des valeurs de RMSE proches de zéro indiquent un ajustement parfait et une performance satisfaisante du modèle.

# **CONCLUSION**

Cette étude avait pour objectif, d'évaluer l'impact des ouvrages hydrauliques sur le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau. Pour ce faire, la démarche méthodologique a consisté à évaluer les paramètres hydrodynamiques du fleuve Cavally avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques ; puis à cartographier les zones à risque d'inondation du bassin versant du fleuve Cavally à Ity.

Les résultats montrent que la crue d'une période de retour de 50 ans pourrait entraîner des vitesses de propagation des crues de l'ordre de  $0,36 \text{ m.s}^{-1}$  à  $1,08 \text{ m.s}^{-1}$  dans le lit du cours d'eau. Au niveau des berges, ces vitesses varient de  $0,19$  à  $0,69 \text{ m.s}^{-1}$ ; soit une augmentation de  $0,04$  et  $0,02 \text{ m.s}^{-1}$  respectivement au niveau du lit du cours d'eau et des berges par rapport à la période de retour de 20 ans. Les vitesses dans le lit du cours d'eau restent également plus importantes que celles observées au niveau des berges.

Après l'intégration d'ouvrages hydrauliques, les vitesses maximales de propagations dans le lit mineur du cours d'eau sont de l'ordre de  $1,3 \text{ m.s}^{-1}$  au voisinage de la mine d'or. Les plus faibles valeurs de vitesse sont observées en aval du cours d'eau  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ . Au niveau des plaines inondables les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de  $0,61 \text{ m.s}^{-1}$  et  $0,71 \text{ m.s}^{-1}$ . Les vitesses les plus faibles sont estimées à  $0,54$  et  $0,58 \text{ m.s}^{-1}$ .

Enfin, pour la cartographie des zones inondables, les cartes de propagation des crues de l'année 1988 avant et après intégration des ouvrages montrent que les zones exposées aux risques d'inondation sont les zones proches de la Société des Mines d'Ity (SMI). Cela est dû aux élévations de la surface de l'eau et des profondeurs de l'étendue des crues qui sont plus élevées. Par contre, en aval (Floleu) ces paramètres ont des valeurs relativement faibles. Il est également important de noter que la topographie très accidentée du terrain influence considérablement la propagation des crues dans la plaine inondable du Cavally dans le périmètre d'exploitation de la mine d'Ity.

Cette étude, ayant traité l'évaluer de l'impact des ouvrages hydrauliques sur le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally est loin de couvrir tous les aspects liés à la modélisation hydrodynamique 1D-2D du fleuve Cavally. Elle ouvre la voie à plusieurs perspectives telles que :

- Mettre à jour le modèle hydraulique par l'actualisation des données de niveaux d'eau, de vitesses, de débits et surtout du paramètre de calage (Coefficient de Manning-Strickler) ;
- Evaluer l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines du bassin du fleuve Cavally.

# **REFERENCES**

## REFERENCES

- Araud Q. (2012). Simulations des écoulements en milieu urbain lors d'un évènement pluvieux extrême. Thèse De Doctorat, Université de Strasbourg (France), 290 p.
- Archambeau P. (2006). Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations. Thèse De Doctorat, Université de Liège (Belgique), 419 p.
- Avenard J.-M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J.-L. & Adjanooun E. (1971). *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM*, 50, Paris (France) : 161- 262.
- Baron C. (2010). L'eau en Afrique: disponibilité et accès. *Futuribles (Paris)*,(359): 33–55.
- Bates P.D. & Anderson M.G. (1993). A two-dimensional finite-element model for river flow inundation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 440(1909): 481–491.
- Boko-Koidia A.N.N., Guéladio C., Brama K. & Dedy S. (2016). Variabilité Climatique Et Changements Dans L'environnement À Korhogo En Côte D'ivoire : Mythes Ou Réalité ? *European Scientific Journal, ESJ*, 12(5): 158.
- Boudjelal S., Fourar A. & Merrouchi F. (2015). Modélisation en 2D des écoulements brusquement instationnaires dans un canal prismatique à surface libre. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828*,(22): 7–13.
- Brou L.A. (2019). Modélisation de la dynamique hydrologique du fleuve Cavally sous l'influence de fortes pressions anthropiques dans la zone de Zouan- Hounien (Côte d'Ivoire). Thèse De Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé (Côte d'Ivoire), 272 p.
- Brou T., Akindes F. & Bigot S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agriculture*, 14 : 533-540.
- Chareb Y.I. (2005). Contribution à la méthodologie des études de protection contre les inondations : Application des modèles HEC-RAS et HEC-FDA. Mémoire De Master, Université des sciences et technologies d'Oran Mohamed (Boudiaf, Algérie), 117 p.
- Chen W.-B. & Liu W.-C. (2017). Modeling the Influence of River Cross-Section Data on a River Stage Using a Two-Dimensional/Three-Dimensional Hydrodynamic Model. *Water*, 9(3) : 203.

## REFERENCES

- Chow V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. New York, 728 p.
- CNRA (2009). *La direction régionale du CNRA de man en quelques mots et chiffres*, Côte d'Ivoire, 2009. Rapport final, CNRA, 12 p.
- Dave M. (2017). *Projet or Ity - résumé de la conception du franchissement de la rivière*. Rapport d'étude, Knight Piésold consulting, 19 p.
- Erpicum S. (2006). *Contribution à la modélisation de la turbulence en écoulements quasi-tridimensionnels à surface libre. Maillage adaptatif multibloc et calage objectif des paramètres*, Thèse de doctorat (en préparation), Université de Liège (Belgique)
- Ettien D.Z. (2010). *Exploitation industrielle des gisements d'or et dynamique spatiale du terroir d'Ity dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Une étude à base de la télédétection*,: 1–15.
- Fillali S. (2012). *Étude D'un écoulement instationnaire dans un canal découvert à fond mobile et à charge variable*. Mémoire De Master En Hydraulique, Département D'hydraulique, Université Hadj Lakhdar batna (Algérie), 25 p.
- Ghavasieh A.-R., Poulard C. & Paquier A. (2006). *Effect of roughened strips on flood propagation: Assessment on representative virtual cases and validation*. *Journal of Hydrology*, 318(1–4): 121–137.
- Girard G. (1974). *Le milieu naturel de Cote d'Ivoire*. Mémoire ORSTOM N°50, 391 p.
- Girard G., Sircoulon J. & Touchebeuf de Lussigny P. (1970). *Aperçu sur les régimes hydrologiques de Côte d'Ivoire*. 61
- Goktas R.K., M Tamer Ayvaz, Pinar Gokce Kargi, Kentel E., Mesta B., Ipek Tezyapar & Ulas Tezel (2018). *Effect of Land Surface Elevation Data Availability on River Hydraulic Model Output*. *ResearchGate*, 1-2
- Hostache R., Puech C. & Raclot D. (2007). *Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR*. *Cybergeo : Europe journal of Geography*, 381 : 1-13
- Indrawati D., Hadihardaja I.K., Bagus Adityawan M., Pahrizal S.F. & Taufik F. (2018). *Diversion Canal to Decrease Flooding (Case Study : Kebon Jati-Kalibata Segment, Ciliwung River Basin)*. *MATEC Web of Conferences*, 147: 03006.

## REFERENCES

- Kane S., Sambou S., Leye I., Diedhiou R., Tamba S., Cisse M.T., Ndione D.M. & Sane M.L. (2017). Modeling of Unsteady Flow through Junction in Rectangular Channels: Impact of Model Junction in the Downstream Channel Hydrograph. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 06(03): 304–319.
- Kasuri L. (2014). Modelling for Ecosystem Restoration: Hydrodynamic Modelling of the Yolo Bypass Using HEC-RAS. University of California, Davis, 114 p.
- Koffi B. (2016). Dimensionnement du canal de dérivation du fleuve Cavally à l'aide d'un modèle hydraulique 1D. Mémoire de Master en Génie de l'Eau et de l'Environnement, UFR Environnement, Jean Lorougnon Guédé (Daloa), 74 p.
- Koffi B., Schulz M., Bréon F.-M., Dentener F., Steensen B.M., Griesfeller J., Winker D., Balkanski Y., Bauer S.E., Bellouin N., Berntsen T., Bian H., Chin M., Diehl T., Easter R., Ghan S., Hauglustaine D.A., Iversen T., Kirkevåg A., Liu X., et al. (2016). Evaluation of the aerosol vertical distribution in global aerosol models through comparison against CALIOP measurements: AeroCom phase II results: AEROSOL PROFILES IN AEROCOM II GCM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(12): 7254–7283.
- Konan K.S., Kouassi K.L., Konan koffi F., Yapo A.S. & Brou L.A. (2020). Impacts de l'orpaillage sur la morphologie et la qualité des eaux du fleuve Cavally (Zouan-hounien, Côte d'Ivoire). : 10 p.
- Kouassi K.L., Brou L.A., Yao A.B., Kouadio Z.A., Konan K.S., Konan K.F. & Koffi B. (2019). 1D-2D Hydraulic Modeling of a Diversion Channel on the Cavally River in Zouan-Hounien, Cote d'Ivoire. *Journal of Water Resource and Protection*, 11(08): 1036–1048.
- Montz B.E. & Grunfest E. (2002). Flash flood mitigation: recommendations for research and applications. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 4(1): 15–22.
- N'Guessan M.P (2019). Analyse hydraulique du projet d'exploitation des gisements miniers de BAKATOUO, WALTER et COLLINE SUD. Rapport d'étude - DHI SARL, 47 p.
- Ngo A.T. (2014). Evaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (centre Viêt-Nam). PhD Thesis, Université d'Orléans (France), 429 p.

## REFERENCES

- Papon A. (1973). *Geologie et mineralisations du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. synthèse des travaux de l'operation sasca*. BRGM, Paris, 186 p.
- Quan N. (2015). *Site-Wide Hydrogeology Field Investigation Programm*. Rapport d'étude SNC-LAVALIN INC consulting Canada, 122 p.
- Soualmia A., Gharbi M., Dartus D. & Masbernat L. (2016). Comparaison of 1D and 2D hydraulic model for floods simulation on the Medjerda riverin Tunisia. *Journal mater*, 7,: 3017–3026.
- Tamisier V., Raufaste S., Gob F., Thommeret N. & Bilodeau C. (2017). Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau français d'outremer (Carhyce). Spécificités, modalités d'application et valorisation des données Carhyce pour la construction d'un outil d'aide à la gestion des cours d'eau. *Rapport scientifique CNRS (LGP-LADYSS)/Université de Paris Panthéon-Sorbonne/ESGT/AFB*, 142 p.
- Tricart J., Avenard J.-M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J.-L., Adjanohoun E. & Perraud A. (1973). Une monographie physique de la Côte d'Ivoire, in: *Annales de Géographie. JSTOR*,: 369–372.
- UNESCO (2020). *L'eau et les changements climatiques, 2020. Rapport mondial des Nations Unis sur la mise en valeur des ressources en eau 2020*, CA, 417 p.
- USACE (2010). *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers, Davis, CA, 417 p.
- USACE (2016). *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers, Davis, CA, 539 p.
- USAID (2013). *Concepts de base de la modélisation hydrologique et hydraulique*. Mecdocument. USA, 19 p.
- Vozinaki A.-E.K., Morianou G.G., Alexakis D.D. & Tsanis I.K. (2017). Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: a case study of the Koiliaris basin, Greece. *Hydrological Sciences Journal*, 62(4): 642–656.

## RESUME

Les inondations sont des phénomènes naturels aléatoires aux conséquences souvent désastreuses. Face à la récurrence des crues, leur compréhension et leur prévision constitue un moyen intéressant de prévention des risques d'inondation le long des principaux fleuves de Côte d'Ivoire. Le but de cette étude est d'évaluer le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally. La démarche méthodologique s'est appuyée sur la modélisation de la propagation des crues en 1D-2D à travers le modèle HEC-RAS 5.05. La modélisation bidimensionnelle permet de mieux apprécier la distribution spatiale de l'inondation. Elle fait ressortir l'étendue de l'inondation (surface libre de l'eau), la distribution des lignes de courant (la vitesse) et la répartition de la profondeur de l'inondation. Les vitesses de propagation des crues varient de 0,36 à 1,08 m.s<sup>-1</sup> dans le lit du cours d'eau et de 0,19 à 0,69 m.s<sup>-1</sup> au niveau des berges ; soit une augmentation de 0,04 et 0,02 m.s<sup>-1</sup> respectivement au niveau du lit du cours d'eau et des berges par rapport à la période de retour de 20 ans. Les vitesses dans le lit du cours d'eau restent également plus importantes que celles observées au niveau des berges. Après l'intégration d'ouvrages hydrauliques, les vitesses maximales de propagations dans le lit mineur du cours d'eau sont de l'ordre de 1,3 m.s<sup>-1</sup> au voisinage de la mine d'or. Les cartes de propagation des crues de l'année 1988 avant et après intégration des ouvrages montrent que les zones exposées aux risques d'inondation sont les zones proches de la Société des Mines d'Ity (SMI).

**Mots clés :** Propagation des crues, modélisation 1D-2D, inondation, fleuve Cavally, Côte d'Ivoire

## ABSTRACT

Floods are random natural phenomena with often disastrous consequences. Faced with the recurrence of floods, understanding and forecasting them is an interesting way of preventing flood risks along the main rivers of Côte d'Ivoire. The aim of this study is to evaluate the hydrodynamic functioning of the Cavally River. The methodological approach was based on the modelling of flood propagation in 1D-2D through the HEC-RAS 5.05 model. The two-dimensional modelling allows a better appreciation of the spatial distribution of the flood. The flood propagation velocities vary from 0.36 to 1.08 m.s<sup>-1</sup> in the riverbed and from 0.19 to 0.69 m.s<sup>-1</sup> at the banks; i.e., an increase of 0.04 and 0.02 m.s<sup>-1</sup> respectively at the riverbed and banks compared to the 20-year return period. Streambed velocities also remain higher than those observed at bank level. After integration of hydraulic structures, maximum propagation velocities in the minor streambed are on the order of 1.3 m.s<sup>-1</sup> in the vicinity of the gold mine. The flood propagation maps of the year 1988 before and after the integration of the structures show that the areas exposed to flood risks are the areas close to the Société des Mines d'Ity (SMI).

**Keywords:** Flood propagation, 1D-2D modelling, flooding, Cavally River, Ivory Coast