UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE
Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNE : 2017-2018

N° D'ORDRE : 011/2019

THESE DE DOCTORAT

Mention : Géosciences et Environnement

Spécialité : Hydrologie

CANDIDAT

Nom : BROU

Prénoms : LOUKOU ALEXIS

Modélisation de la dynamique hydrologique du fleuve Cavally sous l'influence de fortes pressions anthropiques dans la zone de Zouan-Hounien (Côte d'Ivoire)

JURY

Président : Mme TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUEDE

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

Rapporteur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE

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

M. KOUAME Kan Jean, Maître de Conférences, Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY

Soutenu publiquement
le : 22 Novembre 2019

Table des matières **Pages**

DEDICACE ..... **VII**
AVANT-PROPOS ..... **VIII**
REMERCIEMENTS ..... **IX**
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **XII**
LISTE DES TABLEAUX ..... **XIII**
LISTE DES FIGURES ..... **XVI**
LISTE DES ANNEXES ..... **XXII**
INTRODUCTION **1**
PREMIERE PARTIE : CADRE DE L'ETUDE **4**
Chapitre 1 : Caractéristiques physiques du bassin versant du fleuve Cavally **5**
1.1. Situation géographique du bassin versant du fleuve Cavally 5
1.2. Caractéristiques de formes 5
1.3. Hydrographie et relief 6
1.4. Caractéristiques climatiques 8
1.4.1. Humidité relative 9
1.5. Régime hydrologique 9
1.6. Végétation, géologie et pédologie 12
1.6.1. Végétation 12
1.6.2. Géologie 12
1.6.3. Pédologie 14
1.7. Activités socio-économiques 15
Conclusion partielle 16
Chapitre 2 : Généralités sur la modélisation hydrologique et hydraulique **17**
2.1. Modélisation hydrologique 17
2.1.1. Modèles conceptuels (ou déterministes) 18
2.1.2. Modèles globaux (ou stochastiques) : Réseaux de neurones artificiels 19
2.1.3. Calage, validation et incertitudes d'un modèle 21
2.2. Modélisation des écoulements à surface libre et de propagation des crues 24
2.2.1. Principe de base de l'hydraulique 24
2.2.2. Modèles numériques 26
2.2.3. Equations gouvernant les modèles hydrauliques 27
2.2.4. Différents types de modèles d'hydrauliques à surface libre 31

2.3. Description du modèle HEC-RAS 33
2.3.1. Possibilités du modèle HEC-RAS 34
2.3.2. Théorie de base de calcul du modèle HEC-RAS 34
2.3.2.1. Equations mises en jeu 34
Conclusion partielle 40
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES 41
Chapitre 3 : Matériel et données 42
3.1. Matériel 42
3.2. Données collectées 43
3.2.1. Données hydroclimatiques 43
3.2.2. Données satellitaires 44
3.2.3. Images 45
3.3. Logiciels 45
Conclusion partielle 46
Chapitre 4 : Approche méthodologique 47
4.1. Réinstallation des stations hydrométriques 47
4.2. Collecte de données de terrain 47
4.3. Comblement des débits manquants par les réseaux de neurones artificiels 49
4.3.1. Initialisation des poids 49
4.3.2. Lecture du vecteur d'entrée et de la sortie désirée 50
4.3.3. Normalisation du vecteur d'entrée 50
4.3.4. Propagation en avant ou « feed-forward » 50
4.3.5. Calcul d'erreurs 51
4.3.6. Adaptation du réseau et calcul des sorties 52
4.3.7. Calcul de l'erreur quadratique moyenne (Mean Square Error) MSE 53
4.3.8. Configuration et choix d'une architecture optimale du réseau de neurones 53
4.3.9. Choix du pas de temps 53
4.3.10. Apprentissage, test et validation du modèle 54
4.3.11. Critères de performance du modèle 55
4.4. Caractérisation de la variabilité hydro climatique du bassin versant du fleuve Cavally 55
4.4.1. Calcul des indices pluviométriques et des indices des débits 55
4.4.2. Variabilité décennale des précipitations sur le bassin versant du Cavally 57
4.4.3. Analyse des jours et des hauteurs de pluie caractéristiques du bassin 57

4.4.4. Analyse fréquentielle des événements extrêmes pluviométrique et hydrologique 58

4.5. Etude de la dynamique morphologique du lit mineur du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI 61

4.5.1. Prétraitement des images 61

4.5.2. Traitement des images 62

4.5.3. Opérations d'extraction des informations 62

4.5.4. Analyse de l'évolution interannuelle de la morphologie du lit mineur du fleuve Cavally 64

4.6. Dimensionnement des canaux de dérivation 65

4.7. Modélisation du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques 68

4.7.1. Choix du modèle hydraulique 68

4.7.2. Modélisation de la propagation des crues avant la construction des ouvrages hydrauliques 69

4.7.3. Modélisation des écoulements du fleuve Cavally après la construction des ouvrages hydrauliques dans le périmètre d'exploitation de la SMI 76

Conclusion partielle 77

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION 78

Chapitre 5 : Variabilité hydro climatique dans le bassin versant du Cavally 79

5.1. Modèle pluie-débit par les réseaux de neurones artificiels 79

5.2. Structure du modèle de réseau de neurones artificiels (RNA) 79

5.3. Calage du modèle RNA 80

5.4. Validation du modèle RNA 80

5.5. Résultats des débits simulés 81

5.6. Variation interannuelle pluviométrique et hydrologique 82

5.6.1. Variation interannuelle de la pluie 82

5.6.2. Répartition de la pluie moyenne annuelle sur le bassin versant du Cavally 82

5.6.3. Répartition de la pluviométrie moyenne décennale du bassin versant du Cavally 83

5.6.4. Tendances pluviométriques sur le bassin versant du Cavally 87

5.6.5. Nombre de jours et hauteurs de pluie annuelle 87

5.6.6. Variation interannuelle des écoulements du fleuve Cavally 88

5.7. Analyse des extrêmes pluviométrique et hydrologique du bassin versant du fleuve Cavally 89

5.7.1. Extrêmes pluviométriques du bassin versant du Cavally 89
5.8. Discussion 93
Conclusion partielle..... 94
Chapitre 6 : Impact des activités anthropiques sur la morphologie du lit du fleuve Cavally 95
6.1. Compositions colorées OLI4/OLI5/OLI3 et discrimination de l'occupation du sol..... 95
6.2. Evaluation de la précision de la classification supervisée..... 96
6.3. Mode d'occupation du sol du bassin versant du Cavally 97
6.4. Evolution temporelle de la morphologie du lit du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI 97
6.5. Discussion 102
Conclusion partielle..... 103
Chapitre 7 : Caractéristiques des canaux de dérivation sur le fleuve Cavally 104
7.1. Caractéristiques géométriques des canaux de dérivation..... 104
7.2. Variation des vitesses dans le canal de dérivation de Daapleu 105
7.3. Comparaison des vitesses du fleuve Cavally avant et après la construction du canal de dérivation de Daapleu 106
7.4. Comparaison des niveaux d'eau à la station d'Ity avant et après le détournement du fleuve Cavally à Daapleu..... 107
7.5. Discussion 109
Conclusion partielle..... 110
Chapitre 8 : Fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques 111
8.1. Caractéristiques de la morphologie du fond du fleuve Cavally et des sédiments 111
8.1.1. Caractéristiques morphologiques du fond du fleuve Cavally 111
8.1.2. Caractéristiques granulométriques des sables du fond du lit du fleuve Cavally 112
8.1.3. Paramètres granulométriques des sédiments du fond du fleuve Cavally 113
8.2. Propagation des crues dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally 114
8.2.1. Calage et validation du modèle 114
8.2.2. Propagation des crues avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques de Daapleu 116
8.2.3. Cartes des zones inondables dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI 118
8.2.4. Comparaison des levés bathymétriques avec la profondeur simulée par le modèle pour différentes périodes de retour 158

8.2.5. Comparaison des altitudes à la surface libre de l'eau avant et après la construction des ouvrages hydrauliques 159
8.3. Discussion 160
Conclusion partielle 161
CONCLUSION GENERALE 163
REFERENCES 167
ANNEXES i
RESUME ii

DEDICACE

Ce présent mémoire est dédié à toute ma famille, particulièrement à :

Aurélie, Anaëlle et Uriel !

Que Dieu le Tout Puissant

Accorde à tous et à chacun le bonheur espéré !

AVANT-PROPOS

Dans le cadre de l'extension de ses activités de part et d'autre du fleuve Cavally, la société des mines d'Ity (SMI) envisage de créer quatre (4) canaux de dérivation sur le fleuve Cavally. Un tel projet dont les impacts seront significatifs sur le fonctionnement du fleuve Cavally mérite des études approfondies pour bien dimensionner les canaux de dérivation afin de minimiser les impacts du projet sur le cours d'eau, l'environnement immédiat et les intérêts des populations. C'est dans ce contexte que la SMI a sollicité l'Equipe de Recherche sur l'Ecologie et la Dynamique des Hydro systèmes (EREDHy) de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa dans la recherche de solutions idoines pour prévenir tout risque de catastrophe. C'est ainsi que nous avons pris part aux réflexions qui ont abouti à plusieurs études dont la modélisation hydraulique pour simuler le fonctionnement actuel et futur du cours d'eau. Cela permettrait de dimensionner les futurs canaux de dérivation qui puissent assurer des conditions d'hydraulicité similaires à l'état initial du cours d'eau pour différentes périodes de retour. Pour réaliser ces modèles, notre équipe de recherche s'est basée sur la collecte de données hydrologiques, notamment les niveaux d'eau et les débits sur une portion du fleuve Cavally entre la traversée d'Ity-Bakatouo et la traversée de Floleu-Soklaleu. La collecte de données a été réalisée sur quatre ans (juillet 2015-juillet 2019). Ces différentes campagnes ont été effectuées de façon périodique en fonction des saisons climatiques du bassin versant. Les données collectées renferment aussi bien les mesures effectuées sur le terrain que la recherche d'informations et de données historiques auprès de structures telles que la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM) et la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques Humaines (DGIHH). Ce présent mémoire vise spécifiquement à modéliser le fonctionnement hydrodynamique du cours d'eau dans le périmètre d'exploitation de la SMI ; ensuite dimensionner les canaux de dérivation et modéliser le fonctionnement hydrodynamique de celui-ci, tout en vérifiant l'impact de ces aménagements sur le milieu environnant.

REMERCIEMENTS

Ce présent travail a vu la contribution de plusieurs personnes dont il convient d'exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude. Je tiens cependant, à m'excuser en cas d'omission de noms de certaines personnes qui ont également contribué d'une manière ou d'une autre au succès du présent travail. Qu'elles se reconnaissent en ce travail, fruit de leur contribution.

J'exprime ma profonde gratitude au Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) qui en plus de m'avoir permis de réaliser cette thèse à l'Université Jean Lorougnon Guédé, a accepté de présider mon jury.

Je témoigne toute ma reconnaissance à la direction de la Société des Mines d'Ity (SMI) de nous avoir facilité l'accès aux sites d'exploitation minière dont le fleuve Cavally pour la collecte des données et pour la mise à disposition de certaines données. Je remercie particulièrement Monsieur N'Guessan Oi Pierre pour tout le soutien qu'il nous a apporté dans la réalisation des campagnes de terrain.

Je remercie également le Professeur KONE Tidiani, Vice-président de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), chargé de la pédagogie, de la recherche, de la vie universitaire et de l'innovation technologique pour avoir coordonné la mise en place de la formation doctorale.

J'exprime mes sincères remerciements au Docteur AKAFFOU Doffou Sélastique, Vice-président de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), chargé de la planification, de la programmation et des relations extérieures, pour m'avoir trouvé cette opportunité de réaliser mes travaux de thèse auprès du Docteur KOUASSI Kouakou Lazare.

J'exprime ma profonde gratitude au Docteur KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement, pour sa disponibilité, pour ses conseils avisés. Je lui suis infiniment reconnaissant pour avoir accepté non seulement de diriger ce travail mais également de m'avoir adopté comme un petit frère. Vous m'avez cher Maître, appris beaucoup de choses en si peu de temps que j'ai passé à vos côtés et je souhaiterais continuer à apprendre à vos côtés. Vous m'avez cher grand frère, montré le sens du partage et de la générosité dans le travail. Je me souviens des voyages d'étude à l'étranger notamment en Tunisie (2017) et en Chine (2018) dont vous aviez pris soins de prendre en charge les frais des billets d'avion et de communication pour l'aboutissement de ce présent travail. Je n'oublierai jamais cela car c'est une philosophie que vous m'aviez transmise. Je tâcherai ainsi de la perpétuer pour l'avancement de la recherche. Je vous suis également reconnaissant car vous m'avez inculqué le goût du travail bien fait. Trouvez en ces quelques lignes, l'immense estime de votre personnalité. Encore merci cher Maître !

Je voudrais également remercier le Docteur KONAN Koffi Félix, Maître de Conférences et Président du Conseil Scientifique de l'Université Jean Lorougnon Guédé pour sa disponibilité et ses conseils avisés pour l'amélioration de ce travail. Je vous suis également reconnaissant pour vos motivations et vos conseils toutes les fois que j'ai eu l'occasion de vous rencontrer. Merci cher Maître, cher grand frère !

Au Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'UFR Environnement, Docteur DIBI Brou, Maître de Conférences, je lui témoigne ma gratitude de m'avoir accepté dans son laboratoire pour la réalisation de mes travaux et d'avoir accepté d'évaluer ce travail en tant qu'examinateur. Votre disponibilité et les échanges que vous avez eus avec moi ont été d'une contribution significative dans la réalisation de ce travail.

Je voudrais également remercier Docteur KOUAKOU Koffi Eugène, Maître de Conférences à l'Institut National Polytechnique Félix HOUPHOUET-BOIGNY et Docteur Martin SANCHEZ ANGULO, Maître de Conférences, HDR à l'Université de Nantes, instructeurs de ce mémoire de thèse dont la qualité de leurs observations a permis d'améliorer ce travail.

Je suis également très reconnaissant envers le Docteur KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences qui en plus d'avoir instruit cette thèse, a accepté d'être le rapporteur.

Mes remerciements vont à l'endroit du Docteur KOUAME Kan Jean, Maître de Conférences à l'Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY qui a accepté d'évaluer ce travail en tant qu'examinateur.

Je traduits ma gratitude et ma reconnaissance au Docteur KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences qui a contribué d'une manière significative à l'avancement de mes travaux à travers ses conseils avisés et ses questions très constructives qui ont permis d'améliorer ce travail. Merci cher maître, cher grand frère !

Je voudrais traduire ma reconnaissance à l'endroit du Docteur KOUAME Kouassi Innocent, Maître de Conférences qui m'a initié à la recherche scientifique depuis la maîtrise à l'Université Nangui Abrogoua (Ex Université d'Abobo-Adjamé). Cher maître, veuillez apprécier dans ce mémoire, le fruit de votre encadrement.

Je suis également très reconnaissant envers les Docteurs KOUADIO Zilé Alex, YAO Affoué Berthe, KOUASSI Kouakou Hervé, ANOH Kouao Armand, EBLIN Sampah Georges, MANGOUA oi Mangoua Jules et KOUAME Yao Morton pour leur contribution significative à travers la lecture et la correction de ce mémoire qui l'ont considérablement amélioré.

Dans la traduction en anglais de certaines de mes publications, j'ai eu parfois recours à l'expertise du Docteur KOUAKOU Edouard Maître-Assistant, de Monsieur YAO Adou Kobéna, Inspecteur Général option Anglais et de Monsieur N'Guessan Aubin, professeur

d'anglais de lycée et collège. Tout en leur réitérant mes remerciements, qu'ils apprécient ce travail, fruit de leur contribution.

Mes remerciements vont également à l'endroit des Docteurs SOMBO Abé Parfait, Maître-Assistant, KOUA Tanoh Jean-Jacques, Maître-Assistant pour leurs conseils avisés et motivations qui ont contribué à améliorer ce travail.

Je suis très reconnaissant envers Docteur MELEDJE N'Diaye Hermann qui m'a initié à l'utilisation des réseaux de neurone artificiel sur Mathlab.

Je remercie Monsieur DIANE Soualio, et Monsieur OUATTARA Edouard, Ingénieurs hydrologues à la Direction de l'Hydrologie, pour leur disponibilité à nous accompagner sur le terrain chaque fois que nous les avions sollicités.

Je voudrais remercier également tous les doctorants du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement : DOFFOU Richard Jean Olive, KOUADIO Kouamé Jean Olivier, TOURE Fanraban Fabrice, OUATTARA Gningnéri Souleymane, KOUASSI Kouassi Jean Michel, KOKOBOU Kouassi Hervé, KRA Léandre Junias, AKATCHI Akouba Agnès, KOMENAN Yiwa Monique pour leurs contributions à la réalisation de travail. Je voudrais particulièrement remercier KOFFI Bérenger pour sa contribution à l'élaboration de ce travail dans le cadre de son mémoire de master et son amour au travail bien fait et OUEDE Gla Blaise pour son assistance technique quant à la manipulation de certains logiciels.

Ce travail a été rendu possible grâce au soutien de ma famille, famille BROU, particulièrement mon épouse CISSE N'Goné Anne Aurélie, mes enfants Mienwa Marie Keren Anaëlle et Mienyé Kouassi Jean Uriel qui ont supporté mes nombreux et longs moments d'absence dans le cadre de la réalisation de ce travail. Je remercie également la famille ADOU, ma belle-famille pour son soutien à tout égard dans le cadre de l'exécution de ce travail.

Je suis vraiment reconnaissant envers Monsieur OUATTARA Fétigué, pour ses encouragements et pour le soutien financier qu'il m'a apporté pendant de la réalisation de cette thèse. Qu'il trouve ici le fruit de ses efforts.

A mon frère et ami EBA N'Da Richard, je lui suis vraiment reconnaissant pour tout le soutien moral et financier qu'il m'a apporté pendant la réalisation de cette thèse.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ADCP : Acoustic Doppler current profiler

AIC : Critère d'Information d'Akaike

ASL : Altitude à la Surface Libre

BIC : Critère d'Information Bayésien

CNRA : Centre National de Recherche Agronomique

DGIHH : Direction générale des infrastructures et de l'hydraulique humaine

GEV : Loi Généralisée des Valeurs Extrêmes

GPS : Système de géolocalisation par Satellite

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

MNT : Modèle Numérique de Terrain

QDM : Quantité De Mouvement

SMI : Société des Mines d'Ity

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques de forme du bassin versant du fleuve Cavally..... 6
Tableau II : Analogie entre les neurones biologiques et artificiels. (Nielsen, 1990) 21
Tableau III : Différents types de modèles numériques à surface libre (Chareb, 2005 ; Kasuri, 2014). 33
Tableau IV : Bandes spectrales du satellite Landsat 8 en fonction de la longueur d'onde et de la résolution spatiale (Barsi *et al.*, 2014). 45
Tableau V : Logiciels utilisés dans le cadre de cette étude. 46
Tableau VI : Paramètres caractéristiques nécessaires à la réinstallation de la station d'Ity et de Flampleu. 47
Tableau VII : Modèles statistiques présélectionnées pour l'ajustement des pluies journalières extrêmes. 59
Tableau VIII : Débits des périodes de retour. 71
Tableau IX : Critères d'évaluation de la performance et du choix du modèle en fonction de 4 architectures au niveau du calage et la validation. 79
Tableau X : Critères de performance du modèle de réseau de neurone artificiel de type 2-3-1. 81
Tableau XI : Valeurs caractéristiques pluviométriques des stations du sous bassin du Cavally à Floleu. 82
Tableau XII : Lois statistiques appliquées. 89
Tableau XIII : Pluies annuelles en périodes sèche et humide pour diverses périodes de retour. 89
Tableau XIV : Pluies maximales journalières de différentes périodes de retour. 91
Tableau XV : Critères de classement des lois statistiques d'analyse fréquentielle .. 92
Tableau XVI : Quantiles de crue et périodes de retour de débit à la station d'Ity. . 92
Tableau XVII : Quantiles de pluie et de crue correspondant à différentes périodes de retour. 92
Tableau XVIII : Matrice de confusion de la classification finale, dérivée des images LandSat 8 96
Tableau XIX : Précision de la classification des niveaux 1 et 2, dérivée des images LandSat8. 96
Tableau XX : Tableau récapitulatif de l'évolution des surfaces des sections. 100
Tableau XXI : Caractéristiques géométriques des canaux de dérivation. 104

Tableau XXII : Caractéristiques géométriques du canal de dérivation de Daapleu. 104
Tableau XXIII : Paramètres granulométriques des sédiments du fleuve Cavally.... 114
Tableau XXIV : Comparaison entre les vitesses moyennes mesurées du Cavally à la vitesse simulée par le modèle dans les conditions initiales. 128
Tableau XXV : Valeurs caractéristiques des profondeurs du fleuve Cavally dans les conditions initiales et futures pour une périodes de retour 10 ans. 129
Tableau XXVI : Valeurs caractéristiques des profondeurs du fleuve Cavally pour la période de retour 20 ans dans les conditions initiales et futures. 131
Tableau XXVII : Valeurs caractéristiques des profondeurs du fleuve Cavally pour la période de retour 50 ans dans les conditions initiales et futures. 133
Tableau XXVIII : Valeurs caractéristiques des profondeurs du Cavally pour chaque débit de projet. 135
Tableau XXIX : Valeurs caractéristiques de la répartition de la profondeur au niveau du lit mineur pour chaque période de retour dans les conditions initiales. 137
Tableau XXX : Valeurs caractéristiques de la répartition des profondeurs au niveau du lit mineur pour chaque période de retour dans les conditions futures. 138
Tableau XXXI : Valeurs caractéristiques des vitesses du Cavally pour chaque période de retour. 139
Tableau XXXII : Valeurs caractéristiques des vitesses du Cavally pour la période de retour de 20 ans dans les conditions initiales et futures. 141
Tableau XXXIII : Valeurs caractéristiques des vitesses du Cavally pour la période de retour de 50 ans dans les conditions initiales et futures. 143
Tableau XXXIV : Valeurs caractéristiques des vitesses du Cavally pour le débit de projet de 100 ans dans les conditions initiales et futures. 145
Tableau XXXV : Valeurs caractéristiques de la répartition de la vitesse au niveau du lit mineur du Cavally pour chaque débit de projet dans les conditions initiales.... 147
Tableau XXXVI : Valeurs caractéristiques des vitesses au niveau du lit mineur pour chaque période de retour dans les conditions futures. 148
Tableau XXXVII : Distance en amont et en aval des zones de dérivation sur lesquelles des survitesses sont observées. 149
Tableau XXXVIII : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre dans les conditions initiales et futures pour la périodes de retour 10 ans. 149

Tableau XXXIX : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre dans les conditions initiales et futures pour la périodes de retour 20 ans. 151
Tableau XL : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre dans les conditions initiales et futures pour la périodes de retour 50 ans. 153
Tableau XLI : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre dans les conditions initiales et futures pour la périodes de retour 100 ans. 155
Tableau XLII : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre de la propagation des crues au niveau du lit mineur aux différentes périodes de retour. 157
Tableau XLIII : Valeurs caractéristiques des ASL des crues au niveau du lit mineur pour chaque période de retour..... 158
Tableau XLIV : Comparaison des altitudes à la surface libre de l'eau avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques. 159

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de la zone d'étude. 5
Figure 2 : Réseau hydrographique du bassin versant du fleuve Cavally à la station de Taté. 7
Figure 3 : Carte des pentes du bassin versant du fleuve Cavally. 7
Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant du fleuve Cavally. 8
Figure 5 : Diagramme ombrothermique de la station de Zouan-Hounien. 9
Figure 6 : Humidité relatives dans la région de Man de 1970 à 2015. 9
Figure 7 : Evolution des débits mensuels moyens du Cavally au niveau des stations de Flampleu (1980-2001), Ity (1980-2001) et Toulepleu (1980-2001). 10
Figure 8 : Période de crue du fleuve Cavally à la station d'Ity (prise de vue le 12/09/2015). 11
Figure 9 : Période d'étiage du fleuve Cavally à la station d'Ity (prise de vue le 13/01/2016). 11
Figure 10 : Formation géologique dans le sous bassin du Cavally à la station de Floleu. 13
Figure 11 : Formation géologique dans la localité d'Ity (SNC-LAVALIN INC., 2015). 14
Figure 12 : Quelques activités socio-économiques menées dans le bassin versant du Cavally : (A) baignade et autre usage des eaux du Cavally, (B) plantation de cacaoyer, (C et D) activités d'orpaillage clandestin (Crédit photos, Brou). 15
Figure 13 : Composants d'un modèle hydrologique (Singh, 1995). 17
Figure 14 : Classification des modèles proposée par Singh (1995). 18
Figure 15 : Schéma d'un neurone artificiel. (Nielsen,1990) 21
Figure 16 : Simplification générale de la solution de l'équation de Barré de Saint Venant. 28
Figure 17 : Différentes pertes de charges dans un écoulement en lits composés (Proust, 2005) 31
Figure 18 : Représentation des limites dans l'équation d'énergie (Chareb, 2005). 35
Figure 19 : Méthode de subdivision du débit par le modèle HEC-RAS (USACE, 2016). 36
Figure 20 : Volume de contrôle élémentaire pour la dérivation de la continuité (USACE, 2016) 37

Figure 21 : Volume élémentaire pour la dérivation des équations de continuité et de la quantité de mouvement (USACE, 2016). 38
Figure 22 : Ecoulements dans le canal principal et la plaine d'inondation (USACE, 2016). 38
Figure 23 : Matériel de terrain : A) GPS différentiel, B) Moulinet au Saumon, C) Courantomètre ADCP et D) ADCP monté sur une embarcation. 42
Figure 24 : Localisation des stations pluviométriques et hydrométriques. 44
Figure 25 : Zones de couverture des mesures des débits et de niveaux d'eau le fleuve Cavally dans les environs de la SMI. 48
Figure 26 : Processus de répartition des données dans le modèle de réseaux de neurone. 54
Figure 27 : Schéma conceptuel pour l'établissement de la carte d'occupation du sol. 62
Figure 28 : Schéma conceptuel de la réalisation de l'évolution interannuel du lit du fleuve Cavally. 65
Figure 29 : Section transversale du lit mineur amont (A) et aval (B) au niveau du méandre de Daapleu. 67
Figure 30 : Section transversale du lit mineur amont (A) et aval (B) du Cavally au niveau du méandre Colline Sud. 67
Figure 31 : Géométrie du canal de dérivation. 68
Figure 32 : Processus de modélisation des crues sur une section du fleuve Cavally. 71
Figure 33 : Hydrogramme de crue de 1988 à la station hydrométrique d'Ity. 72
Figure 34 : Points de prélèvement des échantillons de sédiments. 73
Figure 35 : Surface maillée pour la modélisation de la propagation des crues dans les conditions initiales. 76
Figure 36 : Terrain naturel modifié au niveau des zones de coupure des méandres dans les conditions futures du fleuve Cavally. 77
Figure 37 : Corrélation entre les débits observés et simulés de l'architecture 2-3-1 du modèle au niveau du calage. 80
Figure 38 : Corrélation entre les débits observés et débits simulés au niveau de la validation. 81
Figure 39 : Variation des débits simulés par le modèle (RNA) station d'Ity de 2001 à 2016. 82
Figure 40 : Variation des hauteurs moyennes annuelles de pluie de 1970 à 2010. 83
Figure 41 : Cartes des isohyètes décennales de 1971-1980 et 1981-1990. 85
Figure 42 : Cartes des isohyètes décennales de 1991-2000 et 2001-2010. 86

Figure 43 : Evolution de l'indice pluviométrique interannuel aux stations de Danané, Sipilou, Zouan-Hounien et SMI-Ity. 87
Figure 44 : Variation du nombre de jours de pluie en fonction de la hauteur de pluie annuelle à la station pluviométrique de Zouan-Hounien (1976-2010). 88
Figure 45 : Variation des modules annuels des débits du Cavally à Flampleu (1969-2015). 89
Figure 46 : Lois de Gumbel (A), Weibull (B) et GEV (C) ajustées et le critère de comparaison graphique (D) par la méthode du maximum de vraisemblance aux séries de pluies journalières de Zouan-Hounien. 90
Figure 47 : Lois de Weibull (A), Gumbel (B) et GEV (C) ajustées et le critère de comparaison graphique (D) par la méthode du maximum de vraisemblance aux séries de débits maxima journaliers annuels de la station d'Ity. 91
Figure 48 : Composition colorée OLI5/OLI4/OLI3 sur l'image LandSat 8 de 2016. 95
Figure 49 : Carte d'occupation du sol dans le périmètre d'exploitation de la SMI en 2018. 97
Figure 50 : Evolution du lit mineur du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI au fil des années. 98
Figure 51 : Dynamique de l'évolution morphologique du lit mineur du Cavally entre Colline Sud et Floleu en 1986, 2011 et 2018. 99
Figure 52 : Etat de la dégradation des berges du fleuve Cavally due aux activités d'orpaillage clandestin. 101
Figure 53 : Etat de la dégradation du lit et des berges du fleuve Cavally dans les environs du méandre de Colline Sud. 102
Figure 54 : Caractéristiques géométriques du canal de dérivation de Daapleu. 105
Figure 55 : Illustration du pont et du canal de dérivation de Daapleu. 105
Figure 56 : Variation des vitesses dans le fleuve Cavally de l'amont vers l'aval au voisinage de la zone de dérivation de Daapleu. 106
Figure 57 : Comparaison des vitesses avant et après le détournement du fleuve Cavally à Daapleu. 107
Figure 58 : Illustration de la variation des niveaux d'eau à la station d'Ity avant et après le détournement du fleuve à Daapleu. 108
Figure 59 : Différence du niveau d'eau entre les conditions existantes et les conditions futures. 108

Figure 60 : Bathymétrie de la portion du Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI en octobre 2015. 111
Figure 61 : Bathymétrie de la portion du Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI en février 2019. 112
Figure 62 : Courbes granulométriques des sables du fleuve Cavally. 113
Figure 63 : Hydrogrammes des débits observés et des débits simulés (1988) à la station d'Ity. 115
Figure 64 : Hydrogrammes des débits observés et débits simulés (Juillet à Octobre 2015) à la station d'Ity. 115
Figure 65 : Hydrogrammes des débits observés et débits simulés (septembre à octobre 2018) à la station d'Ity. 116
Figure 66 : Répartition des niveaux d'eau à la surface libre avant et après la coupure du méandre de Daapleu pour la période de retour de 20 ans. 117
Figure 67 : Répartition des niveaux d'eau à la surface libre avant et après la coupure du méandre de Daapleu pour la période de retour de 100 ans. 117
Figure 68 : Différence entre les niveaux d'eau avant et après la construction du canal de dérivation de Daapleu pour les périodes de retour 20 ans et 100 ans. 118
Figure 69 : Distribution des profondeurs maximales du fleuve Cavally dans les conditions initiales (A) et futures (B) pour l'hydrogramme de crues de 1988. 120
Figure 70 : Variation de la profondeur maximale dans le lit mineur du fleuve dans la zone d'Ity dans les conditions initiales pour l'hydrogramme des crues de 1988. 121
Figure 71 : Profondeur d'eau dans le lit mineur du Cavally dans les conditions futures pour l'hydrogramme des crues de 1988. 121
Figure 72 : Etendue des Altitudes de la Surface Libre (ASL) de l'eau dans la plaine inondable du Cavally dans les conditions initiales (A) et futures (B) pour l'hydrogramme de crues de 1988. 123
Figure 73 : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée dans les conditions initiales pour l'hydrogramme de crues de 1988. 124
Figure 74 : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée dans les conditions futures pour l'hydrogramme de crues de 1988. 124
Figure 75 : Répartition des vitesses dans la plaine inondable de la zone d'étude dans les conditions initiales (A) et futures (B). 126
Figure 76 : Variation de la vitesse s le lit mineur du Cavally dans la zone étudiée dans les conditions initiales pour l'hydrogramme de crues de 1988. 127

Figure 77 : Variation de la vitesse de la propagation des crues dans le lit mineur du Cavally au niveau de la zone étudiée dans les conditions futures pour l'hydrogramme de crues de 1988. 127
Figure 78 : Comparaison des vitesses moyennes mesurées au cours des périodes de campagnes avec les vitesses simulées par le modèle. 128
Figure 79 : Répartition des profondeurs du fleuve Cavally pour la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 130
Figure 80 : Répartition des profondeurs du fleuve Cavally pour la période de retour de 20 dans les conditions initiales (A) et futures (B). 132
Figure 81 : Répartition des profondeurs du fleuve Cavally pour une période de retour de 50 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 134
Figure 82 : Répartition des profondeurs maximales du fleuve Cavally pour la période de retour 100 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 136
Figure 83 : Répartition des profondeurs maximales dans le lit mineur de la portion étudiée du Cavally dans les conditions initiales. 137
Figure 84 : Répartition de la profondeur maximale dans le lit mineur du Cavally dans les conditions futures. 138
Figure 85 : Répartition des vitesses du fleuve Cavally pour la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 140
Figure 86 : Répartition des vitesses du fleuve Cavally pour une période de retour de 20 dans les conditions initiales (A) et futures (B). 142
Figure 87 : Répartition des vitesses du fleuve Cavally pour les périodes de retour de 50 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 144
Figure 88 : Répartition des vitesses maximales des crues du Cavally pour la période de 100 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 146
Figure 89 : Variation de la vitesse dans le lit mineur du Cavally pour chaque période de retour dans les conditions initiales. 147
Figure 90 : Variation de la vitesse des crues dans le lit mineur du Cavally en fonction de chaque période de retour dans les conditions futures. 148
Figure 91 : Etendue des altitudes de surface libre (ASL) des inondations du fleuve Cavally pour la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 150
Figure 92 : Etendue des altitudes de surface libre (ASL) des inondations du fleuve Cavally pour la période de retour 20 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 152

Figure 93 : Etendue des altitudes de surface libre (ASL) des inondations du fleuve Cavally pour la période de retour 50 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 154
Figure 94 : Répartition des altitudes à surface libres maximales des crues du Cavally pour la période de retour de 100 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B). 156
Figure 95 : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée dans les conditions initiales pour chaque période de retour. 157
Figure 96 : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée dans les conditions futures pour chaque période de retour. 158
Figure 97 : Comparaison du levé bathymétrique avec la profondeur simulée en fonction de la période de récurrence des crues. 159

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Comparaison des longueurs des segments de 2011 et 2012. ii
Annexe 2 : Comparaison des longueurs des segments de 2018 et google-earth. ii
Annexe 3 : Caractéristiques du pont de Daapleu iii
Annexe 4 : Caractéristiques des canaux de Bakatouo et de Walter iii

INTRODUCTION

L'augmentation de la population et des activités économiques à proximité des cours d'eau a entraîné une amplification des risques d'inondations de nombreux bassins versants du monde (Chen & Liu, 2017). Les catastrophes naturelles, particulièrement les inondations causées par les crues ont toujours existé et elles constituent un phénomène courant et récurrent dans l'histoire de l'humanité. De plus, depuis quelques années ces phénomènes semblent survenir à un rythme accéléré et deviennent potentiellement plus dangereux et plus dévastateurs. Aussi, les crues sont-elles également des phénomènes naturels aléatoires aux conséquences souvent désastreuses. Une bonne connaissance de ces phénomènes aléatoires s'avère nécessaire pour la prévention des risques (Ngo, 2014). Pour apporter des réponses précises à la compréhension des phénomènes d'inondations, plusieurs études ont été déjà menées à travers différents modèles hydrologiques et hydrauliques et des modèles statistiques.

Ainsi, Baptista (1990) a-t-il étudié la propagation des crues à partir d'un modèle diffusif. Tangara (2005) a, quant à lui, utilisé un modèle pluie-débit global pour la prévision des crues. Dawson *et al.* (2006) ont utilisé les réseaux neuronaux pour l'estimation des crues sur des bassins versants non jaugés. Hyung-Il *et al.* (2012) ont utilisé un système intégré de gestion des réservoirs (IRMS) pour évaluer les risques d'inondations dans un contexte de changement climatique. Au Vietnam, Ngo (2014) a évalué les risques d'inondations causés par les typhons à l'aide du modèle HEC-HMS. Plusieurs études ont été également menées sur la vulnérabilité des plaines inondables et l'estimation des sinistres causés par les inondations (Barredo, 2007 ; Champredonde, 2008 ; Borga *et al.*, 2010 ; Karagiorgos *et al.*, 2016). De nombreux auteurs ont effectué des travaux sur la modélisation de la propagation des crues grâce aux modèles hydrologiques et hydrauliques à travers le monde (Bogdanowicz *et al.*, 2014 ; Kasuri, 2014 ; Boudjelal *et al.*, 2015 ; Bader *et al.*, 2017 ; Bouchenafa, 2017).

En Côte d'Ivoire, face à la récurrence des crues, leur compréhension et leur prévision représentent un moyen intéressant de prévention des risques d'inondation. Cependant, la prévision des crues à travers des modèles facilement compréhensibles est actuellement très peu développée ; ce qui conduit à la non maîtrise de ces phénomènes tant en milieu urbain qu'en milieu rural. Il en résulte donc une méconnaissance des mécanismes de propagation des ondes de crues le long des principaux cours d'eau ivoiriens et un manque de suivi de l'évolution des crues aux conséquences souvent désastreuses. Par conséquent, la capacité des décideurs ivoiriens à répondre à ce type de catastrophe sur la base d'informations scientifiques fiables reste limitée. Par ailleurs, les bassins versants de la Côte d'Ivoire sont soumis à des activités anthropiques de tout genre (Kouassi, 2007). Parmi ces activités, les exploitations minières moderne et traditionnelle ainsi que les aménagements (les barrages, les ouvrages de

franchissement, la dérivation des cours d'eau etc.) contribuent fortement à la modification du fonctionnement hydrologique et hydrodynamique des cours d'eau. L'intensification de ces activités sur les bassins versants de façon générale est l'un des principaux facteurs qui favorise les phénomènes d'érosion et modifie la rugosité du lit et la section des cours d'eau (Rosier *et al.*, 2010). Une connaissance de ces aménagements pour la protection de l'environnement et des hydro systèmes en particulier est nécessaire.

La compréhension des phénomènes d'inondation a fait l'objet de plusieurs études à travers différents modèles hydrauliques (Pirotton, 1994 ; Chapuis, 2012 ; Tran, 2015 ; Kane *et al.*, 2017). Parmi les principales causes anthropiques de la modification du fonctionnement des cours d'eau, certains auteurs tels que Alexeevsky *et al.* (2013) ; Lecce (2013) soulignent le rôle prépondérant de la construction d'ouvrages ou de leur suppression, de la modification de la géométrie des cours d'eau (travaux de terrassement tels que le recoupement de méandres) et des extractions de matériaux.

Le bassin versant du Cavally subit ces dernières années des pressions anthropiques, surtout dans la localité d'Ity (Brou *et al.*, 2019). En effet, le fleuve Cavally, situé à la frontière entre la Côte d'Ivoire et le Libéria, traverse la zone d'exploitation de la société des mines d'Ity (SMI). Le Cavally présente beaucoup de méandres dans cette zone et le lit du cours d'eau est fortement perturbé par les activités des orpailleurs clandestins qui exploitent de manière non-conventionnelle l'or dans le lit du fleuve. Ces orpailleurs utilisent des motopompes pour draguer le fond du fleuve pour y extraire l'or. Ces pratiques entrainent l'élargissement du lit du fleuve, la modification du fonctionnement hydrodynamique du fleuve et la destruction de la faune et de la flore aquatiques (Kouassi *et al.*, 2019). Dans le but d'étendre ses activités, la SMI envisage de couper plusieurs méandres du fleuve Cavally dans la localité d'Ity et de construire des canaux de dérivation et un pont pour faciliter le franchissement du fleuve. Ces aménagements soulèvent des préoccupations à savoir : quelle modification ces ouvrages peuvent-ils entrainer sur le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally ? Quels impacts peuvent-ils causer ces aménagements sur le bassin versant du fleuve Cavally dont les crues causent fréquemment des dégâts sur les activités agricoles des populations riveraines ? Un tel projet dont les impacts peuvent être significatifs sur le fonctionnement du fleuve Cavally mérite des études approfondies afin de bien dimensionner les différents canaux de dérivation dans le but de minimiser leurs impacts sur le cours d'eau et son environnement immédiat.

Parmi les quatre grands fleuves de la Côte d'Ivoire, le fleuve Cavally est le fleuve qui n'a pas encore subi d'aménagements hydrauliques majeurs. Selon les recherches bibliographiques, le bassin versant du Cavally n'a pas encore fait l'objet d'études scientifiques dans le domaine de

l'hydrologie en général, et en particulier la modélisation hydrologique. Or, la compréhension du fonctionnement hydrologique d'un cours d'eau passe nécessairement par la connaissance des paramètres hydrodynamiques, des évènements extrêmes hydrologique et pluviométrique du bassin versant et de la morphologie du lit de ce cours d'eau en tenant compte des activités qui y sont menées. C'est pourquoi le thème défini dans le cadre de cette étude est : « ***Modélisation de la dynamique hydrologique du fleuve Cavally sous l'influence de fortes pressions anthropiques dans la zone de Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire*** ». Cette étude a pour objectif principal d'établir un modèle numérique pour dimensionner des canaux de dérivation et simuler leur influence sur le fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally dans la zone d'Ity. Il s'agira de façon spécifique de :

- caractériser la variabilité hydro climatique du bassin versant du fleuve Cavally ;
- évaluer l'impact des activités humaines sur la morphologie du lit du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI ;
- dimensionner les canaux de dérivation sur le fleuve Cavally à l'aide d'un modèle hydraulique ;
- simuler le fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques.

Pour atteindre ces objectifs, le présent mémoire est subdivisé en trois grandes parties. La première partie porte sur la caractérisation du cadre physique de la zone d'étude et sur l'état de l'art sur des concepts liés aux phénomènes de modélisation hydrologique et hydraulique. La deuxième partie présente l'approche méthodologique d'acquisition des données hydroclimatiques, hydrodynamiques et sédimentologiques ainsi que la mise en place des modèles hydrologique et hydraulique. La troisième partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus et des discussions qui s'en dégagent. Elle décrit d'abord les caractéristiques hydroclimatiques, les impacts des activités humaines sur l'évolution morphologique du fleuve Cavally. Ensuite, elle donne les dimensions des canaux de dérivation qui sont planifiés sur le fleuve Cavally. Enfin, elle présente les résultats de la simulation numérique sur le fonctionnement hydrologique du Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques. Ce travail se termine par la conclusion générale qui dresse le bilan des connaissances acquises au cours de cette étude ainsi que les recommandations et les perspectives de recherche qu'elle suscite.

PREMIERE PARTIE : CADRE DE L'ETUDE

Chapitre 1 : Caractéristiques physiques du bassin versant du fleuve Cavally

1.1. Situation géographique du bassin versant du fleuve Cavally

Le bassin versant du Cavally est un bassin transfrontalier, situé entre les longitudes 8°4' et 7°7' Ouest et les latitudes 6°8'et 7°9' Nord. Le fleuve Cavally prend sa source en Guinée au Nord du Mont Nimba à une altitude de 600 m. Long de 700 km, le lit du Cavally sert de frontière naturelle entre la Côte d'Ivoire et le Libéria dans ses cours moyen et inférieur. Le sous bassin versant objet de cette étude, dont l'exutoire se trouve à Floleu dans la localité de Zouan-Hounien a une superficie d'environ 3700 km^2(Figure 1).

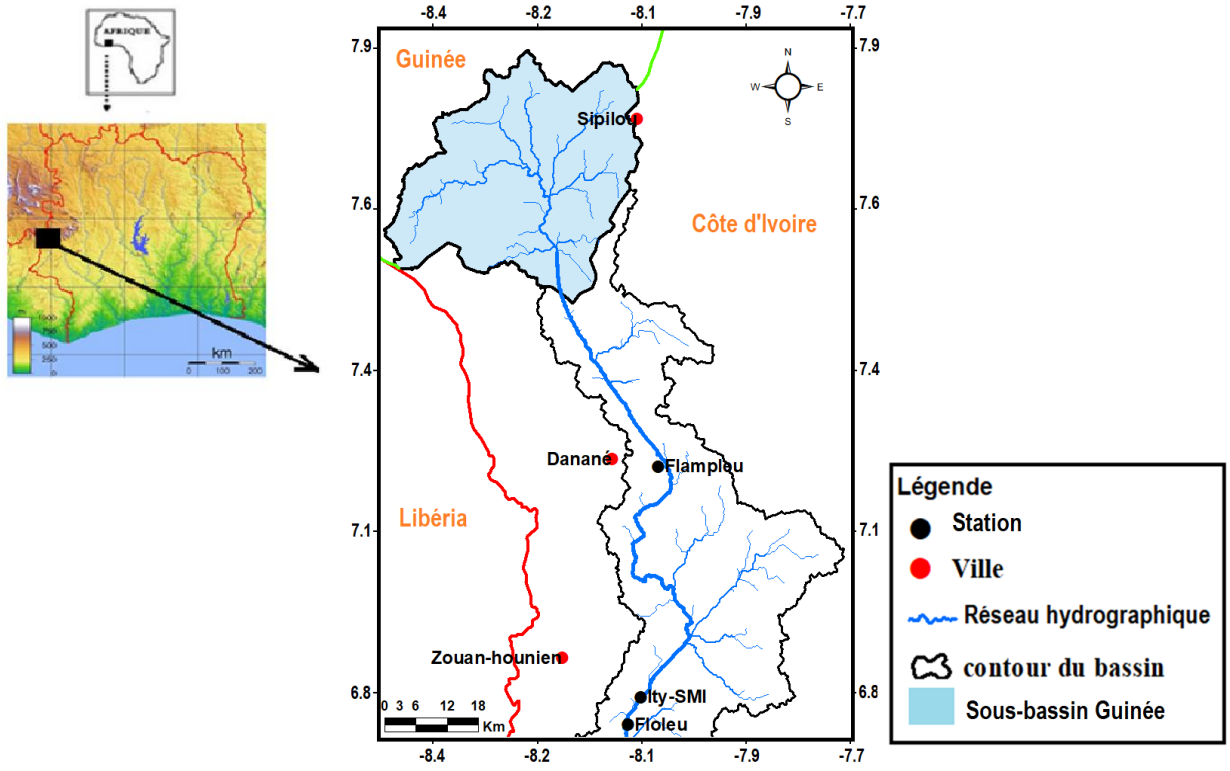


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude.

1.2. Caractéristiques de formes

Les caractéristiques morphométriques de la zone d'étude ont été déterminées à l'aide d'un modèle numérique de terrain de résolution 30 m à partir duquel le bassin versant a été délimité. A la suite de la délimitation du bassin versant, la surface (A), le périmètre (P) et le Coefficient de Gravelius (Kc) encore appelé indice de compacité ont été déterminés.

L'indice de compacité est le rapport du périmètre du bassin versant sur le périmètre du cercle ayant la même surface que le bassin. Il donne une idée de la forme du bassin. Selon qu'il est supérieur ou égal à 1, on parle de bassin versant allongé ou arrondi (Bendjoudi & Hubert, 2002 ; Kouassi, 2007).

Le Tableau I présente les valeurs caractéristiques de forme du bassin versant drainé par le fleuve Cavally.

Tableau I : Caractéristiques de forme du bassin versant du fleuve Cavally.

Surface (Km²)	***Périmètre (Km)***	***Rectangle Equivalent***		***Coefficient de Compacité (Kc)***
		Longueur (Km)	**Largeur (Km)**	
28800	1469	699	8,61	2,62

La valeur du coefficient de compacité qui est de 2,62 pour le bassin versant du Cavally montre qu'il est de forme allongée orientée Nord-Sud. La figure 1 présente la forme du bassin versant du fleuve Cavally

1.3. Hydrographie et relief

Le bassin versant du Cavally pour lequel, le fleuve porte le nom Cavally (700 km) est caractérisé par un réseau hydrographique 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). A la source, le Cavally se nomme 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). Le relief du bassin versant est très accidenté sur le tiers de la superficie avec des altitudes dépassant parfois les 1000 m dans sa partie Nord et 400 m dans sa partie Centre (Figure 2).

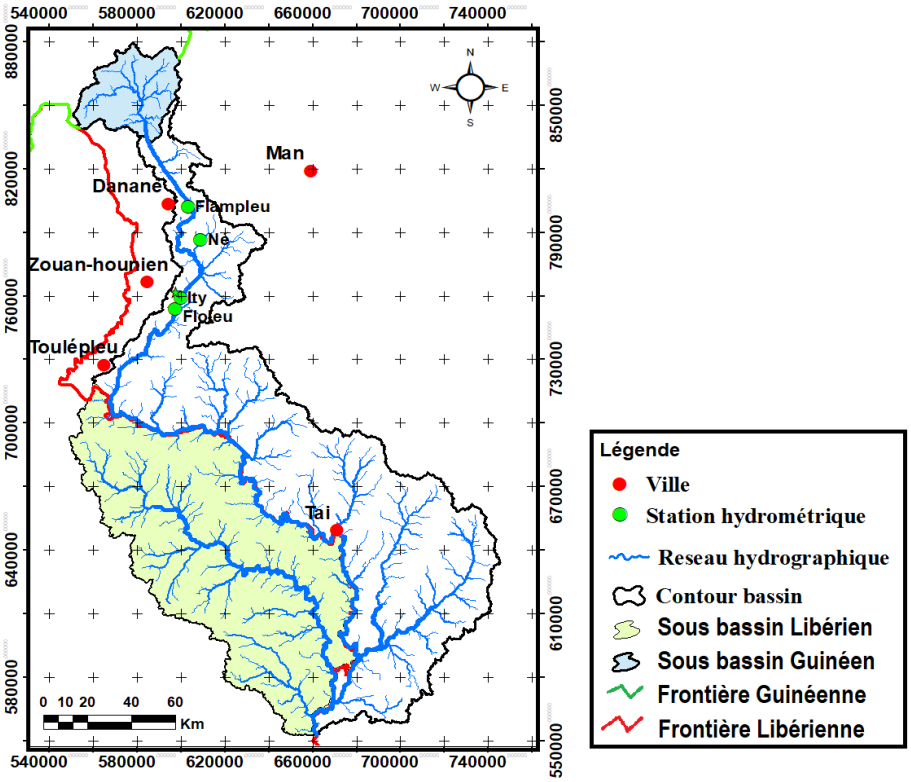


Figure 2 : Réseau hydrographique du bassin versant du fleuve Cavally à la station de Taté.

La Figure 3 ci-dessous présente la répartition de la pente sur l'ensemble du bassin versant du Cavally. La pente moyenne est de 0,85 m/km.

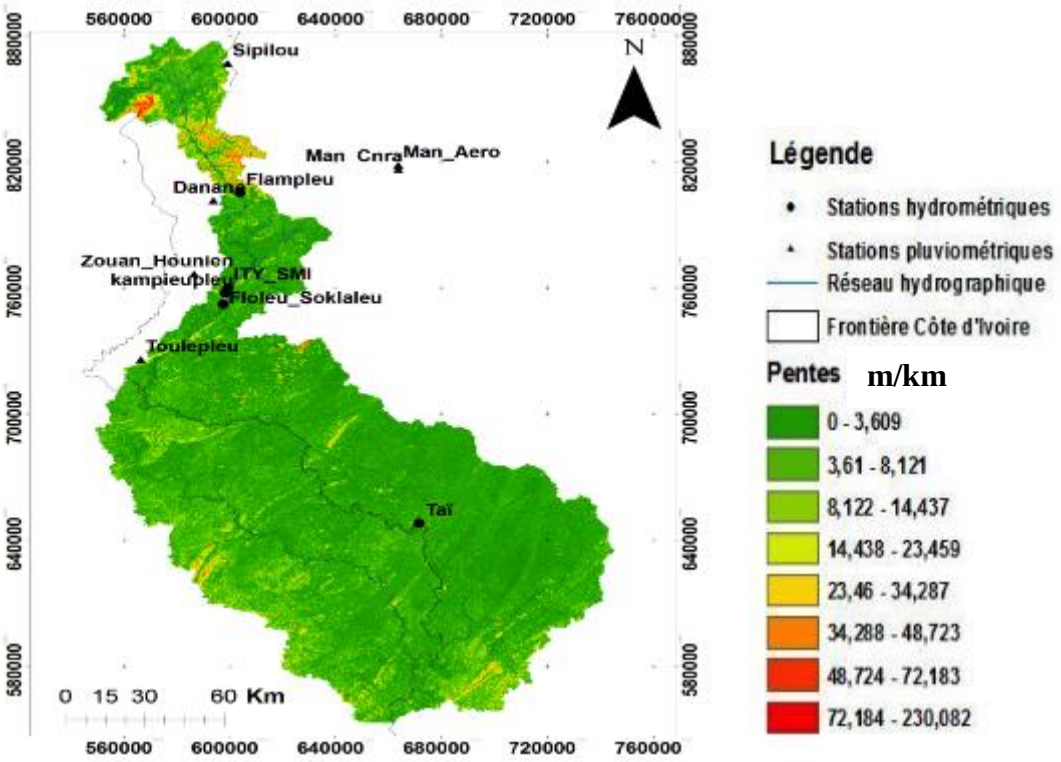


Figure 3 : Carte des pentes du bassin versant du fleuve Cavally.

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 (Figure 4). Il présente d'immenses plaines et de nombreux et larges bas-fonds dans sa partie sud.

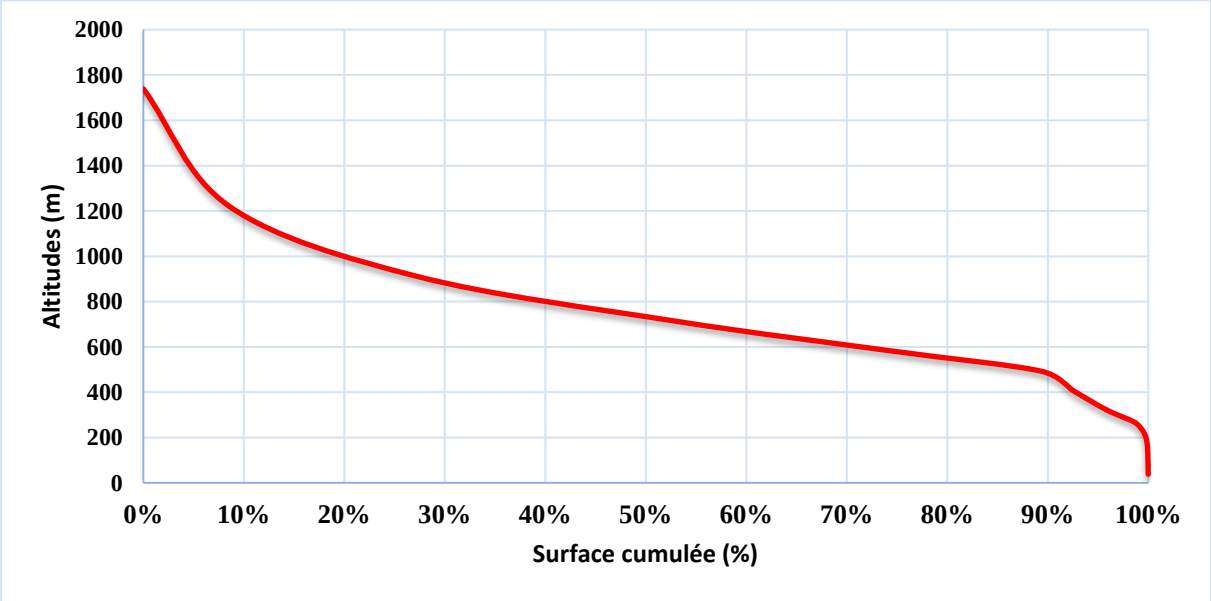


Figure 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant du fleuve Cavally.

1.4. Caractéristiques climatiques

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. Cette partie nord du bassin qui fait l'objet de cette étude, est une zone forestière caractérisée par 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). Le mois le moins pluvieux 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 (Figure 5). Ce régime se rapproche des limites entre celui du type tropical de transition et équatorial de transition**.**

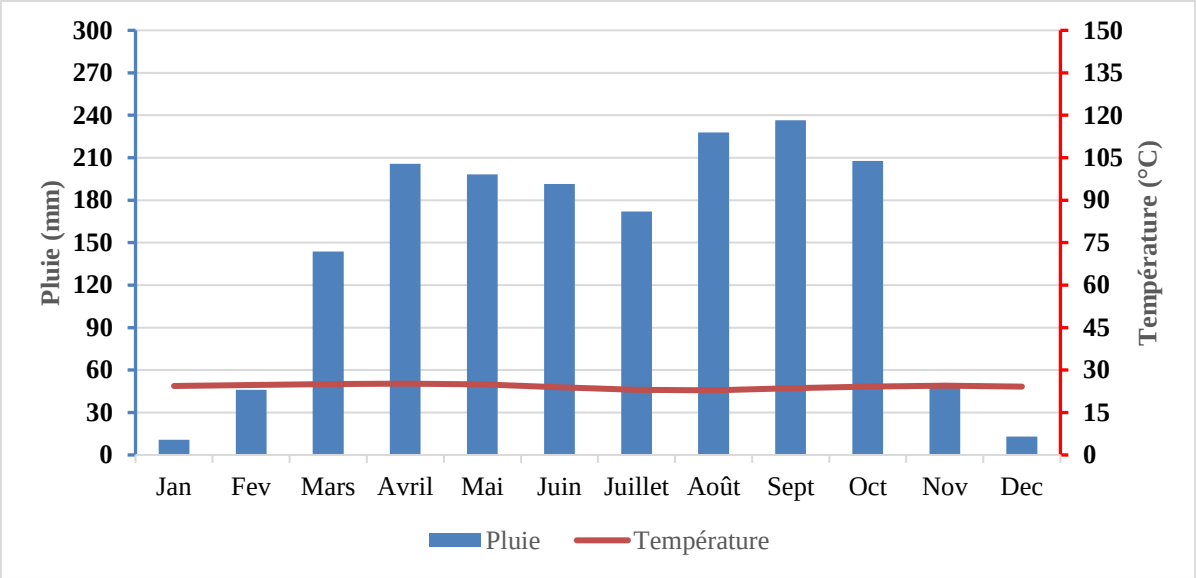


Figure 5 : Diagramme ombrothermique de la station de Zouan-Hounien.

1.4.1. Humidité relative

L'humidité relative de l'air exprimée en %, représente le rapport de la quantité d'eau effectivement contenue dans l'air et la capacité d'absorption de l'eau à une température donnée. L'humidité relative varie peu dans la région de Man. Les valeurs moyennes mensuelles varient entre 75,3 et 90,9 % (Figure 6). La plus faible valeur (75,3%) est enregistrée en janvier. L'humidité relative est supérieure à 80% pour tous les autres mois. Ce qui explique des températures relativement faibles dans la région avec une moyenne annuelle de 24,8 °C.

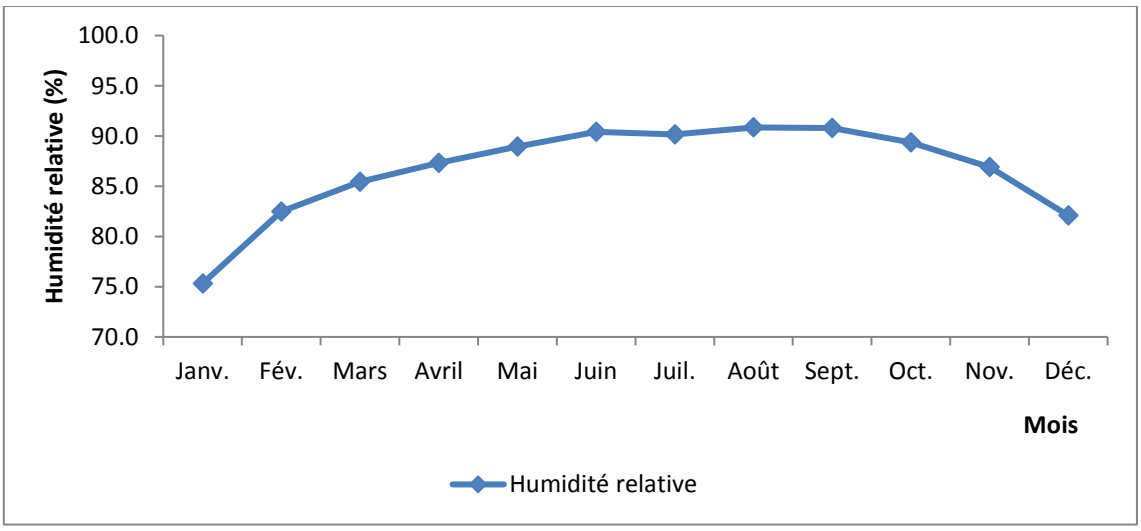


Figure 6 : Humidité relatives dans la région de Man de 1970 à 2015.

1.5. Régime hydrologique

Les courbes d'évolution des débits mensuels moyens mesurés à partir des 3 stations hydrométriques (Flampleu, Ity et Toulépleu) présentent la même allure. Le régime

hydrologique saisonnier du Cavally est de type unimodal (Figure 7). Cela témoigne de l'homogénéité du processus hydrologique. La saison des moyennes et hautes eaux s'étend d'avril à décembre. Le débit fluvial maximal se mesure en septembre qui matérialise le mois le plus pluvieux. Au cours de ce mois, les crues atteignent leur maximum. En amont de la station d'Ity, à la station de Flampleu avant Danané, le débit maximum est 119,88 m^3/s. Au niveau de Zouan-Hounien à la station d'Ity, le débit maximum est de 196,01 m^3/s. En aval de la station d'Ity, à la station de Toulepleu, le débit maximum est de 216,38 m^3/s.

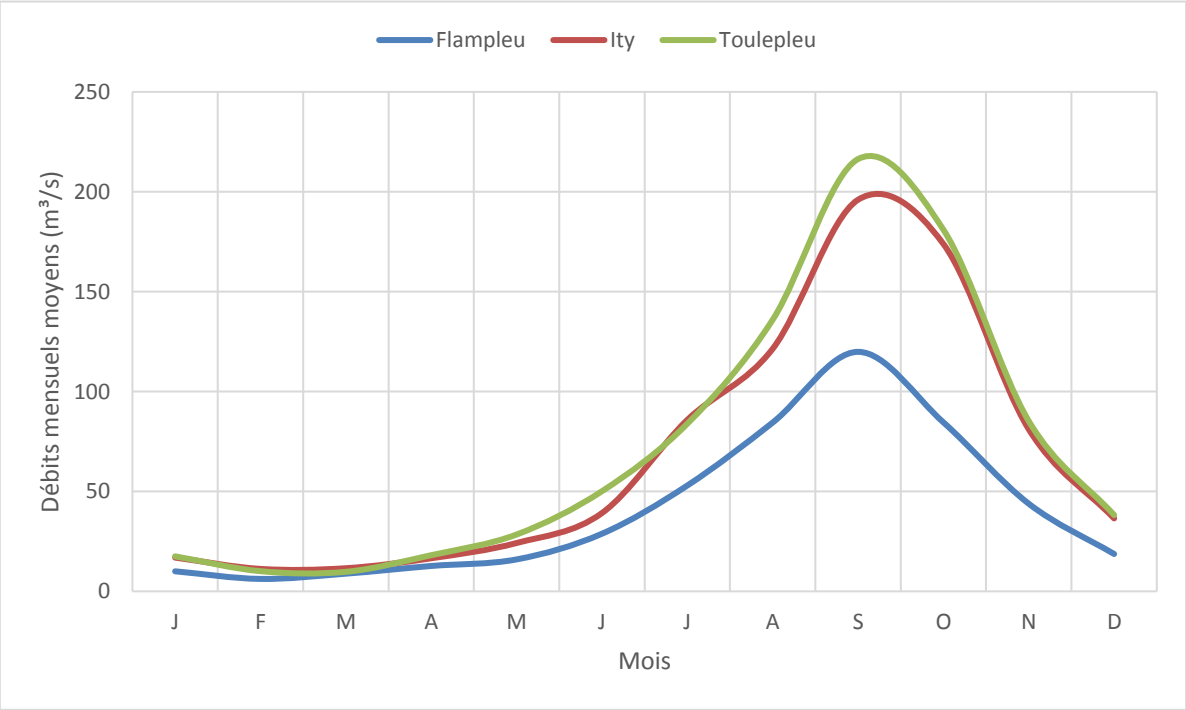


Figure 7 : Evolution des débits mensuels moyens du Cavally au niveau des stations de Flampleu (1980-2001), Ity (1980-2001) et Toulepleu (1980-2001).

La crue annuelle résulte toujours, soit d'une succession de pluies de valeurs normales, soit d'une précipitation exceptionnelle en deux ou trois jours consécutifs. Lorsqu'elle a une ampleur importante, elle inonde de grandes étendues (Figure 8). A cette période le fleuve sort de son lit mineur pour inonder les plantations situées dans son lit majeur.

Figure 8: Période de crue du fleuve Cavally à la station d'Ity (prise de vue le 12/09/2015).

La période des basses eaux est enregistrée de janvier à mars. L'écoulement qui est observée résulte de la contribution des nappes des plaines alluviales. L'affaiblissement des débits est net au cours de cette période. Les étiages les plus marqués ont lieu entre janvier et février (Figure 9). Les débits peuvent baisser jusqu'à 8 m^3/s au cours de cette période.

Figure 9 : Période d'étiage du fleuve Cavally à la station d'Ity (prise de vue le 13/01/2016).

1.6. Végétation, géologie et pédologie

1.6.1. Végétation

Le bassin versant du Cavally est caractérisé par une végétation de forêt dense. Ce bassin possède l'un des plus importants couverts forestiers avec une biodiversité assez importante. Cette vaste zone forestière couvre à la fois le Liberia, la Côte d'Ivoire et la Guinée (Ettien, 2010). Ity appartient au climat de montagne caractérisé par une pluviométrie abondante arrosant la forêt dense humide semi-décidue qui s'étend sur son terroir. On note dans cette forêt la présence d'une variété d'espèces d'arbre 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 Tiama *Entandrophragma Angolense*, le Fromager *Terminalia Ivorensis* (Ettien, 2010) .

1.6.2. Géologie

1.6.2.1. Géologie régionale

Les formations géologiques de la Côte d'Ivoire sont antérieures à une orogénie dite Libérienne, réalisée entre 2750 et 2579 millions d'années. Les roches les plus fréquemment rencontrées sont les migmatites, réparties dans l'ensemble du pays. Dans le Centre-Ouest et le Sud-Ouest du pays, les formations archéennes comprennent, outre des migmatites, un ensemble déjà très différencié (Figure 10): des gneiss, qui sont d'anciens sédiments gréseux et argileux ou d'anciennes roches volcaniques acides ; des amphibolo-pyroxénites, qui représentent d'anciennes roches basiques, et des quartzites ferrugineux lités (itabirites) et grenus. Les roches volcaniques et sédimentaires ont été intensivement transformées par métamorphisme et puissamment plissées. Lors du stade orogénique, la chaine libérienne fut envahie par des roches d'origine très profonde : anorthosites, norites et charnockites qui constituent la province charnockitique de Man (Feybesse *et al.*, 1990).

Le bassin versant se trouve sur le lambeau Birrimien Toulépleu-Ity qui s'est formé de façon discordante sur l'Archéen de l'Ouest de la Côte d'Ivoire (Tagini, 1962 ; Papon, 1973). Les deux principaux groupes tectono-stratigraphiques sont :

- Le substratum Archéen, connu sous le nom de "sous-sol gneissique" dans la zone de la mine. Les roches archéennes sont profondément déformées et métamorphosées au faciès de granulite. Les lithologies dominantes sont la formation de migmatite, de gneiss et de fer bandé. L'accrétion du terrane s'est produite avant 2300 Million d'année.

- Les roches Birimiennes sont liées à l'orogenèse Eburnéenne, y compris les séquences intrusive et volcano-sédimentaire. La séquence volcano-sédimentaire forme un couloir de 10 à 15 km orienté NE-SW et se compose de roches métamorphiques à faciès schiste vert à amphibole (Feybesse *et al.*, 1990).

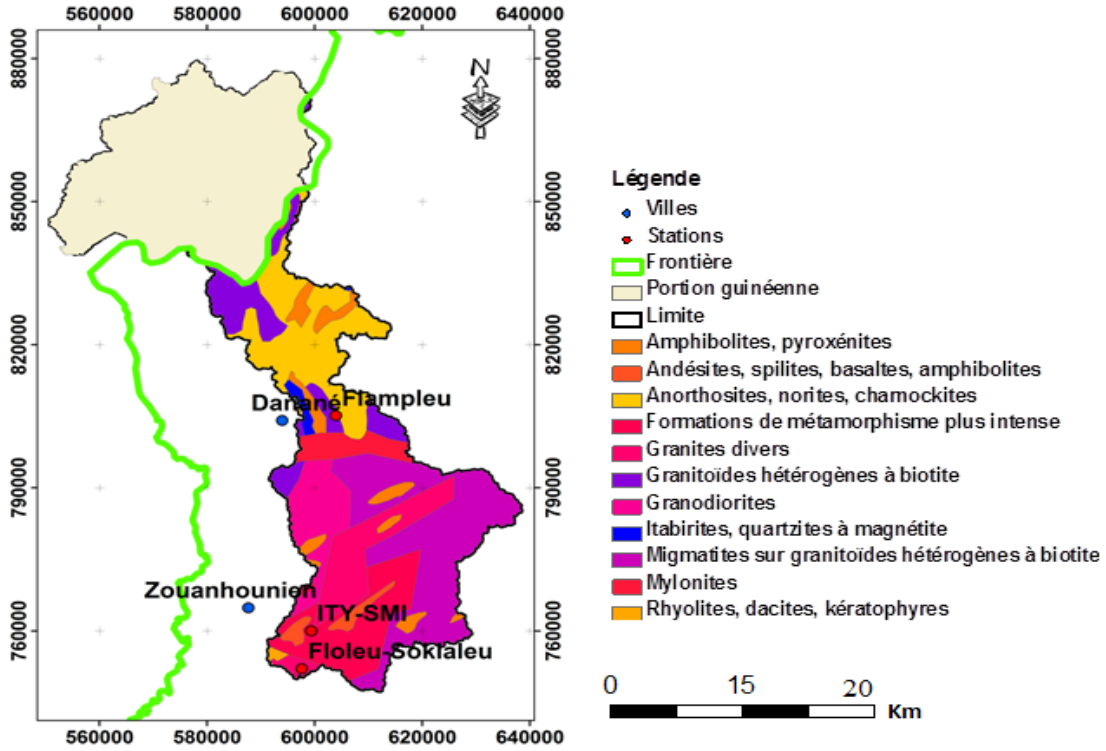


Figure 10 : Formation géologique dans le sous bassin du Cavally à la station de Floleu.

1.6.2.2. Géologie locale

Les travaux de prospection entre 1962 et 1968 de la SODEMI ont révélé une forte minéralisation en or du secteur d'Ity où, dans les années 1940 et 1950 il existait déjà d'intenses activités d'orpaillage (Papon, 1973). Ces activités d'orpaillage sont très accrues ces dernières années depuis la crise qu'a connue la Côte d'Ivoire en 2002.

Le composant dominant fait partie de la séquence Ity, avec des métabasalts 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. 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 Flotouo (Feybesse *et al.*, 1990).

Des intempéries affectent la zone. Un profil latéral épais couvre la terre. Le saprolite varie de 50-120 m d'épaisseur et recouvert d'au moins 10 m d'horizon latéritique (sensu stricto). La latérite est minéralisée dans les zones de fosse. En outre, 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 11).

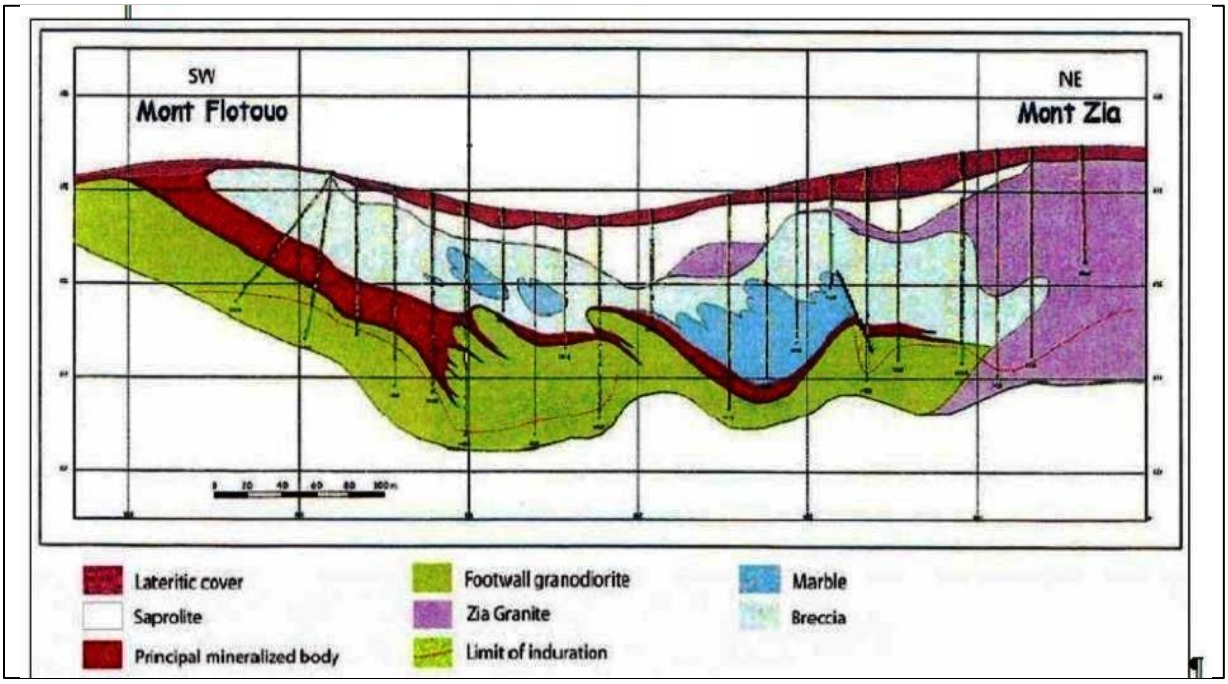


Figure 11 : Formation géologique dans la localité d'Ity (SNC-LAVALIN INC., 2015).

1.6.3. Pédologie

Les sols de type ferralitique 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).

Les profils pédologiques sont variables et dépendent du matériel originel. Les textures sont fonction du modelé et de la nature de la roche mère : fine sur les roches basiques et les schistes, plus grossière sur les migmatites et les gneiss. Les altérites issues des formations granitiques (migmatites, gneiss, charnockites) ont sensiblement le même profil (10-40 m). Sous une couverture latéritique de 3 ou 4 m se trouvent les argiles brunes ocre à rouges violacées. La structure initiale de la roche est souvent conservée. Ces argiles se mélangent aux arènes granitiques de 50 cm à 5 m de diamètre, plus ou moins abondantes sur les 4 ou 5 derniers mètres. La base du profil est toujours plus ou moins arénisée et constitue parfois un aquifère d'importance (Kouamé, 2011). Sur les méta-sédiments et les schistes, les altérations sont plus épaisses (60-100 m) et il n'y a pas d'horizon arénisé. La couleur des argiles va de la berge jaune

au rouge foncé et les micas sont abondants au-dessus des roches schisteuses. L'ensemble des sols de l'hydrosystème du bassin du Cavally présente pour la plupart de bonnes propriétés physiques. Ils sont utilisés essentiellement pour les cultures vivrières et de rente (Kouamé, 2011).

1.7. Activités socio-économiques

L'agriculture est la principale activité de la région. 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 la principale activité pratiquée le long du fleuve Cavally avec l'usage de motopompes pour extraire le sable au fond du fleuve Cavally (Figure 12).

Figure 12 : Quelques activités socio-économiques menées dans le bassin versant du Cavally : (A) baignade et autre usage des eaux du Cavally, (B) plantation de cacaoyer, (C et D) activités d'orpaillage clandestin (Crédit photos, Brou).

Conclusion partielle

Cette partie de l'étude portant sur les caractéristiques physiques du bassin versant du Cavally a permis de connaitre le relief, le réseau hydrographique, la forme du bassin versant, le climat, les régimes pluviométrique et hydrologique, la végétation, la géologie, la pédologie et les activités socio-économiques menées dans la zone d'étude.

Chapitre 2 : Généralités sur la modélisation hydrologique et hydraulique

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. La modélisation hydrologique est également censée fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique et écologique du bassin versant étudié (Gnouma, 2006). A chaque stade de la modélisation, des approximations sont ainsi réalisées : perception du phénomène, formalisation en un cadre conceptuel, traduction dans un langage de programmation (Ambroise, 1999a).

2.1. Modélisation hydrologique

Un modèle hydrologique est un moyen de représentation sous une forme compréhensible d'un système complexe du cycle de l'eau (Payraudeau, 2002). Les modèles hydrologiques sont des outils très fréquemment utilisés dans le domaine de l'évaluation, de la valorisation et de la gestion des ressources en eau (Araghinejad *et al.*, 2011 ; Mélèdje, 2016). Les modèles mis au point par les hydrologues permettent de mieux comprendre et prévoir les variations de débit à l'exutoire d'un bassin versant. Un modèle se définit comme la représentation, sous une forme quelconque, d'un objet, d'un processus ou d'un système (Artigue, 2012). Un modèle selon (Singh, 1995) peut être caractérisé par 5 éléments constitutifs : la géométrie du système (bassin versant), les entrées dans le système, les lois de formalisation des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et enfin les sorties tels que illustrés par la Figure 13.

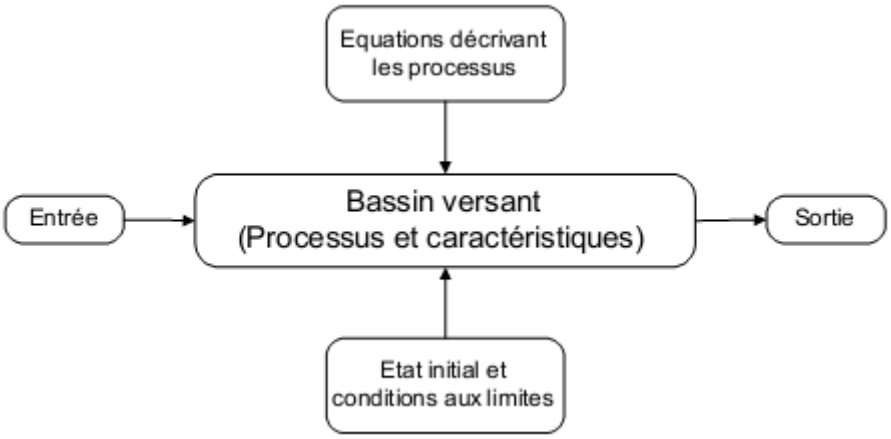


Figure 13 : Composants d'un modèle hydrologique (Singh, 1995).

En hydrologie, un modèle est la plupart du temps une représentation mathématique d'un bassin versant, d'un système d'eau, d'une série de données, etc. (Singh, 1995) ; (Mélèdje, 2016). Il existe plusieurs types de modèles hydrologiques qui peuvent être conceptuel (ou déterministe) ou empiriques (ou stochastiques) selon la méthode de résolution employée. Singh (1995) a proposé trois critères de classification des modèles hydrologiques qui sont entre autres : la description des processus, l'échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les équations. Selon la description des processus, il peut avoir plusieurs niveaux de classification : modèle global ou distribué, déterministe ou stochastique (Figure 14).

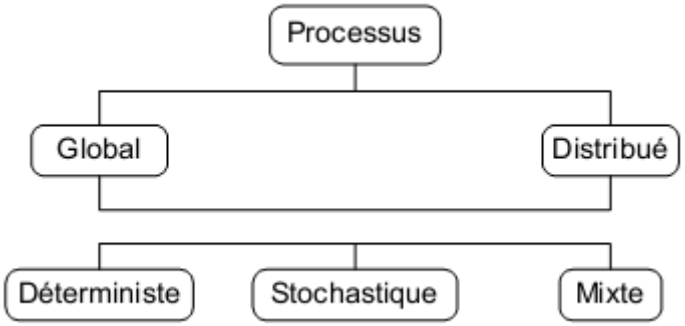


Figure 14 : Classification des modèles proposée par Singh (1995).

2.1.1. Modèles conceptuels (ou déterministes)

Dans un modèle déterministe, les variables d'entrée et les paramètres du système sont parfaitement déterminés ou déterminables (Gnouma, 2006). L'approche déterministe est basée sur la simulation physique du système hydrologique. Le modèle déterministe suppose qu'un calcul exact des paramètres est possible. Dans de nombreux cas, cette hypothèse s'avère peu réaliste, car les phénomènes naturels sont très aléatoires. Les modèles déterministes (modèles physiques distribués) sont finalement tous limités par le grand nombre de paramètres à mesurer et par les limites des connaissances actuelles des systèmes naturels complexes (Mélèdje, 2016). Cette approche fait appel aux lois de continuité, de l'énergie et des forces d'impulsion ainsi que des autres relations physiques pour traduire les entrées (pluies) et les sorties (débits) et pour représenter le déplacement de l'eau dans un bassin versant. Le modèle SHE (Système Hydrologique Européen) est un bon exemple de modèle appartenant à cette catégorie (Abbott *et al.*, 1986). Les modèles conceptuels considèrent en général le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoirs interconnectés. Selon Gnouma (2006), dans les modèles conceptuels semi-distribués, l'espace y est discrétisé en sous-unités que l'on considère « homogène » en terme de caractéristiques physiques et/ou en terme

de fonctionnement hydrologique. Plusieurs approches ont été développées pour mieux découper l'espace et ainsi une description de la variabilité spatiale des caractéristiques physiographiques du bassin dans la connaissance des processus hydrologiques (Gnouma, 2006 ; Mélèdje, 2016).

2.1.2. Modèles globaux (ou stochastiques) : Réseaux de neurones artificiels

L'approche stochastique permet de passer outre les limites des connaissances physiques du système. Elle prend seulement en compte l'aspect aléatoire des phénomènes (Mélèdje, 2016). Contrairement aux modèles déterministes, les modèles globaux fonctionnent comme des « boîtes noire », c'est-à-dire sans aucune considération de la structure interne du système. Elle simule les variations observées des sorties sans essayer de décrire le processus physique qui existe derrière ces observations. Les modèles globaux mettent particulièrement l'accent sur la compréhension de la relation structurelle régissant les variables de sortie du bassin (débits) et les observations des variables d'entrée (pluie, ETP…). Selon Ambroise (1999b) et Mélèdje (2016) ces modèles caractérisent généralement les relations pluie-débit par le traitement de séries chronologiques où n'intervient aucune donnée sur le nature physique du bassin. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les équations utilisées sont souvent des équations différentielles ordinaires qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale des processus, des entrées, des conditions aux limites et les caractéristiques géométriques du système (bassin versant) (Gnouma, 2006). Dans de nombreux modèles globaux, les processus sont décrits sous forme d'équations simplifiées ou d'équations issues de raisonnements empiriques (Singh, 1995). C'est le cas des modèles régressifs pluie-débit, des modèles non-linéaires « à réseaux de neurones » ou des méthodes basées sur les fonctions de transfert, comme celle de l'hydrogramme unitaire et les modèles stochastiques (Ambroise, 1999b). Les réseaux de neurones artificiels font partie de cette catégorie récente de modèle (Hsu *et al.*, 1995).

2.1.2.1. Présentation de la méthode basée sur les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN) constituent une nouvelle approche de modélisation des systèmes complexes, particulièrement utile lorsque ces systèmes sont difficiles à modéliser à l'aide des méthodes statistiques classiques (Mélèdje, 2016). Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle pour modéliser le fonctionnement du cerveau humain (Mcculloch & Pitts, 1943) en se basant principalement sur le concept des neurones du cerveau humain. Ils sont composés d'éléments de traitement interconnectés (neurones) travaillant conjointement pour résoudre un

problème spécifique. Nielsen (1990) définit les réseaux de neurone comme étant un système de calcul composé d'éléments de traitement simples fortement interconnectés, qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe. En raison des difficultés de formulation des modèles non linéaires, les tentatives récentes ont recours à l'approche des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour la modélisation hydrologique de bassins versants complexes. Depuis le début des années 1990, les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés avec succès dans les domaines liés à l'hydrologie comme la modélisation pluie-débit, la qualité de l'eau, la politique de gestion de l'eau, la prévision des précipitations et les séries chronologiques hydrologiques (ASCE, 2000a). Ils ont été également utilisés pour l'estimation des crues sur des stations non jaugées (Dawson *et al.*, 2006), pour la prévision des typhon-pluie (Lin & Wu, 2009), pour l'estimation des débits d'un fleuve (Elcin Kentel, 2009), pour améliorer la modélisation pluie-débit basée sur des évènements pluvieux (Chua & Wong, 2010). pour la prédiction des séries chronologiques des hauteurs de pluie (Wu *et al.*, 2010), pour la modélisation de la relation pluie-débit (Kouassi *et al.*, 2013) etc. Les réseaux de neurones artificiels (RNA) utilisent des données dépendantes. Ils n'imposent aucune relation fonctionnelle entre les variables indépendantes et dépendantes dans la mesure où cette relation est déterminée par les données dans le processus d'apprentissage (ou calibration) (Coulibaly *et al.*, 2000). Mathématiquement, un RNA peut être considéré comme une approximation universelle. Pour sa capacité d'apprendre et de généraliser « la connaissance » de paires de données suffisantes, il est possible pour les réseaux de neurones artificiels de résoudre des problèmes complexes à grande échelle tels que la reconnaissance des formes, la classification, l'association, le contrôle, la modélisation non linéaire et bien d'autres (ASCE, 2000b).

2.1.2.2. Connections entre les neurones

Selon Nielsen (1990) et Mélèdje (2016), les réseaux de neurones sont organisés en couches, ces couches se composent d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation. Des entrées (X_1, X_i, ..., X_n) sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communique aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées. Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S). Les connections entre les neurones se font par des poids (W_1,W_i,..., W_n) (Figure 15).

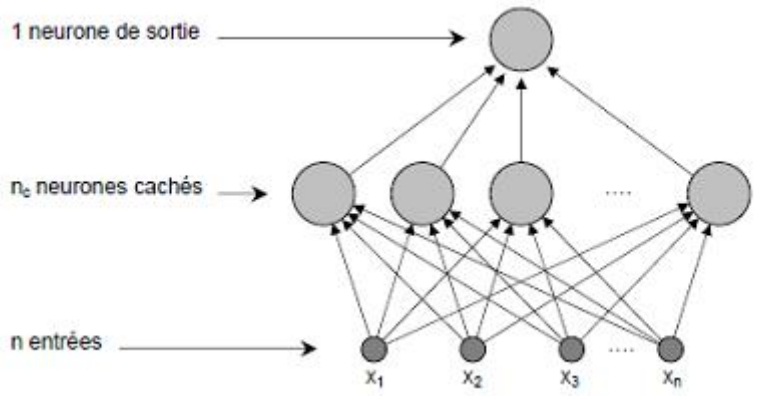


Figure 15 : Schéma d'un neurone artificiel. (Nielsen,1990)

Le fonctionnement d'un neurone artificiel s'inspire du fonctionnement schématisé du neurone humain. Le tableau suivant proposé par Nielsen (1990) résume l'analogie entre les neurones biologiques et les neurones artificiels (Tableau II).

Tableau II : Analogie entre les neurones biologiques et artificiels. (Nielsen, 1990)

Neurone biologique	Neurone artificiel
Soma	Neurone
Dendrite	Entrée (Input)
Axone	Sortie
Synapse	Poids

2.1.3. Calage, validation et incertitudes d'un modèle

2.1.3.1.Calage

Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée (Gnouma, 2006). C'est le processus de choix de jeux de valeurs des paramètres. Cette opération peut se faire manuellement par une procédure « essai et erreur », ou automatiquement par une procédure d'optimisation en cherchant la valeur optimale d'un critère donné (communément appelé fonction objectif) qui améliore la cohérence entre la réponse observée et simulée du bassin (Madsen, 2000) cité par Gnouma (2006). Il existe plusieurs méthodes dans la littérature pour déterminer cette valeur optimale telle que la méthode de détermination directe. Nous pouvons citer par exemple la méthode de Rosenbrock (Rosenbrock, 1960) et la méthode Simplex (Nelder & Mead, 1965). Néanmoins, l'application de ce genre de méthodes trouve rapidement ses limites à cause de la présence de multiples valeurs optimales et de la dépendance le plus souvent forte entre les paramètres (Gnouma, 2006). D'autres algorithmes complexes, de type probabiliste ont été ainsi développés pour

chercher l'optimum global. Dans ce type de méthodes, la convergence ne se fait plus au sens de distance mathématique mais de distance probabiliste. Parmi celles-ci nous pouvons citer l'algorithme *Shuffed Complex Evolution* (SCE-UA) de Duan *et al.*(1992) combinant des algorithmes simple et génétique. Ce genre d'algorithmes nécessite malheureusement des données et un temps de calcul considérables.

D'autres algorithmes d'optimisation globaux ont été développés. Dans les années 1990, Beven & Binley (1992) ont introduit la notion « d'équifinalité ». Le fondement de cette approche réside dans le constat qu'il n'y a, en règle générale, pas un seul et unique jeu de paramètres optimal pour caler un modèle, mais une famille de solutions ou des régions d'une surface de réponse donnant des résultats de qualité similaire. Cela est traduit par le développement de la méthode GLUE (*Generalized likelihood Uncertainty Estimation*) de Beven & Binley (1992) qui utilise les réalisations de Monte Carlo pour faire une exploration de la gamme des simulations possibles. C'est une méthode basée sur une approche bayésienne et donc les mesures de vraisemblance peuvent être modifiées en fonction des données nouvelles. L'autre avantage de cette méthode réside dans le calcul des intervalles de confiance et l'estimation des erreurs et des incertitudes liées à l'opération de calage. Néanmoins, l'inconvénient de cette méthode reste les temps élevés de calcul.

2.1.3.2.Validation

Une fois le modèle hydrologique implémenté sur un bassin versant donné, se pose ensuite la question de savoir quelle est la capacité du modèle à simuler le présent ou le futur. C'est l'étape de validation qui doit répondre à cette question.

La validation consiste à vérifier la reproductibilité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres calés. Son principe selon Gnouma (2006) , est de tester le modèle sur une série de données non utilisées dans la phase de calage. L'existence de cette phase dépend ainsi, de la disponibilité en données. Deux approches de validation sont très utilisées par les hydrologues :

- Une approche classique de validation qui consiste à choisir de façon aléatoire une partie des données pour le calage des paramètres du modèle et une seconde partie pour la validation sans changement des valeurs de paramètres. C'est l'étape de la validation interne qui a pour objectif d'analyser la sensibilité du modèle aux valeurs des paramètres qui le constituent ;
- Une approche basée sur la validation multicritère et multi-échelle appliquée à l'ensemble du bassin. C'est l'étape de la validation externe. Elle consiste à confronter

les résultats du modèle à une réalité, c'est-à-dire concrètement à des données (hydrogrammes mesurés sur des stations intermédiaires, niveaux piézométriques, etc.) qui n'ont pas été utilisées pour le construire. Il importe de bien veiller à ce que la validation externe d'un modèle ne soit pas conduite sur des données qui ont servi à l'établir.

2.1.3.3. Incertitudes

Depuis les années 1990, le calage des modèles hydrologiques a été associé, le plus souvent aux calculs d'incertitudes. Ainsi, Melching (1995) puis Refsgaard & Storm (1996) ont identifié quatre types d'incertitudes dans l'application des modèles hydrologiques :

- Incertitude liée à la nature : c'est une conséquence de la variabilité spatio-temporelle du processus dans la nature (exemple : précipitation, température) qui introduit une fonction aléatoire dans le processus physique de genèse de ruissellement ;
- Incertitude liée aux données : la plupart des auteurs s'accordent sur le constat qu'il est impossible d'identifier la variabilité et la complexité locale des données à travers quelques points de mesure. Donc la variabilité présentée dans les données d'entrée du modèle est une limite pour représenter la variabilité naturelle introduisant ainsi l'incertitude dans les données. Refsgaard & Storm (1996) soulignent l'existence d'incertitudes aléatoires ou systématiques au niveau des techniques d'acquisition des données et des méthodes d'interprétation et d'interpolation utilisées. Le développement de la technique de télédétection a contribué à réduire l'incertitude liée aux données (Gnouma, 2006).
- Incertitude liée aux paramètres du modèle : ce type d'incertitude est influencé par l'incertitude liée aux données à cause des caractéristiques d'optimisation du modèle pendant le processus de calage ;
- Incertitude liée à la structure du modèle : l'incapacité du modèle de représenter les processus physiques réels de ruissellement est à l'origine de ce type d'incertitude.

La paramétrisation des processus hydrologiques pour réduire l'incertitude des modèles est un grand défi dans le domaine de la modélisation hydrologique. Si la paramétrisation des modèles hydrologiques conceptuels simples est rendue possible en utilisant essentiellement des algorithmes d'optimisation et les techniques de Monte Carlo, la paramétrisation des modèles hydrologiques à base physique reste encore sujet de recherche à cause de leur complexité et du grand nombre de paramètres (Gnouma, 2006).

2.2.Modélisation des écoulements à surface libre et de propagation des crues

Les modèles hydrodynamiques peuvent aider à explorer les décisions alternatives et diverses conditions pour éclairer les décisions relatives aux crues et aux inondations ainsi que celles en matière de restauration de l'environnement. En fournissant l'étendue, la durée et la profondeur de l'inondation à l'intérieur de multiples occupations du sol, ces modèles peuvent simuler les effets des projets de restauration planifiés et des conceptions de projets proposées et des opérations. Pour cette thèse, un modèle numérique est utilisé pour résoudre les équations hydrodynamiques sous-jacentes pour les flux bidimensionnel et unidimensionnel. Les équations de base pour l'écoulement bidimensionnel sont la moyenne en profondeur « équations en eau peu profonde » (aussi connues sous le nom « d'équations de Saint Venant » dans leur forme unidimensionnelle et bidimensionnelle). Ce chapitre présente une brève analyse documentaire des modèles, de leurs types et de leurs hypothèses de base.

2.2.1. Principe de base de l'hydraulique

Les équations de l'hydraulique sont tirées du principe de la conservation de différentes grandeurs (Archambeau, 2006). Le plus évident est certainement celui de la conservation de la masse. La conservation de la quantité de mouvement et celle de l'énergie totale viennent ensuite. Vu l'hypothèse de l'incompressibilité de l'eau, cette dernière relation se simplifie en une équation de transport de la température dont nous ne tiendrons pas compte dans ce travail (Hirsch, 2007).

2.2.1.1.Conservation de la masse

La forme globale de la conservation de la masse s'exprime par :

$$\frac{d}{dt}\iiint_{\Omega_D}\rho d\Omega_D = 0 \qquad \textbf{(3. 1)}$$

Avec, $\boldsymbol{\Omega_D}$: un domaine matériel qui suit le fluide en mouvement ;

$\boldsymbol{\rho}$: masse volumique du fluide.

Si on fixe le volume de discrétisation dans l'espace, on se trouve dans le cas d'un domaine géométrique et l'équation (3.4) peut s'écrire sous la forme suivante en utilisant le théorème de la divergence de Green :

$$\iiint_{\Omega_F}\frac{\partial\rho}{\partial t}d\Omega_F = \iint_{S_F}\rho\vec{u}\bullet\vec{n}dS_F \qquad \textbf{(3. 2)}$$

Avec, S_F **:** surface délimitant le domaine Ω_F ;

$\vec{u}$ **:** vecteur vitesse de composantes (*u, v, w*) ou (u_1, u_2, u_3) ;

$\vec{n}$: la normale à la facette du volume considéré.

Cette équation signifiant que la variation de la masse dans l'élément de volume considéré ne dépend que des bilans de flux sur ses faces.

L'eau étant un fluide newtonien incompressible, la variation temporelle de la masse volumique est nulle.

2.2.1.2. Conservation de la quantité de mouvement

Le second principe de conservation à notre disposition est celui de la quantité de mouvement. Il s'écrit :

$$\frac{d}{dt}\iiint_{\Omega_F} \rho \vec{u}\, d\Omega_F = \iiint_{\Omega_F} \rho \vec{F} d\Omega_F + \iint_{S_F} \vec{T} dS_F \qquad \textbf{(3. 3)}$$

Avec, $\vec{F}$ représentant les forces de volume et $\vec{T}$ représentant les forces de surface.
Les forces de volume regroupent les forces de gravité, les forces centrifuges, les forces de Coriolis et les forces électromagnétiques. Dans le cadre de cette étude seules les forces de gravité ont été considérées, l'amplitude des autres forces étant négligeable dans les applications envisagées (Archambeau, 2006). Les forces surfaciques quant à elles comprennent la pression et les tensions visqueuses. Elles peuvent s'écrire de façon générale sous la forme suivante :

$$T_i = \left(\tau_{ik} - p\,\delta_{ik}\right) n_k \qquad \textbf{(3. 4)}$$

Avec, τ_{ik} : les termes du tenseur des tensions visqueuses ;

p : la pression hydrostatique ;

δ_{ik} : le symbole de Kronecker qui traduit le fait que la pression est toujours normale à la surface considérée ;

n_k : les composantes selon les 3 axes de la normale $\vec{n}$ à la surface considérée.

L'hypothèse de stokes (Stokes, 1845), appliquée au fluide permet de relier les contraintes visqueuses, ou de cisaillement, au champ de vitesses :

$$\tau_{ik} = \rho\nu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\right) \quad \textbf{(3. 5)}$$

Où ν est la viscosité cinématique ($1x10^{-6}$ m^2/s pour l'eau).

L'introduction de l'équation (3.7) dans l'équation (3.6) permet d'obtenir aisément ; après utilisation du théorème de Green, les expressions générales suivantes de la conservation de la quantité de mouvement (3.9):

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + div(\rho u_i \vec{u}) = \rho F - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} \quad \textbf{(3. 6)}$$

2.2.1.3.Equations générales de Navier-Stokes

L'expression générale des équations de Navier-Stokes, mises sous forme conservative (3.10) est la suivante pour un fluide newtonien incompressible :

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\
&\frac{\partial u}{\partial t} + div(u\vec{u}) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) \\
&\frac{\partial v}{\partial t} + div(v\vec{u}) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right) \\
&\frac{\partial w}{\partial t} + div(w\vec{u}) = -g - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right)
\end{aligned} \quad \textbf{(3. 7)}$$

Cette formulation permet de faire plusieurs remarques importantes :

- ces équations sont applicables directement en écoulement laminaire car les variables sont « non fluctuantes ». Ce n'est malheureusement pas le cas dans le domaine des écoulements turbulents, beaucoup plus fréquemment rencontrés dans la pratique ;
- ces équations sont conservatives, ce qui permettra la capture de chocs ;
- il n'y a pas de terme temporel « naturel » dans l'équation de continuité. Cela devra être résolu ultérieurement pour envisager une résolution numérique ;
- le système est fermé. Il a en effet quatre équations pour quatre inconnues *u*, *v*, *w* et *p*.

2.2.2. Modèles numériques

Les modèles numériques sont des modèles mathématiques utilisant un algorithme ou un schéma pour résoudre numériquement des équations qui ne peuvent être résolues analytiquement. Un modèle hydraulique est une sorte de modèle numérique qui résout les équations qui régissent

l'écoulement par des moyens numériques (Chow, 1959). Ces modèles sont largement utilisés, par exemple en cas d'inondation (Archambeau, 2006 ; Kasuri, 2014), mais pour leurs applications dans les projets de restauration, il est important de comprendre certaines simplifications et hypothèses dans ces modèles et leurs variantes. Souvent, ces simplifications consistent à ignorer les variations de certains paramètres d'écoulement dans le temps ou l'espace, ou les deux (Stoker, 1957). Une simplification commune des modèles hydrauliques pour la gestion des crues est la réduction de la dimensionnalité, dans laquelle il résout moins de trois dimensions spatiales, ce qui le rend moins lourd à calculer (Horritt & Bates, 2002). Pour réduire la dimensionnalité de deux dimensions (2D) à une dimension (1D), par exemple, l'hypothèse sous-jacente serait qu'à une valeur donnée au cours du temps, les variations des débits et des vitesses ne sont significatives que dans un sens d'écoulement prédominant, c'est-à-dire en amont et en aval et ceux des sections transversales sont négligeables. Dans un modèle 2D, les variations transversales de la surface de l'eau ne sont pas négligées mais les vitesses verticales qui seraient capturées par les modèles à trois dimensions (3D) sont ignorées (Stoker, 1957 ; ASCE, 2000b). De même, d'autres simplifications pourraient consister à supposer que le débit ne varie pas d'un espace à l'autre, ce qui le rend uniforme. Un débit uniforme signifie que la profondeur de l'écoulement dans un cas particulier est la même le long du canal. Un débit non uniforme signifie que la vitesse de l'écoulement à un moment donné varie spatialement à l'intérieur d'une zone de fluide (Stoker, 1957 ; Chow, 1959).

Les simplifications liées au temps peuvent supposer que l'écoulement devient « stationnaire » lorsque la vitesse, la pression et la section transversale de l'écoulement peuvent différer d'un point à l'autre mais ne diffèrent pas dans le temps (Stoker, 1957 ; Singh, 2001). L'expression « écoulement instationnaire » est utilisée lorsque l'écoulement à une section transversale particulière change avec le temps, de sorte que le temps est également considéré comme une variable supplémentaire (Stoker, 1957 ; Chow, 1959 ; Singh, 2001 ; Kasuri, 2014).

2.2.3. Equations gouvernant les modèles hydrauliques

2.2.3.1. Equations 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 (3.11) et des équations de la quantité de mouvement (3.12 et 3.13), décrites dans le plan horizontal comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x}(hu)+\frac{\partial}{\partial y}(hv)+\frac{\partial}{\partial t}H+q=0 \qquad \textbf{(3. 8)}$$

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

$$\boldsymbol{\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial H}{\partial x}+v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)-c_f u} \qquad \textbf{(3. 9)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial H}{\partial y}+v_t\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)-c_f v \qquad \textbf{(3. 10)}$$

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

2.2.3.2.Solutions et simplifications générales

Les équations en eau peu profonde, dans leur forme unidimensionnelle deviennent les équations de Saint Venant. Elles peuvent être simplifiées davantage selon qu'elles soient stationnaires ou instationnaires, uniformes ou non-uniformes. Ces simplifications sont illustrées à la Figure 16.

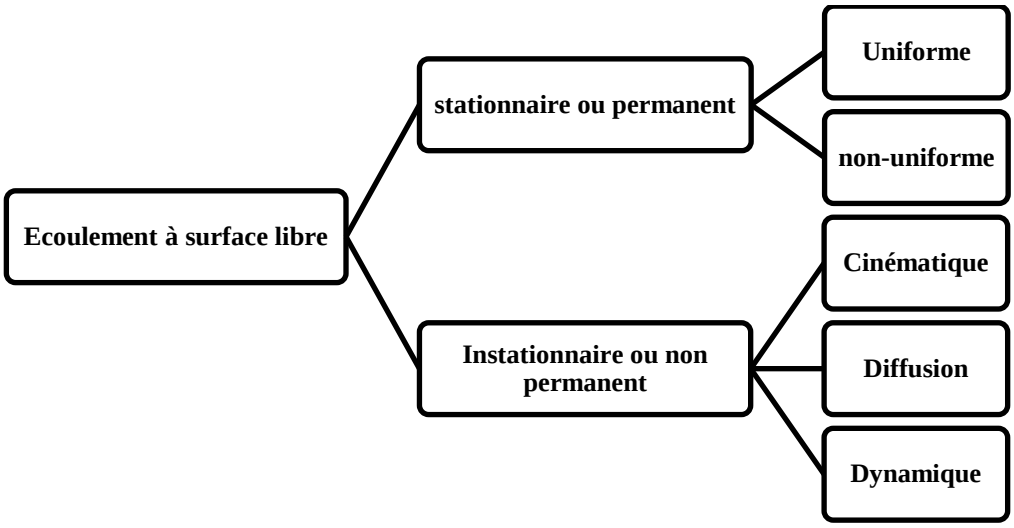


Figure 16 : Simplification générale de la solution de l'équation de Barré de Saint Venant.

2.2.3.3.Ecoulement stationnaire ou permanent

2.2.3.3.1. Ecoulement non-uniforme

En régime permanent, le temps n'est pas une variable qui est résolue et donc, si nous prenons l'exemple d'un débit non uniforme 1D, les équations de continuité et de quantité de mouvement sont réduites aux équations 3.14 et 3.15 :

$$\frac{\partial hV}{\partial x} = q \qquad \textbf{(3. 11)}$$

$$g\frac{\partial h}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g(S_f - S_0) = 0 \qquad \textbf{(3. 12)}$$

De plus, puisque *V* et *h* sont liées empiriquement, en se réorganisant pour résoudre *h*, on obtient l'équation 3.16 (pour un flux 1-D) et S_f et S_0 sont respectivement les forces de frottement et la pente du fond du lit:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{S_0 - S_f}{1 - \frac{V^2}{gh}} \qquad \textbf{(3. 13)}$$

$\frac{V^2}{gh}$ est le carré du nombre de Froude qui est utilisé pour le régime d'écoulement.

2.2.3.3.2. Ecoulement uniforme

Dans un écoulement stationnaire uniforme, la pente du lit S_0 est égale à la pente de frottement et les termes de pression sont ignorés. La pente de frottement S_f est modélisée à l'aide d'une relation empirique, en utilisant la formule de Manning lorsque le débit est uniforme (Equation 3.17).

$$S_f = \left(\frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}}\right) \qquad \textbf{(3. 14)}$$

Avec *n* le coefficient de Manning et *R* le rayon hydraulique, défini par *R=A/P*, où *A* est la section mouillée et *P* le périmètre mouillé.

La profondeur de l'écoulement peut alors être résolue par un calcul itératif.

2.2.3.3.3. Ecoulement non permanent ou instationnaire

A l'état non stationnaire, nous devons également résoudre la dérivée temporelle. Dans le cas unidimensionnel, l'écoulement non stationnaire est représenté par (Equation 3.18) :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} - \underbrace{g(S_0 - S_f)}_{\text{Cinématique}} = 0 \qquad \textbf{(3. 15)}$$

Diffusion

Dynamique

Le premier terme de l'équation 3.18 décrit l'accélération locale, le deuxième terme décrit l'accélération convective tandis que le troisième terme décrit les forces de pression. Les forces gravitationnelles sont représentées par la pente du lit (S_o) et forces de frottement en fonction de la pente de frottement (S_f). L'équation d'onde dynamique complète est résolue pour chaque terme, tandis que la cinématique et l'onde diffusive résolvent moins de termes, selon les applications du modèle. Ce qui doit être noté cependant, c'est qu'en écoulement à surface libre, toutes les ondes cinématiques, diffusantes et dynamiques, ainsi que leurs variantes peuvent exister. Cependant, c'est l'importance relative de ces ondes en un point donné dans le temps qui détermine ce qui est une possible simplification.

2.2.3.3.4. Onde cinématique

Les ondes cinématiques expriment l'équation de l'élan en termes de forces de frottement et de gravitation seulement, ignorant les forces d'inertie et de pression. Cette hypothèse s'applique dans les situations où les valeurs gravitationnelles et les forces de frottement sont beaucoup plus grandes que les forces d'inertie et de pression, ce qui réduit l'équation de momentum de sorte que la pente du lit devienne égale à la pente de friction (James & Beresford, 1955). Comme la pression et l'inertie sont négligées dans l'hypothèse cinématique, le principal mécanisme qui atténue l'onde de crue est éliminé. Toute indication d'atténuation est due à une erreur numérique associée à la différence finie et non les mécanismes physiques associés au mouvement réel d'une onde de crue (Chareb, 2005). Les vagues cinématiques ont un large éventail d'applications allant de l'écoulement dans les chenaux, à l'écoulement dans les sillons, et à l'érosion, en passant par l'analyse de l'eau, transport de sédiments, transport de solutés, pour n'en nommer que quelques-uns (Singh, 2001 ; USACE, 2016).

2.2.3.3.5. Onde de diffusion

L'onde diffusive ignore seulement les termes d'inertie mais prend en compte les forces de pression, les forces gravitationnelles et les forces de friction. Elle est valable lorsque l'accélération d'inertie est beaucoup plus faible que toutes les autres formes d'accélération (Singh, 2001).

2.2.3.3.6. Onde dynamique

L'onde dynamique résout tous les termes de l'équation du momentum, y compris les effets d'inertie. Ces ondes ont souvent des vitesses plus élevées et s'atténuent plus rapidement que les ondes cinématiques. Bien que le calcul soit plus complexe, l'avènement d'ordinateurs plus puissants a permis de résoudre numériquement l'équation de l'onde dynamique complète (Kasuri, 2014 ; USACE, 2016).

2.2.4. Différents types de modèles d'hydrauliques à surface libre

Cet aspect est intimement lié aux données topographiques qui donne l'ossature du modèle géométrique utilisé pour les modélisations (Chareb, 2005 ; Archambeau, 2006 ; Timbadiya *et al.*, 2011 ; Parhi *et al.*, 2012). Une recherche des caractéristiques des principaux modèles existants en hydraulique fluviale avec leurs atouts et limites est donc nécessaire.

Dans le cas d'un écoulement en rivière, on parle d'écoulements en lits composés (lits mineur et majeur) où les caractéristiques de vitesse, de hauteur d'eau et de rugosité varient suivant les lits (Kreis, 2004 ; Proust, 2005 ; Geoffroy, 2007). L'interface entre les lits est primordiale. Elle est la source de la majorité des incertitudes pour la simulation des écoulements débordants (Chareb, 2005 ; Geoffroy, 2007 ; Parhi *et al.*, 2012). Dans cette zone, de fortes pertes de charges sont identifiées ainsi que dans la couche limite (interface entre le fond de la rivière et le fluide) comme présenté à la Figure 17 (Proust, 2005) :

1- pertes par frottement et micro turbulences au fond du cours d'eau ;
2- pertes dues aux macro turbulences issues de la différence de vitesse entre les lits ;
3- pertes par transfert de quantité de mouvement entre les lits.

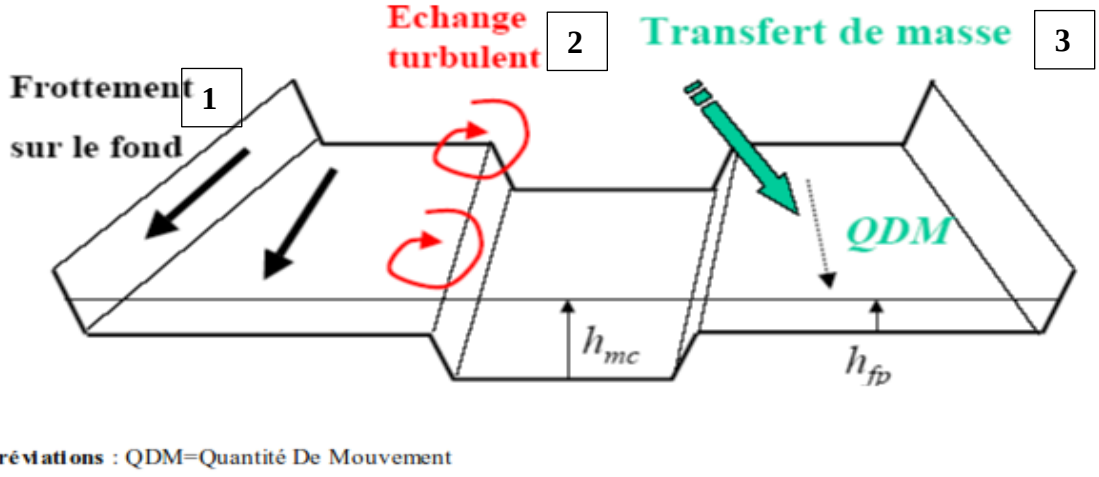


Figure 17 : Différentes pertes de charges dans un écoulement en lits composés (Proust, 2005).

2.2.4.1. Modèles hydrauliques à une dimension (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 (cf. Tableau 3), 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. Néanmoins, 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). Ceci provient de leurs structures et des équations qui les régissent : elles sont constituées d'un ensemble de profils en travers perpendiculaires aux écoulements. Cela constitue leur principale faiblesse car les surfaces libres réelles sont loin d'être horizontales lors des crues (et les champs de vitesses sont loin d'être uniformes) pour une section en travers donnée.

2.2.4.2. Modèles hydrauliques à deux dimensions (2D)

Les modèles bidimensionnels (2D ou 2D-H) tente 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 & Gruntfest, 2002 ; Archambeau, 2006 ; Erpicum, 2006 ; Timbadiya *et al.*, 2011 ; Cázares-Rodríguez *et al.*, 2017).

2.2.4.3.Modèles hydrauliques à trois dimensions (3D)

Actuellement, les modèles à trois 3D ne sont guère opérationnels, ils restent encore du domaine de la recherche et se limitent à des zones d'étude très restreintes de l'ordre de quelques dizaines de mètres de cours d'eau (Fischer-Antze *et al.*, 2001 ; Li *et al.*, 2012 ; Demeke *et al.*, 2019). Ces modèles résolvent les équations complètes de Navier-Stockes en volumes finis (Demeke *et al.*, 2019). La seule limite de ces modèles est le temps de calcul très long. De ce fait, il faudrait disposer de machines très puissantes pour effectuer les calculs.

Le Tableau III donne les différents modèles hydrauliques de rivière et des exemples de modèles les plus utilisés dans le domaine de la simulation hydraulique pour chaque catégorie.

Tableau III : Différents types de modèles numériques à surface libre (Chareb, 2005 ; Kasuri, 2014).

Modèle	Equation	Nom du logiciel	Atouts	Limites
Modélisations 1D dites filaires	Barré Saint-Venant simplifié (BSV 1D)	LISFLOOD-FP (Bates & De Roo, 2000)	Permet d'utiliser des données topographiques précises	Equations simplifiées
		LIDO (CETMEF)	Conçu pour les grandes plaines inondables	
		HEC-RAS 4.2 (USACE), Mike 11 (DHI)	Robustesse et fiabilité	Peu adapté aux reliefs complexes
		Mascaret (EDF), Mage 5 (CEMAGREF)	Tient compte des échanges turbulents entre lits	
		Axeriv (Université Louvain)	Tient compte des échanges turbulents et des transferts de masse entre lits	Peu diffusé, reste du domaine de la recherche
Modélisations 2D	Barré Saint-Venant 2D (BSV 2D)	HEC-RAS 5.0-5.07 (USACE), Telemac 2D (LNH-EDF), Mike 21, Mike Flood (DHI), RUBAR (CEMAGREF)…	Adapté aux reliefs et aux champs de vitesse complexes	Temps de calculs longs
Modélisations 3D	Navier-Stokes	Mike (DHI), Flow-3D (Flow Science Inc.)	Capable de résoudre un large éventail de problèmes d'écoulement de fluide (Demeke *et al.*, 2019).	Temps de calculs très longs

Abréviations : CETMEF (Centre d'études Techniques Maritimes et Fluviales), DHI (Danish Hydraulic Institue), USACE (United State of Army Corps of Engineers), LNH-EDF (Laboratoire National d'Hydraulique-Electricité De France).

2.3. Description du modèle HEC-RAS

HEC-RAS signifie Hydrologic Engineering Center's River Analysis System et 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.

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. 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).

2.3.1. Possibilités du modèle HEC-RAS

L'objectif principal du programme HEC-RAS est tout à fait 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 hydrogrammes de propagation des crues par la simulation de l'écoulement en régime non permanent (Chareb, 2005 ; USACE, 2016).

2.3.2. Théorie de base de calcul du modèle HEC-RAS

2.3.2.1. Equations mises en jeu

HEC-RAS est un modèle qui est beaucoup utilisé dans le domaine de l'hydraulique à surface libre. Il utilise les équations de Barré 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.

2.3.2.1.1. Equations de Barré de Saint-Venant 1D

- **Cas d'un écoulement permanent ou stationnaire**

Les équations de Barré de Saint-Venant permettent d'effectuer des calculs entre les différentes sections transversales avec un coefficient de Manning variable, de différencier les zones actives et non actives dans un canal et de créer une succession de sections transversales interpolées. A partir des programmes de calcul qui y sont intégrés, le logiciel calcul la hauteur d'une section à partir de la hauteur d'eau de la section précédente à l'aide de l'équation de conservation de l'énergie à une dimension (conservation de la charge). Les pertes d'énergie sont évaluées à partir des frottements, des effets de contraction et d'expansion (USACE, 2016).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \qquad \textbf{(3. 16)}$$

Avec : $\boldsymbol{Z_1, Z_2}$: cote du fond du canal principal (m) ; $\boldsymbol{Y_1, Y_2}$: hauteur de l'eau (m) ; $\boldsymbol{V_1, V_2}$: vitesse moyenne (m/s) : $\boldsymbol{a_1, a_2}$: coefficient de pondération de vitesses : $\boldsymbol{g}$**:** accélération gravitationnelle (m/s^2) **:** $\boldsymbol{h_e}$: perte de charge entre les sections du cours d'eau (m)

La Figure 18 montre une représentation des limites dans l'équation d'énergie entre deux sections transversales.

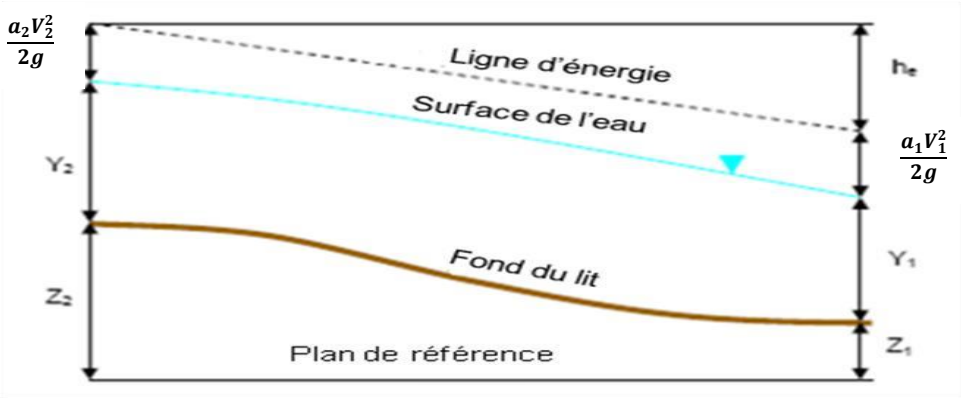


Figure 18 : Représentation des limites dans l'équation d'énergie (Chareb, 2005).

Le coefficient de pertes de charge h_e se calcule à l'aide de la formule suivante (USACE, 2010, 2016).

$$h_e = L\overline{S_f} + C\left|\frac{a_2V_2^2}{2g} - \frac{a_1V_1^2}{2g}\right| \qquad \textbf{(3. 17)}$$

Avec **L** la distance entre les deux profils, S_f angle de frottement représentatif entre deux sections) et **C** le coefficient d'expansion ou de contraction.

La longueur mesurée entre deux sections, L, est calculée comme suit :

$$L = \frac{L_{lob}\overline{Q}_{lob} + L_{ch}\overline{Q_{ch}} + L_{rob}\overline{Q_{rob}}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \qquad \textbf{(3. 18)}$$

Où :

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} : Longueurs des distances entre deux sections de calcul indiquées pour l'écoulement dans la berge gauche, le canal principal et la berge droite.

$\overline{Q_{lob}}, \overline{Q_{ch}}, \overline{Q_{rob}}$ **:** Moyenne arithmétique des débits entre deux sections pour la berge gauche, le canal principal et la berge droite.

La détermination du transport total et du coefficient de vitesse pour une section de calcul exige que l'écoulement soit subdivisé en unités pour lesquelles la vitesse est uniformément distribuée (USACE, 2016). L'approche utilisée dans HEC-RAS est de subdiviser une section en travers pour le calcul des débits en utilisant les points d'arrêt des valeurs de la rugosité ***n*** comme base de la subdivision (endroits où est observé le changement des valeurs du coefficient de rugosité ***n***) comme le montre la Figure 19. Le flux est calculé dans chaque subdivision sous la forme suivante en fonction de ***n*** (Equation de Manning) :

$$Q = K \times S_f^{1/2}, \text{ avec } K = (1{,}486/n) \times A \times R^{2/3} \quad \textbf{(3. 19)}$$

Avec n : coefficient de frottement de Manning ; ***A*** : section mouillée ; R : rayon hydraulique ; S_f : angle de frottement représentatif entre deux sections.

Le programme cumule tous les débits dans les rives pour obtenir un flux pour la rive gauche et la rive droite. Le débit total d'une section de calcul est obtenu en additionnant les trois débits des trois subdivisions (gauche, canal, droite).

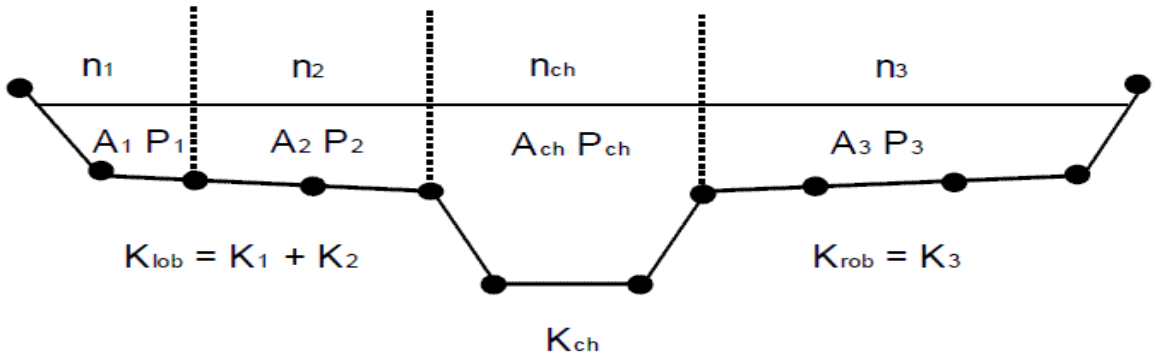


Figure 19 : Méthode de subdivision du débit par le modèle HEC-RAS (USACE, 2016).

- **Cas de l'écoulement non permanent ou instationnaire**

Les équations utilisées dans le cas d'un écoulement non stationnaire (non permanent) sont entre autres la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement. Ces équations correspondent en fait à la résolution des équations de Saint-Venant 1D par la méthode des différences finies. Pour obtenir ces équations on fait un bilan sur un petit volume de contrôle (Figure 20).

Equation de la conservation de la mase :

$$\frac{\partial AT}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad \textbf{(3. 20)}$$

Equation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + Sf\right) = 0 \quad \textbf{(3. 21)}$$

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

Pour résoudre ces équations le modèle utilise la théorie des différences finies qui est à la fois pratique et simple pour le cas 1D.

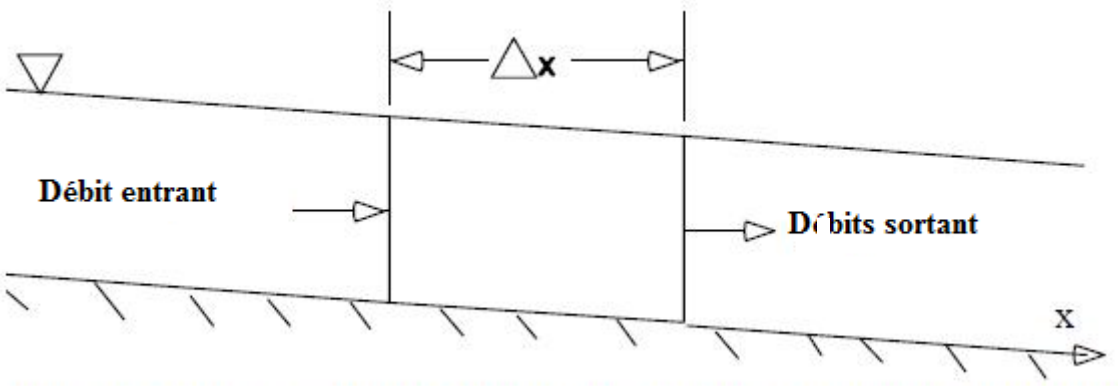


Figure 20 : Volume de contrôle élémentaire pour la dérivation de la continuité (USACE, 2016).

La hauteur inconnue de la surface de l'eau en une section est déterminée par une solution itérative de l'équation 3.25.

$$\boldsymbol{WS_2 = WS_1 + \frac{1}{2g}\left(\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2\right) + h_e} \qquad \textbf{(3. 22)}$$

Avec *WS* : Niveau (profil) de la surface de l'eau (m), V_1 et V_2 : vitesses de pondération entre deux sections, α : coefficient de pondération et h_e : perte de charge totale.

2.3.2.1.2. Propagation des crues en régime d'écoulement non permanent (1D)

Les lois physiques qui régissent l'écoulement de l'eau dans un canal telles que définies plus haut dans ce chapitre, sont : (1) le principe de la conservation de la masse (continuité), et (2) le principe de la conservation de la quantité de mouvement. Ces lois sont exprimées mathématiquement sous forme d'équations différentielles partielles, qui ci-après désignées sous le nom des équations de continuité et de la quantité de mouvement. La Figure 21 présente un volume élémentaire pour la dérivation des équations de continuité et de la quantité de mouvement.

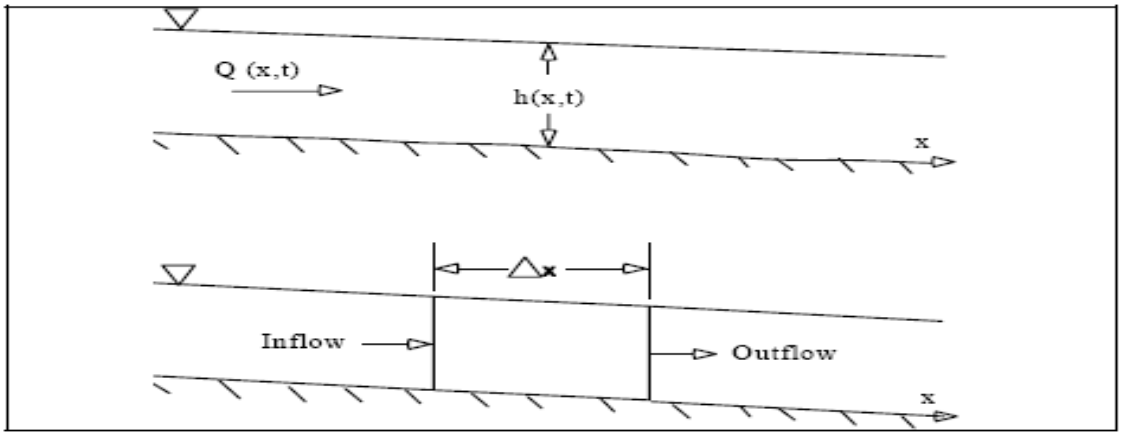


Figure 21 : Volume élémentaire pour la dérivation des équations de continuité et de la quantité de mouvement (USACE, 2016).

La Figure 22 illustre les caractéristiques bidimensionnelles de l'interaction entre le canal et la plaine inondable. Quand le niveau d'eau du canal s'élève, l'eau s'éloigne latéralement du canal, inondant la plaine d'inondation et remplissant les zones de stockage disponibles. A mesure que la profondeur augmente, la plaine d'inondation commence à transporter l'eau en aval généralement le long d'une courte trajectoire. Quand le niveau d'eau s'abaisse, l'eau se déplace vers les rives du canal complétant l'écoulement dans le canal principal.

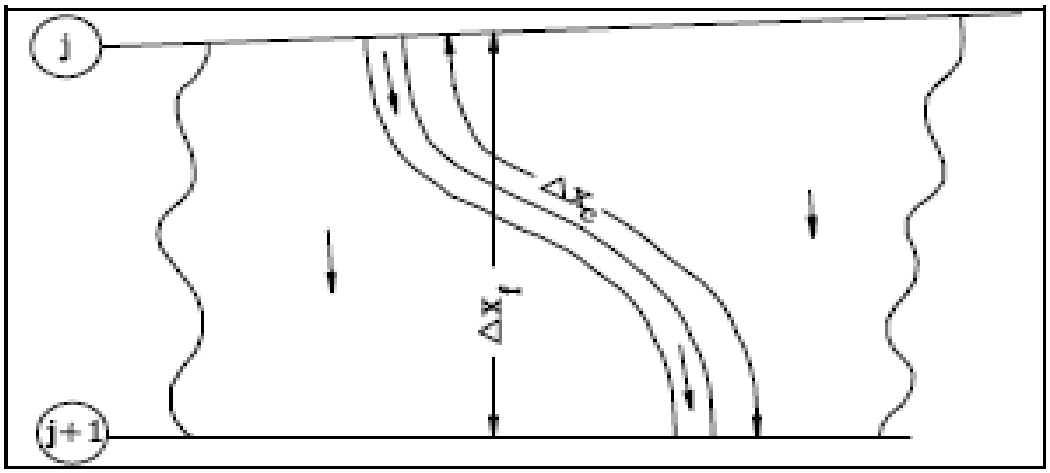


Figure 22 : Ecoulements dans le canal principal et la plaine d'inondation (USACE, 2016).

Puisque la direction primaire de l'écoulement est orientée le long du canal, ce champ bidimensionnel d'écoulement peut souvent être exactement rapproché par une représentation unidimensionnelle. Les surfaces d'accumulation peuvent être modélisées avec les zones de stockage qui échangent l'eau avec le canal. L'écoulement dans les rives peut être rapproché comme un écoulement à travers un canal séparé.

La résolution de ces équations aux dérivées partielles se fait par solutions approchées à l'aide de la méthode implicite des différences finies pour les écoulements en 1D (Godunov, 1959 ; USACE, 2016).

2.3.2.1.3. Propagation des crues en écoulement non permanent en 2D

La modélisation de la propagation des crues peut se faire également en deux (2) dimensions (2D). Cette méthode permet de mieux apprécier la distribution spatiale de l'inondation en faisant 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.

- **Equations du modèle 2D**

Les équations dites « de Barré de Saint-Venant », publiées en 1871 occupent aujourd'hui une place primordiale dans les études en hydraulique maritime ou fluviale. Ces équations décrivent des écoulements à surface libre en eaux peu profondes, d'où leur appellation anglaise « Shallow Water Equations ». Elles sont obtenues à partir d'une intégration verticale des équations 3D de Navier-Stockes en utilisant l'hypothèse de pression hydrostatique et l'approximation de Boussinesq. Les écoulements dans cette étude sont considérés non permanents compte tenu de la variation des paramètres hydrauliques et hydrologiques (débits, niveaux d'eau, profondeurs et vitesses) en fonction du temps. Les équations de continuité et de quantité de mouvement constituent les équations de Barré de Saint-Venant en deux directions (2D).

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial}{\partial x}(hu)+\frac{\partial}{\partial y}(hv)+\frac{\partial}{\partial t}H+q=0 \qquad \textbf{(3. 23)}$$

Où $\boldsymbol{t}$ est le temps, $\boldsymbol{u}$ et $\boldsymbol{v}$ sont les composantes de la vitesse suivant respectivement les directions $\boldsymbol{x}$ et $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{q}$ est le débit élémentaire et H est la dénivellation de la surface libre de l'eau.

- **Equation de quantité de mouvement**

$$\boldsymbol{\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial H}{\partial x}+v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)-c_f u} \qquad \textbf{(3. 24)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial H}{\partial y}+v_t\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)-c_f v \qquad \textbf{(3. 25)}$$

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

Les résultats se présentent sous la forme suivante : l'évolution de la hauteur d'eau et du débit pendant la simulation au niveau de chaque section transversale, qui sert de maille lors de la résolution mathématique. En effet, ces équations sont résolues grâce à la méthode des volumes finis qui consiste à approximer les dérivées partielles à l'aide du développement de Taylor dans un domaine discret. De plus, pour la discrétisation en fonction du temps nous avons choisi un schéma implicite (Goodman & LeVeque, 1985 ; Archambeau, 2006 ; Boudjelal *et al.*, 2015; USACE, 2016).

Conclusion partielle

Dans cette partie de l'étude, il s'agit de faire une revue littéraire sur la modélisation hydrologique et hydraulique.

Concernant, la modélisation hydrologique, il ressort qu'il existe une variabilité de description de processus hydrologiques selon le type du modèle. Le choix dépend des échelles spatiale et temporelle de la modélisation. Concernant l'échelle temporelle, plus le pas de temps de modélisation est long, plus la description des processus hydrologiques est simple. Au contraire, la modélisation des processus à pas de temps court nécessite une description des processus plus complexe. En ce qui concerne l'échelle spatiale, la relation entre l'échelle et le processus hydrologique reste encore un sujet de discussion dans la communauté hydrologique.

Au niveau de la modélisation hydraulique des écoulements à surface libre, la revue littéraire a permis de mettre en évidence les différents types de modèles utilisés. Ces modèles sont régis par les principes de la conservation de la masse et des quantités de mouvement. Selon le phénomène étudié, ces modèles peuvent être à une dimension (1D), à deux dimensions (2D) ou à trois dimensions (3D). La comparaison effectuée par Horritt et Bates (2002) entre LISFLOOD-FP, HEC-RAS et Telemac 2D a mis en évidence les bons résultats du logiciel HEC-RAS, qui donne des résultats d'une précision comparable à ceux de Telemac 2D en ce qui concerne l'extension spatiale du champs d'inondation et la propagation de l'onde de crue. Cette comparaison a permis de choisir le modèle HEC-RAS dans le cadre de cette étude. Ce choix s'est basé également sur la facilité d'acquisition de ce modèle dans la mesure où il est un logiciel libre d'accès sur le site internet de l'armée des Etats-Unis d'Amérique.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

Chapitre 3 : Matériel et données

Ce chapitre présente le matériel de terrain, les logiciels et les données qui sont utilisés dans cette étude. Il présente également les différents modes d'acquisition de ces données ainsi que leurs sources. Il s'agit des données climatiques, hydrologiques, des données de télédétection et de cartographie.

3.1.Matériel

Dans le cadre de cette étude, le matériel est constitué essentiellement d'un ensemble d'instruments de mesure de terrain (Figure 23). Il s'agit d'un GPS différentiel modèle STONEX S8 Plus (Figure 23 A) de 5 mm de précision horizontale statique et 10 mm de précision statique verticale statique servant à relever les côtes de la ligne d'eau et des positions de référence. Les déplacements sur le cours d'eau ont été effectués à l'aide d'un hors-bord. Le courantomètre ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) équipé d'un ordinateur portable (Figure 23 C et 23 D) a servi à mesurer les débits et les vitesses transversales du courant du fleuve Cavally au niveau des stations hydrométriques d'Ity et de Floleu. Un moulinet au saumon de type C31 (Figure 23 B) a été utilisé pour la mesure des débits au niveau du pont de Flampleu. Un appareil photographique numérique a été utilisé pour les prises de vue sur le terrain.

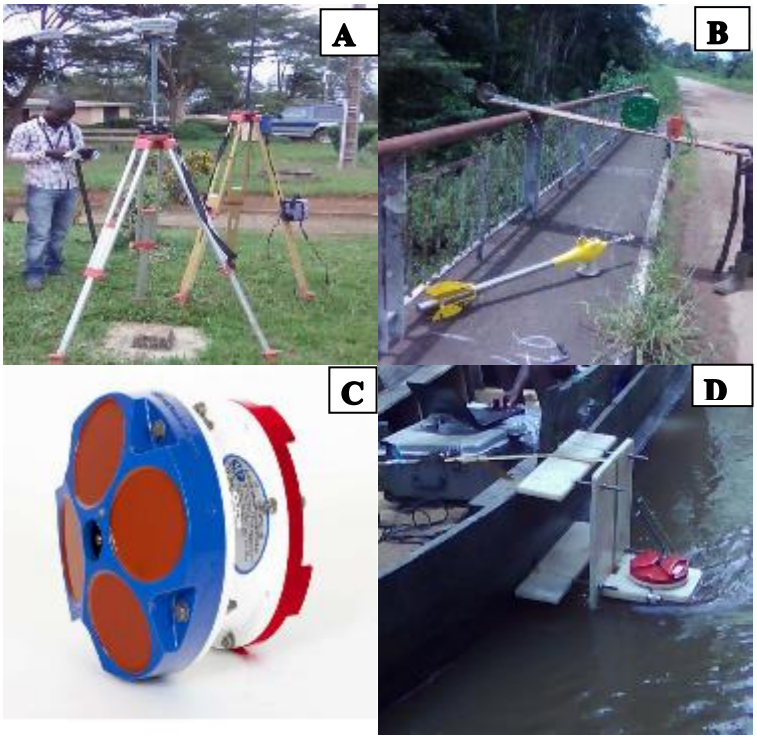


Figure 23 : Matériel de terrain : A) GPS différentiel, B) Moulinet au Saumon, C) Courantomètre ADCP et D) ADCP monté sur une embarcation.

3.2.Données collectées

Les données utilisées sont issues des services nationaux, des stations météorologiques se trouvant dans le bassin versant du fleuve Cavally en Côte d'Ivoire et en Guinée, et des mesures ponctuelles de terrain.

3.2.1. Données hydroclimatiques

Les données historiques de pluie, d'humidité relative, de vitesse de vent et de température au pas de temps mensuel ont été fournies par la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM). Il s'agit des données provenant des stations pluviométriques et météorologiques de Man, Danané, Zouan-Hounien, Sipilou, Guiglo, Bangolo, Bloléquin, Biankouman et de Toulépleu en Côte d'Ivoire. Les données des stations de Beyla et Nzérékoré en Guinée ont été fournies par les services en charge de la météorologie de la Guinée. Ces données pluviométriques couvrent généralement la période de 1970-2016. La Figure 24 présente les stations hydrométrique, pluviométrique et synoptique dont les données ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

Les données historiques de débits et de niveau d'eau au pas de temps journalier ont été fournies par la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques Humaines (DGIHH). Les stations concernées sont : Flampleu (1955-2001 soit 46 ans de données), Ity (1980-2001 soit 21 ans de données) et Toulépleu (1970-2004 soit 34 ans de données).

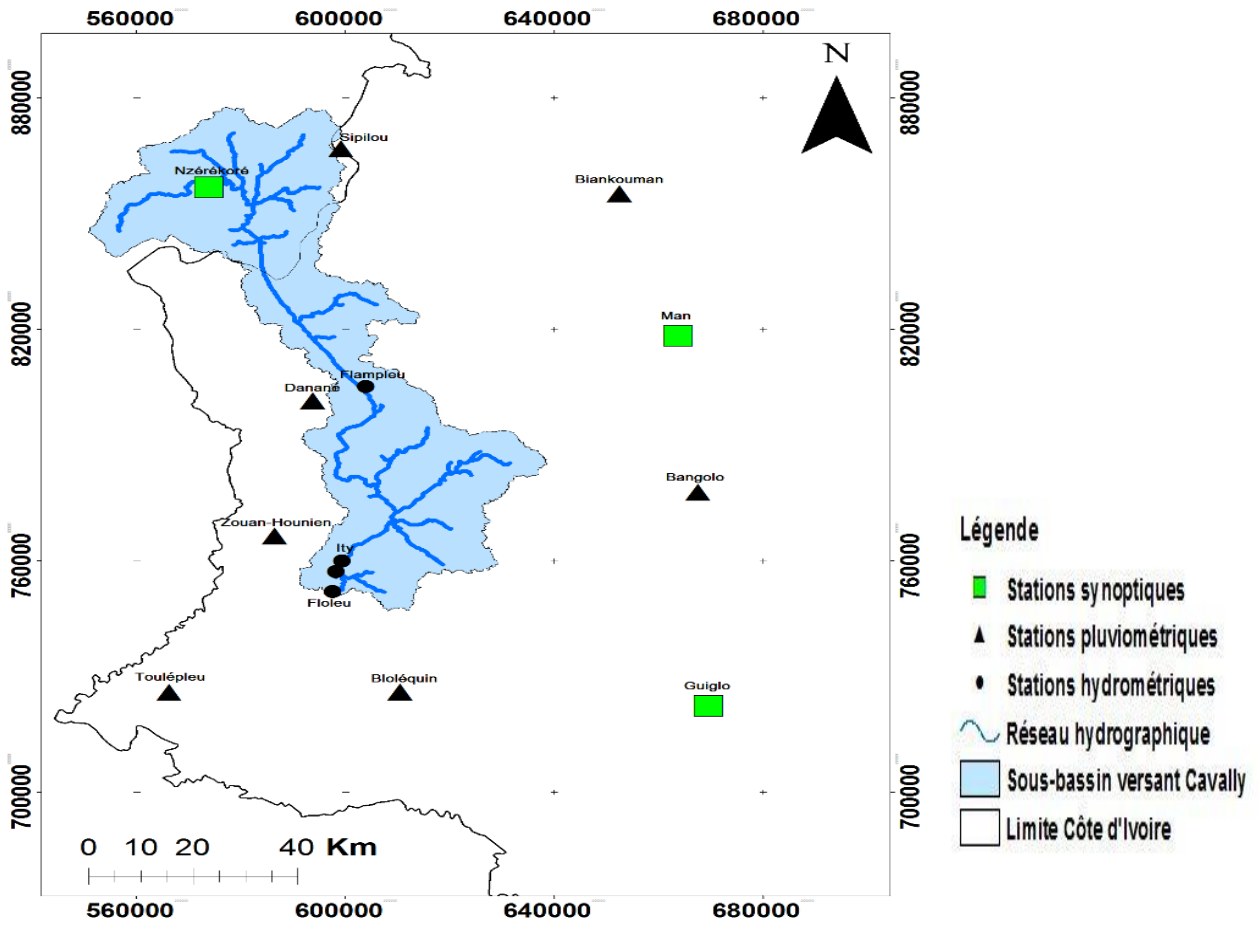


Figure 24 : Localisation des stations pluviométriques et hydrométriques.

3.2.2. Données satellitaires

Une image satellitaire de type LANDSAT L8 OLI_TIRS datant de la période de décembre 2015 à Février 2016 de résolution 30 m téléchargeable à partir du site internet de United States Geological Survey (USGS) : http://earthexplorer.usgs.gov/wms/custom/0101605288603 a également été utilisée. Les images Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI) et *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) sont constituées de neuf (9) bandes spectrales avec une résolution spatiale de 30 mètres pour les bandes 1 à 7 et 9. La taille approximative de la scène est de 170 km nord-sud sur 183 km est-ouest (Barsi *et al.*, 2014). Le Tableau IV présente les différentes bandes spectrales en fonction de leurs longueurs d'onde et de la résolution spatiale d'après les travaux Barsi *et al.*(2014).

Tableau IV : Bandes spectrales du satellite Landsat 8 en fonction de la longueur d'onde et de la résolution spatiale (Barsi *et al.*, 2014).

	Bandes spectrales	***Longueurs d'onde (µm)***	***Résolution spatiale (m)***
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal *Infrared Sensor (TIRS)*	Bande 1 - Ultra bleu	0,435 – 0,451	30
	Bande 2 - Bleu	0,452 – 0,512	30
	Bande 3 - Vert	0,533 – 0,590	30
	Bande 4 - Rouge	0,636 – 0,673	30
	Bande 5 – Proche Infra Rouge (NIR)	0,851 – 0,879	30
	Bandes 6 – Courte onde infrarouge (SWIR) 1	1,566 – 1,651	30
	Bandes 7 – Courte onde infrarouge (SWIR) 2	2,107 – 2,294	30
	Bande 8 - Panchromatique	0,503 – 0,676	30
	Bande 9 - Cirre	1,363 – 1,383	30
	Bande 10 – Infrarouge Thermique 1 (TIR)	10,60 – 11,19	100 (30)
	Bande 11 – Infrarouge Thermique (TIR)	11,50 – 12,51	100 (30)

3.2.3. Images

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 fournie par la Société des Mines d'Ity (SMI), a permis d'extraire les données topographiques de la zone d'étude. 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.

3.3. Logiciels

Plusieurs logiciels ont été utilisés dans le cadre de la réalisation de cette étude. L'essentiel de ces logiciels est consigné dans le Tableau V.

Tableau V : Logiciels utilisés dans le cadre de cette étude**.**

Logiciels	*Types*	*Utilité*
ArcGIS 10.2.2 et ses extensions (ARCSWAT et ARC Hydro Tools)	Cartographie	- Traitement des données SIG, le krigeage des données pluviométriques ; - Analyse hydrologique et extraction du réseau hydrographique
ENVI 4.7	Télédétection	Traitement des images satellitaires et réalisation des cartes d'occupation de sols
MATLAB 2014a	Statistique	Programmation des réseaux de neurones artificiels du modèle pluie-débit
Hydrospect et XLSTAT version 2014	Statistique	Analyse des tests de rupture dans les séries pluviométriques
HYFRAN	Statistique	Analyse fréquentielle des données hydro pluviométriques
HEC-RAS 5.03 et HEC-GeoRAS 4.3	Modèle hydraulique (1D et 2D)	Modélisation de la propagation des crues

Conclusion partielle

Dans ce chapitre, il a été question de présenter le matériel de terrain, les logiciels et les données qui ont été utilisés dans cette étude. Il présente également les différents modes d'acquisition de ces données ainsi que leurs sources. Il s'agit des données climatiques, hydrologiques, des données de télédétection et de cartographie.

Chapitre 4 : Approche méthodologique

La réalisation de ce travail a nécessité la réhabilitation et l'installation de stations hydrométriques, le traitement des données spatiales, le dimensionnement des canaux de dérivation et la simulation du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally. Ce chapitre décrit l'approche méthodologique utilisée pour l'acquisition et le traitement des données. Une méthodologie appropriée a été utilisée pour traiter chaque objectif spécifique défini dans ce travail.

4.1.Réinstallation des stations hydrométriques

Cette activité a consisté à transférer les deux stations hydrométriques (Ity et Flampleu (Téapleu-Cavally)) de leur site initial à un autre. L'objectif recherché était de permettre un accès plus facile aux sites et surtout assurer une meilleure surveillance des équipements. Cette opération s'est réalisée en conservant toute la chronique de données de ces deux stations.

Les éléments d'échelles ont été installés conformément à la technique de rattachement aux bornes hydrométriques, connaissant le zéro de chaque station et après avoir déterminé la dénivelée entre le plan d'eau et la borne de manière à obtenir la même station hydrométrique aux nouveaux sites. La station de Flampleu a été réinstallée à environ 150 m en aval de l'ancien pont reliant la ville de Danané à Zouan-Hounien. Celle d'Ity a été réinstallée au nouveau pont construit par la SMI, reliant Zouan-Hounien et Bloléquin. Les nouvelles bornes hydrométriques sont repérées aux coordonnées géographiques consignées dans le Tableau VI. Ces coordonnées ont été rattachées à la borne géodésique de Danané.

Tableau VI : Paramètres caractéristiques nécessaires à la réinstallation de la station d'Ity et de Flampleu.

	Site initial	**Nouveau site**	**Coordonnées géographiques de la borne hydrométrique**	
			Longitude	**Latitude**
Zéro de la station Ity	-9,61 m	-14,03 m	759157	599488
Dénivelée borne-plan d'eau	5,85 m	5.85 m		
Zéro de la station Flampleu	-4,670 m	-4,670 m	804249	603540
Dénivelée borne-plan d'eau	3,74 m	3,74 m		

4.2.Collecte de données de terrain

Plusieurs campagnes de mesure ont été effectuées entre 2015 et 2019 sur une section du fleuve Cavally pour mesurer les débits et les niveaux d'eau entre Bakatou et Floleu-Soklaleu (Figure

25). Ces mesures ont concerné de débit du cours d'eau, les vitesses du courant, les niveaux d'eau, des levés bathymétriques, le prélèvement des échantillons de sédiment. 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.

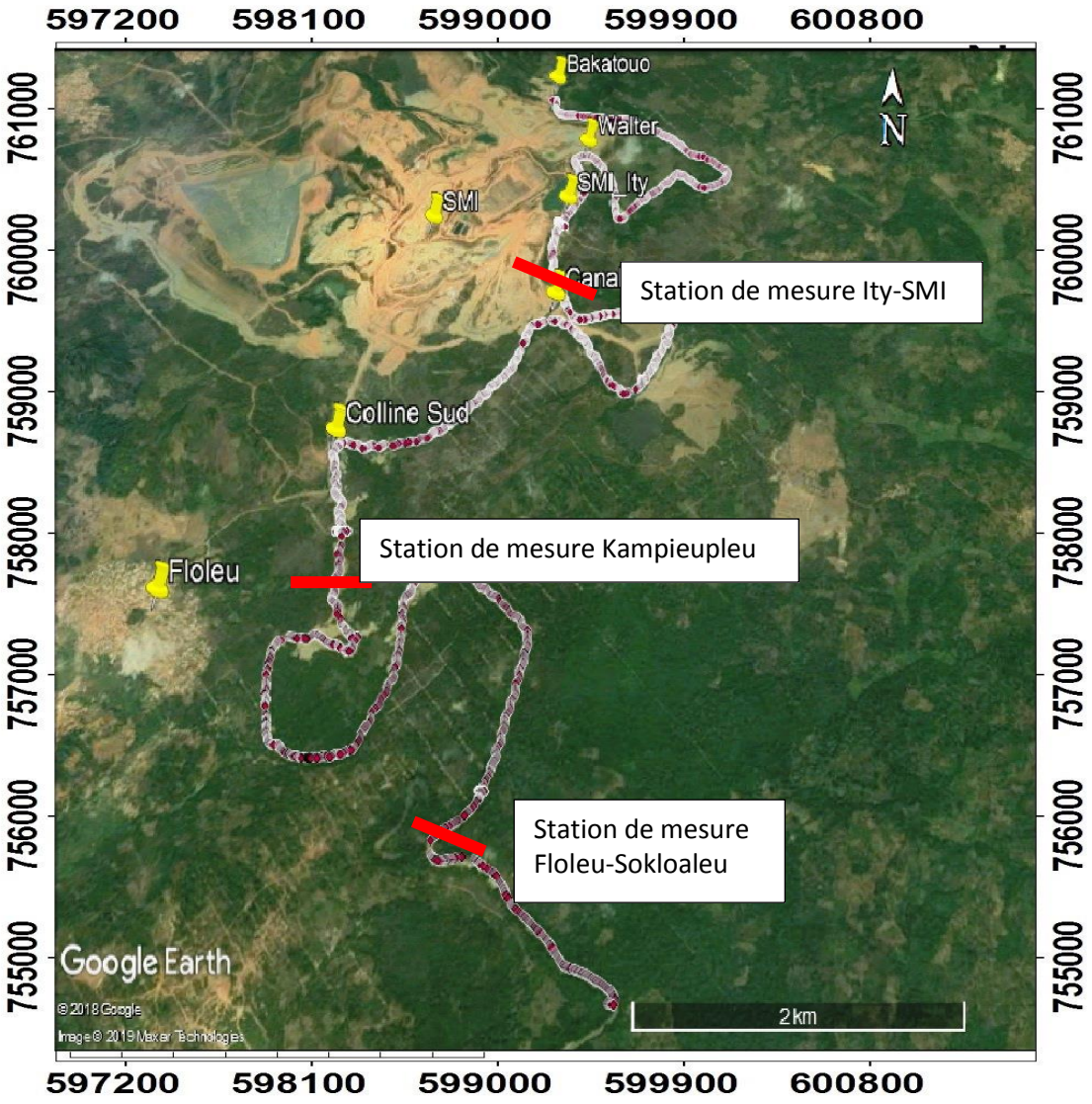


Figure 25 : Zones de couverture des mesures des débits et de niveaux d'eau le fleuve Cavally dans les environs de la SMI.

4.3.Comblement des débits manquants par les réseaux de neurones artificiels

Avant de caractériser la variabilité hydro climatique du bassin versant du fleuve Cavally, l'analyse des données hydro climatiques disponibles a montré que ces données contiennent des lacunes. Pour combler ces lacunes, un modèle pluie-débit a été élaboré à l'aide de réseaux de neurones artificiels.

L'algorithme utilisé pour l'apprentissage du réseau de neurones est l'algorithme de rétropropagation du gradient d'erreur avec un terme supplémentaire appelé « momentum » (Koffi, 2007 ; Mélèdje, 2016). Le principe fondamental du réseau de neurones choisi est entrainé pour associer un modèle d'entrée « vecteur d'entrées » à un modèle de sortie « vecteur de sortie ». Pendant la phase d'apprentissage, les deux modèles d'entrée et de sortie sont présentés aux réseaux de neurones afin de lui permettre d'apprendre et de mémoriser l'allure de ces vecteurs. Les principales étapes de l'apprentissage du neurone proposé pour la conception de notre modèle sont :

4.3.1. Initialisation des poids

L'initialisation des poids se fait de manière aléatoire, mais dans un intervalle prédéfini. Les valeurs des poids et des biais sont comprises dans l'intervalle [-1 ; +1]. Cette technique est utilisée afin de permettre une convergence rapide au réseau à travers la formule suivante :

$$w_{ij}^{1},\ j = 1,2,...,l \text{ et } i = 1,2,...,6 \qquad \textbf{(5. 26)}$$

Où l'indice supérieur (^{1}) signifie qu'il s'agit d'une matrice de poids de la couche d'entrée, l'indice (j) signifie l'arrivée (indice de neurone dans la couche cachée). Dans cette étude, il varie de 1 jusqu'à *l*, nombres de neurone dans la couche cachée ; l'indice (i) indique la couche de départ, il varie de 1 jusqu'à 6, nombre de neurone dans la couche d'entrée et s'exprime par :

$$w_{k,j}^{2}, k = 1 \text{ et } j = 1,2,...,l \qquad \textbf{(5. 27)}$$

Où l'indice supérieur (^{2}) indique qu'il s'agit de la matrice de poids de la couche cachée, (k) est l'indice correspondant au nombre de neurone de la couche de sortie, il est égal à 1 (une seule sortie), (j) est l'indice correspondant au nombre de neurones de la couche cachée.

$b_{j}^{1}, j = 1,2,...l$ et $b_{k}^{2}, k = 1$ sont les valeurs des biais correspondant aux couches cachées et de sortie. Leurs valeurs sont égales à l'unité (1).

4.3.2. Lecture du vecteur d'entrée et de la sortie désirée

Le vecteur d'entrée se compose du temps des mesures t, des pluies moyennes mensuelles sur le bassin versant et de l'évapotranspiration moyenne. Les valeurs de débits mesurés à la station hydrométrique d'Ity représentent la sortie désirée du réseau (ou cible).

4.3.3. Normalisation du vecteur d'entrée

Pendant la phase d'apprentissage du réseau de neurone, les valeurs du vecteur d'entrée, doivent être normalisées dans l'intervalle [0 ; 1] afin de permettre un traitement efficace et acceptées aux fonctions d'entrée et de sortie du réseau (Özel & Nadgir, 2002; Mélèdje, 2016). La fonction (fonction linéaire) utilisée pour la normalisation du vecteur d'entrée est donnée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{X_N = (X - X_{min})\frac{(X_{Nmax} - X_{Nmin})}{(X_{max} - X_{min})} + X_{Nmin}} \quad \textbf{(5. 28)}$$

Où :

X_N = Valeur normalisée correspondant aux éléments du vecteur d'entrées (pluie, ETP),

X = Valeur réelle d'un élément du vecteur d'entrées,

X_{min} = Valeur minimum d'un élément du vecteur d'entrées,

X_{max} = Valeur maximum d'un élément du vecteur d'entrées,

X_{Nmin} = Valeur minimum du vecteur de normalisation [0 ; 1] égale à 0,

X_{Nmax} = Valeur maximum du vecteur de normalisation [0 ; 1] égale à 1.

Le réseau sera alimenté après avoir normalisé les éléments du vecteur d'entrée pour les associer avec les sorties désirées.

4.3.4. Propagation en avant ou « feed-forward »

Le réseau étant organisé en couches successives, les neurones d'une couche sont reliés à ceux de la couche suivante. Le calcul de chaque sortie se fait en avant, c'est-à-dire de la couche d'entrée vers la couche cachée et ensuite de la couche cachée vers la couche de sortie.

- La sortie de chaque neurone d'entrée prend tout simplement les valeurs du vecteur d'entrée (input patterns).

y_0^1 : Sortie de la couche d'entrée (couche 0)

$y_0^1 = P, y_2^0 = ETP, y_3^0 = t$ (Conditions de pluie, d'ETP et de temps)

- Le calcul de la sortie de la couche d'entrée vers la couche cachée et la sortie de la couche cachée vers la couche de sortie se fait suivant la relation :

$y_j^1 (j = 1,2,...,l)$: sortie de la couche cachée (couche 1)

y_k^2 : sortie de la dernière (couche 2), elle exprime la valeur de débit prédite.

L'entrée de la couche cachée est donnée par :

$$h_j^1 = w_{j1}^1 P + w_{j2}^1 T + w_{j3}^1 t,\ j = (1,2,...,l) \quad \textbf{(5. 29)}$$

Ou bien

$$h_j^1 = w_{j1}^1 y_1^0 + w_{j2}^1 y_2^0 + w_{j3}^1 y_3^0 + b_j^1 \quad \textbf{(5. 30)}$$

Qui s'écrit :

$$h_j^1 = \sum_{i=1}^{6} w_{ji}^0 y_i^0 + b_j^1,\ j = (1,2,...,l) \quad \textbf{(5. 31)}$$

La sortie de cette couche cachée est donnée par :

$$y_j^1 = f(h_j^1);\ j = (1,2,...,l) \quad \textbf{(5. 32)}$$

Où *f*(*som*) est la fonction d'activation. C'est une fonction sigmoïde de type logistique qui vaut :

$$f(som) = \frac{1}{1 + \exp(-som)} \quad \textbf{(5. 33)}$$

La variable *som* étant la somme :

$$somj = \sum_{i=1}^{i=n} x_i w_{ji} + b_j;\ n = 6 \quad \textbf{(5. 34)}$$

L'entrée de la couche de sortie (dernière couche) est exprimée par :

$$h_k^2 = w_{k1}^2 y_1^1 + w_{k2}^2 y_2^1 + ... + w_{kl}^2 y_l^2 + b_k^2 = \sum_{i=1}^{l} w_{ki}^1 y_i^1 + b_k^1, k = 1 \quad \textbf{(5. 35)}$$

4.3.5. Calcul d'erreurs

L'erreur dans une couche donnée est exprimée par la relation suivante :

$$\delta_k^2 = (d - O_k^2) f'(h_k^2); k = 1 \quad \textbf{(5. 36)}$$

Et

$$\delta_j^1 = (\sum_{k=1}^{m} \delta_k^2 w_{kj}^2) f'(h_j^1); m = 1 \quad \textbf{(5. 37)}$$

Où *n* le nombre d'entrées présentées au réseau, *m* est le nombre de neurones dans la couche de sortie désirée (valeurs du débit mesuré) et y est la sortie calculée par le réseau.

4.3.6. Adaptation du réseau et calcul des sorties

Cette étape consiste à adapter les poids et les biais des différentes interconnexions du réseau (mise à jour de la matrice de poids w_{ji} et du vecteur biais b_j).

La mise à jour se fait suivant l'algorithme de rétropropagation du gradient d'erreur avec un terme supplémentaire « momentum ». L'erreur est donc rétropropagée à travers le réseau par une quantité Δw et Δb.

$$\begin{aligned}
(\Delta w_{kj}^2)_{nouveau} &= \eta\delta_k^2 y_j^1 + \alpha(\Delta w_{kj}^2)_{ancien} \\
(\Delta w_{jl}^1)_{nouveau} &= \eta\delta_j^1 y_i^0 + \alpha(\Delta w_{ji}^1)_{ancien} \\
(\Delta b_k^2)_{nouveau} &= \eta\delta_k^2 + \alpha(\Delta b_k^2)_{ancien} \\
(\Delta b_j^1)_{nouveau} &= \eta\delta_j^1 + \alpha(\Delta b_j^1)_{ancien}
\end{aligned} \qquad \textbf{(5. 38)}$$

Le poids et les biais sont incrémentés suivant la relation :

$$\Delta w_{ji}(I) = \eta\frac{\partial e_k}{\partial w_{ki}} + \alpha\Delta w_{kj}(I-1) \qquad \textbf{(5. 39)}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned}
(\Delta w_{kj}^2)_{nouveau} &= \eta\delta_k^2 y_j^1 + \alpha(\Delta w_{kj}^2)_{ancien} \\
(\Delta w_{ji}^1)_{nouveau} &= \eta\delta_j^1 y_i^0 + \alpha(\Delta w_{ji}^1)_{ancien} \\
(\Delta b_k^2)_{nouveau} &= \eta\delta_k^2 + \alpha(\Delta b_k^2)_{ancien} \\
(\Delta b_j^1)_{nouveau} &= \eta\delta_j^1 + \alpha(\Delta b_j^1)_{ancien}
\end{aligned} \textbf{, avec } \begin{matrix} i = 1,2,...,6 \\ j = 1,...,l \\ k = 1 \end{matrix} \qquad \textbf{(5. 40)}$$

η étant un paramètre au réseau de neurone appelé « *taux d'apprentissage* » et α étant le « momentum ». Ce paramètre permet de prendre en considération l'évolution de l'apprentissage au cours du temps. En d'autres termes, il permet de pondérer l'influence de la variation précédente sur la variation actuelle (parlant ici de la variation de poids et de biais). Lorsqu'une petite valeur de η est utilisée, le changement dans les poids synaptiques du réseau est aussi petit ; ce qui a pour effet d'augmenter la vitesse de convergence de l'algorithme d'apprentissage. Dans le cas contraire, c'est-à-dire, une grande valeur de η, le changement résultant dans les poids synaptiques est tel que le réseau devient instable. Comme alternative et afin de remédier à ce problème, l'introduction du momentum permet d'éviter ces instabilités et d'éviter également de tomber dans un minimum local.

4.3.7. Calcul de l'erreur quadratique moyenne (Mean Square Error) MSE

Dans cette étape, l'erreur moyenne MSE (appelée aussi performance du réseau) est calculée et devrait s'approcher au maximum d'une tolérance imposée pour un nombre d'itérations donné. La maitrise de ces deux facteurs (tolérance et nombres d'itérations) permet d'éviter deux problèmes qui peuvent être rencontrés au cours de la phase d'apprentissage du réseau de neurones, à savoir : le sur-apprentissage et le sous-apprentissage.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(d - y_i^2)^2, \qquad \textbf{(5. 41)}$$

avec *n* étant le nombre d'exemples

L'algorithme de rétropropagation du gradient continue à être exécuté pour un nombre d'itérations prédéfini jusqu'à atteindre une erreur acceptable à travers le processus d'apprentissage. Une fois les quantités de mise à jour des poids et des biais sont calculées, on calcule à nouveau les sorties du réseau (propagation en avant) suivant les relations présentées plus haut dans l'étape 4.

Dans les réseaux de neurones multicouches, un nombre important d'itérations est exigé afin de satisfaire l'erreur imposée ; cela dans le but d'avoir un degré élevé de fiabilité de débit.

4.3.8. Configuration et choix d'une architecture optimale du réseau de neurones

Les différentes architectures (30 architectures au total) ont été étudiées afin de choisir l'architecture pour laquelle l'erreur de test est la plus faible (erreur acceptable par rapport à la tolérance fixée). Le nombre de neurones dans la couche cachée étant variable, chaque architecture a été entrainée pour des poids et des biais aléatoires (différentes valeurs d'initialisation). Les poids obtenus après la phase d'apprentissage ont été utilisés pour tester le réseau. L'erreur minimale de tout le processus de test de ces différentes architectures servira comme critère de choix d'une première optimisation.

4.3.9. Choix du pas de temps

Une analyse des données de débits fournies par la Direction de l'Hydrologie donne les observations suivantes :

- au pas de temps horaire, les données n'existent pas ;
- au pas de temps journalier, les données existent mais présentent beaucoup de lacunes ;
- au pas de temps mensuel, les données sont obtenues en calculant la moyenne des débits journaliers. Les séries obtenues présentent peu de lacunes ;

- au pas de temps annuel, les données sont obtenues en calculant les moyennes des débits mensuels. Les débits obtenus représentent les moyennes des débits mensuels.

Les différentes valeurs de débits sont très lissées au pas de temps annuels. Les séries de débits annuels obtenues présentent peu de lacunes. Il ressort de cette analyse que la Direction de l'Hydrologie ne dispose que des données au pas de temps journalier et que les données au pas de temps mensuel et annuels sont obtenues par calcul. Vu ce qui précède, c'est la modélisation au pas de temps mensuel qui a été choisie. En effet, ce pas de temps semble être un bon compromis permettant d'intégrer des données avec peu de lacunes sans qu'elles soient trop lissées comme l'a souligné Mélèdje (2016). Aussi, le pas de temps mensuel peut-il également être considéré comme opérationnel pour les acteurs concernés par la gestion de la ressource en eau, la gestion des inondations et l'anticipation des crues.

4.3.10. Apprentissage, test et validation du modèle

L'apprentissage du réseau a été effectué de sorte que la moyenne des carrés des erreurs (ASE) soit minimale essentiellement pour la phase de test. Le calage et la convergence du modèle ont été testés donc par rapport à l'erreur moyenne (ASE) de la phase de test. Pour la première étape de modélisation, les données ont été subdivisées en deux périodes : 1990-1995 (5 ans) pour l'apprentissage et 1996-1999 (3 ans) pour le test. Concernant la validation, les données de la période de 2000 à 2001 (2 ans) ont été utilisées (Figure 26).

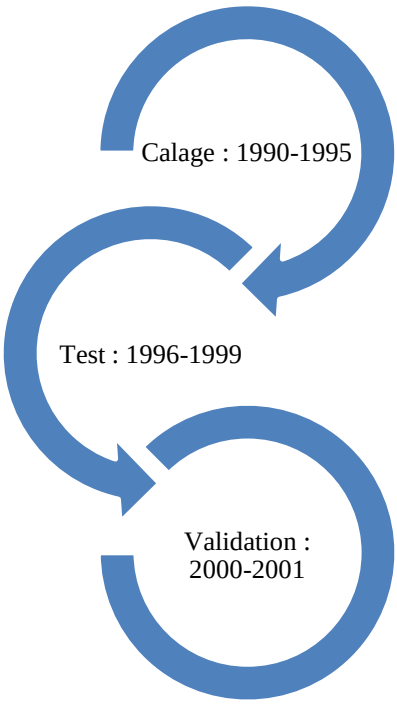


Figure 26: Processus de répartition des données dans le modèle de réseaux de neurone.

4.3.11. Critères de performance du modèle

La performance d'un modèle issu d'une méthode d'apprentissage s'évalue par sa capacité de prédiction ou de généralisation. En effet, les critères de performance mesurent la qualité ou la confiance que l'on peut accorder aux résultats d'une prévision (Besse *et al.*, 2005). Le modèle est évalué avec deux (2) critères numériques (coefficient de Nash et coefficient de corrélation) et un critère graphique (hydrogrammes des débits observés et simulés).

4.3.11.1. Coefficient de Nash

Dans le but de quantifier la précision de la simulation et la fiabilité du modèle, le coefficient de Nash est appliqué sur les résultats obtenus (Kouassi, 2007). Le coefficient de Nash est exprimé par la relation suivante :

$$\boldsymbol{Nash = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(q_{ci} - q_{oi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(q_{oi} - \overline{q}_o)^2}}} \qquad \textbf{(5. 42)}$$

4.3.11.2. Coefficient de corrélation « R »

Le coefficient de corrélation ou coefficient de Pearson, noté R est la racine carrée du coefficient de détermination donnée par la relation :

$$\boldsymbol{R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(q_{ci} - \overline{q}_c)-(q_{oi} - q_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(q_{ci} - \overline{q}_c)^2 \sum_{i=1}^{n}(q_{oi} - \overline{q}_o)^2}}} \qquad \textbf{(5. 43)}$$

Dans ces deux expressions, n représente la taille de la série, q_{oi} représente le débit observé pour le pas de temps **i** en m^3/s ; q_{ci}, le débit calculé pour le pas de temps i en m^3/s ; $\overline{q_0}$, le débit moyen observé en m^3/s ; $\overline{q}_c$, le débit moyen calculé en m^3/s.

Selon Koffi (2007), par convention, la relation est parfaite si R = 1 ; très forte si R> 0,8 ; forte si R se situe entre 0,5 et 0,8 ; d'intensité moyenne si R se situe entre 0,2 et 0,5 ; faible si R se situe entre 0 et 0,2 ; nulle si R = 0. De manière générale si R est inférieure à 0,7 alors la relation est sujette à problème (Anctil & Coulibaly, 2004).

4.4. Caractérisation de la variabilité hydro climatique du bassin versant du fleuve Cavally

4.4.1. Calcul des indices pluviométriques et des indices des débits

4.4.1.1. Indices de Nicholson

La méthode des indices de Nicholson permet de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires au sein d'une série chronologique de données (Yao, 2015). Pour chacun des

postes pluviométriques et stations hydrométrique retenus, un indice annuel de la variable pluviométrique ou de débit a été déterminé. Il se calcule à partir de l'équation suivante :

$$\boldsymbol{I = \frac{x_i - \overline{x}}{\sigma}} \quad \textbf{(5. 44)}$$

Avec :

I : indice annuel de la variable étudiée (pluie ou débit) ;

$\boldsymbol{x_i}$: Module annuel de la variable de l'année i ;

$\boldsymbol{\overline{x}}$: Moyenne interannuelle de la variable sur la période d'étude ;

$\boldsymbol{\sigma}$: Ecart type de la série hydro climatique sur la période d'étude.

4.4.1.2. Filtre non récursif passe bas de Hanning d'ordre 2

Cette méthode appelée aussi « moyennes mobiles pondérées », permet d'éliminer les variations saisonnières dans une série chronologique. Le calcul de ce filtre a été effectué au moyen des équations recommandées par Tyson et al.(1975), déjà utilisées par plusieurs auteurs (Assani, 1999 ; Kouassi, 2007 ; Yao, 2015). Ces équations permettent d'estimer chaque terme de la série de la manière suivante :

Pour $3 \leq t \leq (n-2)$,

$$\boldsymbol{X(t) = 0,06x_{(t-2)} + 0,25x_{(t-1)} + 0,38x_{(t)} + 0,25x_{(t+1)} + 0,06x_{(t+2)}} \quad \textbf{(5. 45)}$$

Où, t est l'année considérée et x(t) la pluviométrie ou le débit de l'année t. X(t) est le total pluviométrique ou de débit pondéré du terme t ou la moyenne mobile. $x_{(t-2)}$ et $x_{(t-1)}$ sont les totaux pluviométriques ou de débits principaux observés de deux (2) termes qui précèdent immédiatement le terme t. $x_{(t+2)}$ et $x_{(t+1)}$ sont les totaux pluviométriques ou de débits observés de deux (2) termes qui suivent immédiatement le terme t.

Les totaux pluviométriques ou de débits pondérés des deux premiers termes [X_1, X_2] et des deux derniers [X_{n-1}, X_n] termes de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

$$\boldsymbol{X_1 = 0,54x_1 + 0,46x_2} \quad \textbf{(5. 46)}$$

$$\boldsymbol{X_2 = 0,25x_1 + 0,5x_2 + 0,25x_3} \quad \textbf{(5. 47)}$$

$$\boldsymbol{X_{n-1} = 0,25x_{(n-2)} + 0,5x_{(n-1)} + 0,25x_n} \quad \textbf{(5. 48)}$$

$$\boldsymbol{X_n = 0,54x_n + 0,46x_{(n-1)}} \quad \textbf{(5. 49)}$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent pluviométriques ou de débits, les moyennes mobiles sont centrées et réduites au moyen de l'équation 5.35:

$$Y'_t = \frac{x_t - m}{\sigma} \quad \textbf{(5. 50)}$$

Où :

m : est la moyenne de la série des moyennes pondérées et σ l'écart type de la série des moyennes mobiles pondérées.

Selon Assani (1999) et Kouassi (2007), cette méthode permet de faire apparaître plus nettement les périodes d'excédent et de déficit pluviométrique ou débits.

4.4.2. Variabilité décennale des précipitations sur le bassin versant du Cavally

La distribution moyenne annuelle des précipitations a été calculée par la méthode des isohyètes sur la période 1970-2010. Les données pluviométriques des stations du bassin et des zones environnantes ont permis de retracer les isohyètes des décennies 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 et 2001-2010. Elles sont préparées avec le maximum de vraisemblance qui tient compte de la région, du réseau hydrographique et de la qualité des mesures.

4.4.3. Analyse des jours et des hauteurs de pluie caractéristiques du bassin

L'analyse statistique des jours pluvieux a été menée sur la période 1970-2016, à partir de données pluviométriques journalières des stations. Cette période est imposée par la longueur des données disponibles. L'étude des jours pluvieux est primordiale pour la compréhension de la variabilité pluviométrique (Kouadio, 2011). La pluie étant un phénomène variable dans le temps et dans l'espace, les déficits pluviométriques pourraient être liés à la diminution de la fréquence des fortes précipitations qui ont atteint ou dépassé un certain seuil. Ainsi, en se référant aux normes internationales recommandées par l'Organisation mondiale de la Météorologie (OMM), les seuils de précipitations journalières sont définis en fonction du nombre de jours de pluie et de la hauteur comme suit (OMM, 1990) :

- 1 et 10 mm (P1) ;
- 10 et 30 mm (P2) ;
- 30 et 50 mm (P3)
- > 50 mm (P4).

Le nombre de jours de pluie a été étudié à l'échelle interannuelle.

4.4.4. Analyse fréquentielle des événements extrêmes pluviométrique et hydrologique

Un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes est l'analyse fréquentielle. Cette méthode statistique a comme objectif principal d'utiliser des mesures d'événements passés pour estimer les probabilités futures d'occurrence (Muller, 2006). L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier pour estimer l'ampleur de l'événement temporel X_T auquel est associée une période de retour T (quantile de période de retour T ou de probabilité au dépassement (p=1/T)). L'estimation X_T de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité F (x ; θ) à un échantillon de n observations x= $\{x_1 ; \ldots ; x_n\}$, où θ représente le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité F. Les étapes principales de l'analyse fréquentielle telles que décrites par Mélèdje (2016) sont :

1. La vérification des hypothèses de base. Ces hypothèses sont :
    - Homogénéité (les données proviennent d'un échantillon homogène, donc il n'y a pas de différence significative dans la moyenne de sous-échantillons) ;
    - Stationnarité (pas de tendance à la hausse ou à la baisse dans la chronique des données) ;
    - Indépendance (pas d'autocorrélation dans les séries).
2. L'ajustement d'une distribution statistique à l'échantillon. Cet ajustement est fait sur la base d'un échantillon ordonné pour lequel une probabilité au dépassement **p** ou une probabilité au non dépassement **q** (**q = 1-p**) est calculée. Plusieurs formules empiriques existent pour calculer la probabilité au non dépassement des pluies ordonnées. Celle utilisée dans cette étude est la formule de Cunnane déjà utilisée par Soro (2011) ; Mélèdje (2016):

$$\boldsymbol{q = \frac{k-q}{n-2q+1}} \qquad \textbf{(4. 51)}$$

Où, k est le rang des observations (classées de la plus faible à la plus élevée) ; n est la taille de l'échantillon, q=0,4 (constante de la formule de Cunnane).

3. A l'aide du modèle théorique fourni par la loi statistique ajustée, on procède à l'extrapolation permettant d'obtenir les valeurs des quantiles (valeur de X_T pour une période de retour T). La relation entre la probabilité au non dépassement et la période de retour est :

$$\boldsymbol{T = \frac{1}{1-q}} \qquad \textbf{(5. 52)}$$

4.4.4.1. Choix des modèles statistiques

Le choix des différents modèles statistiques retenus pour l'ajustement des maxima annuels (MAXAN) repose sur des considérations théoriques (Soro, 2011). Et les recommandations des travaux antérieurs en la matière (Muller, 2006 ; Goula *et al.*, 2007 ; Soro, 2011).
Les modèles statistiques retenus *a priori* pour l'ajustement des variables des pluies journalières extrêmes sont présentés dans le Tableau VII :

Tableau VII : Modèles statistiques présélectionnées pour l'ajustement des pluies journalières extrêmes.

Mode échantillonnage	*Modèle statistique*	*Fonction de densité de probabilité*	*Paramètres*
MAXAN	GEV-EV1 (loi de Gumbel)	**(5. 53)** $f(x)=\frac{1}{\alpha}\exp\left[-\frac{x-u}{\alpha}-\exp\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$	α, u
	GEV-EV2 (loi de Fréchet)	**(5. 54)** $f(x)=\frac{1}{\alpha}\left(1-\frac{x-u}{\alpha}\right)\exp\left\{-\left[1-k(x-u)/\alpha\right]^{\frac{1}{k}}\right\}$	α, u, k
	GEV-EV3 (loi de Weibull)	**(5. 55)** $f(x)=\frac{1}{\alpha}\left(1-\frac{x-u}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k}-1}\exp\left\{1\left[1-k(x-u)/\alpha\right]^{\frac{1}{k}}\right\}$	α, u, k

4.4.4.2. Estimation des paramètres du modèle statistique

Les travaux de Soro (2011) ont montré que plusieurs études comparatives tant empiriques que théoriques ont été menées afin de déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation des paramètres est la plus efficace pour un modèle statistique donné. Ainsi, l'estimateur du maximum de vraisemblance a-t-il été retenu dans le cadre de cette étude. Ce choix se justifie par le fait que l'estimateur de maximum de vraisemblance a l'avantage de produire une faible variance d'échantillonnage des paramètres estimés et par conséquent une faible variance des quantiles (Meylan & Musy, 1999 ; Meylan *et al.*, 2008 ; Soro, 2011). La méthode du maximum de vraisemblance consiste en effet, à trouver l'ensemble des paramètres qui, compte tenu de la loi de probabilité retenue, maximise la probabilité d'obtenir les valeurs observées de l'échantillon.

4.4.4.3. Validation du modèle statistique

Pour valider le modèle statistique, deux techniques de sélection ont été mise en œuvre : les critères de comparaison graphique et les critères de comparaison numérique. Ces différentes techniques permettent de déterminer le modèle statistique qui s'ajuste bien aux séries de données.

4.4.4.3.1. Critères de comparaison graphique

Les critères de comparaison graphique sont un ensemble de méthodes graphiques mises en œuvre pour déterminer la classe de distribution la plus adéquate pour estimer les quantiles de période de retour élevé. Ils consistent à comparer les résultats de plusieurs ajustements différents à l'aide d'un graphique sur papier de probabilité normal. Dans le cadre de cette étude, trois lois ont été appliquées. Ce sont : la loi de Gumbel, la loi Weilbull et de Fréchet. L'application de ces lois permet d'apprécier celle qui s'adapte au mieux à une série chronologique de débits et de pluie.

4.4.4.3.2. Critères de comparaison numérique

Pour pouvoir comparer les modèles statistiques par critère de comparaison, l'on se fixe des probabilités *a priori* égales pour toutes les distributions. Ensuite, l'on spécifie une période de retour (T). Ainsi, la probabilité *a posteriori* est calculée à partir de la probabilité *a priori*. Le Critère d'Information Bayésien (BIC) et le Critère d'Information d'Akaike (AIC) sont aussi calculés. Le meilleur modèle statistique est celui dont les valeurs de AIC et BIC sont faibles et la probabilité *a posteriori* est la plus appropriée (Soro, 2011). Les critères BIC et AIC sont calculés respectivement à partir des équations 5.59 et 5.60:

$$\boldsymbol{BIC = -2\log(L) + 2k} \quad \textbf{(5. 56)}$$

$$\boldsymbol{AIC = -2\log(L) + 2klog(n)} \quad \textbf{(5. 57)}$$

Avec : L : la vraisemblance ; k : nombre de paramètres ; n : taille de l'échantillon.

4.4.4.3.3. Analyse des incertitudes

L'estimation des quantiles pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques requiert un certain niveau de confiance (Soro, 2011). En effet, les modèles statistiques utilisés pour représenter les pluies extrêmes sont entachés d'erreurs qu'il est nécessaire de préciser.

4.4.4.3.3.1. Incertitudes de l'échantillonnage

Pour évaluer les incertitudes liées aux données d'entrée des modèles statistiques, un intervalle de confiance a été construit par la méthode dite de l'erreur-type (Meylan & Musy, 1999 ; Soro, 2011) Cette méthode permet de quantifier les dispersions d'une variable descriptive des pluies extrêmes autour d'une valeur attendue.

4.4.4.3.3.2. Incertitudes de modélisation

Pour évaluer les incertitudes liées au choix d'un modèle statistique ou un estimateur des paramètres du modèle statistique, il a été proposé de calculer les écarts relatifs et les biais dus au choix de ce dernier (Soro, 2011). Les écarts relatifs exprimés en pourcentage sont définis comme suit :

$$\boldsymbol{ER(T) = \left(\frac{Q_{th} - Q_{em}}{Q_{em}}\right) * 100} \quad \textbf{(5. 58)}$$

Avec : Q_{th} : Quantile théorique (modèle statistique) ; Q_{em} : quantile empirique ; T : période de retour.

L'expression du biais est définie comme suit :

$$\boldsymbol{Biais(T) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{Q_{th} - Q_{em}}{Q_{em}}\right) * 100} \quad \textbf{(5. 59)}$$

Avec : N est le nombre de stations pluviométriques,Q_{th} : Quantile théorique (modèle statistique) ; Q_{em} : quantile empirique ; T : période de retour.

L'analyse fréquentielle a été réalisée à l'aide du logiciel *HYFRAN* (*Hydrological Frequency Analysis*).

4.5. Etude de la dynamique morphologique du lit mineur du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI

L'objectif dans cette partie de l'étude est d'abord d'étudier l'occupation du sol sur le bassin versant du fleuve Cavally et ensuite analyser l'évolution interannuelle de la morphologie du lit mineur du fleuve dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity.

4.5.1. Prétraitement des images

Le prétraitement consiste en général à procéder à la correction géométrique et radiométrique de la scène (N'Da, 2007). Pour les images LandSat 8, le fournisseur fait la correction à deux niveaux essentiels (Atmosphérique et Canopée) et l'élimination des effets perturbateurs atmosphériques à l'aide d'un modèle de simulation avant de mettre à disposition (Sallemi, 2013). C'est le modèle 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum), développé par Vermote *et al.*(1997), qui est un modèle très complexe et basé sur l'équation du transfert radiatif dans l'atmosphère qui a été utilisé. Il a été créé pour simuler la réflectance au-dessus de l'atmosphère, TOA (Top Of Atmosphere) à partir de la réflectance au-dessus du couvert, TOC (Top Of Canopy).

4.5.2. Traitement des images

Le traitement des images satellitaires LandSat, jusqu'à l'aboutissement de la carte d'occupation du sol est décrit en plusieurs étapes telles que présentées par le schéma conceptuel de la Figure 27.

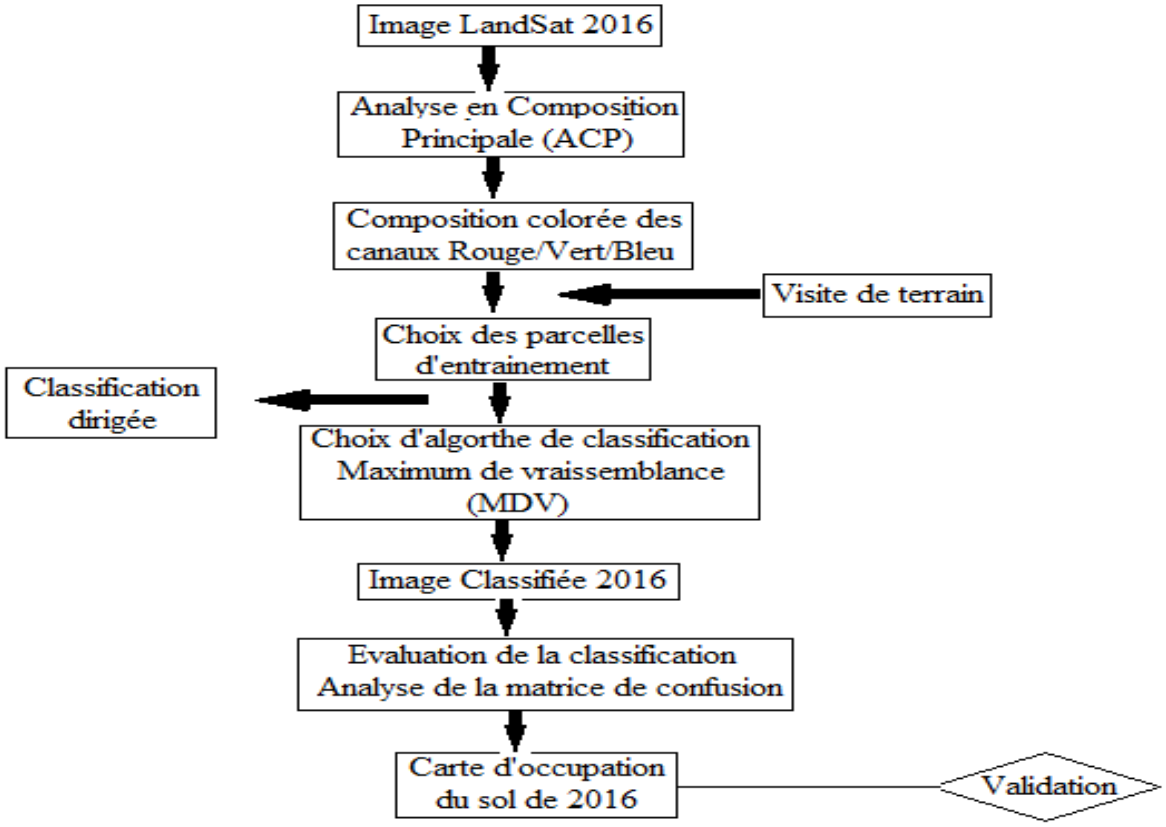


Figure 27 : Schéma conceptuel pour l'établissement de la carte d'occupation du sol.

4.5.3. Opérations d'extraction des informations

4.5.3.1. Composition colorée

La composition colorée consiste à afficher simultanément à l'écran trois bandes d'images dans les canaux de base (Rouge/Vert/Bleu) et faciliter l'extraction des informations. Cette opération permet l'interprétation sur la base de la connaissance du comportement spectral des différents types d'occupation du sol. Les images LandSat 8 du capteur OLI sont composées de 11 et 12 bandes spectrales. Ces bandes conduisent à une grande possibilité de combinaisons pour une composition colorée. Finalement, la composition colorée des bandes OLI 5-3-4 de LandSat 8 a été utilisée dans ce travail parce qu'elle présente la meilleure discrimination des types d'occupation du sol.

4.5.3.2. Classification des images

La méthode de classification supervisée a été appliquée dans ce travail. La classification non supervisée a été une étape intermédiaire de cette classification. Les zones homogènes et hétérogènes peuvent servir au choix des parcelles d'entraînement pour la classification supervisée. Après la classification non supervisée des images, nous nous sommes basés sur celle-ci pour réaliser une classification supervisée. Dans cette dernière variété d'algorithmes, la classification par le « maximum de vraisemblance » a été choisie. Cet algorithme est très utilisé dans les classifications supervisées et est considéré comme le plus performant des algorithmes dans la production des cartes thématiques dans le domaine de l'occupation du sol (Kouadio, 2011 ; Zro, 2012 ; Mélèdje, 2016). La sélection et la définition des classes d'intérêt sont nécessaires pour transformer avec succès les images satellitaires en information d'occupation du sol. Le choix de ces classes est fondé sur la mise en correspondance des informations sur les images et celles recueillies sur le terrain. L'interprétation visuelle de la composition colorée effectuée sur les images a servi de support à ces choix. De plus, les données annexes telles que les localités, les réseaux routiers et hydrographiques ainsi que, les limites artificielles et les connaissances théoriques de terrain ont permis de faciliter cette interprétation. Une multitude de parcelles d'entrainement a été délimitée et cela, en fonction des sites visités et de la réflectance des types d'occupation du sol, la position géographique, la topographie du milieu et surtout leur accessibilité (bordure de route et de localités). Les parcelles d'entrainement sont caractérisées par leur taille et leur homogénéité pour être reconnues sur le terrain.

L'évaluation de la classification est effectuée à partir de la matrice de confusion qui donne la précision du traitement et permet de valider le choix des parcelles d'entraînement. Ce rapport statistique réalisé sur la base des parcelles de contrôles permet d'évaluer la capacité des images satellitaires à discriminer les différentes classes de végétation retenues (Kouadio, 2011). La diagonale de la matrice de confusion représente les pourcentages des pixels bien classés ; les valeurs de pourcentage hors de la diagonale étant celles des pixels mal classés. La précision cartographique est l'expression de la validité du traitement ou le pourcentage de pixels bien classés pour un thème. Plus, cette valeur est proche de 100%, plus le traitement est dit valide. La précision globale est le rapport entre le nombre total de pixels bien classés et le nombre total de pixels dans une image. Après la validation de la classification, un filtre médian 3x3, permet de réduire l'hétérogénéité intra classes par élimination des pixels isolés.

4.5.4. Analyse de l'évolution interannuelle de la morphologie du lit mineur du fleuve Cavally

4.5.4.1. Prétraitement des images

Les images satellitaires ont été prétraitées et la zone d'étude a été extraite avec le logiciel ENVI. Le prétraitement appliqué aux images est la correction géométrique. Elle a consisté au référencement des images de façon qu'en tout point de l'image il soit possible d'avoir les coordonnées dans un système de référence (Padonou & Sarr, 2009). Dans le cadre de ce travail le système de coordonnées utilisé est WGS 84 UTM zone 29N. L'image de 2018 a été utilisée comme référence pour la réalisation de la correction géométrique des autres images. La méthode utilisée est la méthode d'image à image (Dusseux, 2014). Cette étape est essentielle pour la suite du traitement car elle permet en général la superposition des cartes (Dusseux, 2014). Le traitement a succédé à cette étape de prétraitement.

4.5.4.2. Traitement des images

Le traitement des images a consisté à faire la composition colorée des différentes images, vectoriser les contours du plan de chaque année et valider les vectorisations. En ce qui concerne la composition colorée les bandes utilisées sont respectivement les bandes 4,5 et 6, pour l'image satellitaire de 2018 et 3,4 et 5 pour les images de 2011 et 1986. Ces bandes ont été utilisées respectivement pour les canaux rouge, vert et bleu. Cette classification fait ressortir au mieux les différentes entités de l'image.

Le contour du cours d'eau a été délimité par digitalisation (vectorisation) au moyen du logiciel ArcGIS. La digitalisation a consisté, à partir de chaque image utilisée, à repasser sur les contours du cours d'eau.

Une validation des couches de la vectorisation s'impose après la réalisation des celles-ci, afin d'apporter une crédibilité au travail effectué (Onétié *et al.*, 2016). Dans le cas d'un inventaire de zones humides, il est important de réduire au maximum les erreurs de digitalisation (Fernandez, 2014). Ainsi, les vectorisations des contours de 2011 et de 2018 ont été respectivement contrôlés avec l'ortho image du 03/12/2012 et l'image Google Earth du 19/01/2018. Pour ce faire, des segments parallèles à l'horizontale (transversaux) ont été tracés et mesurés en des endroits précis et facilement repérables de la carte, notamment les zones de courbure. Les segments transversaux permettent d'éviter les erreurs liées à la longueur des segments qui pourraient être engendrées par l'existence de différents angles de mesure. Les tracés ont été validés si et seulement si l'écart entre les longueurs des segments mesurés sur les

images de référence et les couches vectorisées sont inférieures à 5%. Dans le cas contraire les vectorisations sont reprises et les segments sont recalculés.

4.5.4.3. Calcul des surfaces

Après la validation de la carte, des sections ont été définies afin d'évaluer la zone la plus perturbée par le phénomène d'orpaillage. Au total cinq sections ont été définies sur le cours d'eau ; une section en amont de la zone d'étude, trois sections dans la zone d'étude et une section en aval de la zone d'étude. La superficie de chaque section du cours d'eau des trois années (1986, 2011 et 2018) a été déterminée avec le logiciel ArcGIS. Le schéma conceptuel de la méthode d'analyse de l'évolution interannuelle de la morphologie du lit du fleuve Cavally est présenté par la Figure 28.

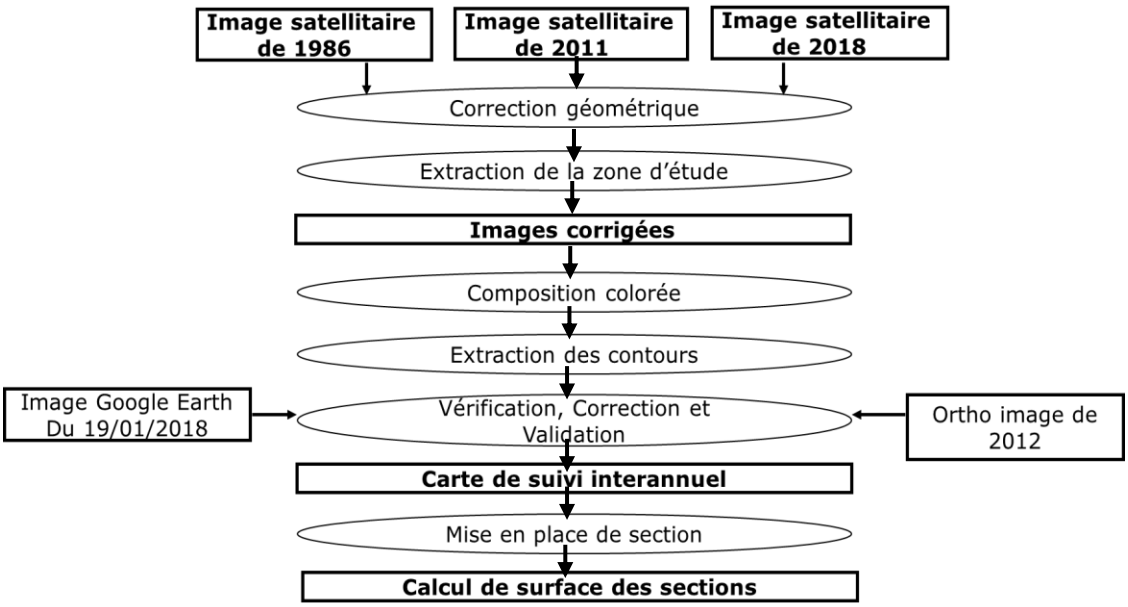


Figure 28 : Schéma conceptuel de la réalisation de l'évolution interannuel du lit du fleuve Cavally.

4.6. Dimensionnement des canaux de dérivation

Quatre (4) canaux de dérivation prévus sur le fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (SMI) ont été dimensionnés. Il s'agit des canaux de Bakatouo, Walter, Daapleu et Colline Sud. Parmi les quatre canaux dimensionnés, celui de Daapleu a déjà été réalisé et est fonctionnel. Ce canal va servir à la validation des paramètres hydrodynamiques simulés par le modèle.

La méthode utilisée pour le dimensionnement de ces canaux est basée sur la méthode du modèle rugueux de référence (MMR) décrit de la manière suivante (Achour & Bedjaoui, 2006 ; Achour & Sehtal, 2013) : connaissant le débit maximum ***Q*** que doit évacuer le canal, la pente

longitudinale ***j***, le fruit des berges ***m***, le coefficient de forme $\boldsymbol{\eta}$ et le coefficient de rugosité $\boldsymbol{\varepsilon}$ on calcule la base ***b*** par la méthode du modèle rugueux de référence. La hauteur ***H*** ne sera pas calculée avec le coefficient de correction, sinon le canal serait dès lors dimensionner comme une conduite fermée.

On sait que $\boldsymbol{Q = \Psi A \Rightarrow A = \frac{Q}{\Psi}}$ **(5. 60) or** $\boldsymbol{A = (b + mH)H}$ **(5. 61)**

Donc $bH + mH^2 - A = 0$ cette équation admet deux solutions $H_1 et\ H_2$

$\boldsymbol{H_1 = \frac{-b-\sqrt{b^2+4mA}}{2m} < 0}$ **(5. 62)** **et** $\boldsymbol{H_2 = \frac{-b+\sqrt{b^2+4mA}}{2m} > 0}$ **(5. 63)**

$$\boldsymbol{y = H_2 + \eta b = \frac{-b+\sqrt{b^2+4m\frac{Q}{\Psi}}}{2m} + \eta b} \quad \textbf{(5. 64)}$$

Où y est la hauteur du canal sans la revanche.

Les canaux de dérivation sont dimensionnés avec les critères suivants :

- une période de retour de 2 ans soit un débit de 246 m^3/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^3/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.

Le coefficient de forme est obtenu à partir des sections transversales du canal naturel en amont et en aval du canal de détournement. La Figure 29 présente respectivement les sections transversales amont et aval au niveau du méandre de Daapleu.

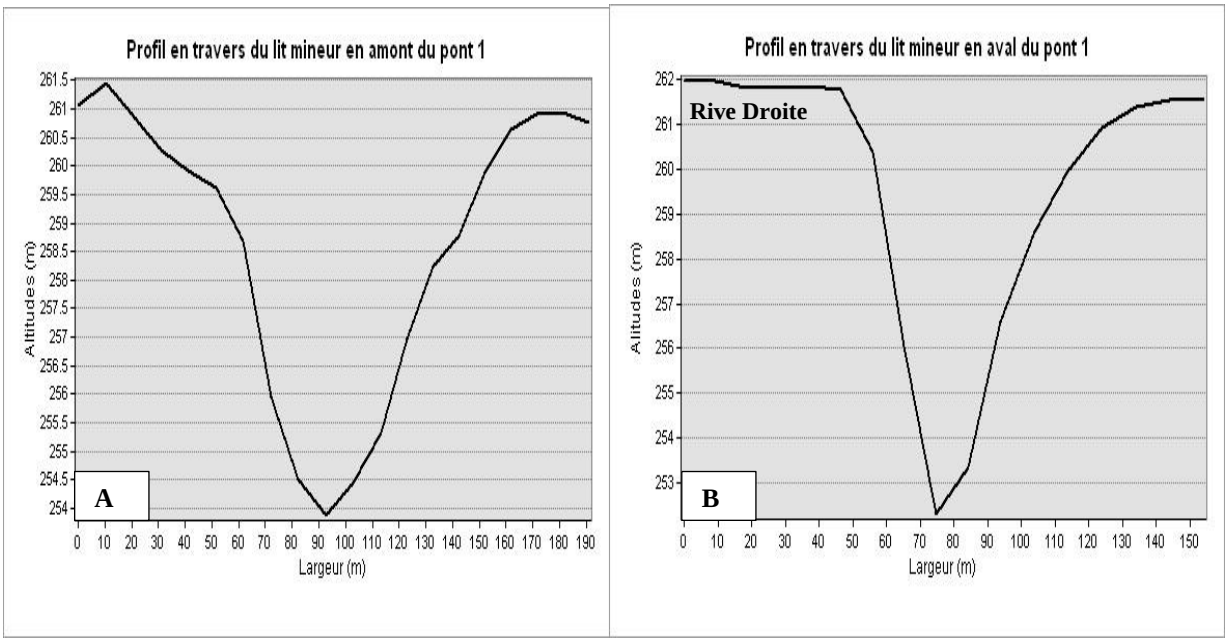


Figure 29 : Section transversale du lit mineur amont (A) et aval (B) au niveau du méandre de Daapleu.

La morphologie des sections transversales amont et aval est présentée par la Figure 30.

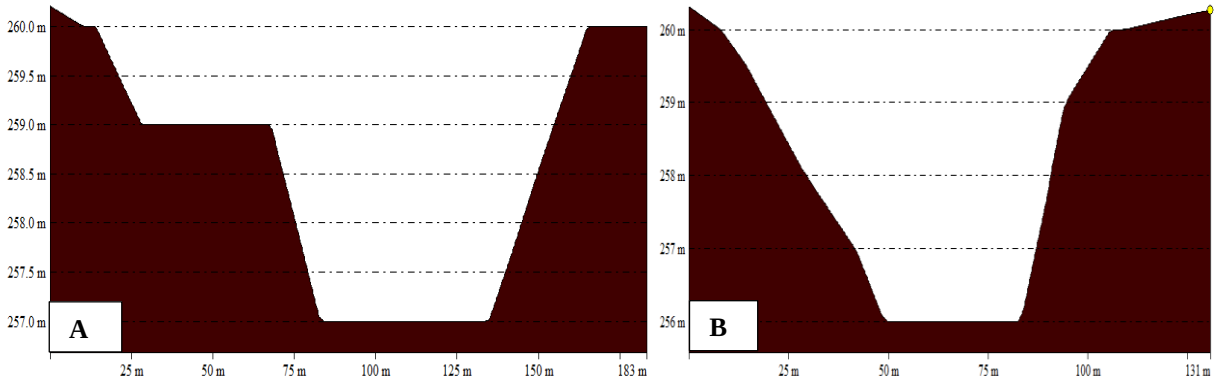


Figure 30 : Section transversale du lit mineur amont (A) et aval (B) du Cavally au niveau du méandre Colline Sud.

Pour éviter de perturber l'écoulement dans la zone de coupure du méandre un ouvrage ayant une géométrie similaire à la section du fleuve a été dimensionné de façon à respecter les conditions naturelles du fleuve Cavally. Tous les canaux dimensionnés sont de forme trapézoidale isocèle avec les caractéristiques géométriques suivantes (Figure 31).

Le choix des canaux à section trapézoïdale réside dans le fait que le lit mineur du fleuve épouse les caractéristiques géométriques similaires à un canal trapézoïdal, en référence aux observations effectuées lors des différentes campagnes de collecte des données de terrain.

✓ Section mouillée

$$S = by + my^2 = (b + my)y \quad \textbf{(5. 65)}$$

✓ Périmètre mouillé

$$P_m = b + 2y\sqrt{1+m^2} \quad \textbf{(5. 66)}$$

posons

$$m = 2\sqrt{1+m^2} \Rightarrow P = b + my$$

Avec :

b : largeur du fond du canal

m : fruit de berge

B : largeur au miroir

Rev : revanche

Y : tirant d'eau

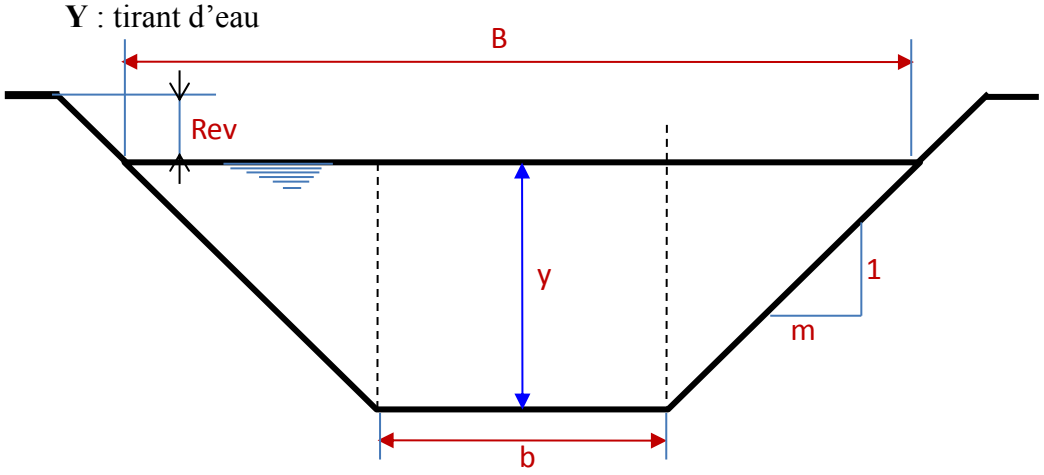


Figure 31 : Géométrie du canal de dérivation.

4.7. Modélisation du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques

Dans cette partie il s'agit de présenter les différentes méthodes de modélisation hydraulique utilisées dans le cadre de cette étude. Il s'agit entre autres, de la modélisation de la propagation des crues sur une section du fleuve Cavally dans la localité d'Ity dans les conditions initiales de ce fleuve et de la simulation des écoulements intégrant les ouvrages hydrauliques.

4.7.1. Choix du modèle hydraulique

La comparaison effectuée par Horritt & Bates (2002) entre LISFLOOD-FP, HEC-RAS et Telemac 2D a mis en évidence les bons résultats du logiciel HEC-RAS, qui obtient des résultats d'une précision comparable à ceux de Telemac 2D en ce qui concerne l'extension spatiale du champs d'inondation et la propagation de l'onde de crue. De plus, ces dernières années plusieurs travaux ont été menés avec le logiciel HEC-RAS aussi bien dans le domaine des écoulements en rivière 1D (Kasuri, 2014 ; Lahsaini & Tabyaoui, 2018) que dans le domaine de la propagation

des crues 2D (Timbadiya *et al.*, 2011 ; Parhi *et al.*, 2012 ; Parhi, 2013 ; Ngo, 2014). Mieux, le logiciel HEC-RAS est libre d'accès. Il est disponible sur le site internet : https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/.

4.7.2. Modélisation de la propagation des crues avant la construction des ouvrages hydrauliques

La modélisation de la propagation des crues se fait de manière générale en deux (2) dimensions (2D). Cette méthode permet de mieux apprécier la distribution spatiale de l'inondation en faisant 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'eau.

4.7.2.1. Equations du modèle 2D

Les équations dites « de Barré de Saint-Venant », publiées en 1871 occupent aujourd'hui une place primordiale dans les études en hydraulique maritime ou fluviale. Ces équations décrivent des écoulements à surface libre en eaux peu profondes, d'où leur appellation anglaise « Shallow Water Equations ». Elles sont obtenues à partir d'une intégration verticale des équations 3D de Navier-Stockes en utilisant l'hypothèse de pression hydrostatique et l'approximation de Boussinesq. Les écoulements dans cette étude sont considérés non permanents compte tenu de la variation des paramètres hydrauliques et hydrologiques (débits, niveaux d'eau, profondeurs et vitesses) en fonction du temps. Les équations de continuité (5.70) et de quantité de mouvement (5.71 et 5.72) constituent les équations utilisées dans travail et se formulent comme suit :

Equation de continuité

$$\frac{\partial}{\partial x}(hu)+\frac{\partial}{\partial y}(hv)+\frac{\partial}{\partial t}H+q=0 \qquad \textbf{(5. 67)}$$

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

Equation de quantité de mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial H}{\partial x}+v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)-c_f u \qquad \textbf{(5. 68)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial H}{\partial y}+v_t\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)-c_f v \qquad \textbf{(5. 69)}$$

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

Les résultats se présentent sous la forme suivante : l'évolution de la hauteur d'eau et du débit pendant la simulation au niveau de chaque section transversale, qui sert de maille lors de la résolution mathématique. En effet, ces équations sont résolues grâce à la méthode des volumes finis qui consiste à approximer les dérivées partielles à l'aide d'un maillage constitué de petits volumes disjoints (volumes de contrôle) dont la réunion constitue le domaine d'étude. Le point de départ de cette méthode est la forme intégrale des équations de conservation, celle-ci est appliquée à chacun de ces volumes de contrôle. Les variables sont calculées au centre de chaque volume de contrôle nommé nœud. De plus, pour la discrétisation en fonction du temps nous avons choisi un schéma implicite. La résolution de ces équations par la méthode des volumes finis nécessite des conditions initiales et des conditions aux limites.

4.7.2.2. Conditions initiales

La simulation s'est faite sur 16 jours. 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 utilisés. Ensuite on renseigne quatre autres temps soit un intervalle de temps d'entrée et un intervalle de temps de fin. Dans les calculs on a utilisé un pas de temps variable en fonction des objectifs visés. Les simulations sont menées 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. En fonction du pas de temps défini, la simulation peut durer de quelques minutes à plusieurs jours. Le processus de modélisation de la propagation des crues dans la zone d'Ity est résumé à partir de la Figure 32.

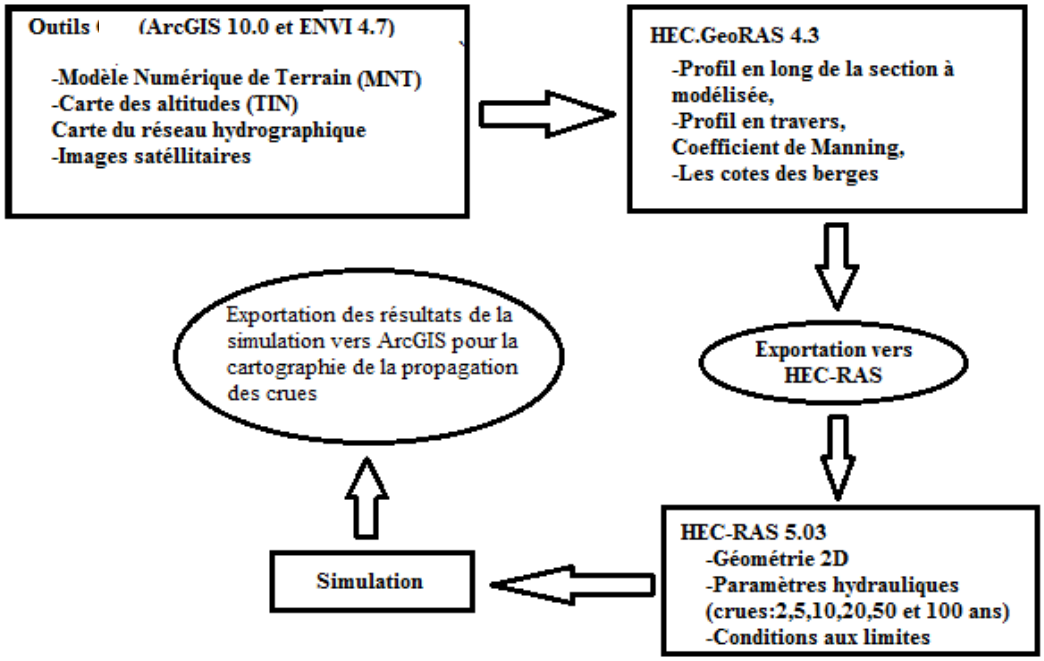


Figure 32 : Processus de modélisation des crues sur une section du fleuve Cavally.

Les conditions aux limites ont été les suivantes :

- En entrée, les débits de crue des différentes périodes de retour sont imposés en amont de la section pour la simulation en écoulement permanent et l'hydrogramme de crue de 1988 (Figure 33) a été utilisé pour la simulation en écoulement non permanent au niveau de la station hydrométrique d'Ity ;
- En sortie, la pente du fond du lit du fleuve Cavally ; soit 0,000194 m/m mesurée à partir du profil en long du cours d'eau a été retenue.

Les débits de crue des différentes périodes de retour imposés en amont de la section étudiée pour la simulation en écoulement permanent sont consignés dans le Tableau VIII.

Tableau VIII : Débits des périodes de retour.

Période de retour (Ans)	***Débits (m^3/s)***
100	365
50	353
20	334
10	316

L'hydrogramme de crue de l'année 1988 utilisé pour la simulation des écoulements non permanents a été imposé à la station hydrométriques d'Ity (Figure 33).

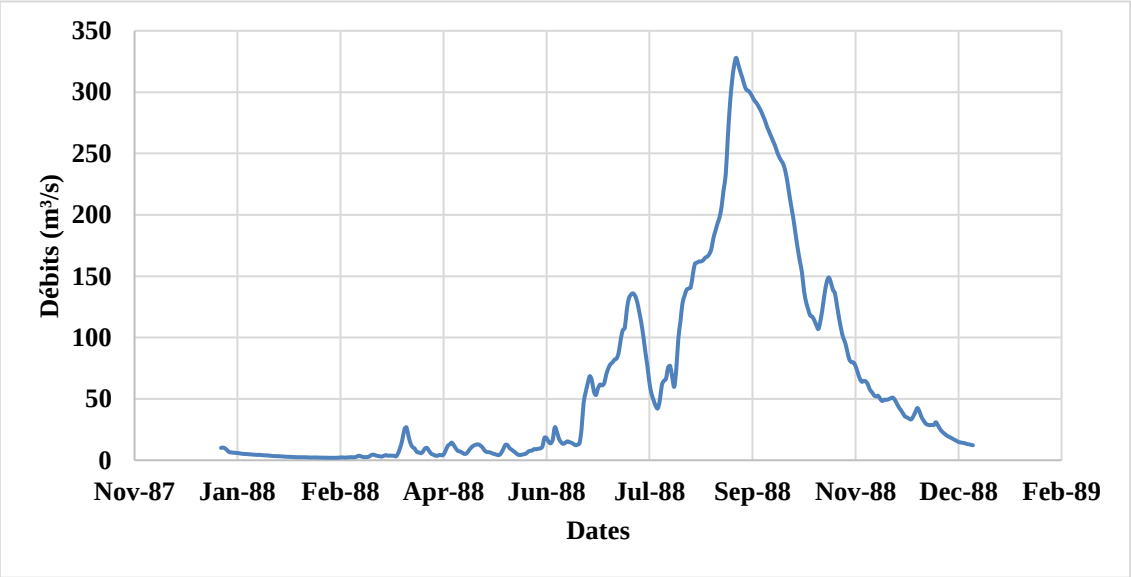


Figure 33 : Hydrogramme de crue de 1988 à la station hydrométrique d'Ity.

4.7.2.3. Calage et validation du modèle

Les débits de l'année 1988 ont servi au calage, car la plus grande crue a été observée durant cette année. Les niveaux d'eau et les débits collectés au cours des campagnes réalisées sur les périodes de juillet à novembre 2015 et de septembre à octobre 2018 ont servi à la validation du modèle. Ces campagnes ont été effectuées en période de crue du Cavally.

4.7.2.3.1. Calage du modèle de propagation des crues

Les données utilisées pour l'étalonnage du modèle sont :

- les débits moyens journaliers enregistrés durant l'année 1988 (année où la plus grande crue a été observée, d'où la crue de référence) ;
- la pente du fond du canal du fleuve Cavally qui est de 0,000194 m/m.

La calibration a été faite de façon itérative en faisant varier la valeur des coefficients de Manning jusqu'à ce qu'il y ait une concordance satisfaisante entre les hydrogrammes des débits observés et simulés à la station hydrométrique d'Ity. Un pas de temps d'une heure (1h) a été imposé lors de la simulation. En effet, après plusieurs essais à différents pas de temps, c'est ce pas de temps (1h) qui offrait moins d'instabilité dans la simulation.

Les valeurs de coefficient de Manning (0,052 $s/m^{1/3}$) pour le lit mineur et 0,06 $s/m^{1/3}$ pour le lit majeur ont été retenues. Ce choix est basé aussi bien sur les travaux déjà effectuées dans la littérature (Chow, 1959 ; Noarayanan *et al.*, 2012), que sur les analyses granulométriques issues

des prélèvements d'échantillons de sédiments dans le lit mineur et au niveau des rives du Cavally (Figure 34). A la fin de la simulation le modèle génère des profondeurs, des vitesses et des niveaux d'eaux suivant la direction x et y.

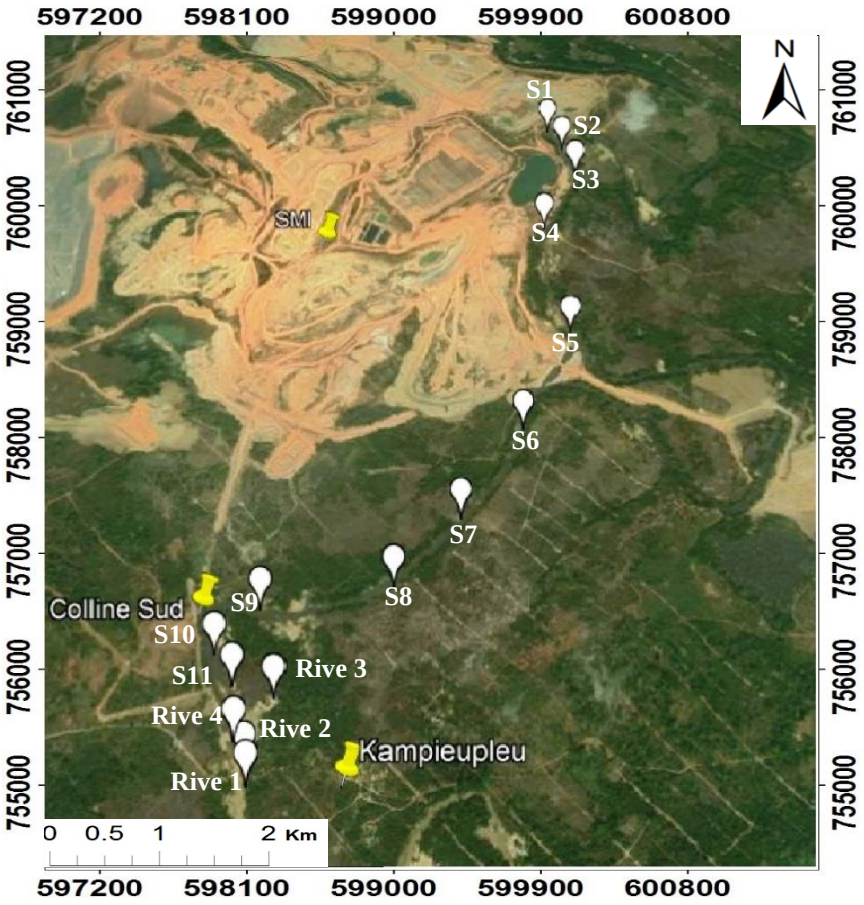


Figure 34 : Points de prélèvement des échantillons de sédiments.

Les échantillons de sédiments prélevés ont permis de déterminer les paramètres granulométriques à partir des analyses granulométriques. Ces différentes variables ont été déterminées à l'aide des méthodes de Folk & Ward (1957) et de Friedman (1962). Il s'agit de la moyenne granulométrique, de l'indice de classement et de l'asymétrie ou du skewness. Toutefois, dans le cadre de cette étude la moyenne granulométrique a été déterminante dans le choix des coefficients de Manning.

- **Moyenne granulométrique (M_Z)**

La moyenne granulométrique est calculée à partir de l'équation (5.73) :

$$M_Z = \frac{d_{16} + d_{50} + d_{84}}{3} \qquad \textbf{(5.70)}$$

Où *d* représente le diamètre des particules. Par exemple d_{16} est le diamètre des particules correspondant à un pourcentage pondéral de 16%.

La moyenne permet de définir les faciès granulométriques suivants :

- silts et argiles : Mz <63 µm ;
- sables très fins : 63 µm <Mz < 125 µm ;
- sables fins : 125 µm <Mz< 250 µm ;
- sables moyens : 250 µm <Mz <500 µm ;
- sables grossiers : Mz> 500 µm.

La moyenne permet de déterminer le type de sable en utilisant la classification de Friedman (1967). Cet indice donne une idée de l'énergie du milieu (Reineck & Singh, 1980), mais il est également influencé par la granulométrie du sédiment source (Sahu, 1964 ; Folk, 1966 ; Lenoir, 2011).

- **Construction des courbes granulométriques**

Les courbes cumulatives semi-logarithmiques ont été utilisées pour représenter les paramètres granulométriques. La courbe cumulative semi-logarithmique s'obtient en portant en ordonnée les refus cumulés de chaque tamis. Sur l'axe des abscisses ayant une graduation logarithmique sont les diamètres des tamis. La courbe semi-logarithmique fournit une image plus fidèle du dépôt des sédiments par un courant d'eau dont la vitesse décroît ; puisqu'elle représente d'abord les sédiments grossiers qui se sont déposés les premiers, puis les sédiments fins constituant le terme ultime du dépôt. De plus, ce mode de représentation est très pratique parce que, lorsqu'il n'y a qu'un petit nombre d'échantillon à comparer, l'examen direct des courbes granulométriques permet de séparer des classes granulométriques et de faciliter l'interprétation sédimentologique (Kouassi, 2007 ; Mélèdje, 2016).

4.7.2.3.2. Validation du modèle de propagation des crues

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. Ainsi, les niveaux d'eau et les débits mesurés au cours des campagnes réalisées sur les périodes de juillet à novembre 2015 et de septembre à octobre 2018 ont-ils servi à la validation du modèle. Ces campagnes ont été effectuées en période de crue du Cavally.

4.7.2.4. Evaluation de la performance du modèle de propagation des crues

Trois critères numériques (le coefficient de Nash-Sutcliffe, le coefficient de corrélation et le pourcentage d'erreurs calculés à partir des équations (5. 74) et (5. 75) respectives) et un critère graphique (Hydrogrammes) ont permis la validation du modèle. Ces équations sont respectivement les indicateurs de performance et de précision effectués sur les valeurs observées et les valeurs simulées des débits. Ces hydrogrammes permettent d'apprécier l'allure entre les débits simulés et observés (Kouassi, 2007 ; Kouadio, 2011 ; Yao, 2015).

Coefficient de Nash : $$\boldsymbol{NTD = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(q_{ci} - q_{oi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(q_{oi} - \overline{q}_o)^2}}} \quad \textbf{(5.71)}$$

Coefficient de corrélation : $$\boldsymbol{R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(q_{ci} - \overline{q}_c) - (q_{oi} - q_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(q_{ci} - \overline{q}_c)^2 \sum_{i=1}^{n}(q_{oi} - \overline{q}_o)^2}}} \quad \textbf{(5.72)}$$

Où :

q_{ci} **et** q_{oi} sont les débits respectifs calculés et observés au jour *i*, $\overline{q_c}$et $\overline{q_o}$sont les moyennes respectives de q_{ci} et q_{oi} sur les *n* jours.

Les pourcentages d'erreur (5. 76) sont calculés à partir des volumes cumulés en entrée et en sortie du modèle.

$$\%\ \boldsymbol{erreur = \frac{Volume\ d'eau\ entré - Volume\ d'eau\ sorti}{Volume\ d'eau\ entré} \times 100} \quad \textbf{(5.73)}$$

4.7.2.5. Discrétisation du modèle de propagation des crues

Le maillage utilisé couvre la portion du fleuve Cavally depuis l'amont du méandre de Bakatouo jusqu'à l'exutoire à la station de Floleu.

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. La limite de la zone 2D, a été d'abord définie. Ensuite, les conditions aux limites en amont et en aval à l'aide de lignes tracée pour matérialiser l'entrée et la sortie du flux, ont été également définies. Celles-ci ont été placées au même endroit que les sections en amont et en aval du modèle. Dans ce maillage 2D, l'espacement initial de cellules carrées de 30 m x 30 m a été fixé. Cependant, autour du périmètre de la zone 2D, le modèle génère automatiquement des cellules de forme irrégulière pour s'adapter aux bordures afin de mieux obtenir une forme géométrique qui s'apparente à la forme dessinée par le modélisateur. Cette technique a pour but de faciliter et de réduire le temps de

simulation. Le domaine étudié comporte un nombre total de 23 486 mailles et couvre une superficie totale de 21,13 km^2 (Figure 35).

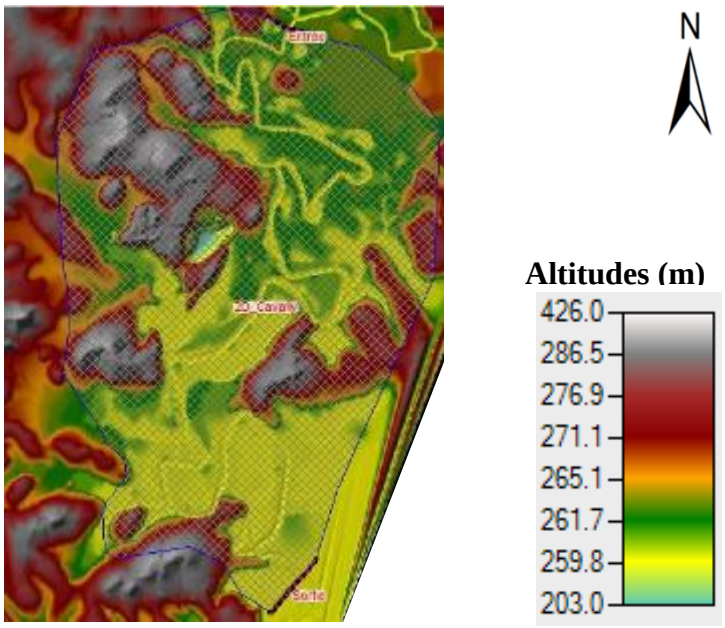


Figure 35 : Surface maillée pour la modélisation de la propagation des crues dans les conditions initiales.

4.7.3. Modélisation des écoulements du fleuve Cavally après la construction des ouvrages hydrauliques dans le périmètre d'exploitation de la SMI

Le modèle HEC-RAS ne fait pas la modélisation des ouvrages hydrauliques (ponts, canal de dérivation…) en 2D. Cependant, il est possible de modifier le terrain naturel à l'aide du logiciel AutoCAD Civil 3D et de trianguler sur le logiciel Global Mapper pour obtenir un nouveau modèle numérique d'élévation. Ainsi, dans la zone de coupure des méandres du cours d'eau, le terrain naturel a été modifié (Figure 36) en tenant compte des caractéristiques géométriques des canaux de dérivation et une simulation en écoulement permanent a été faite en tenant compte des débits de projet, afin de montrer l'influence des ouvrages hydrauliques sur l'étendue des zones inondables.

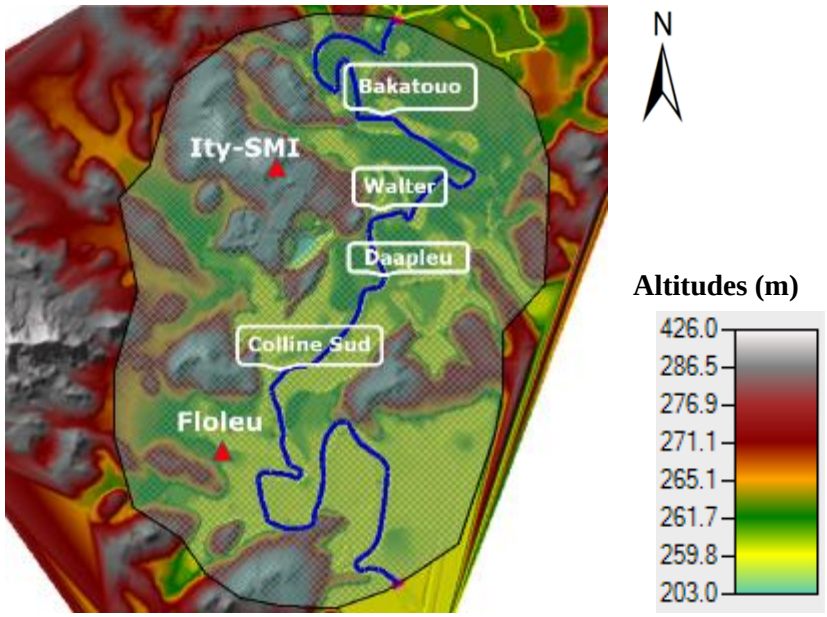


Figure 36 : Terrain naturel modifié au niveau des zones de coupure des méandres dans les conditions futures du fleuve Cavally.

- **Conditions aux limites**

Les conditions aux limites choisies sont : en amont, l'hydrogramme de crue de l'année 1988. Le choix de cette période s'explique par la cohérence des données et la crue la plus importante enregistrée sur la série chronologique des données, En aval, une pente S_f = 0,0035 m/m pour les canaux de dérivation. Dans le but de maintenir les conditions naturelles du cours d'eau nous avions maintenu la pente du terrain naturel dans la zone de coupure du méandre. Pour le cours d'eau une pente de fond S_f = 0,000194 m/m a été utilisée.

Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de présenter les différentes approches méthodologiques utilisées dans cette étude. Il s'agit de :

- la caractérisation de la variabilité hydro climatique du bassin versant du Cavally prenant en compte les extrêmes pluviométrique et hydrologique ;
- l'étude de l'occupation du sol tenant compte de l'évolution interannuelle de la morphologie du cours d'eau ;
- la modélisation pluie-débit par les réseaux de neurones artificiels ;
- du dimensionnement des canaux de dérivation sur le fleuve Cavally ;
- la modélisation du fonctionnement hydrologique du Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 5 : Variabilité hydro climatique dans le bassin versant du Cavally

Cette partie de l'étude présente les résultats de la variabilité hydro climatique obtenus à partir de différentes méthodes de caractérisation. Par ailleurs, les résultats issus du modèle pluie-débits à l'aide de réseaux de neurones artificiels pour le comblement des lacunes dans les séries de données seront d'abord présentés avant la présentation des résultats de la variabilité hydro climatique.

5.1.Modèle pluie-débit par les réseaux de neurones artificiels

Cette partie de l'étude a fait l'objet d'une publication scientifique et d'une communication en 2017 qui sont annexées à ce présent mémoire.

5.2.Structure du modèle de réseau de neurones artificiels (RNA)

En modélisation par les réseaux de neurones, pour éviter un sur apprentissage (modélisation du brut), les résultats obtenus à partir des données réservées à l'apprentissage doivent être validés sur un nouveau jeu de données. Le Tableau IX présente les critères d'évaluation de la performance du modèle en fonction de quatre (4) architectures (2-3-1, 2-4-1, 2-5-1 et 2-6-1) au niveau du calage et au niveau de la validation.

Tableau IX : Critères d'évaluation de la performance et du choix du modèle en fonction de 4 architectures (2-3-1, 2-4-1, 2-5-1 et 2-6-1) au niveau du calage et la validation.

			Architectures des modèles			
			2-3-1	2-4-1	2-5-1	2-6-1
Critères d'évaluation	**NASH**	**Calage**	**75,79**	74,18	73,68	74,21
		Validation	**73,33**	74,64	74,02	73,75
	Coefficient de corrélation	**Calage**	**95,64**	95,81	97,43	95,96
		Validation	**98,33**	98,4	96,93	98,86

Au regard de ce tableau, toutes les architectures donnent de meilleurs critères de performances conformément aux critères d'évaluation de la performance d'un modèle qui doivent être supérieurs à 60% pour le critère de NASH et 80% pour le coefficient de corrélation. Toutefois en modélisation des réseaux de neurones artificiels plus le nombre de couches cachées est élevé plus le modèle devient complexe et instable. Pour réduire ainsi cette complexité du modèle, il est nécessaire de faire le choix des modèles dont il y a moins de couches. De ce fait le modèle le plus approprié dans le cadre de cette étude est le modèle d'architecture 2-3-1.

5.3. Calage du modèle RNA

La Figure 37 présente la corrélation entre les débits observés et les débits simulés par le modèle 2-3-1 au niveau du calage. On remarque qu'il existe une bonne corrélation entre les débits observés et les débits simulés. Le modèle simule bien les débits au regard du coefficient de Nash qui est de 75,79%.

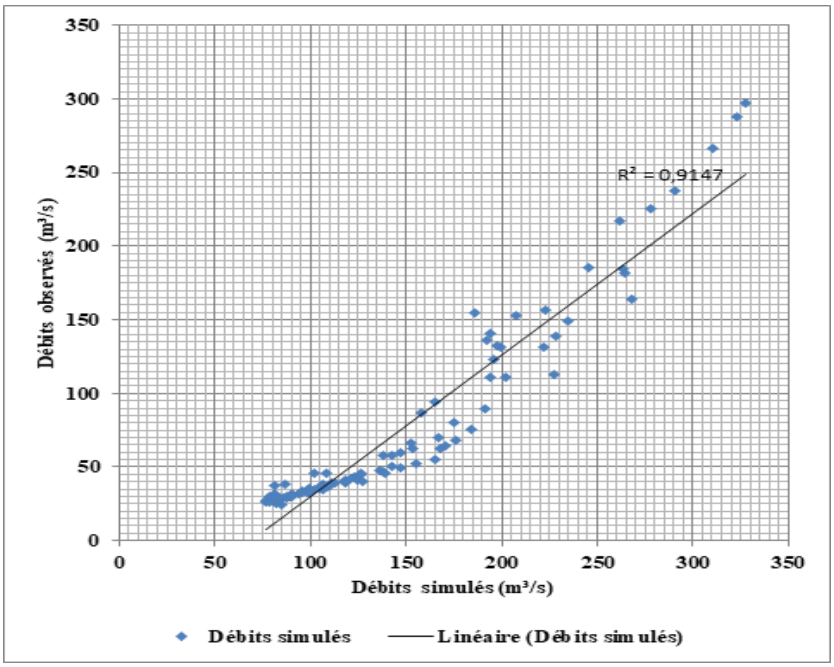


Figure 37 : Corrélation entre les débits observés et simulés de l'architecture 2-3-1 du modèle au niveau du calage.

5.4. Validation du modèle RNA

La Figure 38 présente la corrélation entre les débits observés et les débits simulés par le modèle 2-3-1 au niveau de la validation du modèle. Les valeurs des coefficients de Nash et de corrélation linéaire sont respectivement de de 73,32% et 98,33% ; ce qui montre que le modèle simule bien les Débits.

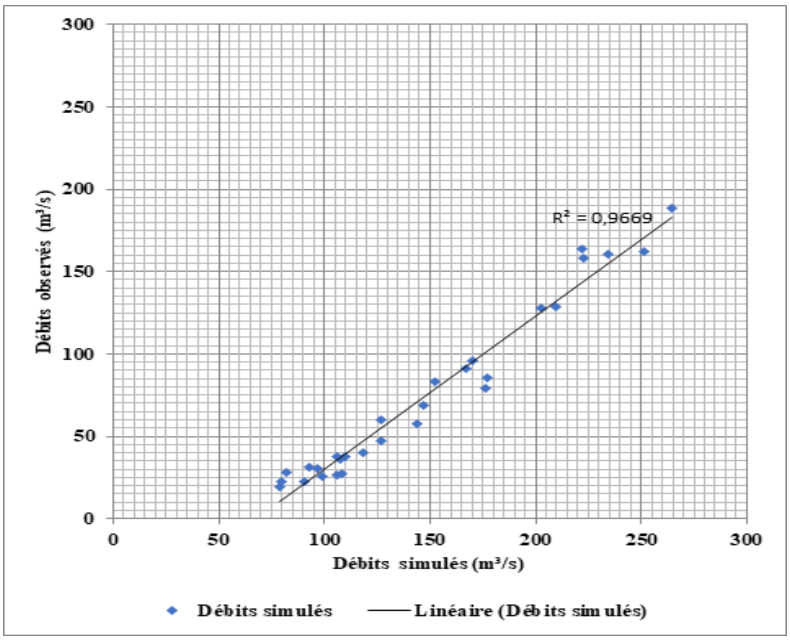


Figure 38 : Corrélation entre les débits observés et débits simulés au niveau de la validation.

On constate que le modèle 2-3-1 donne un coefficient de Nash supérieur à 60% et un coefficient de corrélation supérieur à 80% aussi bien en calage qu'en validation (Tableau X). Il ressort de l'analyse de ces résultats que le modèle 2-3-1 retenu présente de bons critères de performance.

Tableau X : Critères de performance du modèle de réseau de neurone artificiel de type 2-3-1.

Critères d'évaluation	***Calage***	***Validation***
Critère de Nash (%)	75,79	73,32
Coefficient de corrélation (%)	95,64	98,33

5.5.Résultats des débits simulés

Le modèle pluie-débit à l'aide des réseaux de neurone sur la période 1980-2001, a permis de combler les données de débits manquants dans la série chronologique et de les simuler sur la période 2001-2016 (Figure 39).

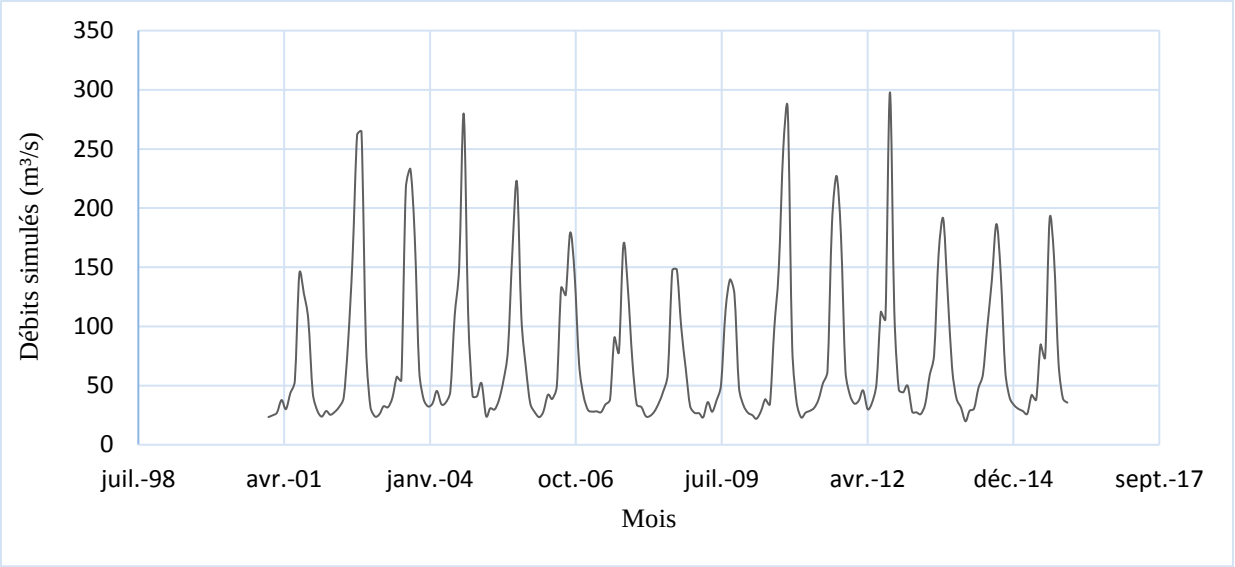


Figure 39 : Variation des débits simulés par le modèle (RNA) station d'Ity de 2001 à 2016.

5.6. Variation interannuelle pluviométrique et hydrologique

5.6.1. Variation interannuelle de la pluie

Le Tableau XI présente les caractéristiques statistiques des pluies annuelles des postes pluviométriques du sous bassin du Cavally à Floleu. Dans la zone d'étude, les pluies annuelles varient de 997,8 mm à 2320,9 mm pour une moyenne interannuelle de 1764±177,9 mm.

Tableau XI : Valeurs caractéristiques pluviométriques des stations du sous bassin du Cavally à Floleu.

Poste	Période	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart- type	Coeff. Var.
Nzérékoré	1970-2010	1186,3	1830,6	2274,5	195,9	0,17
Sipilou	1970-2010	1404,1	1704,9	2111,8	136,9	0,23
Danané	1970-2010	1670,3	1984,6	2320,9	164,6	0,2
Zouan-Hounien	1970-2010	997,8	1535,9	1961,7	214,2	0,14

5.6.2. Répartition de la pluie moyenne annuelle sur le bassin versant du Cavally

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des indices pluviométrique annuels au cours de la période 1970-2010, a permis de situer le bassin versant du Cavally dans son contexte spatio-

temporel (Figure 40). La pluviométrie dans le Nord et le Sud du bassin varie entre 1611 mm et 1757 mm, tandis que dans la partie centrale du bassin versant, elle oscille entre 1758 mm et 1970 mm. Les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités de pluie sur l'ensemble du bassin.

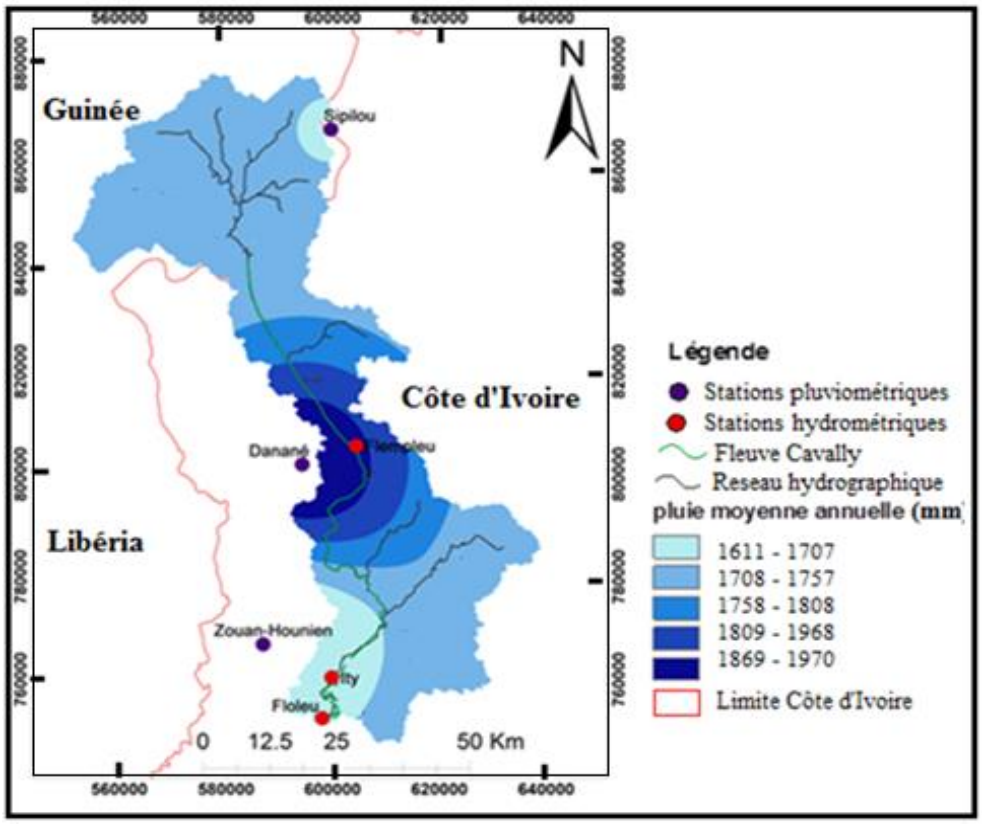


Figure 40 : Variation des hauteurs moyennes annuelles de pluie de 1970 à 2010.

5.6.3. Répartition de la pluviométrie moyenne décennale du bassin versant du Cavally

L'étude de la variabilité pluviométrique décennale à partir des isohyètes des décennies 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 et 2001-2010 montre une augmentation générale de la pluviométrie sur les 11 stations pluviométriques (Figure 41 et Figure 42) :

- la décennie 1971-1980 est marquée par la présence des isohyètes caractéristiques des hauteurs pluviométriques comprises entre 1500 mm et 1850 mm. Les stations pluviométriques de Toulepleu, Guiglo et Bangolo sont les seules qui enregistrent les plus basses précipitations (1500 mm) ; Les autres stations recevant des hauteurs de pluie comprises entre 1600 et 1850 mm ;
- la décennie 1981-1990 enregistre une augmentation de la pluviométrie avec l'apparition des isohyètes 1700 mm, 1850 mm et 1900 mm ;

- la décennie 1991-2000 enregistre aussi une augmentation de la pluviométrie avec l'apparition des isohyètes 1950 mm et 2000 mm dans la zone de Danané et de Taï ;
- la décennie 2001-2010 enregistre également une augmentation de la pluviométrie similaire à la décennie 1991-2000 avec l'apparition des isohyètes 1950 mm et 2000 mm.

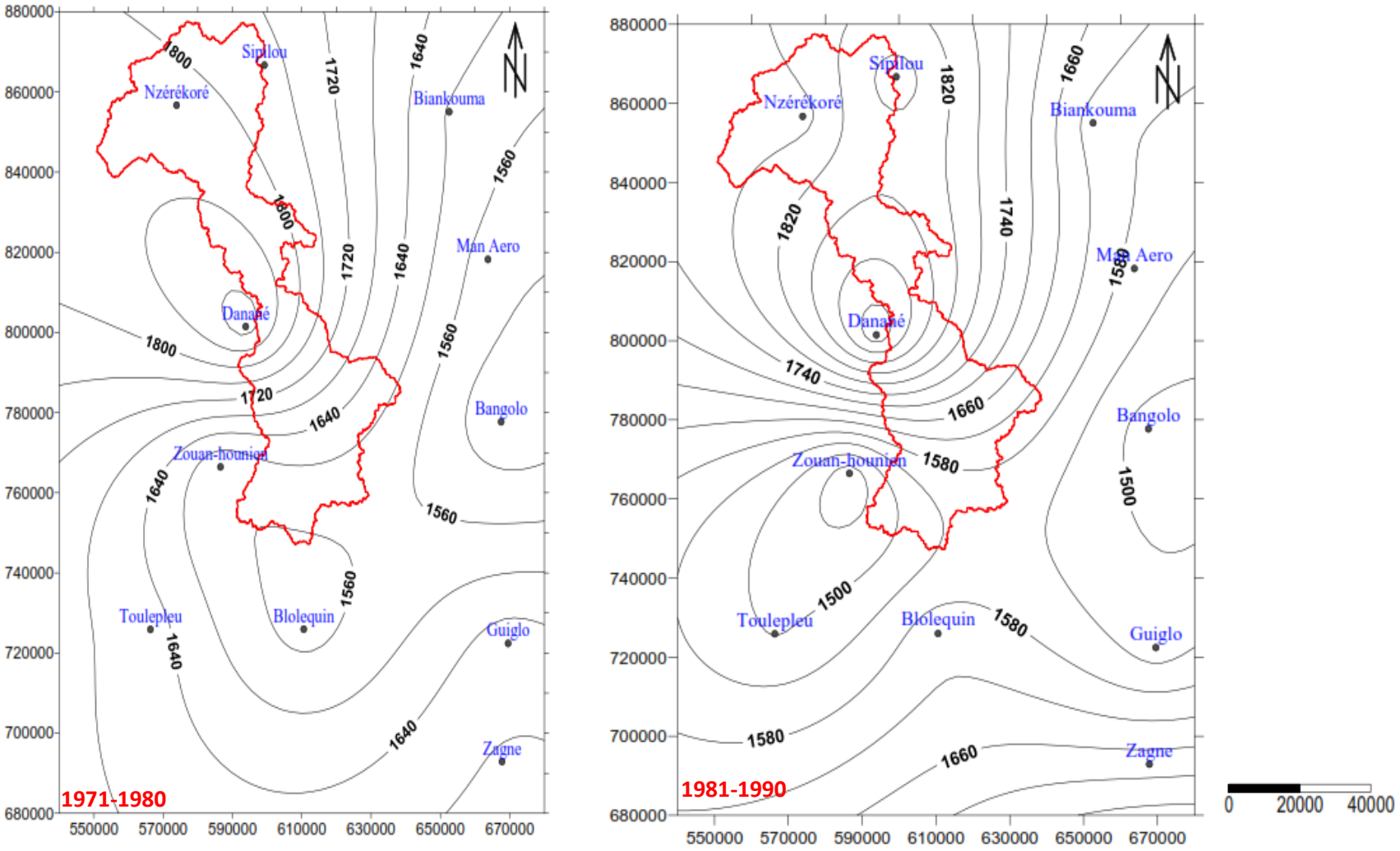


Figure 41 : Cartes des isohyètes décennales de 1971-1980 et 1981-1990.

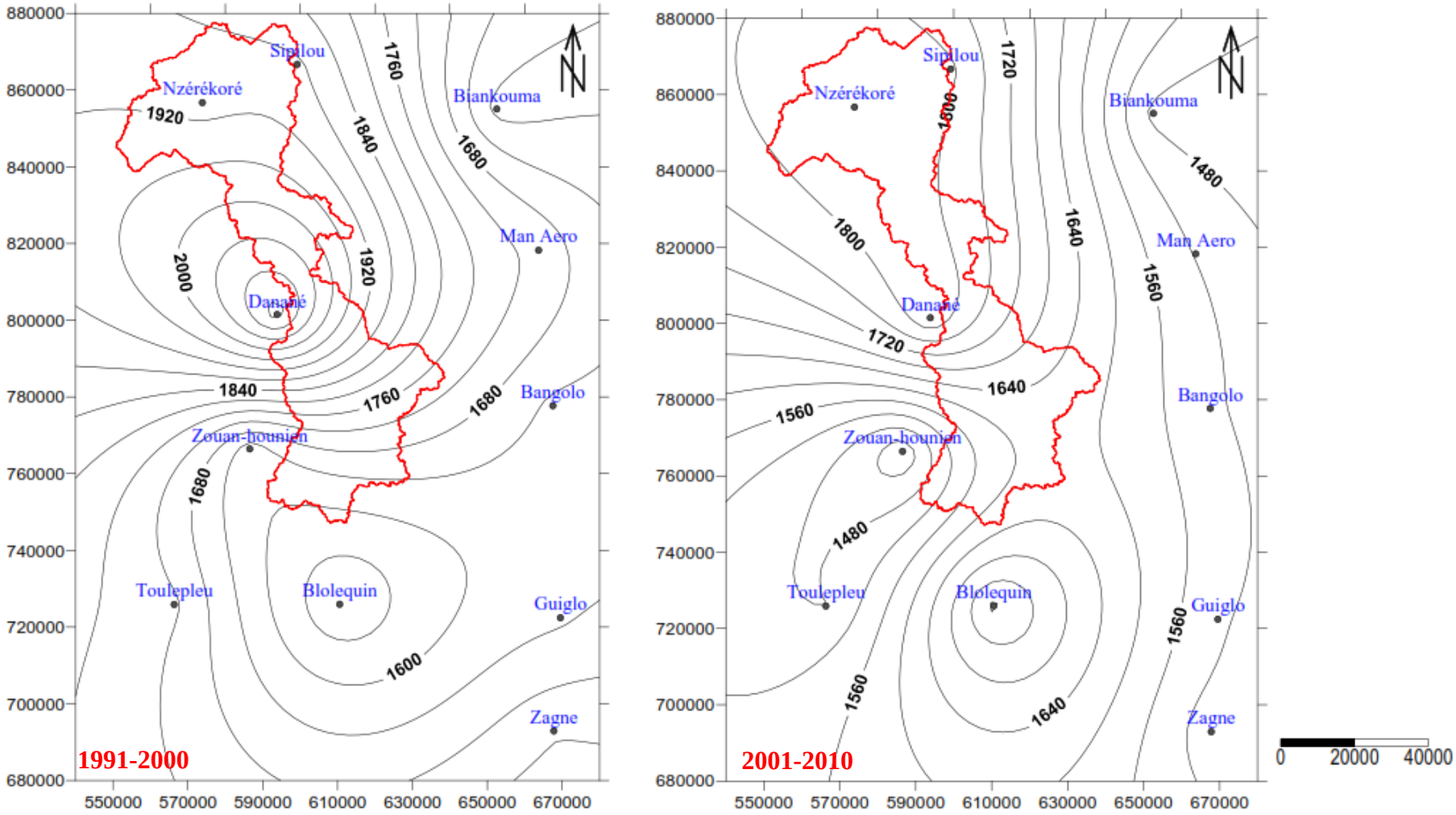


Figure 42 : Cartes des isohyètes décennales de 1991-2000 et 2001-2010.

5.6.4. Tendances pluviométriques sur le bassin versant du Cavally

On constate une variabilité interannuelle globalement excédentaire pour toutes les stations. Cependant, après 1970, on observe une sècheresse intense d'environ 6 années pour les stations de Danané, Zouan-Hounien et SMI-Ity (Figure 43).

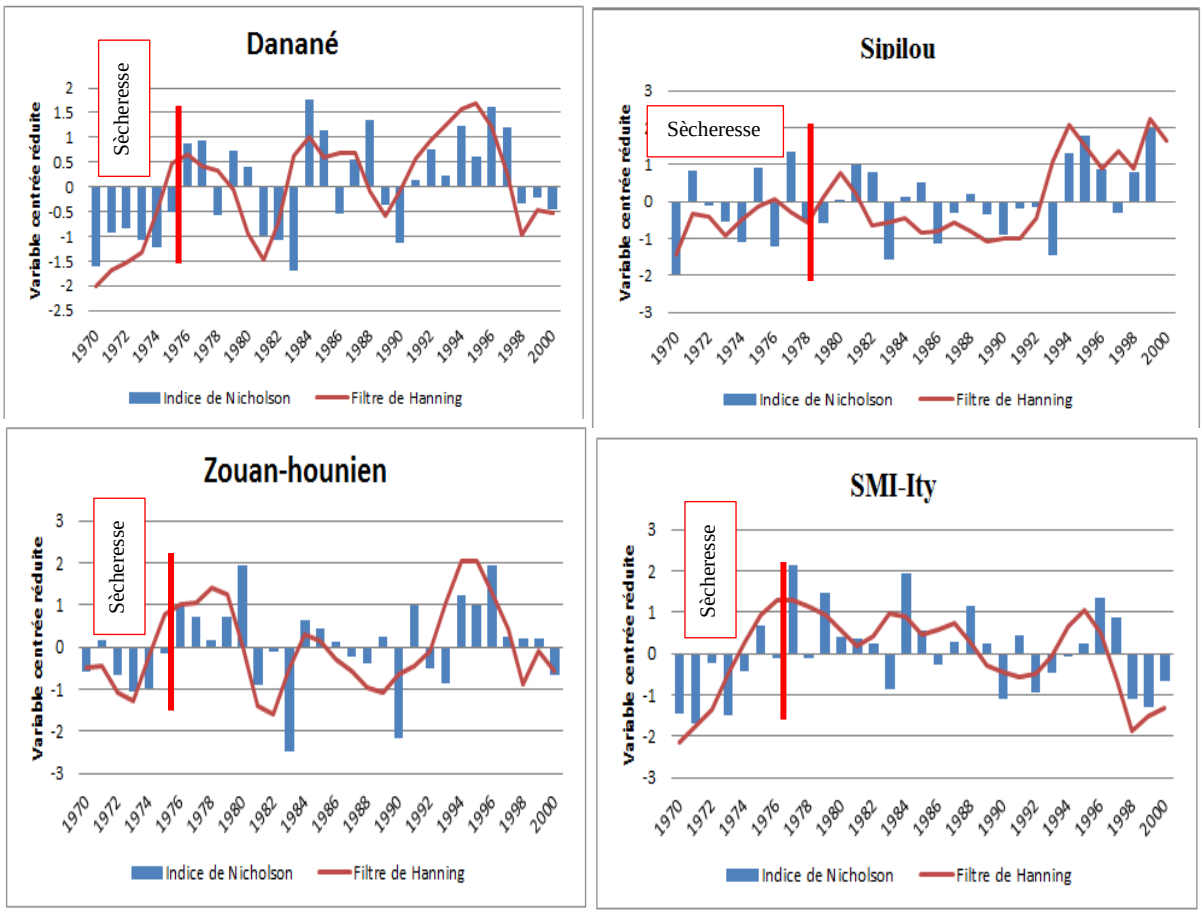


Figure 43 : Evolution de l'indice pluviométrique interannuel aux stations de Danané, Sipilou, Zouan-Hounien et SMI-Ity.

5.6.5. Nombre de jours et hauteurs de pluie annuelle

La station pluviométrique de Zouan-Hounien a été choisie pour caractériser la variation des jours et des hauteurs de pluie annuelle du bassin versant à cause de la consistance des données et de la longueur de sa série. La Figure 44 présente le nombre de jours de pluie en fonction de la hauteur de pluie annuelle. L'analyse de cette figure a montré que les données de cette station ont révélé qu'il pleut en moyenne 95 jours par an. La pluie moyenne annuelle est de 1588 mm sur la période de 1976 à 2010.

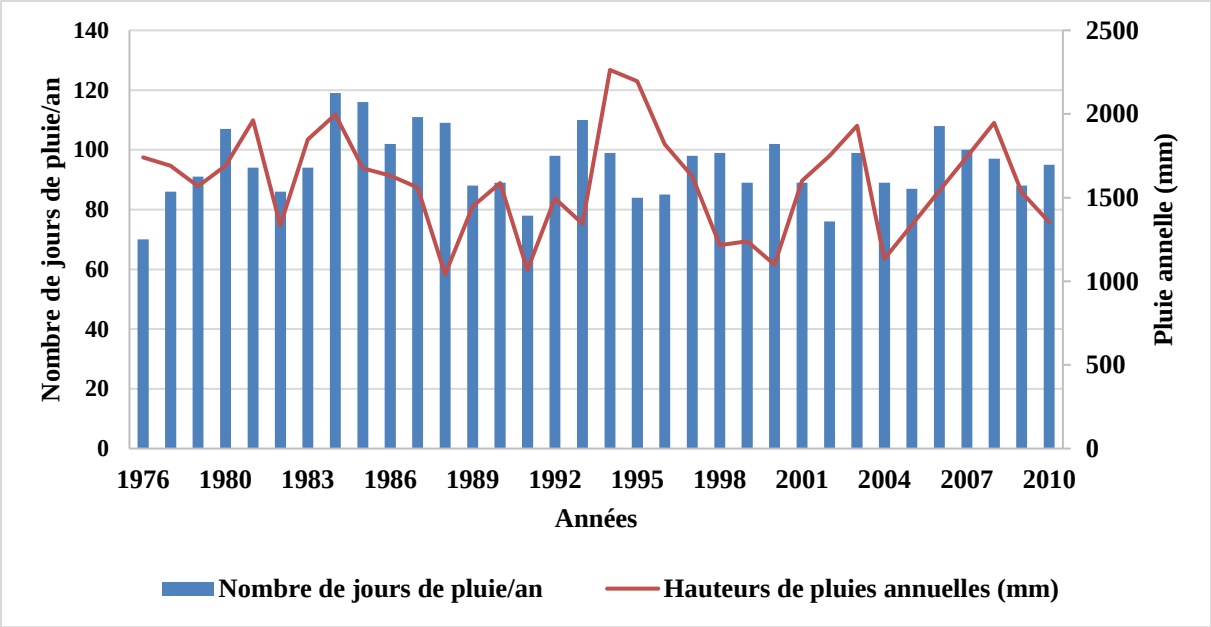


Figure 44 : Variation du nombre de jours de pluie en fonction de la hauteur de pluie annuelle à la station pluviométrique de Zouan-Hounien (1976-2010).

5.6.6. Variation interannuelle des écoulements du fleuve Cavally

La station de Flampleu a été choisie pour suivre la variabilité hydrologique du bassin versant du Cavally pour la longueur de sa série. L'évolution des indices centrés réduits et le filtrage de Hanning permet de distinguer les périodes de fluctuations des modules annuels de débits suivantes (Figure 45) :

- une période déficitaire de 1974 à 1991, marquée par une forte baisse des écoulements indiquant une période sèche ;
- une période excédentaire de 1992 à 1999, correspondant à une période humide marquée par une abondance des écoulements ;
- une période déficitaire de 2001 à 2011, indiquant une période sèche avec une baisse considérable des écoulements ;
- une période excédentaire de 2012 à 2015, annonçant un retour de l'humidité à la fin de la période d'observation.

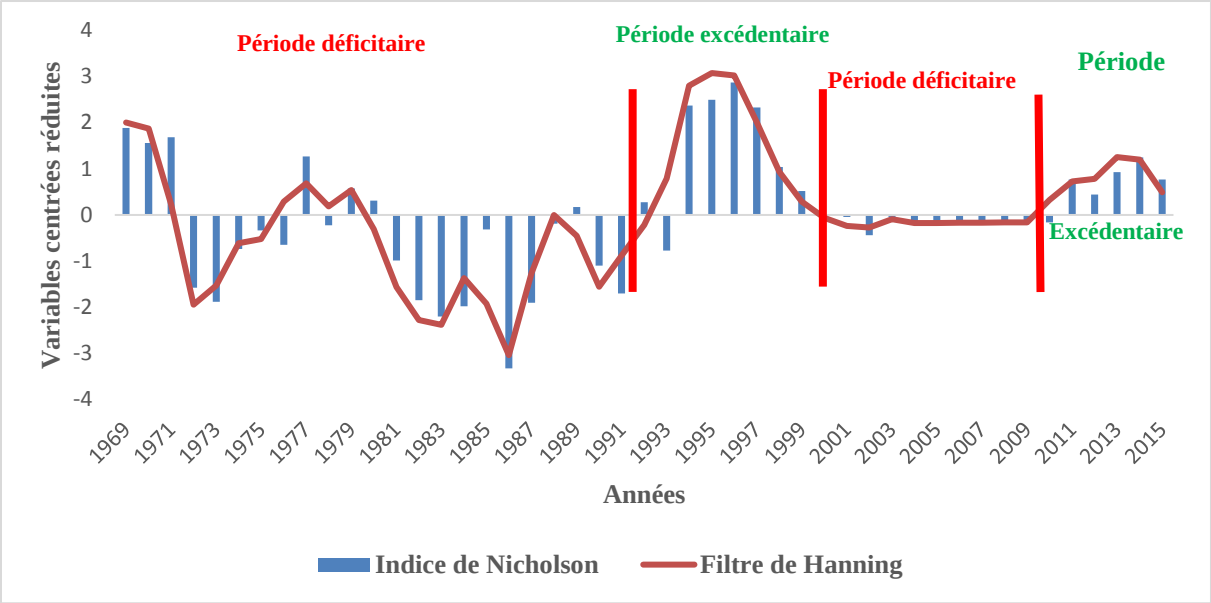


Figure 45 : Variation des modules annuels des débits du Cavally à Flampleu (1969-2015).

5.7. Analyse des extrêmes pluviométrique et hydrologique du bassin versant du fleuve Cavally

5.7.1. Extrêmes pluviométriques du bassin versant du Cavally

Dans cette partie de l'étude, il s'agit de présenter les résultats obtenus à partir des lois statistiques appliquées aux modules de pluies. Concernant, la chronique des données utilisées, la loi de Weibull à 3 paramètres s'ajuste bien aux modules de pluie maximale avec des critères de BIC et AIC faibles (Tableau XII).

Tableau XII : Lois statistiques appliquées.

Lois Statistiques	Nombre de paramètres	Critères de comparaison		Classement
		BIC	AIC	
Weibull	**3**	**427,69**	**424,83**	**1**
GEV	3	430,75	426,44	2
Gumbel	2	435,82	432,95	3

Le Tableau XIII présente les pluies annuelles en périodes sèche et humide pour différentes périodes de retour.

Tableau XIII : Pluies annuelles en périodes sèche et humide pour diverses périodes de retour.

Pluie annuelle estimée selon les périodes de retour (mm)							
Périodes de retour (ans)		**100**	**50**	**20**	**10**	**5**	**2**
Lois statistiques	**GEV**	1970	1940	1880	1810	1730	1550
	Gumbel	2510	2340	2120	1950	1780	1510
	Weibull	**1970**	**1930**	**1860**	**1800**	**1730**	**1560**

5.7.1.1. Pluie journalière maximale annuelle

Les fréquences expérimentales ont été déterminées à l'aide de l'expression de Hazen après un classement par ordre croissant (Figure 46).

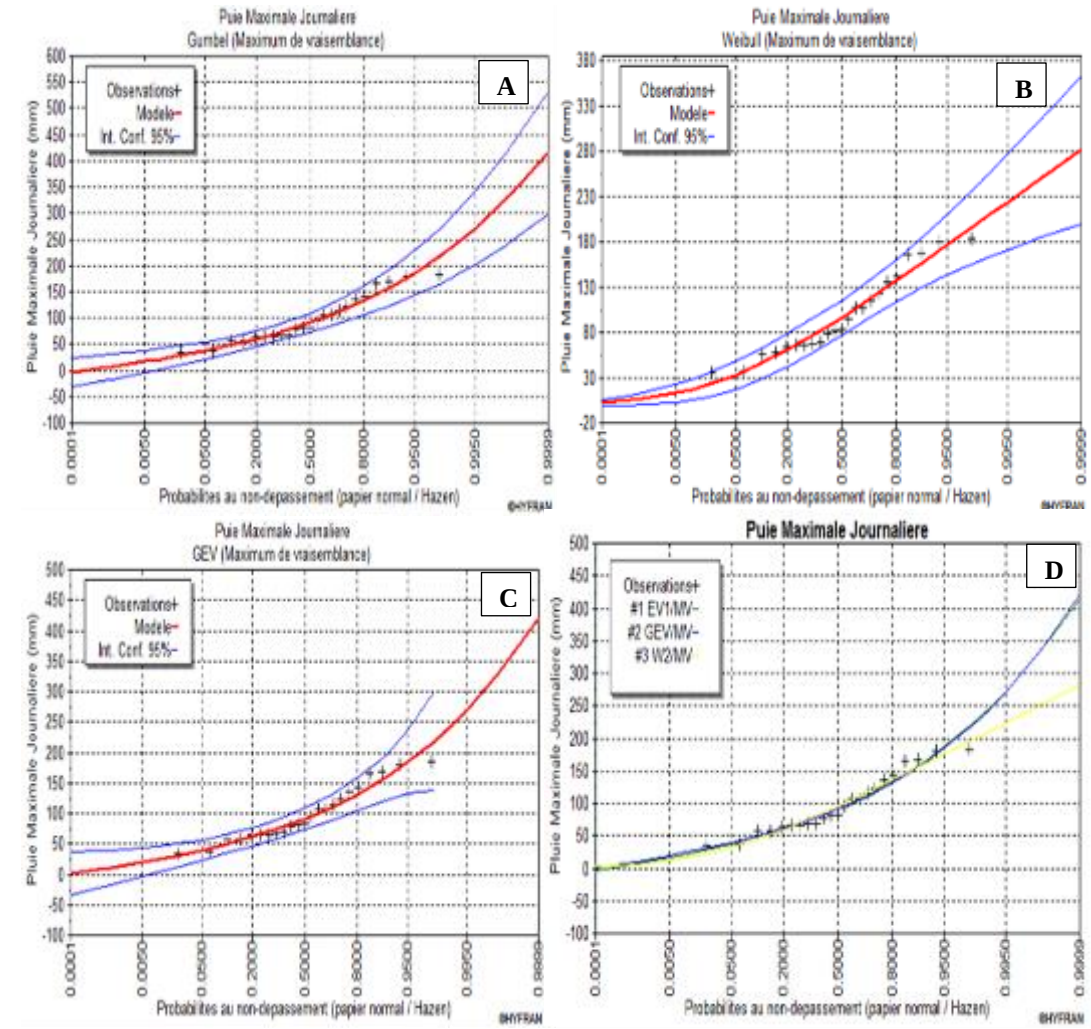


Figure 46 : Lois de Gumbel (A), Weibull (B) et GEV (C) ajustées et le critère de comparaison graphique (D) par la méthode du maximum de vraisemblance aux séries de pluies journalières de Zouan-Hounien.

Dans la zone d'étude, les pluies journalières de fréquences rares à l'échelle interannuelle ont été enregistrées le 12 août 1977 avec une hauteur de pluie de 184 mm à la station de Zouan-Hounien. Les valeurs des quantiles de période de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans ont été estimées par le biais de la méthode du maximum de vraisemblance pour la période allant de 1976 à 2000 exprimées en mm (Tableau XIV).

Tableau XIV : Pluies maximales journalières de différentes périodes de retour.

Poste pluviométrique	***Quantiles de pluie (mm)***					
	2 ans	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**50 ans**	**100 ans**
Zouan-Hounien	91.2	133	160	187	221	246

5.7.1.2.Extrêmes hydrologiques du bassin versant du fleuve Cavally

Les débits de projet de période de retour 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans ont été estimés statistiquement à partir d'un modèle fréquentiel qui sera choisi sur la base de critères donnés. Une illustration des résultats du critère de comparaison graphique (Figure 47 D) pour la station d'Ity est présentée par les graphiques de la Figure 47. D'après l'examen visuel par la méthode graphique, on remarque que les valeurs de débits maxima journaliers annuels à Ity sont bien corrélées à la loi de Weibull (W2, A) ; ce qui met en évidence un bon comportement comparé aux lois de Gumbel (EV1, B) et de GEV (GEV, C) (Figure 47) avec un intervalle de confiance de 95%.

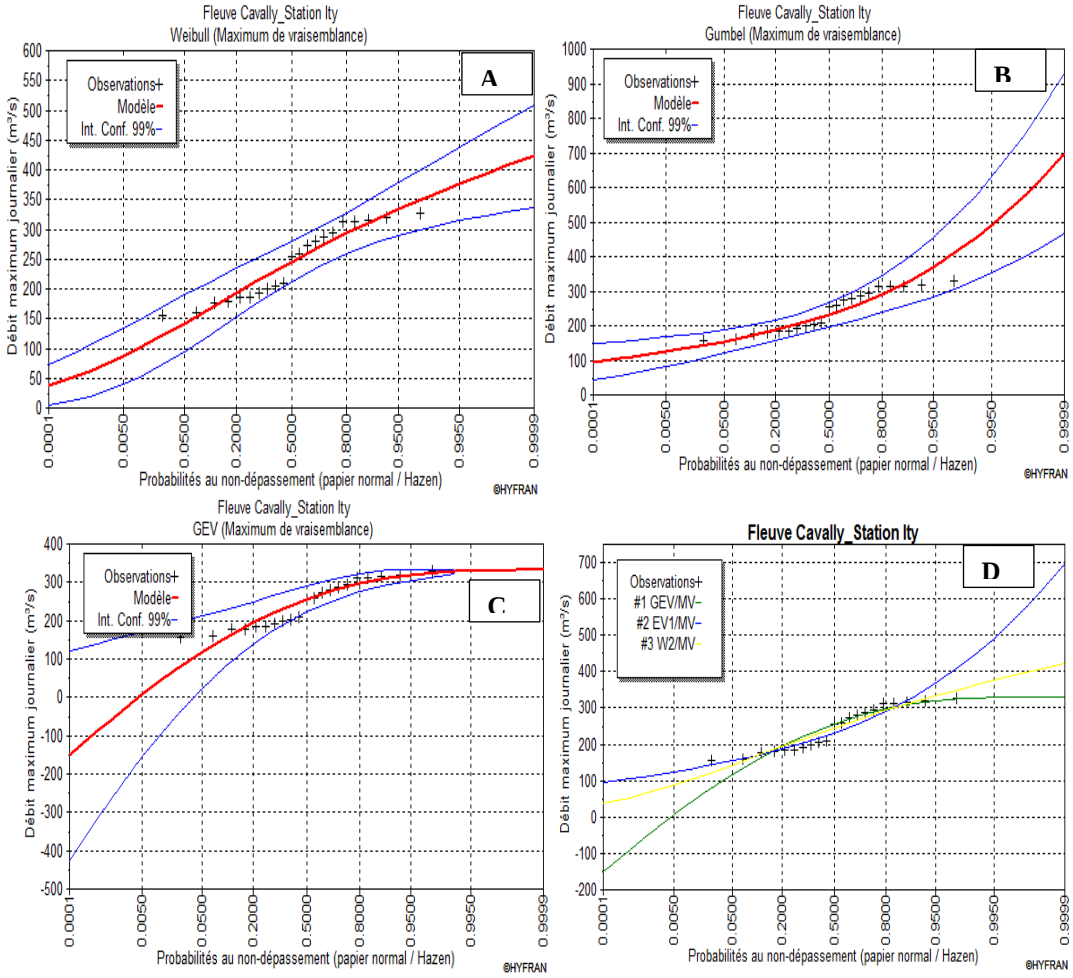


Figure 47 : Lois de Weibull (A), Gumbel (B) et GEV (C) ajustées et le critère de comparaison graphique (D) par la méthode du maximum de vraisemblance aux séries de débits maxima journaliers annuels de la station d'Ity.

Le Tableau XV présente le classement des lois ajustées aux séries de débits moyens annuels. D'après les critères de comparaison, c'est la loi de Weibull qui s'ajuste bien aux modules hydrologiques du fleuve Cavally ensuite, viens la loi de Gumbel, suivie de la loi GEV. D'où le choix de la loi de Weibull pour le modèle fréquentiel d'ajustement aux modules du fleuve Cavally.

Tableau XV : Critères de classement des lois statistiques d'analyse fréquentielle

Lois statistiques	Nombre de paramètres	Critères de comparaison		classement
		BIC	**AIC**	
WEIBULL	**3**	**236,145**	**234,056**	1
GUMBEL	2	236,993	234,904	2
GEV	3	237,277	234,143	3

Les quantiles de crue pour des diverses périodes de retour en fonction des méthodes statistiques utilisées sont consignées dans le Tableau XVI. Au niveau de la loi de Weibull, les quantiles de crue de périodes de retour de 100 ; 50 ; 20 ; 10 ; 5 et 2 ans sont respectivement de 365 ; 353 ; 334 ; 316 ; 293 et 246 m^3/s pourraient survenir.

Tableau XVI : Quantiles de crue et périodes de retour de débit à la station d'Ity.

Période de retour	**Débits (m^3/s)**
100	365
50	353
20	334
10	316
5	293
2	246

Les quantiles de pluie et de cure correspondant à chaque période de retour sont consignés dans le Tableau XVII. Au regard de ce tableau, une pluie centennale de 246 mm correspond à un débit centennal de 365 m3/s, pour une période de retour de 2 ans, une hauteur de pluie de 91,2 mm correspond à une crue de 246 m^3/s.

Tableau XVII: Quantiles de pluie et de crue correspondant à différentes périodes de retour.

Période *de retour (ans)*	***Quantile de pluie (mm)***	***Quantile de crue (m^3/s)***
100	246	365
50	221	353
20	187	334
10	160	316
5	133	293
2	91,2	246

5.8.Discussion

Avant la caractérisation de la variabilité hydro climatique, un modèle pluie-débit a été établi pour le comblement des lacunes dans les séries de données hydrométriques de la station d'Ity à l'aide des réseaux de neurones artificiels. Les résultats ont montré que la structure du modèle pluie-débit de réseau de neurones artificiels adaptée au binôme pluie-débit du bassin versant du Fleuve Cavally est de 2-3-1. C'est-à-dire deux (2) paramètres en entrée du modèle (pluie et ETP), trois (3) couches intermédiaires (ou neurones cachés) et une (1) sortie (débit). L'évaluation des critères de performance a montré que les coefficients de Nash et de corrélation au niveau du calage sont respectivement de 75,79 et 95,64 %. Ils sont respectivement de 73,32 et 98,33 % au niveau de la validation du modèle. Ainsi, trois (3) neurones cachés sont nécessaires pour bien simuler les débits à la station hydrométrique d'Ity à partir de deux (2) entrées (pluie moyenne mensuelle et ETP). Des écarts sont cependant observés entre les débits observés et les débits simulés par l'architecture 2-3-1 du modèle de réseau de neurones artificiels au niveau de la validation. Ces décalages peuvent s'expliquer par le fait que les réseaux de neurones artificiels sont des modèles influencés par le nombre de variables d'entrées du modèle, la longueur de la série de données pour le calage et la qualité des données (Kouassi *et al.*, 2013). Randrianarivony *et al.* (2009) ont montré qu'en augmentant le nombre de variables d'entrée d'un modèle de réseau de neurones artificiels de un (1) à trois (3) entrées, la performance du modèle s'améliore considérablement. Selon Mouelhi (2003) ; Koffi (2007) ; Kouassi *et al.*(2013), la végétation, l'ordre du cours d'eau, la capacité de rétention en eau du sol, le relief et les autres pertes sont des facteurs qui influencent la transformation de la pluie en débit. Les résultats obtenus dans cette étude (modèle 2-3-1) comparés avec ceux obtenus (modèle 2-4-1) par Kouassi *et al.*(2013) sur le bassin versant de Bia au Sud-Est de la Côte d'Ivoire sont sensiblement similaires. Dès lors, on pourrait dire que le nombre de neurones n'influence pas trop la performance du modèle à transformer la pluie en débit à comparer à la quantité des données d'entrée dans le réseau.

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des indices pluviométrique annuels au cours de la période 1970-2000 a permis de monter la distribution spatio-temporelle de la pluie moyenne annuelle dans le bassin versant du Cavally. En effet, la pluviométrie dans le Nord et le Sud du bassin varie respectivement entre 1611 mm et 1757 mm, tandis que dans la partie centrale du bassin versant, elle oscille entre 1758 mm et 1970 mm. Il faut noter que le bassin versant du Cavally connait une répartition hétérogène mais une pluviométrie excédentaire car les hauteurs de pluies sont au-dessus de la normale qui est d'environ 1600 mm à l'Ouest de la Côte d'Ivoire.

Cette forte pluviométrie peut s'expliquer par l'importance de la forêt sur le bassin versant du Cavally. Ces observations sont corroborées par les travaux de Kouamé (2011) qui rapporte que le nombre de jour de la saison des pluies connait une augmentation assez marquée, juste après la rupture climatique des années 1970, ce qui a impacté fortement la pluviométrie.

Au niveau de l'analyse fréquentielle, cette étude a montré que la loi de Weibull s'ajuste mieux au module de crues du fleuve Cavally. Concernant la chronique des données pluviométriques, l'analyse statistique a montré que la distribution de probabilité des pluies journalières maximales annuelles suit la loi de Weibull à trois (3) paramètres. Ces résultats sont conformes à ceux de Soro (2011), sur la modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire montrant que la loi de Weibull s'ajuste bien aux séries de données pluviométriques dans l'Ouest ivoirien. Par conséquent, pour la chronique des données utilisées, la loi de Weibull à trois (3) paramètres, ajustée par la méthode des maximums de vraisemblance est la mieux adaptée au module de pluie maximale avec des critères de BIC et AIC faibles.

Conclusion partielle

Un modèle pluie-débit à l'aide de réseau de neurones artificiels a été établi pour combler les lacunes dans les séries de débits de la station hydrométrique d'Ity sur le fleuve Cavally. Les résultats obtenus avec ce modèle montrent que l'architecture 2-3-1 donne des résultats satisfaisants avec des coefficients de Nash supérieurs à 75% et des coefficients de corrélation supérieurs à 95%. Les résultats de ce modèle ont permis d'étudier la variabilité hydro climatique sur le bassin versant du Cavally.

Cette étude a permis de mettre en évidence que c'est la loi statistique qui s'ajuste le mieux aux modules pluviométriques et hydrologiques du bassin versant du fleuve Cavally. Il s'agit de la loi de Weibull à trois (3) paramètres. Une pluie exceptionnelle a été enregistrée le 12 août 1977 avec une hauteur 184 mm qui pourrait être qualifiée de pluie de période de retour 20 ans dans la mesure où ce quantile de pluie (20 ans) est 187 mm.

Concernant la variabilité hydro climatique, on constate une variabilité interannuelle globalement excédentaire pour toutes les stations, soit de Danané, Zouan-Hounien, SMI-Ity et Sipilou. Cependant, quelques années après la grande rupture pluviométrique de 1970, on assiste à une sècheresse intense d'environ 6 années pour les stations de Danané, Zouan-Hounien et SMI-Ity. Quant à la station de Sipilou, on constate qu'elle n'a pas connue de perturbation pluviométrique après la rupture de 1970. La pluie moyenne interannuelle du bassin versant du Cavally est de 1535,9 ± 214,2 mm.

Chapitre 6 : Impact des activités anthropiques sur la morphologie du lit du fleuve Cavally

Les activités agricoles, l'urbanisation et l'orpaillage ont généralement une forte influence sur le régime des écoulements et la morphologie du lit des cours d'eau et des réservoirs. Dans ce chapitre, il s'agit de montrer l'impact des activités humaines, notamment l'orpaillage sur la morphologie du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI.

6.1. Compositions colorées OLI4/OLI5/OLI3 et discrimination de l'occupation du sol

La composition colorée OLI5/OLI4/OLI3 a permis de discriminer les types d'occupation du sol (Figure 48). Cette composition colorée donne les caractéristiques de l'état de l'occupation du sol.

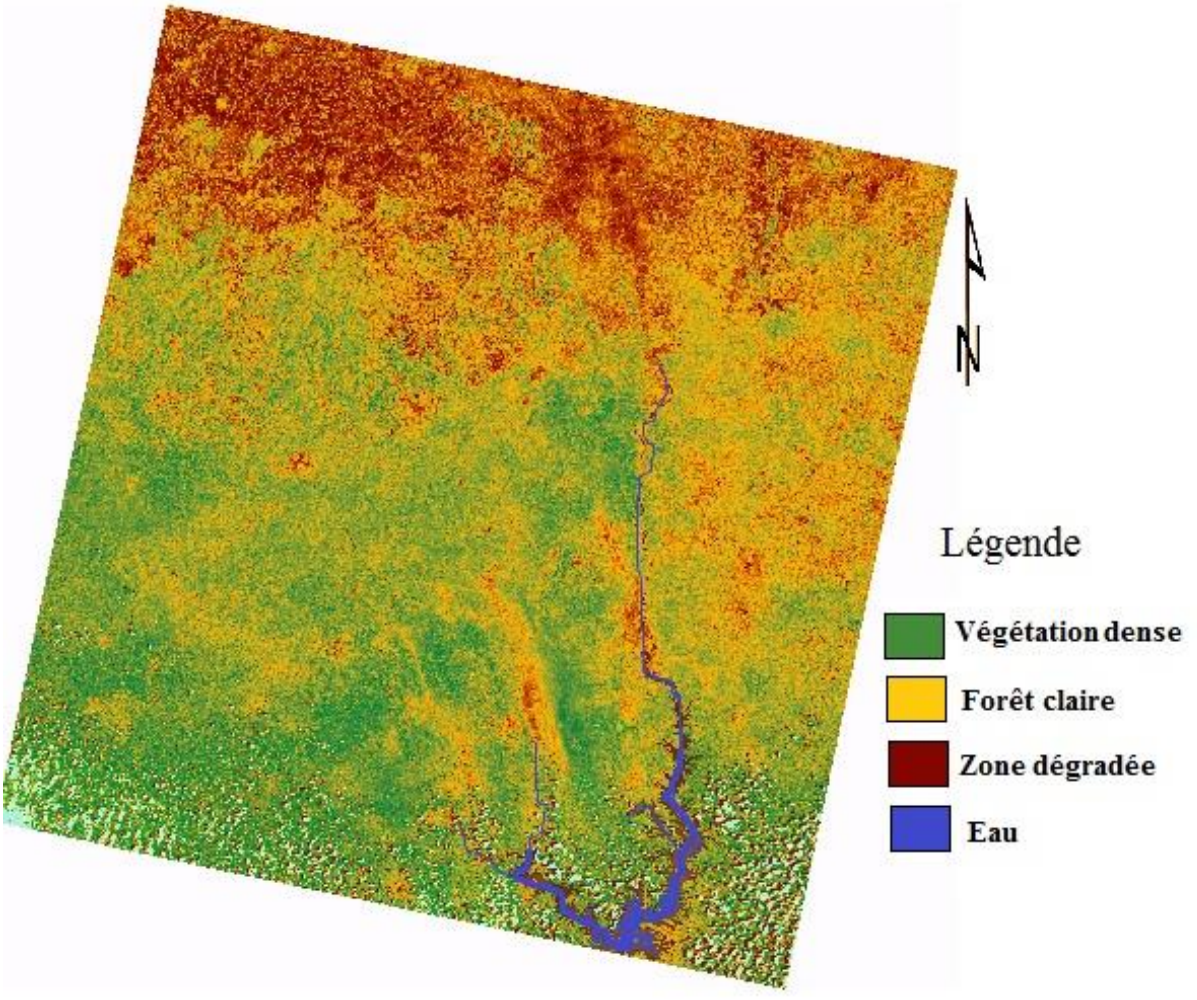


Figure 48 : Composition colorée OLI5/OLI4/OLI3 sur l'image LandSat 8 de 2016.

6.2. Evaluation de la précision de la classification supervisée

L'évaluation quantitative de la précision a été faite à l'aide de la matrice de confusion en utilisant les données de la carte de référence et des informations obtenues lors de la visite de terrain (Tableau XVIII). Quatre (4) classes principales ont été obtenues, soit forêt, forêt dégradée et cultures, cours d'eau, zones bâties et sols nus.

Tableau XVIII : Matrice de confusion de la classification finale, dérivée des images LandSat 8

		Référence			
		Forêt	**Forêt dégradée et cultures**	**Cours d'eau**	**Zones bâties et sols nus**
Classification finale	**Forêt**	231 514	965	2 277	787
	Forêt dégradée et cultures	7 731	25 734	1 899	3 967
	Cours d'eau	50	133	13 534	42
	Zones bâties et sols nus	1 347	2 065	1 074	17 594

Le Tableau XIX présente la précision globale des classifications à la composition colorée (Niveau 1) et la classification dirigée (Niveau 2), soit le total de pixels bien classifiés par rapport au total de pixels dans la matrice de confusion, qui est de 80,5% et 82,2%. Malgré une différence légère entre la précision du producteur et de l'utilisateur (5% pour le niveau 1 et 2 % pour le niveau 2), les pixels ont été bien classifiés pour chacune des classes définies (88% niveau 1, 81% niveau 2). La précision du producteur a montré que les classes du niveau 1 ont été mieux classifiées qu'au niveau 2, en comparant aux données de références. Cela s'explique par le fait que le niveau de détail des classes du niveau 1 est moins que celui du niveau 2, la confusion entre les classes est donc moindre. Une précision de l'utilisateur de 83% signifie que 83% des pixels classifiés représentent la réalité par rapport aux données de référence. L'indice de Kappa (K) de l'ordre de 0,80 représente une forte précision entre l'information de la carte de la classification dérivée des images LandSat 8.

Tableau XIX : Précision de la classification des niveaux 1 et 2, dérivée des images LandSat8.

Valeur	***Niveau 1***	***Niveau 2***
Précision de producteur (%)	88	81
Précision d'utilisateur (%)	83	83
Précision globale	80,5	82,2
Kappa	0,78	0,8

6.3. Mode d'occupation du sol du bassin versant du Cavally

Quatre classes communes d'occupation du sol ont été cartographiées (Figure 49). Elles sont représentées par la végétation dense avec 13,11 % ; la végétation dégradée et des cultures avec 72, 04 % ; l'eau avec 4,73 % ; les zones bâties et les sols nus avec 10,12 %. La discrimination entre les différentes classes thématiques est statistiquement significative avec des précisions statistiques globales de 80,5 % à 82,2 %.

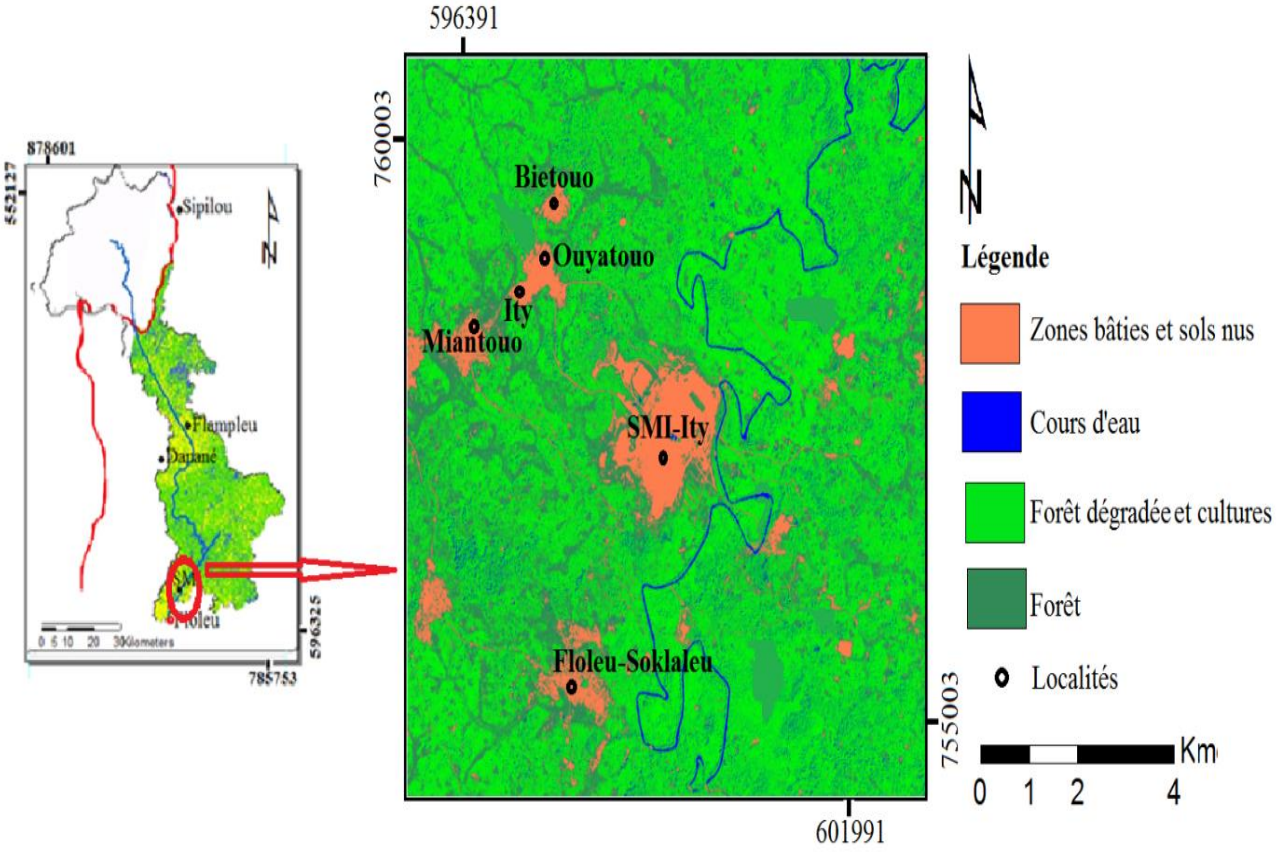


Figure 49 : Carte d'occupation du sol dans le périmètre d'exploitation de la SMI en 2018.

6.4. Evolution temporelle de la morphologie du lit du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI

La Figure 50 présente l'évolution des contours du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity pour les périodes respectives de 1986 (jaune), 2011 (rouge) et 2018 (bleu).

La superposition de ces trois images de la Figure 51 a permis d'obtenir la Figure 52 qui met en évidence la dynamique de l'évolution morphologique du fleuve Cavally à ces différentes dates.

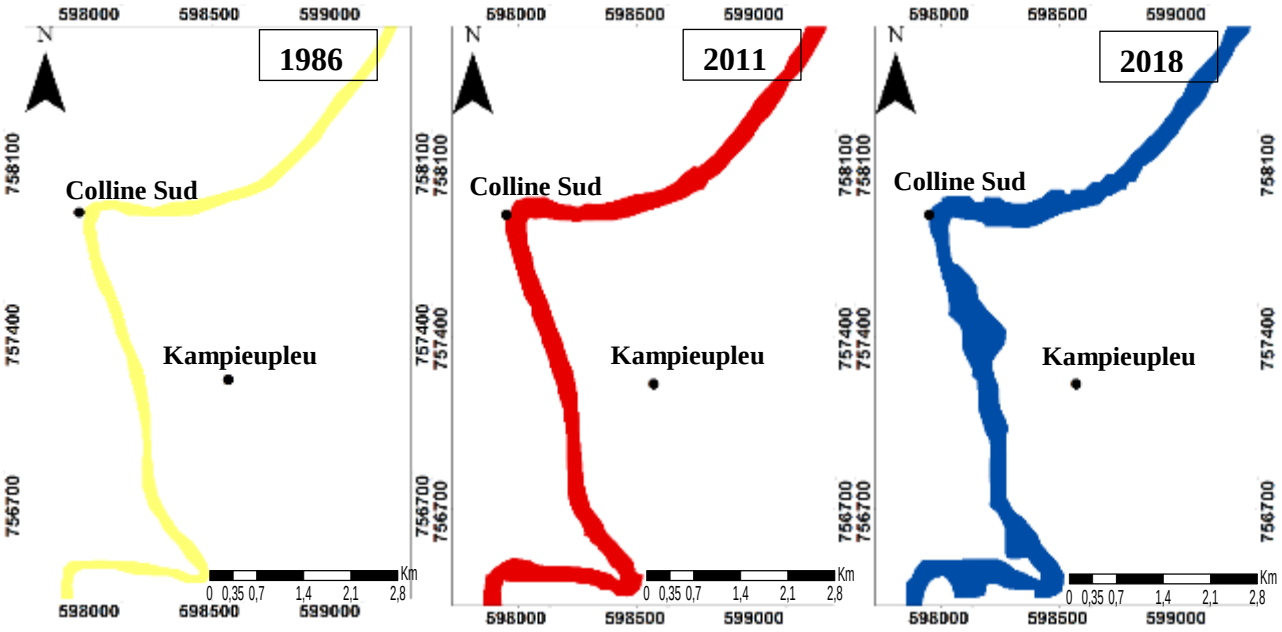


Figure 50 : Evolution du lit mineur du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI au fil des années.

Le lit du fleuve Cavally dans la zone de Zouan-Hounien a subi des perturbations entre 1986 et 2018 (Figure 51). Les contours du fleuve Cavally de 1986 (en jaune) et de 2011 (en rouge) sont très similaires. Les tracés des contours du fleuve à ces deux dates présentent de légers écarts. Cependant, les contours du cours d'eau de 2018 (en bleu) présentent des déformations remarquables avec la disparition d'un méandre.

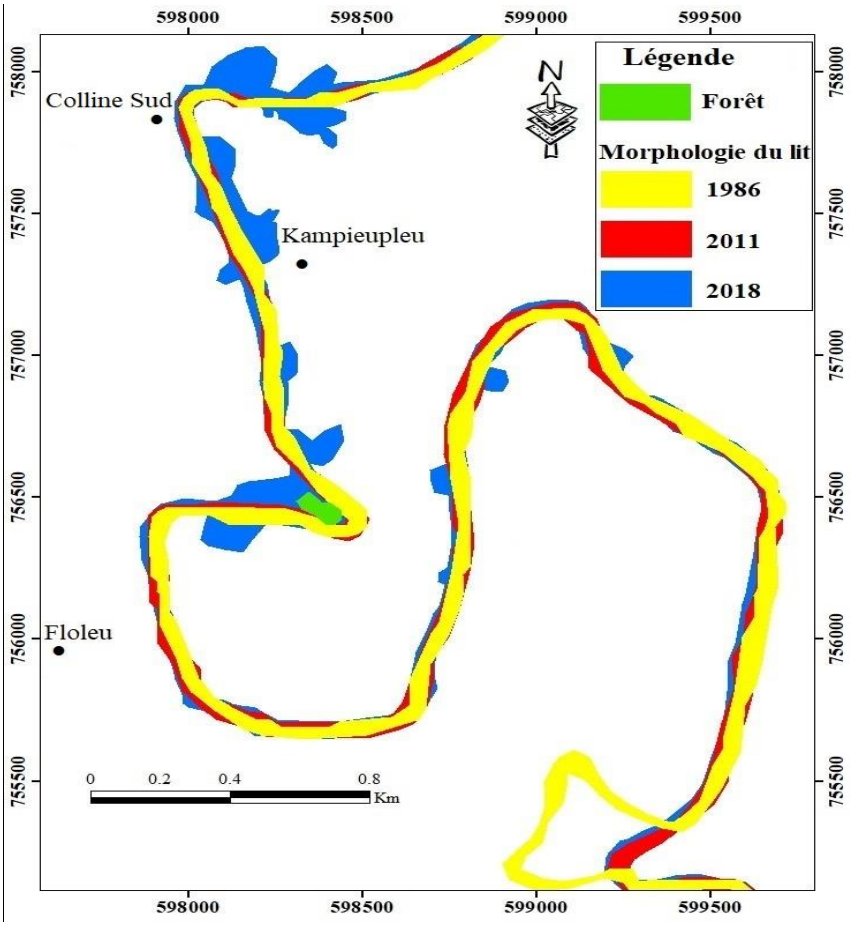


Figure 51 : Dynamique de l'évolution morphologique du lit mineur du Cavally entre Colline Sud et Floleu en 1986, 2011 et 2018.

Les superficies des sections du cours d'eau ont subi une augmentation de 1986 à 2018. De 1986 à 2011, les surfaces des sections ont évolué de 5,68 à 16,31%. Les sections 2 (amont Colline Sud) et 3 (Entre Colline Sud et Floleu) ont une évolution surfacique supérieure à 10% qui sont respectivement 16,31% et 13,70%. Entre 2011 et 2018, l'augmentation des surfaces des sections varient entre 12,47% et 55,93%. Les taux d'augmentation des sections 1 (entre SMI et Bakatouo) et 5 (amont de Bakatouo) qui sont respectivement de 16,39% et de 12,47% sont les plus faibles tandis que le taux de variation de la section 3 (55,93%) est le plus élevé (Tableau XX).

Tableau XX : Tableau récapitulatif de l'évolution des surfaces des sections.

		Surface en Km²			*Augmentation*	
		1986	**2011**	**2018**	**1986 - 2011**	**2011 - 2018**
Amont	**Section 1**	0,30	0,31	0,37	6,60%	16,39%
	Section 2	0,11	0,13	0,16	16,31%	22,62%
Zone d'étude	**Section 3**	**0,17**	**0,20**	**0,31**	**13,70%**	**55,93%**
	Section 4	0,39	0,41	0,51	5,68%	25,42%
Aval	**Section 5**	0,30	0,32	0,36	6,26%	12,47%

Les effets de la dégradation des berges du fleuve Cavally dans les environs de la Société des Mines d'Ity sont observés sur les Figure 52 et Figure 53. En effet, en descendant le Cavally à partir de la station de Bakatouo, le lit du cours d'eau est très perturbé par les activités d'orpaillage (Figure 52). Les activités des orpailleurs entrainent :

- l'élargissement du lit du cours d'eau par endroits ;
- la modification de la morphologie du fond du cours d'eau par l'établissement des hauts fonds et des zones de dépressions ;
- la réduction du tirant d'eau par endroits et donc la navigabilité du cours d'eau ;
- la destruction des arbres sur les rives, ce qui réduit la navigabilité du cours d'eau ;
- l'augmentation des matières en suspension (l'eau devient très turbide en aval des sites d'orpaillage).

Figure 52 : Etat de la dégradation des berges du fleuve Cavally due aux activités d'orpaillage clandestin.

En amont comme en aval du méandre de Colline Sud, il existe d'importants sites d'orpaillage. Cette pratique a favorisé l'élargissement du lit mineur et la dégradation des berges sur des centaines de mètres (Figure 53).

Figure 53 : Etat de la dégradation du lit et des berges du fleuve Cavally dans les environs du méandre de Colline Sud.

6.5. Discussion

Le traitement de l'image LandSat utilisée donne les précisions statistiques globales de 80,5 % à 82,2 %, un indice de Kappa de l'ordre de 0,80 ainsi que des précisions de producteur et d'utilisateur supérieur à 80 %, ce qui démontre une bonne discrimination de la zone d'étude. Cette distinction fait apparaitre un ensemble formé de sols nus et bâtis, eau et forêt qui ont une faible occupation avec un total de 27,96 %, contrairement à la classe de forêt dégradée et cultures qui est assez représentative (72,04 %). En effet, le bassin versant du fleuve Cavally appartient au domaine Guinéen dont le paysage dominant est la forêt humide, sempervirente caractérisée par de grands arbres dépassant 50 m de hauteur, qui renouvellent leur feuillage perpétuellement (N'Da, 2007). Cette importante couverture végétale favorise une bonne évapotranspiration et une bonne pluviométrie (Zueli, 1981 ; Kouamé, 2011).

La dynamique du fleuve Cavally dans la zone d'étude a été effectuée avec des images LandSat. Ces types d'images, de moyennes résolutions (30 mètres de résolutions), ont permis d'établir, avec assez de précision, le suivi interannuel, du tracé du fleuve Cavally. La cartographie des plans d'eau par l'utilisation des images LandSat est une méthode assez intéressante utilisée dans de nombreux travaux. Ainsi, au Burkina Faso et en Tunisie, pour la surveillance de la configuration des plans d'eau sur plusieurs années, certains auteurs firent l'usage de ces types d'images (Ben Mammou & Rabbia, 1990 ; Gnoumou *et al.*, 1995 ; Padonou & Sarr, 2009 ; Yobouet, 2011). Toutefois, la vectorisation des contours du plan d'eau reste une tâche assez fastidieuse à accomplir à cause de la qualité moyenne de l'image. Cela entraine, en général, une sous-estimation ou une surestimation du volume du plan d'eau. Pour pallier ces conséquences, des ortho photos et photographies aériennes sont nécessaires en vue de faciliter l'établissement des limites des plans d'eau (Heinerich *et al.*, 2011).

En ce qui concerne l'évolution du lit du cours d'eau, l'orpaillage clandestin pourrait être à l'origine de l'augmentation de surface du plan d'eau située entre la SMI et le village Floleu (section 3). En effet, cette zone est quotidiennement fréquentée par les orpailleurs qui mènent leurs activités aussi bien dans le lit mineur que sur les berges du cours d'eau. Bamba *et al.* (2013) rapportent que l'activité d'orpaillage clandestine fragilise les sols, détruit progressivement des terres arables, déstabilise des berges et prédispose le sol à des processus d'érosion souvent intenses. En effet, l'exploitation artisanale de l'or s'accompagne en général d'ouverture de tranchées, de puits, du grattage et du retournement des sols. Vu le débit et la vitesse d'écoulement important du fleuve Cavally, la présence de ces tranchées favoriserait, effectivement, l'érosion des berges donc la déformation du lit du cours d'eau.

Conclusion partielle

Le traitement des images satellitaires LandSat de 2016 a permis de montrer que l'occupation du sol est moins prononcée sur le bassin versant du fleuve Cavally et cela se justifie par une végétation dominante à 85,14 %. Cependant, l'orpaillage clandestin mené dans le lit du fleuve Cavally présente d'énormes risques pour sa morphologie. Dans cette étude, la morphologie du lit du cours d'eau a été étudiée grâce à l'utilisation conjointe des outils de télédétection et de SIG. Les images satellitaires (LandSat) ayant servi à la mise en place de la carte de suivi interannuel du cours d'eau a permis de montrer que la morphologie du Cavally a subi d'importantes perturbations à partir de 2011. Sur toute la zone d'étude, la présence d'orpailleurs est remarquable, particulièrement la portion du cours d'eau comprise entre la SMI et le village de Floleu.

Chapitre 7 : Caractéristiques des canaux de dérivation sur le fleuve Cavally

Il s'agit dans cette partie de l'étude de présenter les résultats du dimensionnement des canaux de dérivation sur le fleuve Cavally. Il s'agit des canaux de Bakatouo, Walter, Daapleu et Colline Sud. Parmi ces quatre (4) canaux dimensionnés, le canal de Daapleu est déjà construit et intégré au fleuve Cavally. Une comparaison sera effectuée entre les paramètres hydrodynamiques du fleuve Cavally avant et après la construction de ce canal.

7.1. Caractéristiques géométriques des canaux de dérivation

Les caractéristiques géométriques des canaux de dérivation prévus sur le fleuve Cavally sont consignées dans le Tableau XXI. Ces canaux ont été dimensionnés avec un débit de période de retour 2 ans (246 m^3/s).

Tableau XXI : Caractéristiques géométriques des canaux de dérivation.

Canaux	Base (m)	Profondeur (m)	Fruit des berges	Longueur (m)	n **($s/m^{1/3}$)**
Bakatouo	25	8,5	3H:1V	783	0,06
Walter	25	9,5	3H:1V	550	
Daapleu	22	6,5	2,5H:1V	280	
Colline Sud	22,7	6,9	2,5H:1V	503	

Le Tableau XXII présente les caractéristiques géométriques du canal de dérivation de Daapleu. Le canal de dérivation a été dimensionné pour une période de retour de T=2 ans avec un débit de 246 m^3/s, après estimation des quantiles de crue par l'analyse fréquentielle. Les caractéristiques géométriques du canal sont consignées dans le Tableau XXII :

Tableau XXII : Caractéristiques géométriques du canal de dérivation de Daapleu.

$Q(m^3/s)$	**n ($s/m^{1/3}$)**	**m**	**b(m)**	**L(m)**	**j(m/m)**	**$S(m^2)$**	**P(m)**	**R_h(m)**	**y(m)**	**V_m(m/s)**
246	**0,06**	**2 ,5**	**22**	**280**	**0,0035**	**222**	**54,3**	**4,09**	**6,5**	**1,11**

Les Figure 54 et Figure 55 présentent l'illustration du canal de dérivation de Daapleu dont les caractéristiques géométriques ont été présentées dans le Tableau XXII ci-dessus.

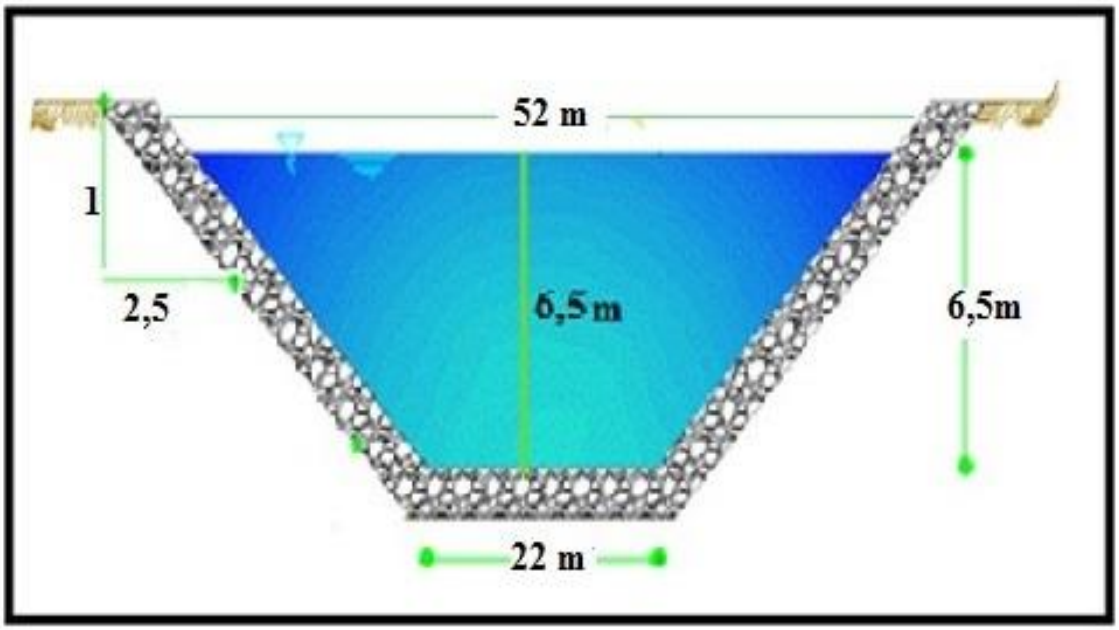


Figure 54 : Caractéristiques géométriques du canal de dérivation de Daapleu.

Figure 55 : Illustration du pont et du canal de dérivation de Daapleu.

7.2.Variation des vitesses dans le canal de dérivation de Daapleu

Les vitesses dans le canal (Figure 56) sont relativement faibles au niveau des rives et élevées dans le lit mineur. Ces valeurs sont comprises entre 0,55 et 2 m/s pour une vitesse moyenne de 1,5 m/s. Les vitesses diminuent de l'amont vers l'aval.

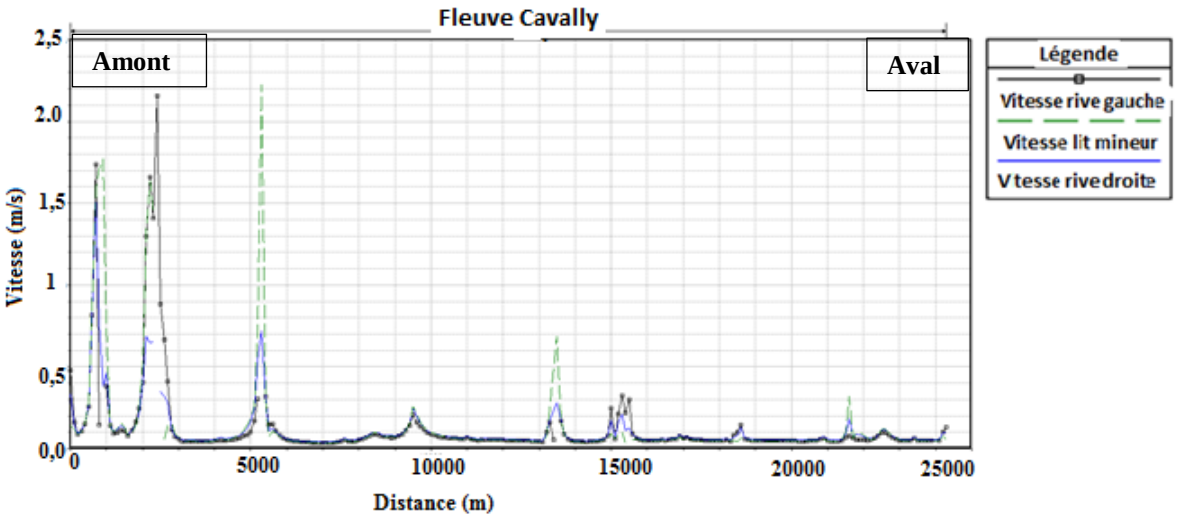


Figure 56: Variation des vitesses dans le fleuve Cavally de l'amont vers l'aval au voisinage de la zone de dérivation de Daapleu.

Les vitesses simulées par le modèle avant (0,1 et 2,2 m/s) et après (0,5 et 2 m/s) le détournement du fleuve, sont pratiquement dans le même ordre de grandeur. Les valeurs maximales sont enregistrées en amont et elles diminuent progressivement vers l'aval.

7.3.Comparaison des vitesses du fleuve Cavally avant et après la construction du canal de dérivation de Daapleu

Les vitesses avant et après la réalisation du canal de dérivation sont relativement faibles au niveau des rives et élevées dans le lit mineur (Figure 57). Ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur sont inférieures 2 m/s. Les vitesses diminuent considérablement de l'amont vers aval. Les vitesses les plus élevées sont dans la zone de coupure du méandre. Il faut noter également que dans les conditions naturelles il y a une accélération de l'écoulement dans les rives concaves à l'entrée du méandre.

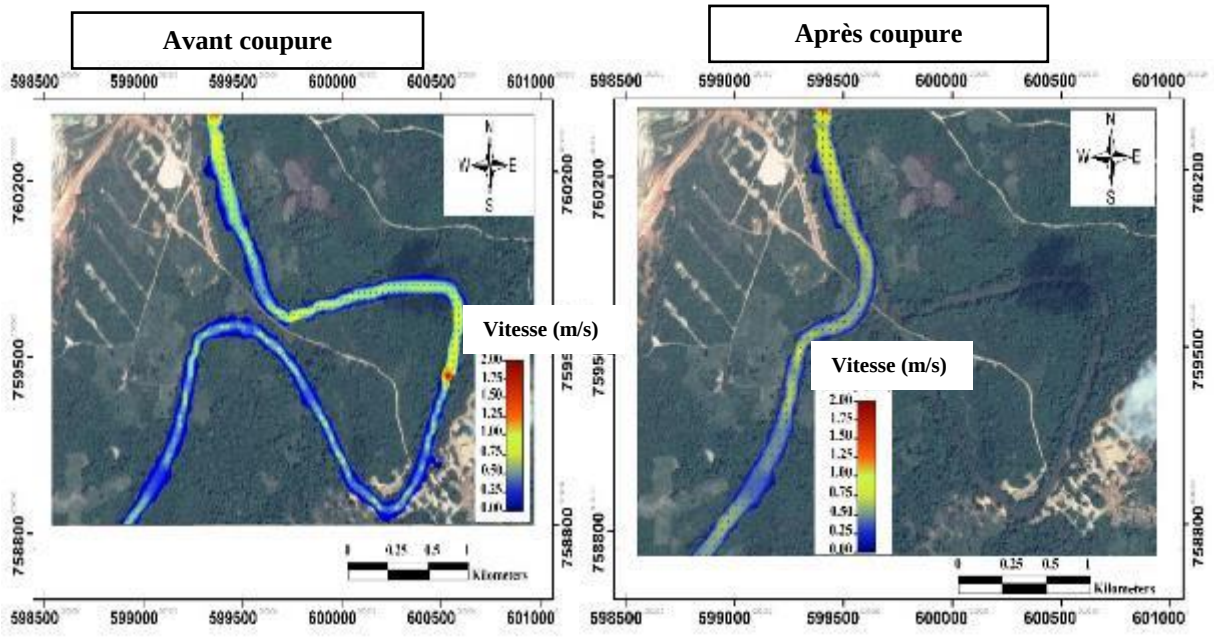


Figure 57 : Comparaison des vitesses avant et après le détournement du fleuve Cavally à Daapleu.

7.4. Comparaison des niveaux d'eau à la station d'Ity avant et après le détournement du fleuve Cavally à Daapleu

La Figure 58 présente la variation des niveaux d'eau avant et après le détournement du fleuve à la station d'Ity. L'analyse du graphique montre une parfaite superposition des courbes avant et après l'implantation de l'ouvrage ; ce qui indique que la dynamique du cours d'eau ne sera pas perturbée. Le niveau de l'eau dans l'ouvrage diminue progressivement de 0,6 m soit 8,57 % du niveau d'eau moyen durant une année avec l'implantation du canal de dérivation.

Ces baisses du niveau d'eau sont négligeables par rapport aux fluctuations totales de la rivière qui varient dans une année de 6 à 7 m. Par conséquent, les niveaux d'eau des conditions futures après le détournement pourraient rester similaires à l'état naturel du cours d'eau.

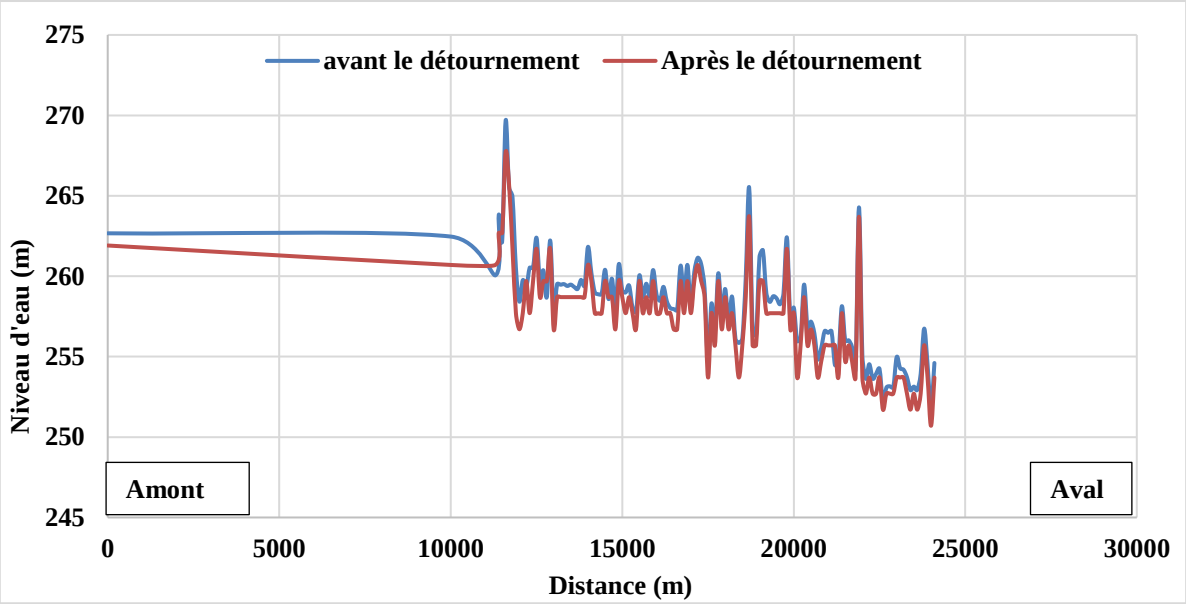


Figure 58 : Illustration de la variation des niveaux d'eau à la station d'Ity avant et après le détournement du fleuve à Daapleu.

La Figure 59 montre la différence du niveau d'eau avant et après l'implantation du canal de dérivation. On peut remarquer qu'en aval du canal les niveaux d'eau demeurent presque à leur état naturel. D'autre part, juste en amont du canal, les niveaux d'eau ont diminué d'environ 0,2 m, d'où une légère augmentation de la capacité hydraulique du fleuve Cavally sera observée à cet endroit.

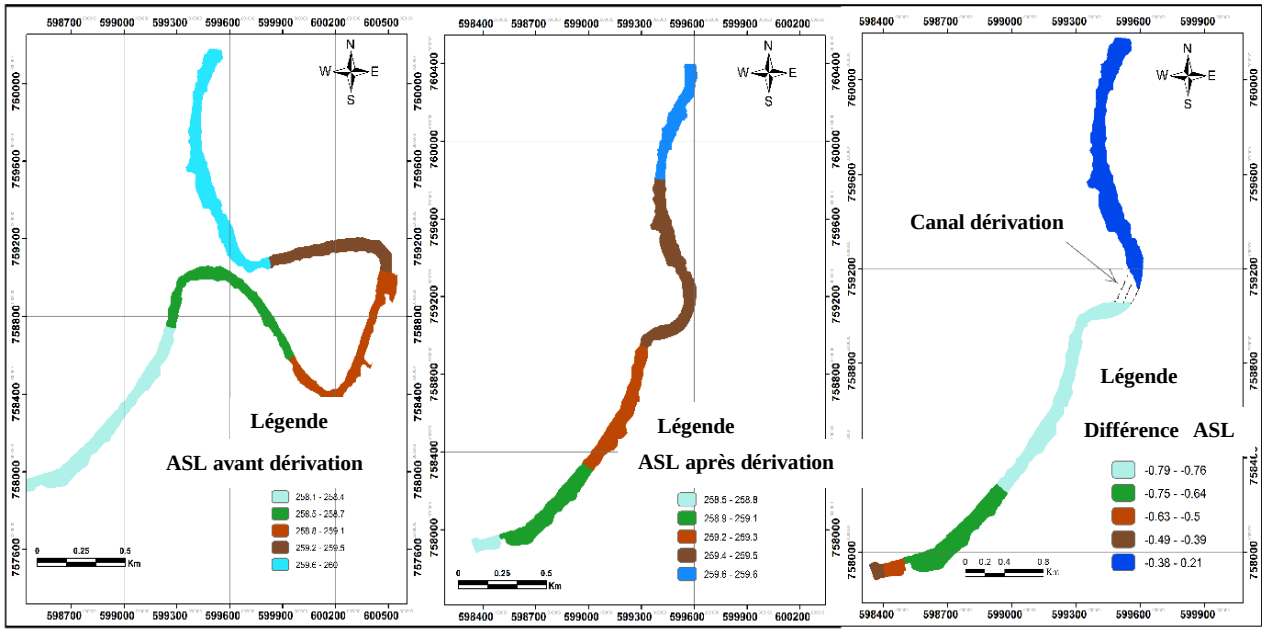


Figure 59 : Différence du niveau d'eau entre les conditions existantes et les conditions futures.

7.5. Discussion

L'objectif de cette étude est de dimensionner les canaux de dérivation du fleuve Cavally. Ces canaux ont été dimensionnés par la méthode du modèle rugueux de référence (MMR) pour un débit de 246 m^3/s.

Un modèle 1D a été utilisé pour simuler le fonctionnement hydraulique du fleuve Cavally à partir du canal de dérivation dimensionné de sorte à imposer dans ce canal, les conditions hydrauliques similaires aux conditions initiales du fleuve, notamment les niveaux d'eau et les vitesses. Les résultats obtenus montrent d'une manière générale que le modèle reproduit bien les conditions d'écoulement du milieu. Le modèle hydraulique élaboré dans cette étude est influencé par certains paramètres (la pente de fond, la topographie du terrain, le pas de temps de simulation) qui peuvent causer des instabilités lors de la simulation. Selon plusieurs auteurs, le temps de calcul, la précision du modèle numérique de terrain (MNT) et la pente longitudinale du cours d'eau peuvent être l'une des causes d'instabilité d'un modèle hydraulique (Chareb, 2005 ; Goodell, 2013 ; Kasuri, 2014). La complexité dans ce modèle s'explique aussi par la présence de plusieurs méandres dans le fleuve Cavally avec une topographie assez accidentée qui induit des pertes de charge importante dans le fleuve. Les pertes d'énergie enregistrées dans les méandres peuvent être dues aux composantes transversales supplémentaires de la contrainte de cisaillement limite induite par les flux secondaires, le gradient de couche augmente les vecteurs de vitesses en raison des profils de formes et aussi la distribution non uniforme des vitesses en profondeur. Le bassin versant du Cavally est situé dans une zone où la présence du couvert végétal est profitable à l'équilibre hydrologique du bassin alors que sa discontinuité, ou son absence totale constitue un facteur favorable à l'irrégularité des débits (Burguete & García, 2001 ; Rosier *et al.*, 2010 ; Wang *et al.*, 2010 ; Alexeevsky *et al.*, 2013). Les vitesses maximales dans le cours d'eau (2,3 m/s) sont du même ordre de grandeur que celles dans le canal de dérivation (2,13 m/s), les vitesses maximales sont enregistrées en amont, uniquement dans le lit principal. Selon les travaux de Gharbi *et al.*(2016) , le lit principal a une vitesse plus forte que celle du ou des lits secondaires. La vitesse moyenne d'écoulement dans le canal de dérivation est de 1,1 m/s. Ce résultat est en étroite corrélation avec les travaux de Novak *et al.* (2010) qui stipulent que pour éviter la formation de dépôts et l'érosion du radier d'un canal en terre de forme trapézoïdale, la vitesse admise doit être comprise entre 0,5 et 2,5 m/s. Le coefficient de Manning utilisé pour le calage du modèle hydraulique du canal de dérivation est de 0,06 $s/m^{1/3}$ pour le lit mineur et 0,052 $s/m^{1/3}$ pour le lit majeur. Il est clair que cette valeur est élevée, mais ceci est tout à fait acceptable, vu la composition des sols ainsi que la nature de la végétation existante au niveau du Cavally conduisant à des rugosités importantes. Ces résultats

confirment ceux de nombreux chercheurs en Tunisie et aux Etats-Unis qui indiquent que le coefficient de Manning est généralement élevé pour les cours d'eau subissant d'intenses activités d'orpaillage. Ces activités affectent la morphologie, la section, et la rugosité des cours d'eau (Kasuri, 2014 ; Gharbi *et al.*, 2016). La comparaison des niveaux d'eau avant et après le détournement du fleuve à la station d'Ity montre que le fleuve Cavally ne sera pas véritablement perturbé par cet aménagement parce que ces baisses du niveau d'eau (0,6 m soit 8,57% du niveau d'eau moyen) sont négligeables par rapport aux fluctuations normales de la rivière qui varie dans une année de 6 à 7 m.

Conclusion partielle

Les travaux présentés dans cette partie de l'étude portent sur la réalisation d'un modèle hydraulique pour dimensionner des canaux de dérivation capables d'assurer un fonctionnement hydraulique similaire aux conditions initiales (débit, niveaux d'eau, vitesse) du fleuve Cavally. Le dimensionnement a été effectué grâce à la méthode du modèle rugueux de référence (MMR). Au niveau du canal de dérivation de Daapleu, les conditions hydrauliques (débit, niveaux d'eau, vitesse) dans ce canal après la dérivation du cours d'eau demeureront sensiblement les mêmes que l'état naturel du cours d'eau. Le niveau d'eau augmente de 20 cm en amont du chenal, ce qui sera insignifiant par rapport aux fluctuations habituelles du fleuve qui varient chaque année entre 6 et 7 m. L'aménagement du fleuve n'aura donc pas un impact significatif sur le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally à Daapleu.

Chapitre 8 : Fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques

Il s'agit dans cette partie de l'étude de présenter les résultats obtenus à partir de la simulation des modèles hydrologiques réalisées avant et après la construction des ouvrages hydrauliques sur le fleuve Cavally. En outre, l'analyse granulométrique des sédiments prélevés dans le fleuve Cavally ayant contribué au choix des coefficients de Manning, nécessite une présentation des résultats de cette analyse. Aussi, les caractéristiques morphologiques du fond du fleuve Cavally seront-elles présentées à travers des cartes bathymétriques réalisées en périodes de crue et d'étiage de la section du fleuve située entre les villages Bakatouo et Floleu.

8.1. Caractéristiques de la morphologie du fond du fleuve Cavally et des sédiments

8.1.1. Caractéristiques morphologiques du fond du fleuve Cavally

La carte bathymétrique réalisée en période de crue (octobre 2015), montre que le fond du lit mineur du fleuve Cavally présente une morphologie très accidentée (Figure 60). La profondeur maximale du fond du lit mineur dans la zone d'étude est de 10 m. La profondeur moyenne à cette période est de 6,14±1,13 m.

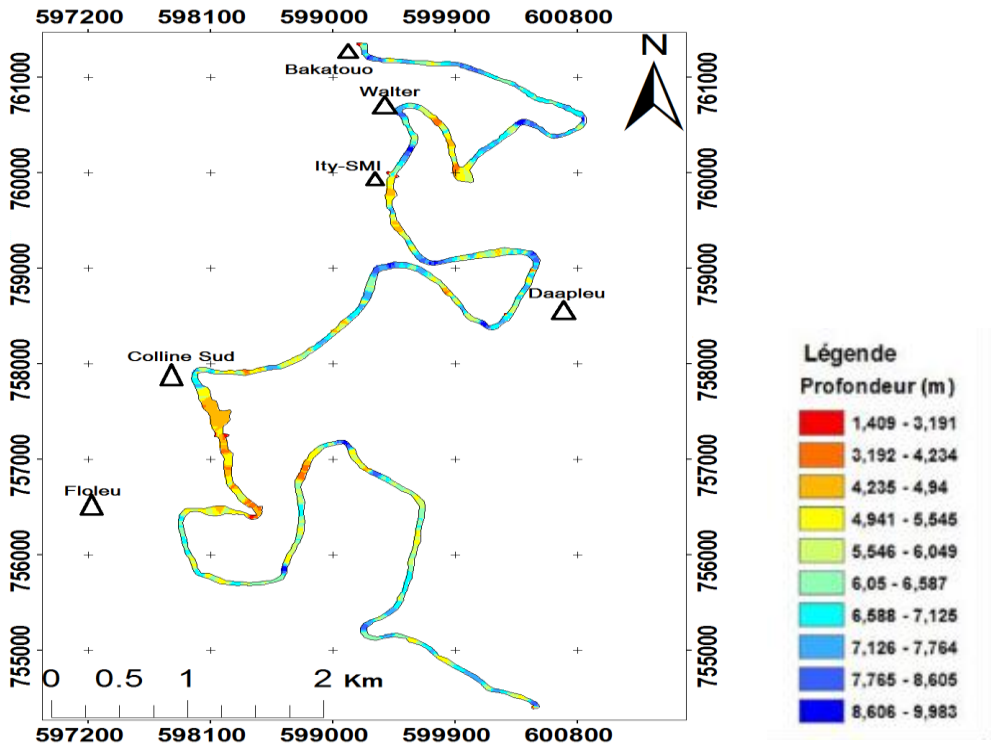


Figure 60 : Bathymétrie de la portion du Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI en octobre 2015.

La carte bathymétrique réalisée en période d'étiage (février 2019) montre également que le fond du lit mineur dans la zone d'étude présente une morphologie très accidentée. La profondeur maximale du fond du lit mineur dans la zone d'étude est de 3,85 m (Figure 61). La profondeur moyenne est de 1,899 m avec un écart-type de 0,602 m. On observe des hauts fonds dus aux activités d'orpaillage dans plusieurs endroits du cours d'eau, ce qui rend la navigabilité du fleuve difficile.

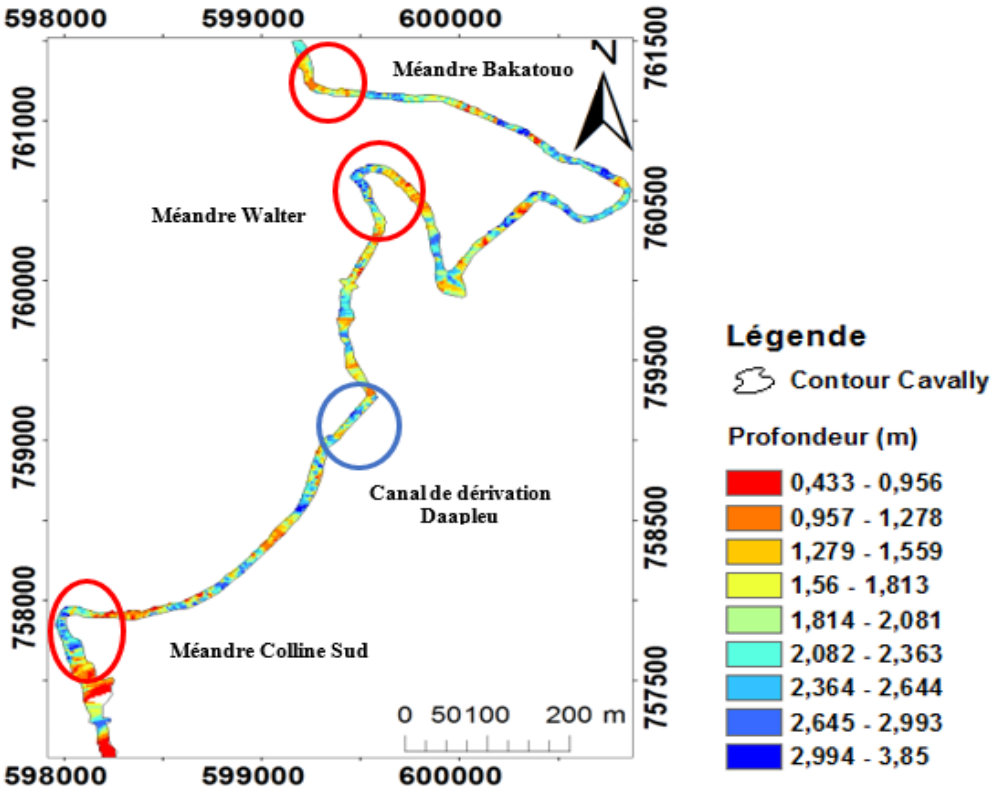


Figure 61 : Bathymétrie de la portion du Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI en février 2019.

8.1.2. Caractéristiques granulométriques des sables du fond du lit du fleuve Cavally

Les courbes granulométriques des sables de fond du fleuve Cavally sont de trois types : les courbes de type logarithmique (S1, S6 et Rive 3), les courbes de type parabolique (S3, S7, S8, S9 et S10) et les courbes de types pseudo-hyperboliques (S2, S4 et Rive 4) (Figure 62).

Les courbes granulométriques des sables aux faciès logarithmiques (S1, S6 et Rive 3) sont des sables fins à sables moyens. Ces courbes indiquent que la sédimentation de ces sables s'est faite essentiellement par suspension qui est une conséquence de l'agitation turbulente. Les courbes granulométriques des sables aux faciès paraboliques (S3, S7, S8, S9 et S10) sont des sables

grossiers à moyens. Ces sables ont une faible proportion d'éléments fins. Ce qui pourrait montrer que le charriage constitue le mécanisme de transport le plus déterminant. Les courbes aux allures pseudo-hyperboliques représentent des échantillons de sédiments (S2, S4 et Rive 4) aux faciès de sables grossiers. Ce qui pourrait montrer que le transport de ces sédiments se fait également par charriage.

L'examen des courbes granulométriques de l'ensemble des échantillons laisse supposer que les sables du Cavally sont en général moyens à grossiers. Par ailleurs, ces courbes granulométriques pourraient montrer que le transport des sables se fait majoritairement par charriage. Cependant, ces observations doivent être considérées avec réserve étant donné que les activités d'orpaillage ont une très grande influence sur la distribution des sédiments dans le cours d'eau.

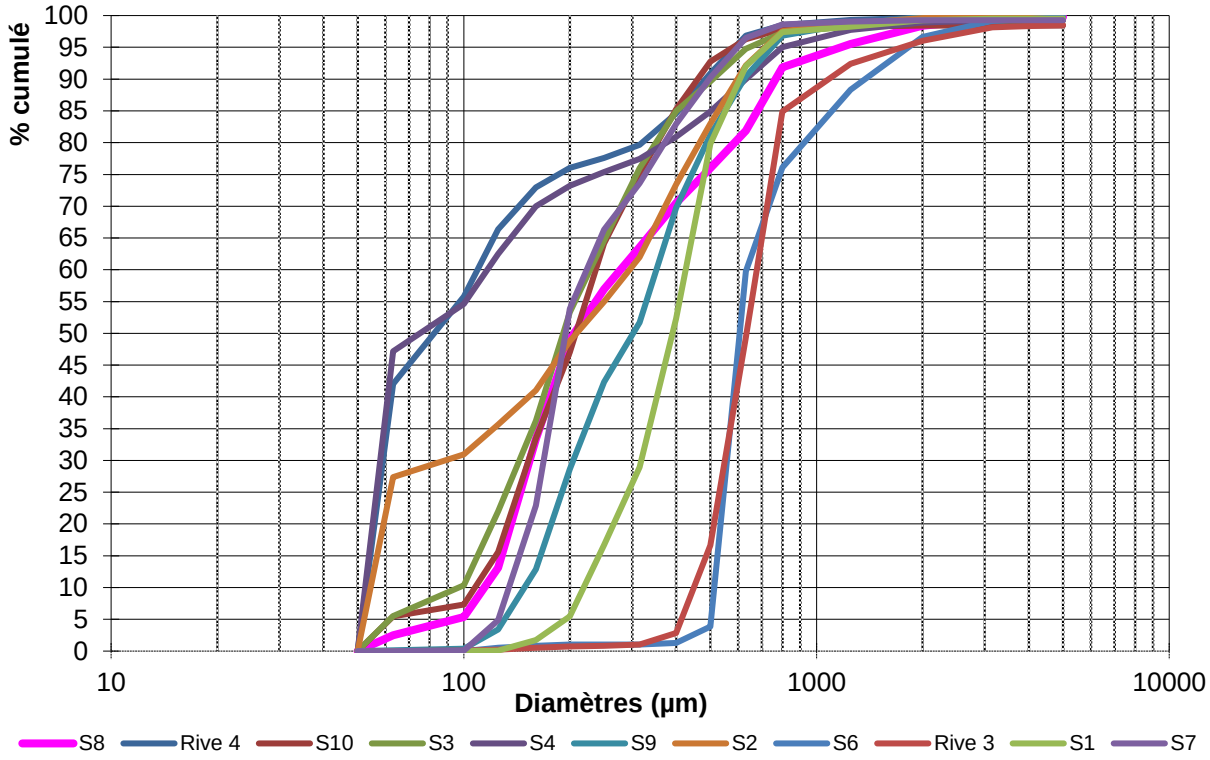


Figure 62 : Courbes granulométriques des sables du fleuve Cavally.

8.1.3. Paramètres granulométriques des sédiments du fond du fleuve Cavally

Le Tableau XXIII présente les paramètres granulométriques des sédiments du fleuve Cavally. Il s'agit de la moyenne granulométrique (Mz), l'indice de classement (**σ)** et l'asymétrie ou skewness (Sk). Les sables recueillis dans le fleuve Cavally peuvent être regroupés en trois (3) faciès granulométriques : il s'agit des sables fins, des sables moyens et des sables grossiers. Les

sables contenus dans les sédiments du Cavally sont majoritairement grossiers (soit 63%) avec une moyenne granulométrique de 1099,34 ± 443,83 µm.

Tableau XXIII : Paramètres granulométriques des sédiments du fleuve Cavally.

N° échantillon	*Longitude*	*Latitude*	*Moyenne (Mz) (µm)*	*Ecart-type*	*Médiane*	*Indice de classement (σ)*	*Skewness (Sk)*	*Type de faciès*
S1	599460,48	760668,72	353,33	0,15	310	0,15	0,69	Sables moyens
S2	599532,44	760538,26	1616,67	0,51	600	0,51	0,03	Sables grossiers
S3	599591,53	760358,31	1233,33	0,33	680	0,33	-0,07	Sables grossiers
S4	599420	759986	2425	0,52	2800	0,52	-0,07	Sables grossiers
S5	599521,41	759335,45				Non déterminés		vases
S6	599285,95	758801	183,33	0,14	200	0,14	1,01	Sables fins
S7	599011,67	758347,2	616,67	0,24	650	0,24	0,17	Sables grossiers
S8	598735,44	758021,16	696,67	0,44	630	0,44	0,14	Sables grossiers
S9	598198,49	757926,49	470	0,36	400	0,23	0,36	Sables moyens
S10	598032,75	757730,04	736,67	0,33	600	0,334	0,17	Sables grossiers
S11	598148	757379,59				Non déterminés		Vases
Rive 1	598211	757210				Non déterminés		Vases
Rive 2	598196	757283				Non déterminés		Vases
Rive 3	598289	757545	208,33	0,11	200	0,11	3,05	Sables fins
Rive 4	598117	757601	2336,67	0,05	2000	0,43	0,05	Sables grossiers

8.2. Propagation des crues dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally

8.2.1. Calage et validation du modèle

Lors du calage du modèle de propagation des crues, les hydrogrammes des débits observés et simulés sont fortement synchronisés ; ce qui donne un coefficient de corrélation de 0,92 et un critère de Nash de 0,89 au cours de l'année 1988 avec un pourcentage d'erreurs de précision de 0,0067 (Figure 63).

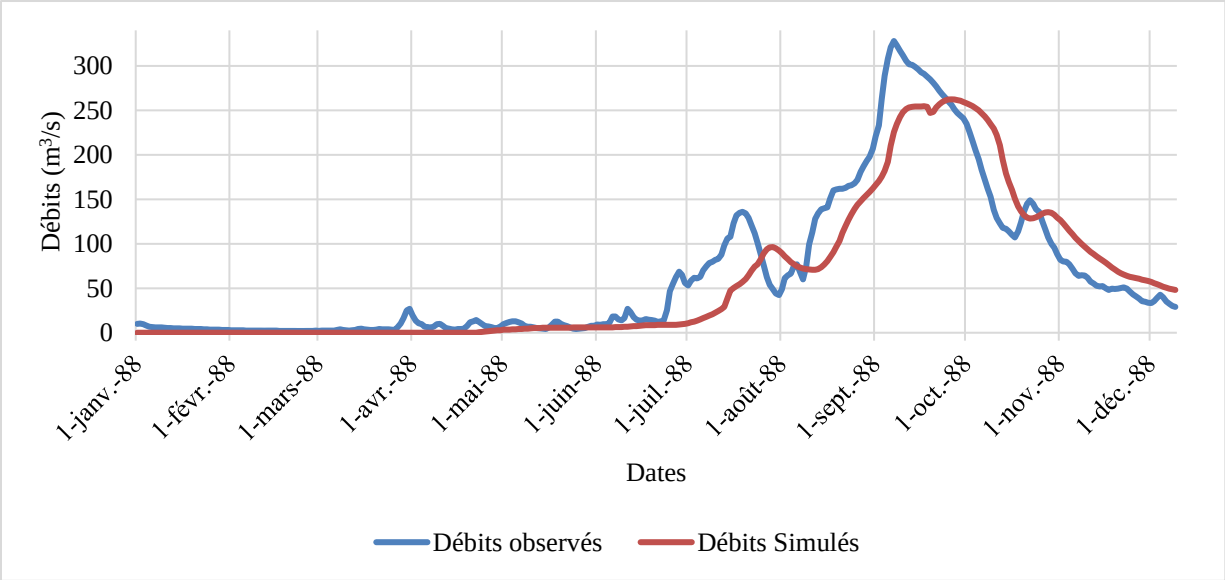


Figure 63 : Hydrogrammes des débits observés et des débits simulés (1988) à la station d'Ity.

Pour les débits mesurés pendant la période de crue entre juin et novembre 2015 ayant été utilisés pour la validation du modèle de propagation des cures, les hydrogrammes (Figure 64) ne montrent pas de différence remarquable entre les débits simulés et observés. Le coefficient de Nash (0,93) et le coefficient de corrélation (0,96) avec un pourcentage d'erreurs de précision de 0,0054 expliquent cette forte synchronisation.

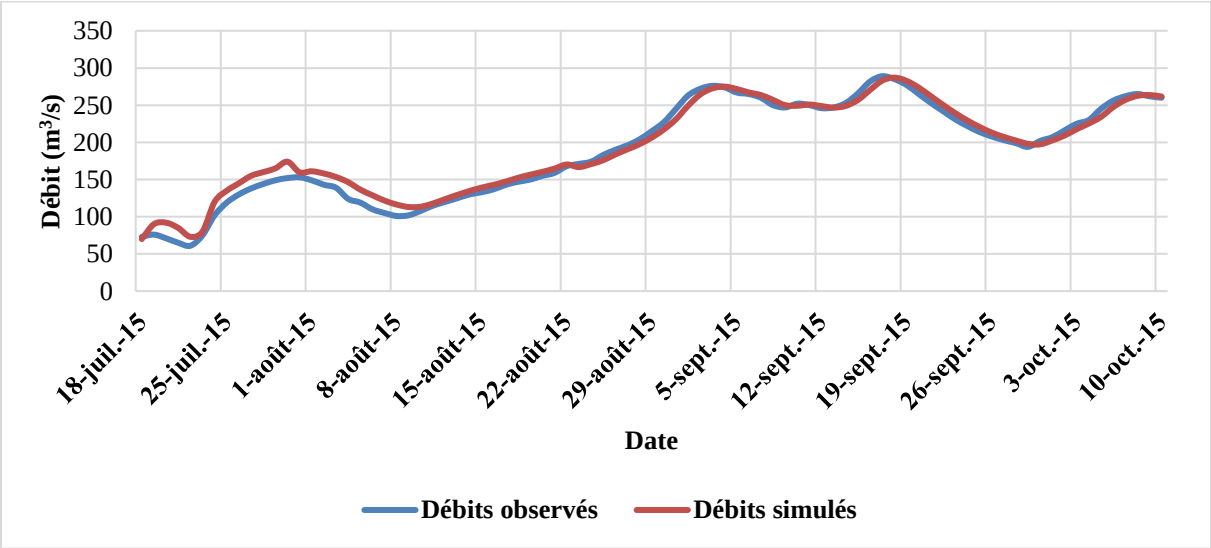


Figure 64 : Hydrogrammes des débits observés et débits simulés (Juillet à Octobre 2015) à la station d'Ity.

De même, pour les débits mesurés pendant la période de crue de septembre à octobre 2018, les hydrogrammes n'ont pas montré de différence remarquable entre les débits observés et les simulés par le modèle (Figure 65). Le coefficient de Nash (0,95) et le coefficient de corrélation

(0,97) avec un pourcentage d'erreurs de précision de 0,0027 montrent que le modèle simule bien les débits.

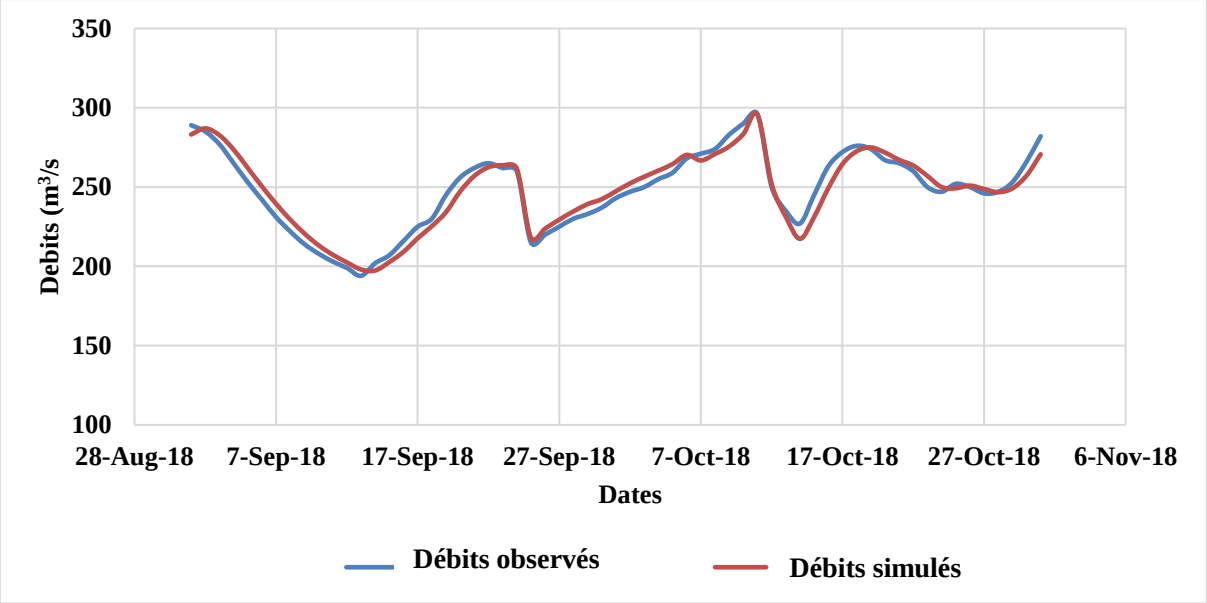


Figure 65 : Hydrogrammes des débits observés et débits simulés (septembre à octobre 2018) à la station d'Ity.

8.2.2. Propagation des crues avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques de Daapleu

Cette partie concerne la présentation des résultats des simulations de la propagation des crues, tenant compte des débits de projet de période de 20 et 100 ans avant et après l'intégration du canal de dérivation et du pont de Daapleu. Ces résultats concernent les altitudes maximales à la surface libre (ASL) et les différences de niveaux d'eau entre les périodes de retour de 100 et 20 ans.

8.2.2.1. Etat initial (avant la coupure du méandre de Daapleu) et état présent (avec le canal de dérivation de Daapleu) du fleuve Cavally avec les débits de période de retour de 20 ans et 100 ans

La Figure 66 montre la distribution des altitudes maximales à la surface libre (ASL) (ou niveau d'eau) du Cavally après la construction du canal de dérivation pour les crues de période de retour 20 ans. Au regard de ces cartes, le niveau d'eau est de 262,45 m avant la coupure du méandre de Daapleu et de 262,65 m après la coupure du méandre dans la zone de coupure du méandre. La coupure du méandre de Daapleu a entraîné une augmentation légère du niveau d'eau de 20 cm juste en amont de la zone de coupure du méandre.

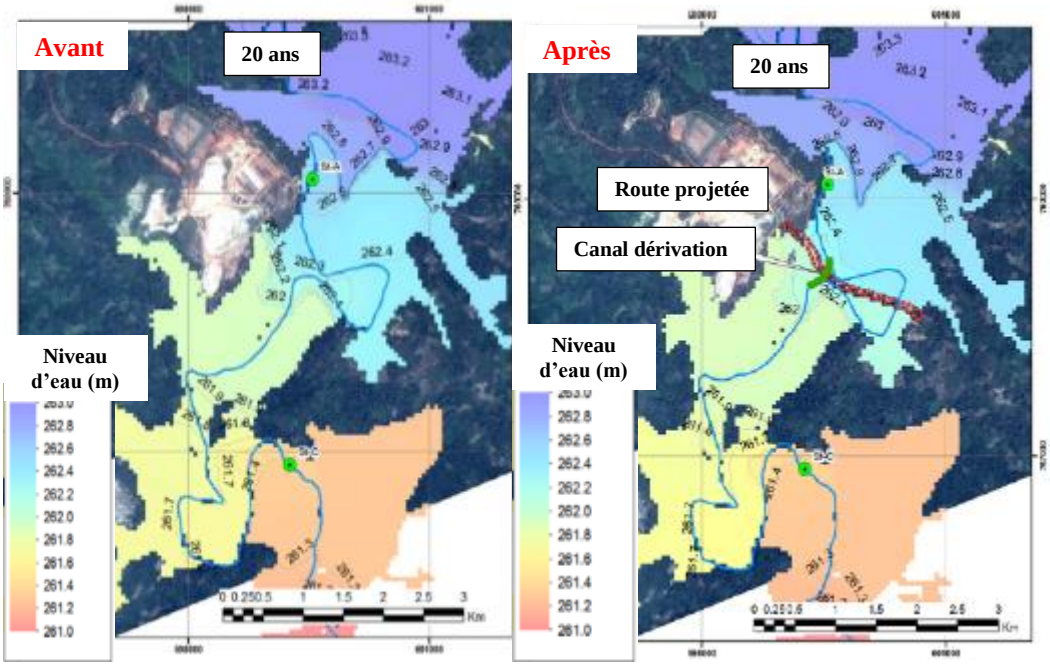


Figure 66 : Répartition des niveaux d'eau à la surface libre avant et après la coupure du méandre de Daapleu pour la période de retour de 20 ans.

La Figure 67 montre la distribution des altitudes maximales à la surface libre (ASL) du Cavally après la construction du canal de dérivation pour les crues de période de retour 100 ans. Au regard de ces cartes, le niveau d'eau est de 262,6 m avant la coupure du méandre de Daapleu et de 262,8 m après la coupure du méandre dans la zone de coupure du méandre. Nous remarquons une légère augmentation du niveau d'eau de 20 cm en amont la zone de coupure du méandre.

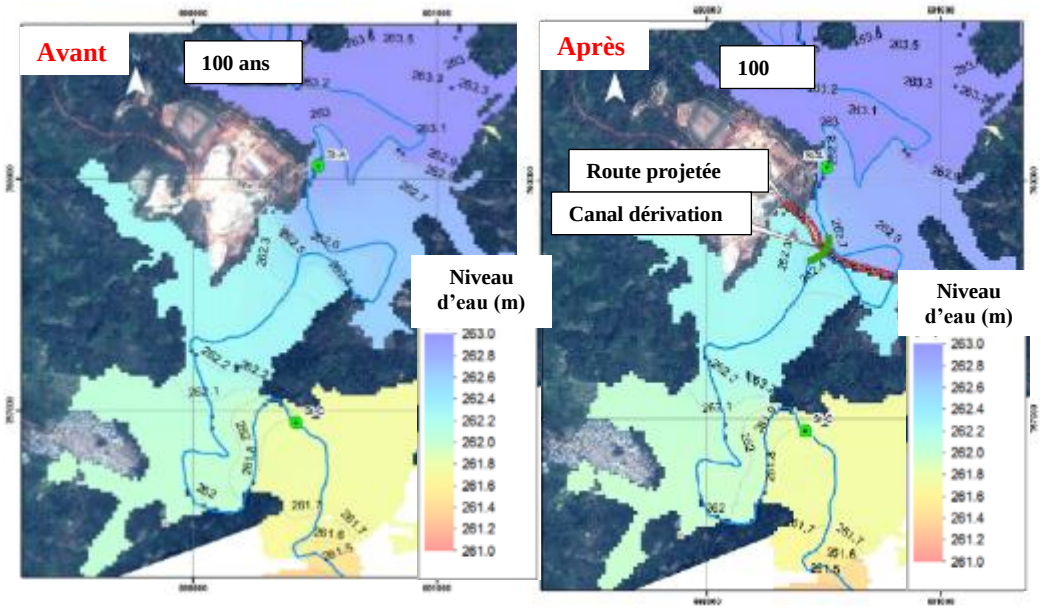


Figure 67 : Répartition des niveaux d'eau à la surface libre avant et après la coupure du méandre de Daapleu pour la période de retour de 100 ans.

8.2.2.2. Différence de niveaux d'eau avant et après la construction du canal de dérivation de Daapleu pour les périodes de retour de 20 ans et 100 ans

La Figure 68 montre la différence entre les niveaux d'eau avant et après la construction du canal de dérivation de Daapleu pour les périodes de retour 20 ans et 100 ans. Il ressort de l'analyse de ce résultat que le niveau de l'eau augmente de 20 cm en amont du chenal. Cette augmentation du niveau d'eau pourrait être due à la route projetée dans la zone de coupure du méandre de Daapleu.

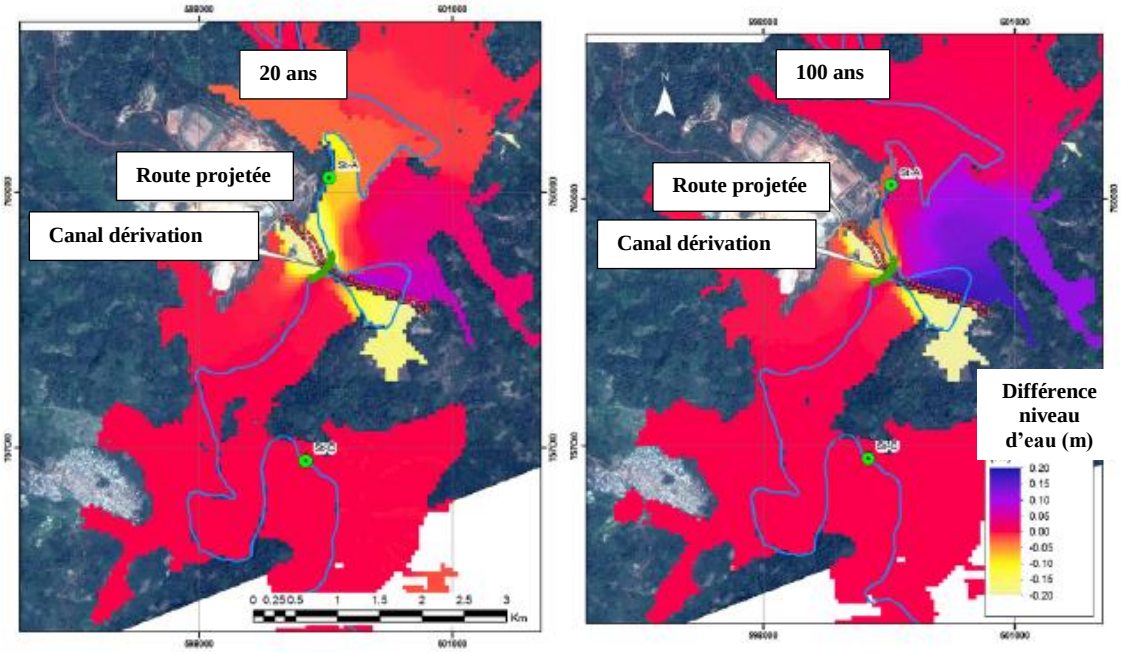


Figure 68 : Différence entre les niveaux d'eau avant et après la construction du canal de dérivation de Daapleu pour les périodes de retour 20 ans et 100 ans.

8.2.3. Cartes des zones inondables dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI

8.2.3.1. Cartes des inondables du fleuve Cavally en écoulements non permanents dans les conditions initiales et futures dans le périmètre d'exploitation de la SMI

Les résultats obtenus dans cette étude seront présentés sous forme de cartes et de tableaux. Ces résultats concernent donc les profondeurs maximales des crues, les vitesses maximales de propagation des crues et les altitudes maximales de la surface libre (ALS) issues de la simulation avec l'hydrogramme de crue de référence de 1988 dans les conditions initiales et futures du fleuve du Cavally à la station hydrométrique d'Ity.

8.2.3.1.1. Cartes de la répartition de la profondeur maximale dans les conditions initiales et futures

La distribution spatiale des profondeurs de l'inondation dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally est présentée par la Figure 69. La profondeur maximale est de 6,37 m avec une moyenne de 1,45 ± 1,30 m au niveau de la plaine inondable dans les conditions initiales. La profondeur maximale est de 7,35 m avec une moyenne de 1,53±1,29 m au niveau de la plaine inondable dans les conditions futures. Les profondeurs sont plus importantes au niveau du lit mineur que dans la plaine inondable (Figure 70).

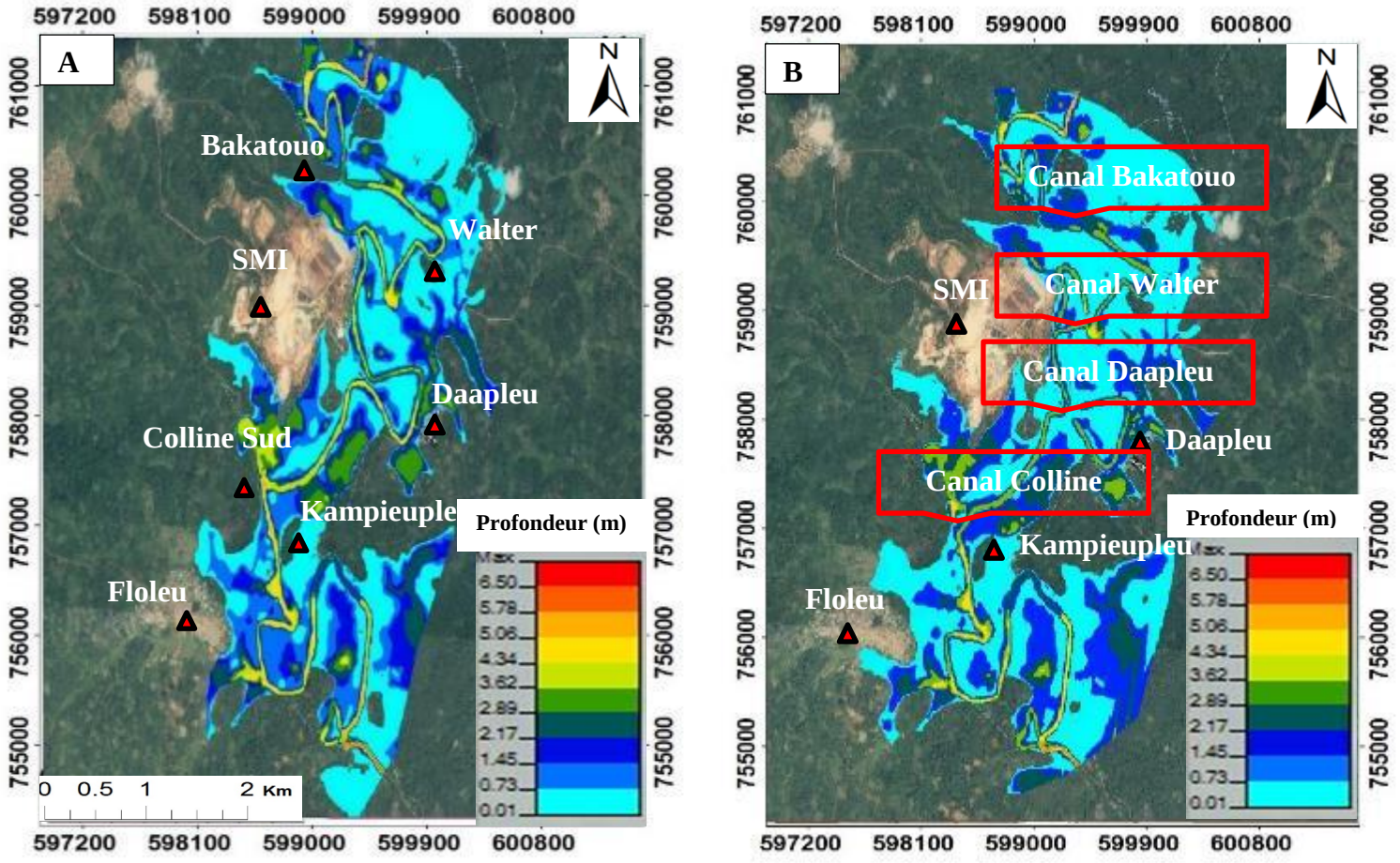


Figure 69 : Distribution des profondeurs maximales du fleuve Cavally dans les conditions initiales (A) et futures (B) pour l'hydrogramme de crues de 1988.

Dans les conditions initiales, la profondeur moyenne du lit mineur est de 3,19 ± 1,38 m (Figure 70). Des profondeurs maximales peuvent atteindre 6 m. Les profondeurs les importantes sont enregistrées au niveau du lit mineur du cours d'eau.

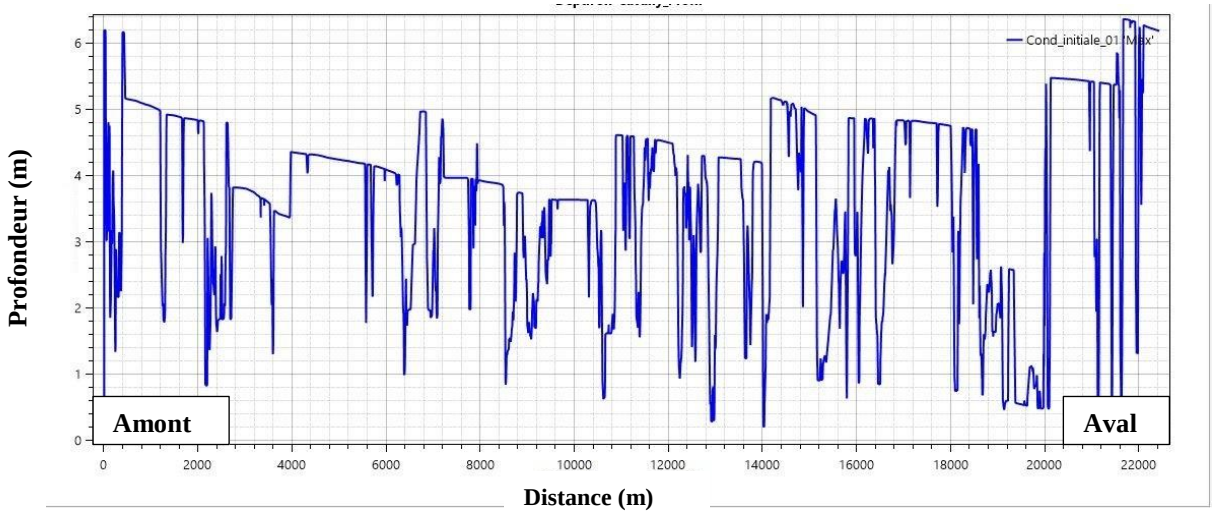


Figure 70 : Variation de la profondeur maximale dans le lit mineur du fleuve dans la zone d'Ity dans les conditions initiales pour l'hydrogramme des crues de 1988.

Dans les conditions futures, la profondeur maximale dans le lit mineur du Cavally est de 6,65 m avec une profondeur moyenne de 4,52 ± 0,88 m (Figure 71).

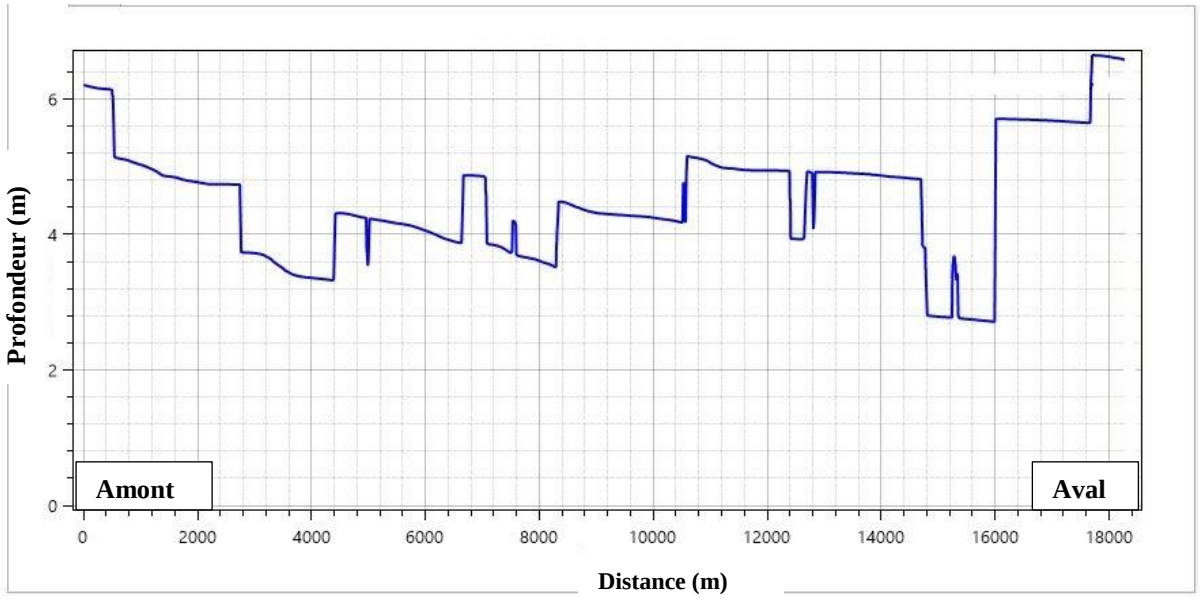


Figure 71 : Profondeur d'eau dans le lit mineur du Cavally dans les conditions futures pour l'hydrogramme des crues de 1988.

8.2.3.1.2. Cartes de la répartition des altitudes à la surface libre dans les conditions initiales et futures

Les Altitudes de la Surface Libre (ASL) de l'eau sont présentées par la Figure 72 dans les conditions initiales (A) et futures (B) . Concernant les conditions initiales, la valeur maximale des ASL est de 263,19 m avec une moyenne de 261,44 m ± 0,94 m répartie sur toute la zone inondable. Dans les conditions futures, la plaine inondable présente des altitudes à surface libre de l'eau dans l'ordre de 263 à 260 m de l'amont vers l'aval de la portion du cours d'eau étudiée. La valeur moyenne est de 261,51 ± 0,77 m.

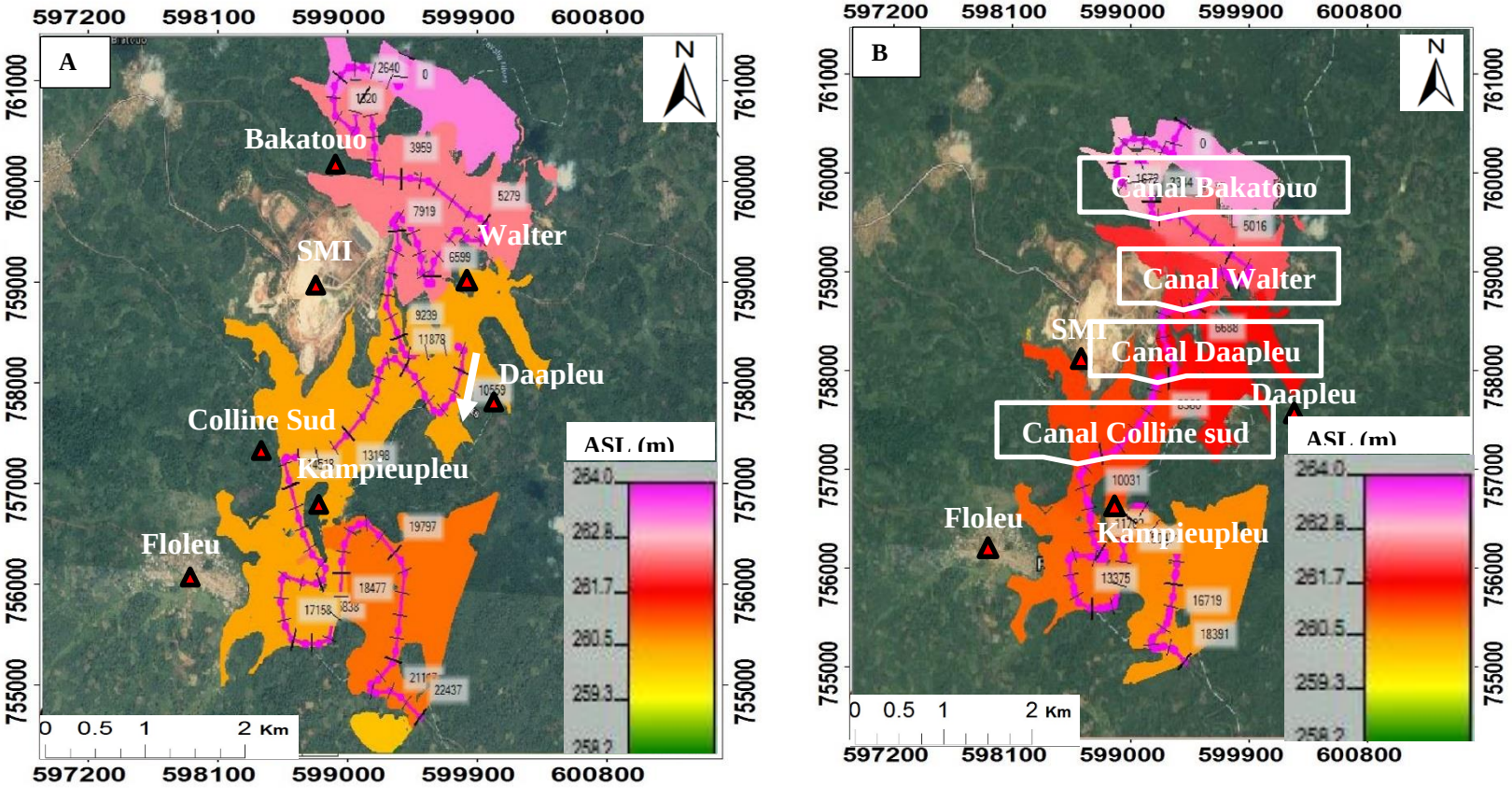


Figure 72 : Etendue des Altitudes de la Surface Libre (ASL) de l'eau dans la plaine inondable du Cavally dans les conditions initiales (A) et futures (B) pour l'hydrogramme de crues de 1988.

Le profil en long de la section du Cavally étudiée dans les conditions initiales est présenté par la Figure 73. Ce profil en long montre que le niveau d'eau maximal de 263,19 m avec un niveau d'eau moyen de 261,47 ± 0,81 m. Le niveau maximal est enregistré en amont de la section du cours d'eau.

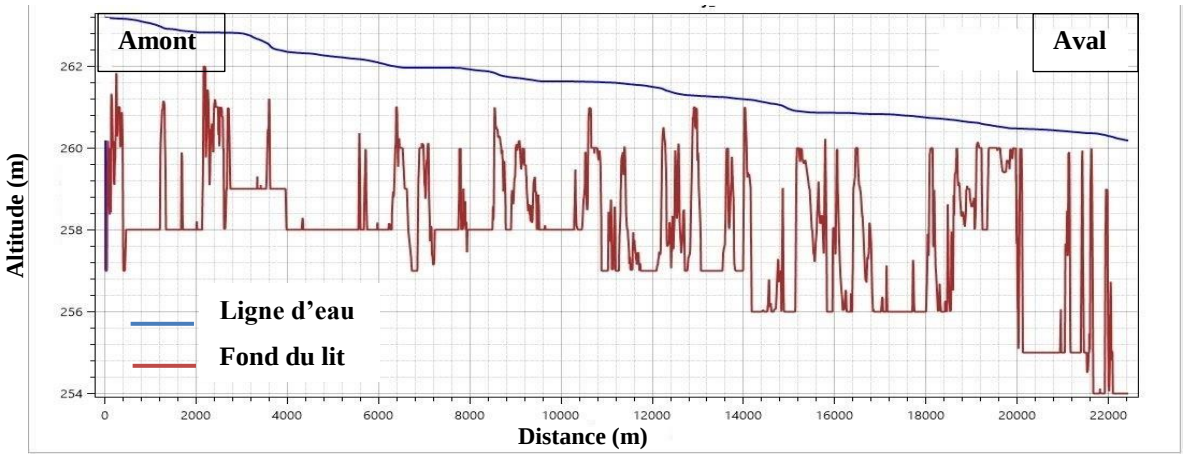


Figure 73 : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée dans les conditions initiales pour l'hydrogramme de crues de 1988.

Le profil en long de la portion du Cavally étudiée dans les conditions futures présente une altitude à surface libre de l'eau maximale de 263,21 m avec une valeur moyenne de 261,57 ± 0,80 m (Figure 74). L'altitude à surface libre minimale est de 260,56 m.

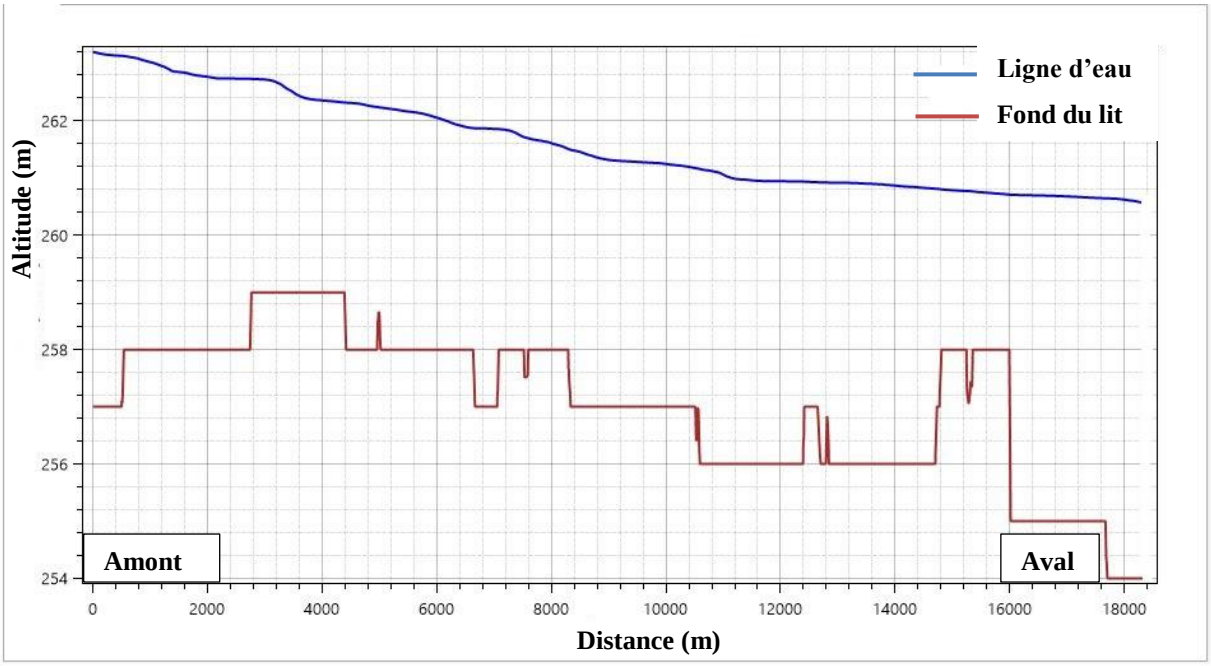


Figure 74 : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée dans les conditions futures pour l'hydrogramme de crues de 1988.

8.2.3.1.3. Cartes de la répartition des vitesses de propagation des crues dans les conditions initiales et futures

La Figure 75 présente la répartition des vitesses dans la plaine inondable de la zone d'étude dans les conditions initiales (A) et futures (B). La valeur moyenne des vitesses maximales est de 0,17 m/s ± 0,16 m/s dans les conditions initiales. Au niveau des conditions futures, la valeur moyenne des vitesses maximales est de 0,16 m/s ± 0,16 m/s. Les vitesses sont relativement plus importantes au niveau du lit mineur que le lit majeur. Les vitesses sont relativement plus importantes au niveau du lit mineur que le lit majeur.

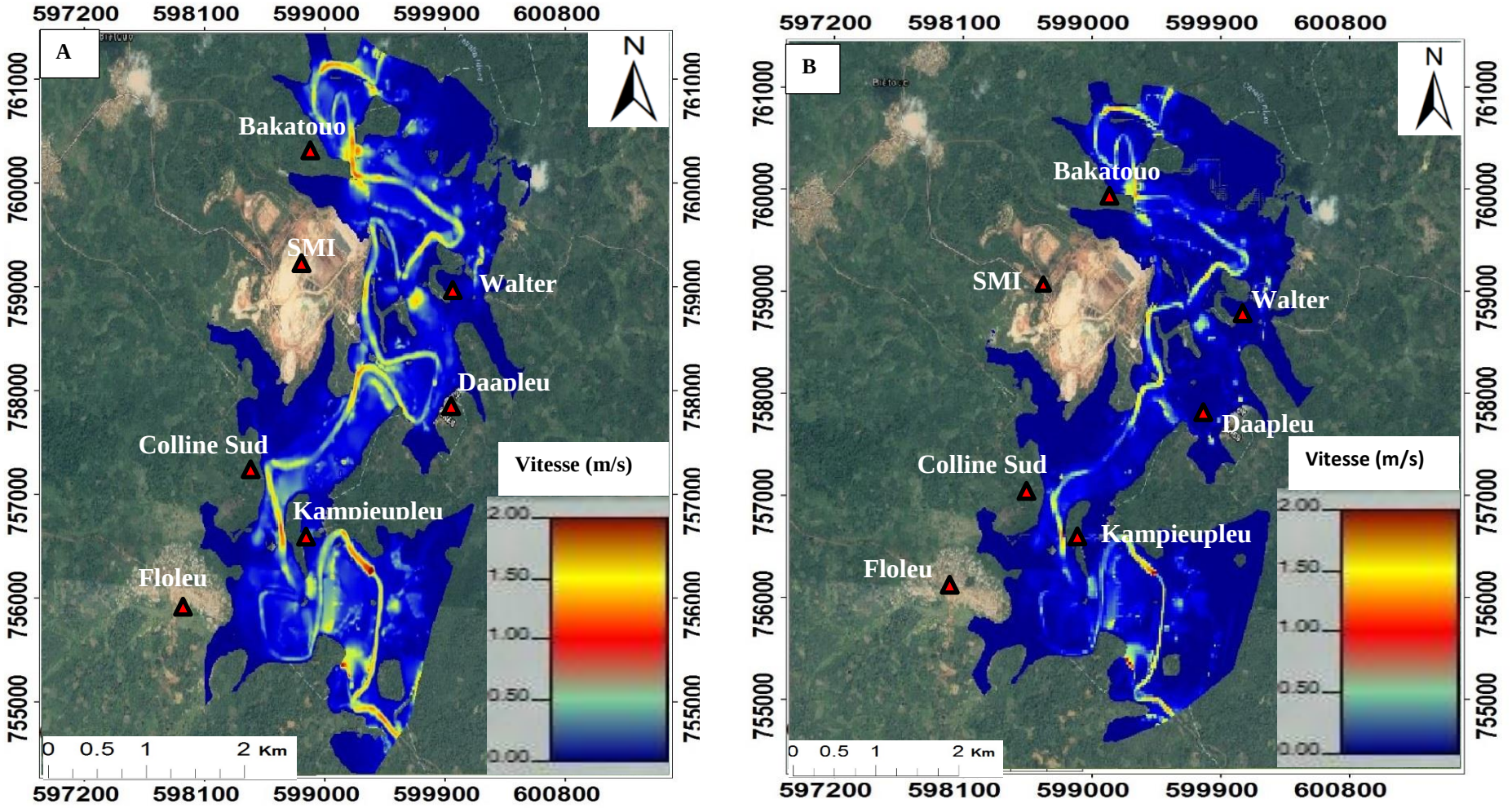


Figure 75 : Répartition des vitesses dans la plaine inondable de la zone d'étude dans les conditions initiales (A) et futures (B).

La vitesse dans le lit mineur est comprise entre 0 (début de la simulation) et 1 m/s (Figure 76) dans les conditions initiales. La valeur moyenne de cette vitesse est de 0,41 ± 0,17 m/s.

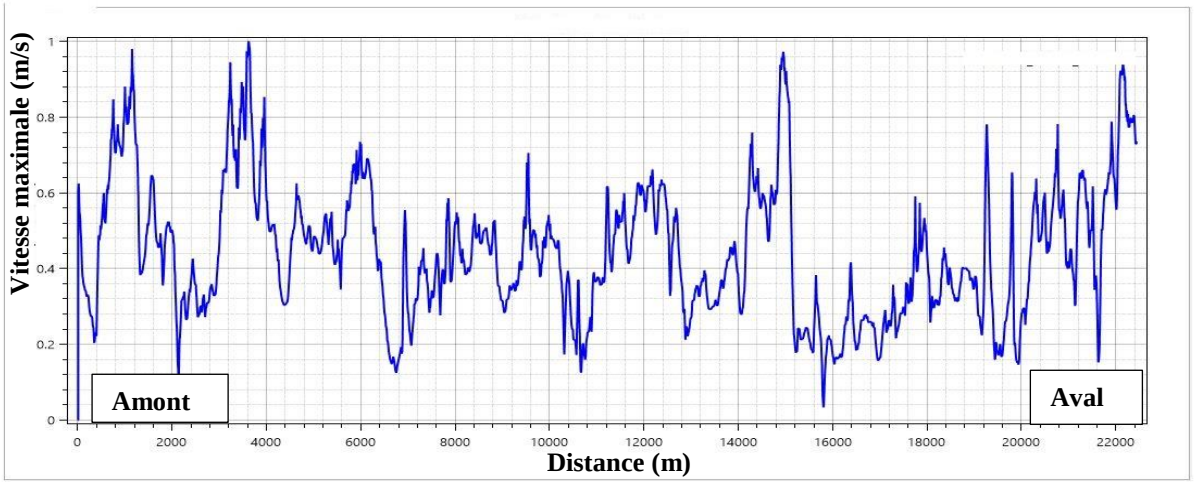


Figure 76 : Variation de la vitesse s le lit mineur du Cavally dans la zone étudiée dans les conditions initiales pour l'hydrogramme de crues de 1988.

La vitesse de la propagation des crues dans le lit mineur est comprise entre 0,165 et 2,281 m/s dans les conditions futures (Figure 77). La valeur moyenne de cette vitesse est de 0,568 ± 0,205 m/s.

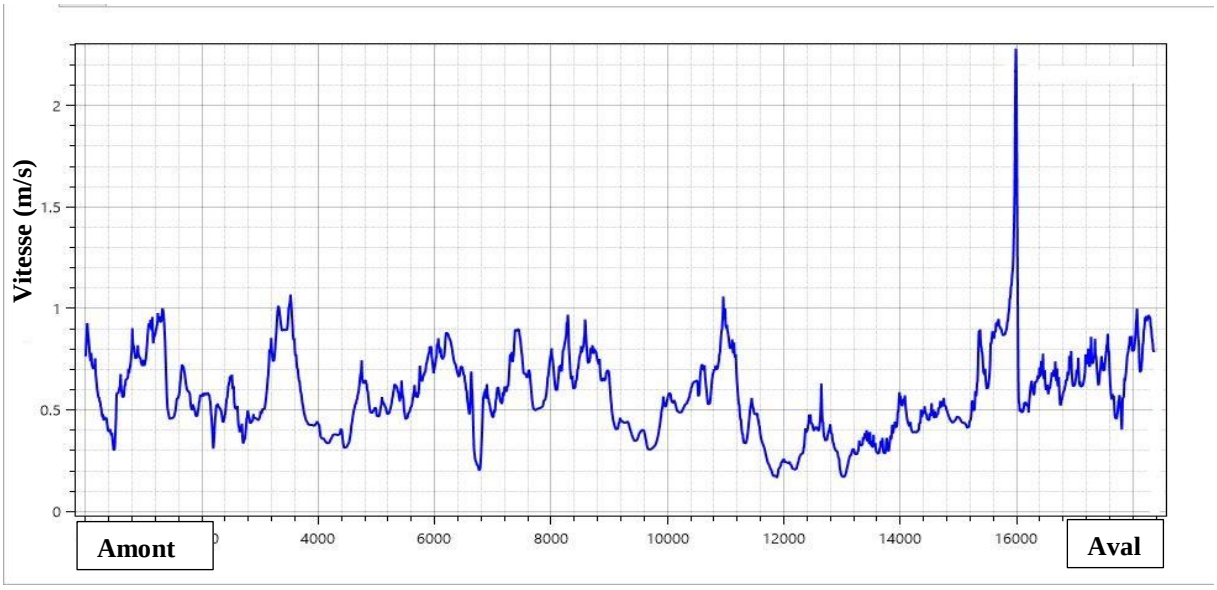


Figure 77 : Variation de la vitesse de la propagation des crues dans le lit mineur du Cavally au niveau de la zone étudiée dans les conditions futures pour l'hydrogramme de crues de 1988.

Les vitesses simulées par le modèle sont quasiment similaires aux vitesses mesurées par l'ADCP sur le cours d'eau à différentes périodes de campagne au niveau des stations de mesure à savoir juillet-octobre 2015 et septembre-octobre 2018 (Figure 78).

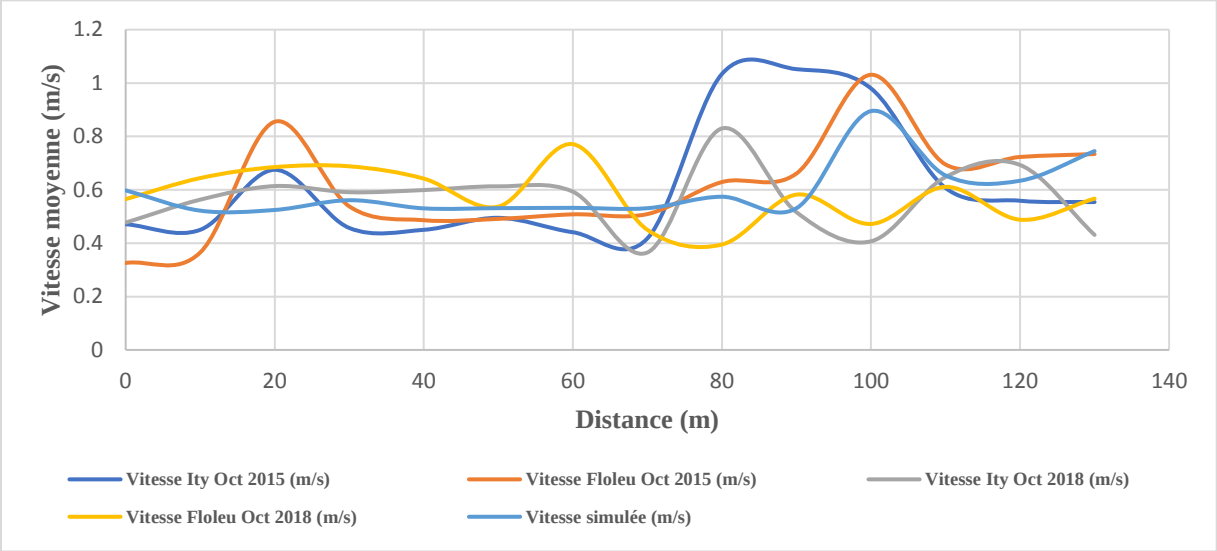


Figure 78 : Comparaison des vitesses moyennes mesurées au cours des périodes de campagnes avec les vitesses simulées par le modèle.

Les vitesses moyennes de ces différentes périodes de mesures ainsi que celles simulées par le modèle de propagation des crues, évoluent presque dans le même ordre de grandeurs (Tableau XXIV).

Tableau XXIV : Comparaison entre les vitesses moyennes mesurées du Cavally à la vitesse simulée par le modèle dans les conditions initiales.

	Ity Oct 2015	***Floleu Oct 2015***	***Ity Oct 2018***	***Floleu Oct 2018***	**Vitesse simulée**
Vitesse moyenne (m/s)	0,62	0,61	0,57	0,58	0,60
Ecart-type	0,23	0,19	0,12	0,10	0,11

8.2.3.2. Test de sensibilité du modèle de propagation de crues avec les débits de projet dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally

Les résultats du test de sensibilité ont été obtenus avec les débits de projet de période de retour de 10 ; 20 ; 50 et 100 ans dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally. Ces résultats sont présentés sous forme de figures et de tableaux. Ils concernent donc les profondeurs des crues, les vitesses de propagation des crues et les altitudes de la surface libre (ASL) maximales de l'eau provenant des différentes périodes de retour.

8.2.3.2.1. Cartes de la répartition des profondeurs dans les conditions initiales et futures pour la période de retour de 10, 20, 50 et 100 ans.

- **Cartes de la répartition des profondeurs pour la période de 10 ans**

Le Tableau XXV présente les valeurs minimales, maximales, moyennes et les écart-types des profondeurs pour la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally. Les profondeurs moyennes sont respectivement de 1,44 ± 1,32 m et 1,42±1,32 m dans les conditions initiales et futures.

Tableau XXV : Valeurs caractéristiques des profondeurs du fleuve Cavally dans les conditions initiales et futures pour une périodes de retour 10 ans.

	Période de retour (ans)	Min (m)	Max (m)	Moyenne (m)	Ecart-type(m)
Conditions initiales	10	0,001	6,22	1,44	1,32
Conditions futures		0,00	6,26	1,42	1,32

Au regard de ce tableau, on remarque que les valeurs moyennes sont sensiblement égales pour ces différentes périodes de récurrence.

La Figure 79 présente la répartition des profondeurs de l'inondation pour la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally.

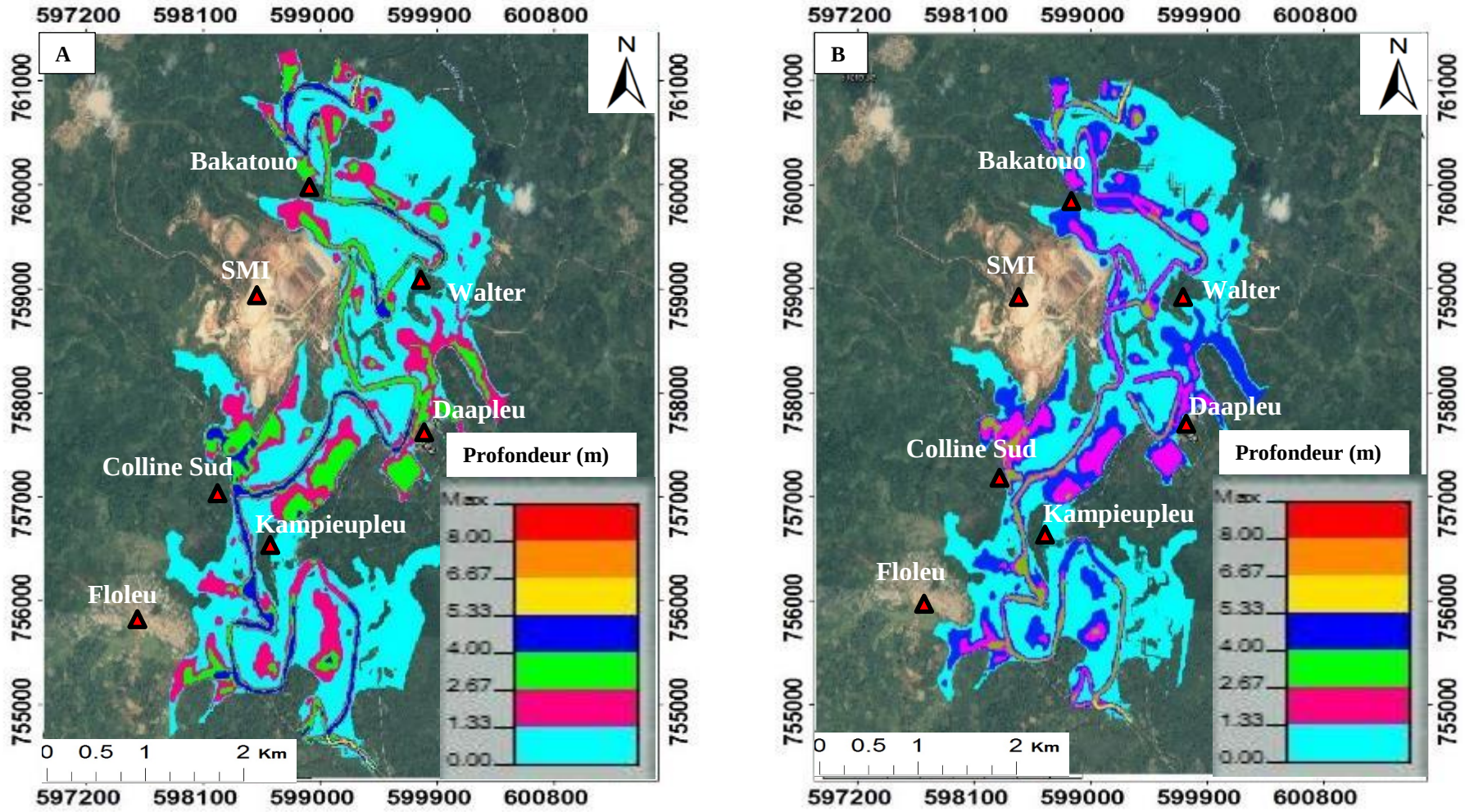


Figure 79 : Répartition des profondeurs du fleuve Cavally pour la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

❖ Cartes de la répartition des profondeurs pour la période de retour de 20 ans

Le Tableau XXVI présente les valeurs minimales, maximales, moyennes et l'écart-type des profondeurs pour les conditions initiales et futures. Les profondeurs moyennes sont de 1,50 ± 1,32 m ; et 1,48 ± 1,30 m respectivement dans les conditions initiales et futures.

Tableau XXVI : Valeurs caractéristiques des profondeurs du fleuve Cavally pour la période de retour 20 ans dans les conditions initiales et futures.

	Période de retour (ans)	Min (m)	Max (m)	Moyenne (m)	Ecart-type(m)
Conditions initiales	20	0,001	6,34	1,50	1,32
Conditions futures		0,00	6,35	1,48	1,30

Au regard de ce tableau, on remarque que les valeurs moyennes sont sensiblement égales pour ces différentes périodes de récurrence.

La Figure 80 présente la répartition des profondeurs de l'inondation pour la période de retour de 20 ans dans les conditions initiales et futures.

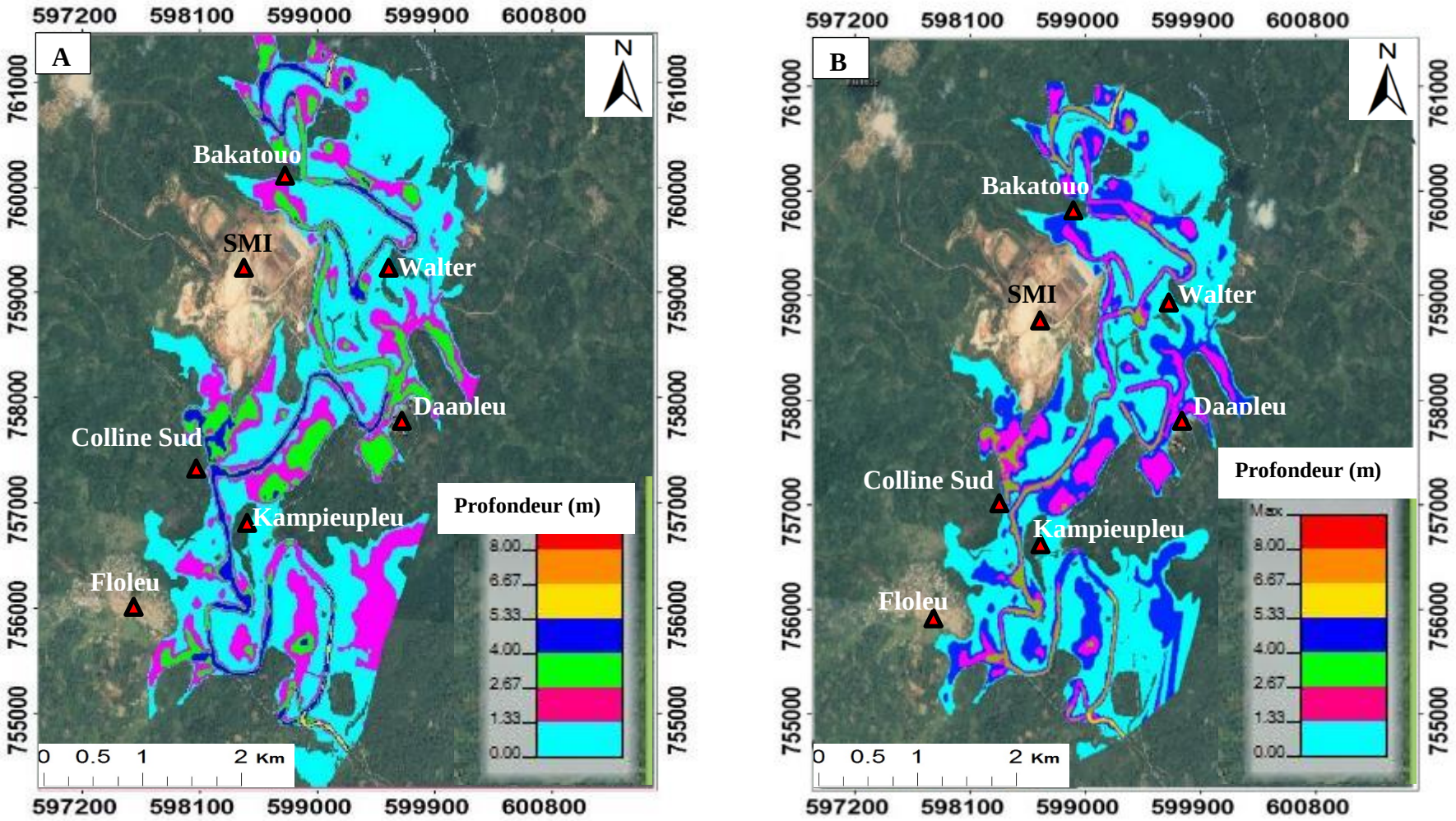


Figure 80: Répartition des profondeurs du fleuve Cavally pour la période de retour de 20 dans les conditions initiales (A) et futures (B).

❖ Cartes de la répartition des profondeurs pour la période de retour de 50 ans

Le Tableau XXVII présente les valeurs minimales, maximales, moyennes et l'écart-type des profondeurs pour les conditions initiales et futures. Les profondeurs moyennes sont de 1,57 ± 1,33 m ; et 1,57 ± 1,30 m respectivement dans les conditions initiales et futures. Ces profondeurs moyennes sont quasiment identiques.

Tableau XXVII : Valeurs caractéristiques des profondeurs du fleuve Cavally pour la période de retour 50 ans dans les conditions initiales et futures.

	Période de retour (ans)	Min (m)	Max (m)	Moyenne (m)	Ecart-type(m)
Conditions initiales	50	0,00	6,54	1,57	1,33
Conditions futures		0,00	6,51	1,57	1,30

La Figure 81 présente la répartition des profondeurs de l'inondation pour la période de retour de 50 ans dans les conditions initiales et futures.

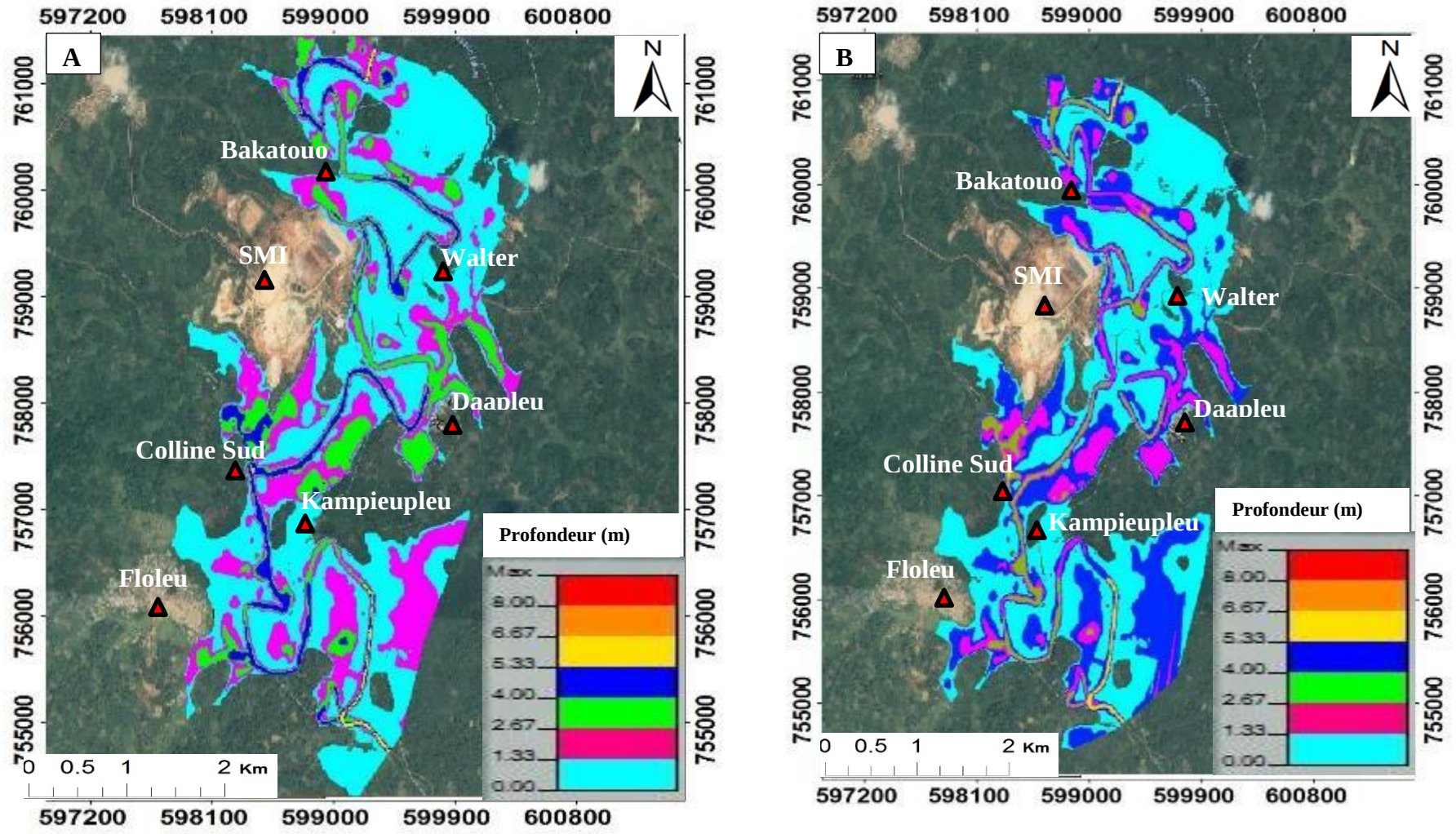


Figure 81 : Répartition des profondeurs du fleuve Cavally pour une période de retour de 50 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

❖ Cartes de la répartition des profondeurs pour la période de retour de 100 ans

Les profondeurs maximales moyennes sont respectivement de 6,62 m et 7,76 m pour les débits de projet de100 ans dans les conditions initiales et futures (Tableau XXVIII**)**

Tableau XXVIII : Valeurs caractéristiques des profondeurs du Cavally pour chaque débit de projet.

	Périodes de retour (ans)	Min (m)	Max (m)	Moyenne (m)	Ecart-type(m)
Conditions initiales	100	0,001	6,62	1,62	1,33
Conditions futures		0,00	7,76	1,65	1,31

La distribution spatiale de la profondeur maximale dans la plaine inondable pour la période de retour de 100 ans dans les conditions initiales et futures est représentée par la Figure 82 Les profondeurs les plus importantes sont observées au niveau du lit mineur. Les faibles profondeurs sont observées dans la plaine inondable en s'éloignant du lit mineur du fleuve.

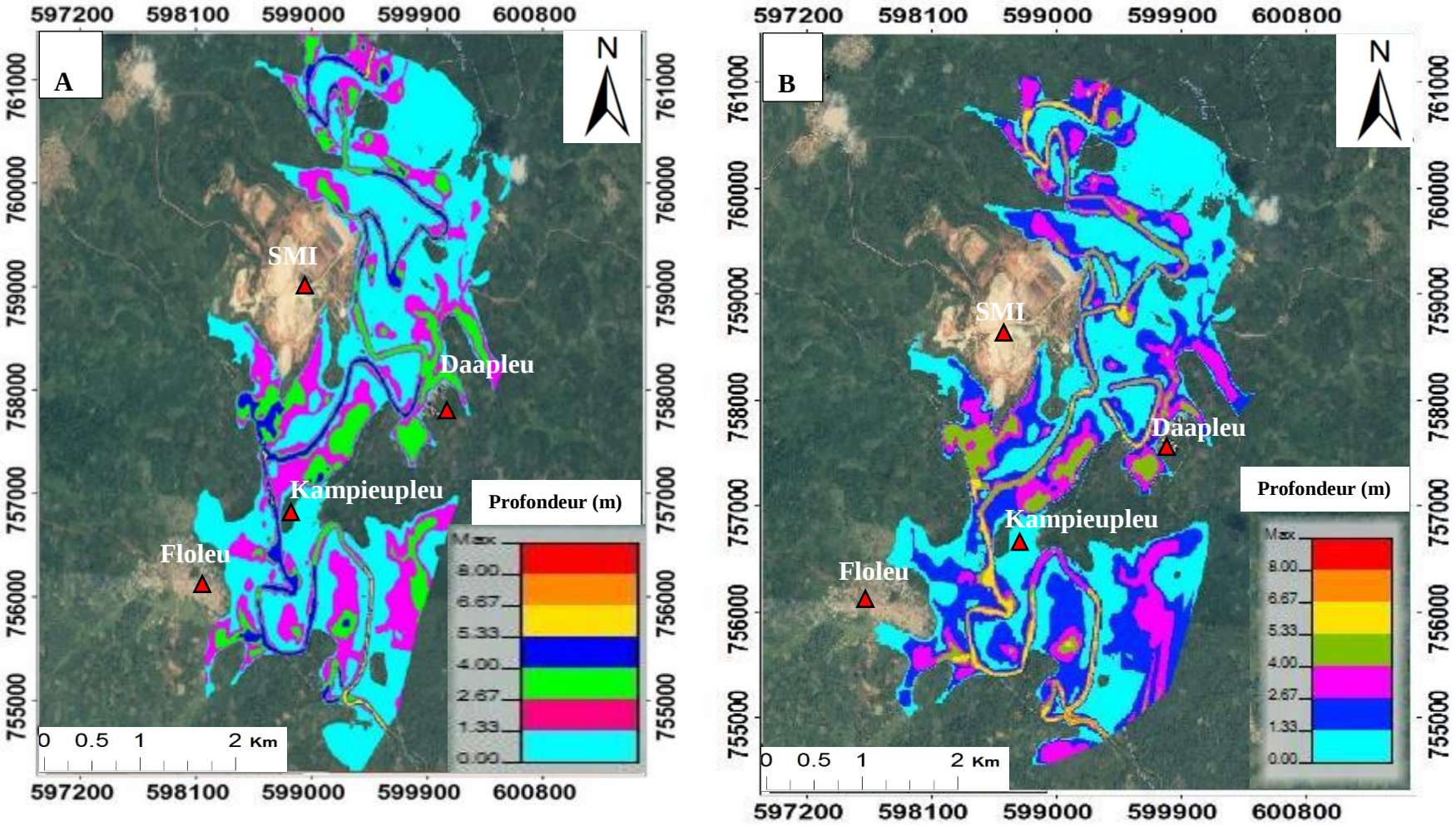


Figure 82 : Répartition des profondeurs maximales du fleuve Cavally pour la période de retour 100 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

Dans les conditions initiales du fleuve, , le profil de répartition des profondeurs, donne des valeurs caractéristiques de profondeurs maximales, moyennes et minimales pour chaque période de retour au niveau du lit mineur de la portion du Cavally étudiée pour les périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans (Tableau XXIX).

Tableau XXIX : Valeurs caractéristiques de la répartition de la profondeur au niveau du lit mineur pour chaque période de retour dans les conditions initiales.

	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans
Max (m)	6,61	6,53	6,33	6,23
Moyenne (m)	3,44	3,38	3,26	3,15
Ecart-type (m)	1,38	1,38	1,38	1,38
Min (m)	0,51	0,44	0,31	0,13

Au regard de ce tableau, les profondeurs maximales sont respectivement de 6,61m ; 6,53 m ; 6,33 m ; 6,23 m pour les débits de projet de 100 ; 50 ; 20 ; 10 ans. Les profondeurs moyennes des débits de projet de 100 ; 50 ; 20 et 10 ans sont respectivement de 3,439 ± 1,376 m ; 3,375 ± 1,377 m ; 3,255 ± 1,380 m et 3,146 ± 1,380 m.

La Figure 83 illustre la répartition de la profondeur au niveau du lit mineur de la portion du Cavally étudiée dans les conditions initiale du fleuve pour les périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans.

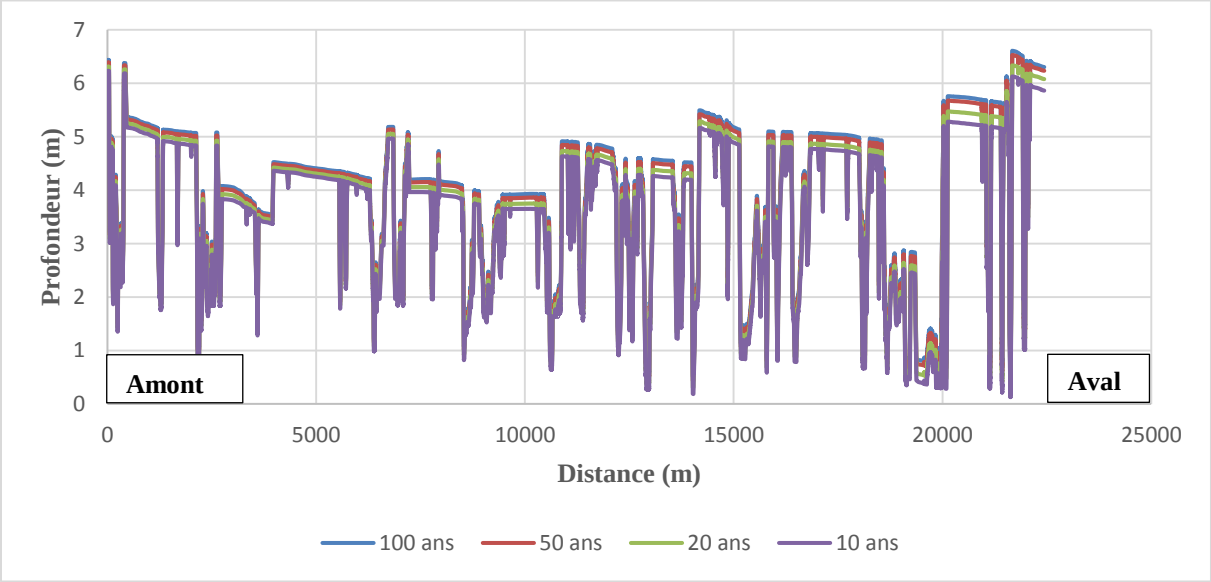


Figure 83 : Répartition des profondeurs maximales dans le lit mineur de la portion étudiée du Cavally dans les conditions initiales.

Dans les conditions futures du fleuves, , le profil de répartition des profondeurs donne au niveau du lit mineur de la portion du Cavally étudiée, des valeurs caractéristiques de profondeurs maximales, moyennes et minimales pour chaque période de retour (Tableau XXX).

À travers ce tableau, on constate que les profondeurs maximales sont respectivement de 6,76 m ; 6,51 m ; 6,35 m ; 6,26 m pour les débits de projet de 100 ; 50 ; 20 ; 10 ans. Les profondeurs moyennes des débits de projet de 100 ; 50 ; 20 et 10 ans sont respectivement de 4,71 ± 0,86 m ; 4,61 ± 0,85 m ; 4,48 ± 0,83 m ; 4,38 ± 0,82 m.

Tableau XXX : Valeurs caractéristiques de la répartition des profondeurs au niveau du lit mineur pour chaque période de retour dans les conditions futures.

	100 ans	***50 ans***	***20 ans***	***10 ans***
Maximum	6,76	6,51	6,35	6,26
Moyenne	4,71	4,61	4,48	4,39
Ecart-type	0,86	0,85	0,83	0,82
Minimum	2,84	2,63	2,39	2,28

La Figure 84 illustre bien la répartition de la profondeur au niveau du lit mineur de la portion du Cavally étudiée.

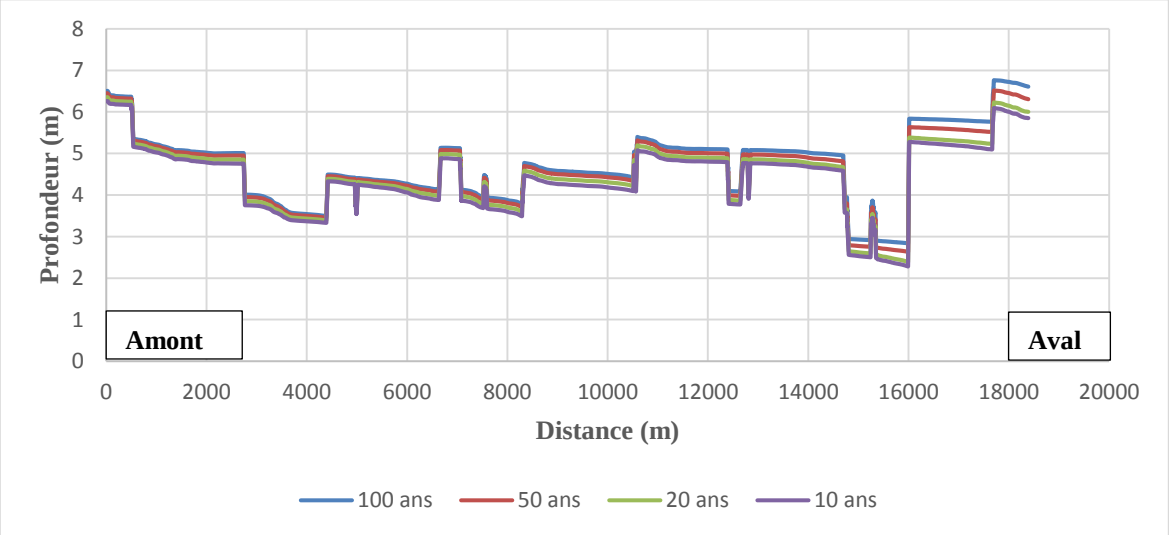


Figure 84 : Répartition de la profondeur maximale dans le lit mineur du Cavally dans les conditions futures.

8.2.3.2.2. Cartes de la répartition des vitesses de propagation des crues dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally pour les périodes de 10, 20, 50 et 100 ans

- **Cartes de la répartition des vitesses de propagation des crues pour la période de retour de 10 ans**

Le Tableau XXXI présente les valeurs caractéristiques des vitesses pour la période de retour 10 ans dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally. Les vitesses moyennes des crues sont respectivement de 0,34 ± 0,42 m/s et 0,33 ± 0,40 m/s dans les conditions initiales et futures la crue 10 ans. Ces valeurs moyennes sont sensiblement égales.

Tableau XXXI : Valeurs caractéristiques des vitesses du Cavally pour chaque période de retour.

	Période de retour (ans)	Min (m/s)	Max (m/s)	Moyenne (m/s)	Ecart-type(m/s)
Conditions initiales	10	0	1,71	0,34	0,42
Conditions futures		0	2,17	0,33	0,40

La distribution des vitesses pour la période de retour 10 ans dans les conditions initiales et futures est présentée par la Figure 85. Les valeurs des vitesses les plus importantes sont observées au niveau du lit mineur du fleuve.

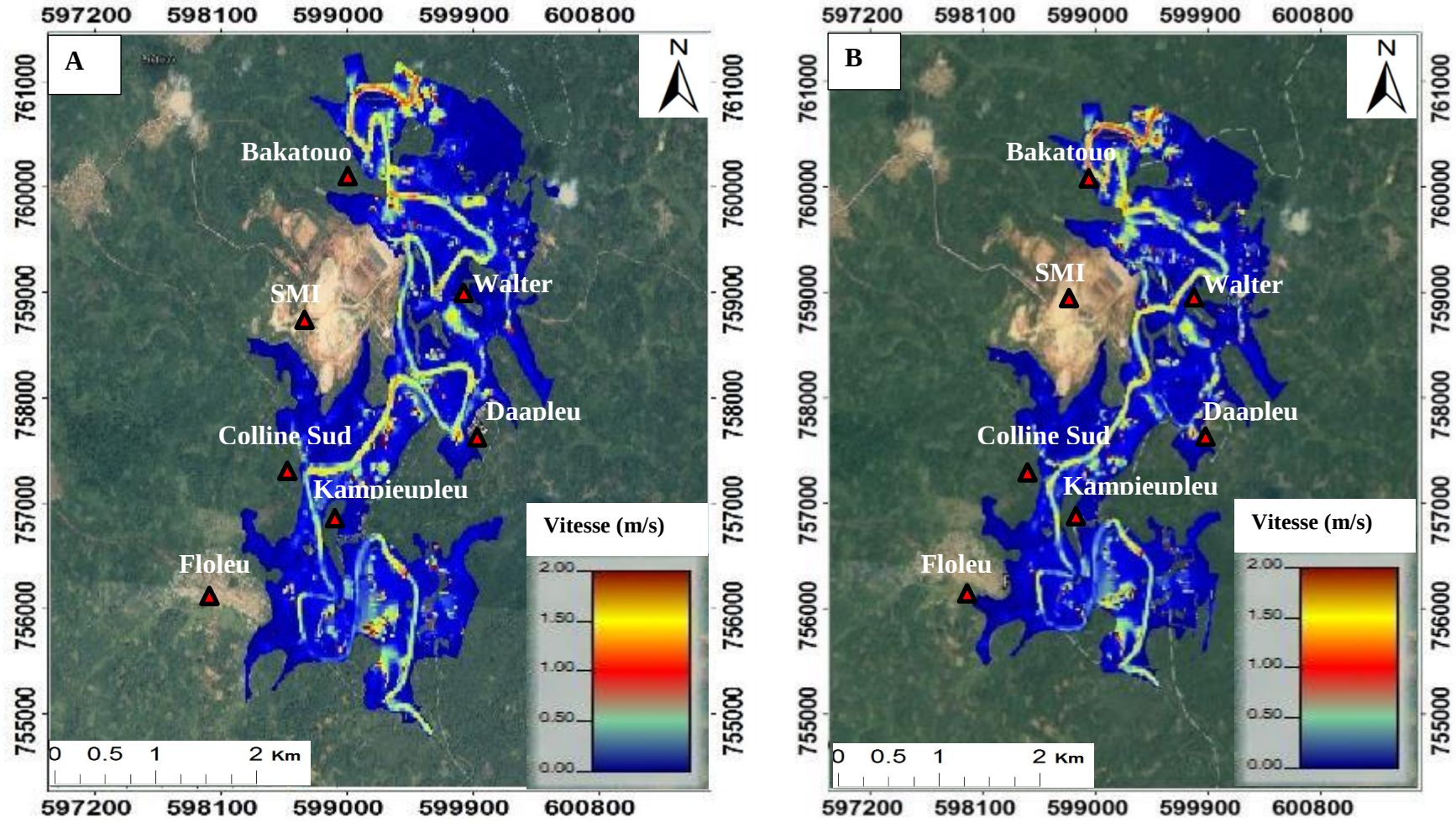


Figure 85 : Répartition des vitesses du fleuve Cavally pour la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

- **Cartes de la répartition des vitesses de propagation des crues pour la période de retour de 20 ans**

Le Tableau XXXII présente les valeurs caractéristiques des vitesses pour une période de retour 20 ans dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally. Les vitesses moyennes des crues sont respectivement de 0,37 ± 0,42 m/s et 0,35 ± 0,44 m/s dans les conditions initiales et futures la crue 20 ans. Ces valeurs moyennes sont sensiblement égales.

Tableau XXXII : Valeurs caractéristiques des vitesses du Cavally pour la période de retour de 20 ans dans les conditions initiales et futures.

	Période de retour (Ans)	Min (m/s)	Max (m/s)	Moyenne (m/s)	Écart-type (m/s)
Conditions initiales	20	0	2,32	0,37	0,42
Conditions futures		0	2,22	0,35	0,44

La distribution des vitesses pour la période de retour de 20 ans dans les conditions initiales et futures est présentée à la Figure 86. Les valeurs des vitesses les plus importantes sont observées au niveau du lit mineur du fleuve.

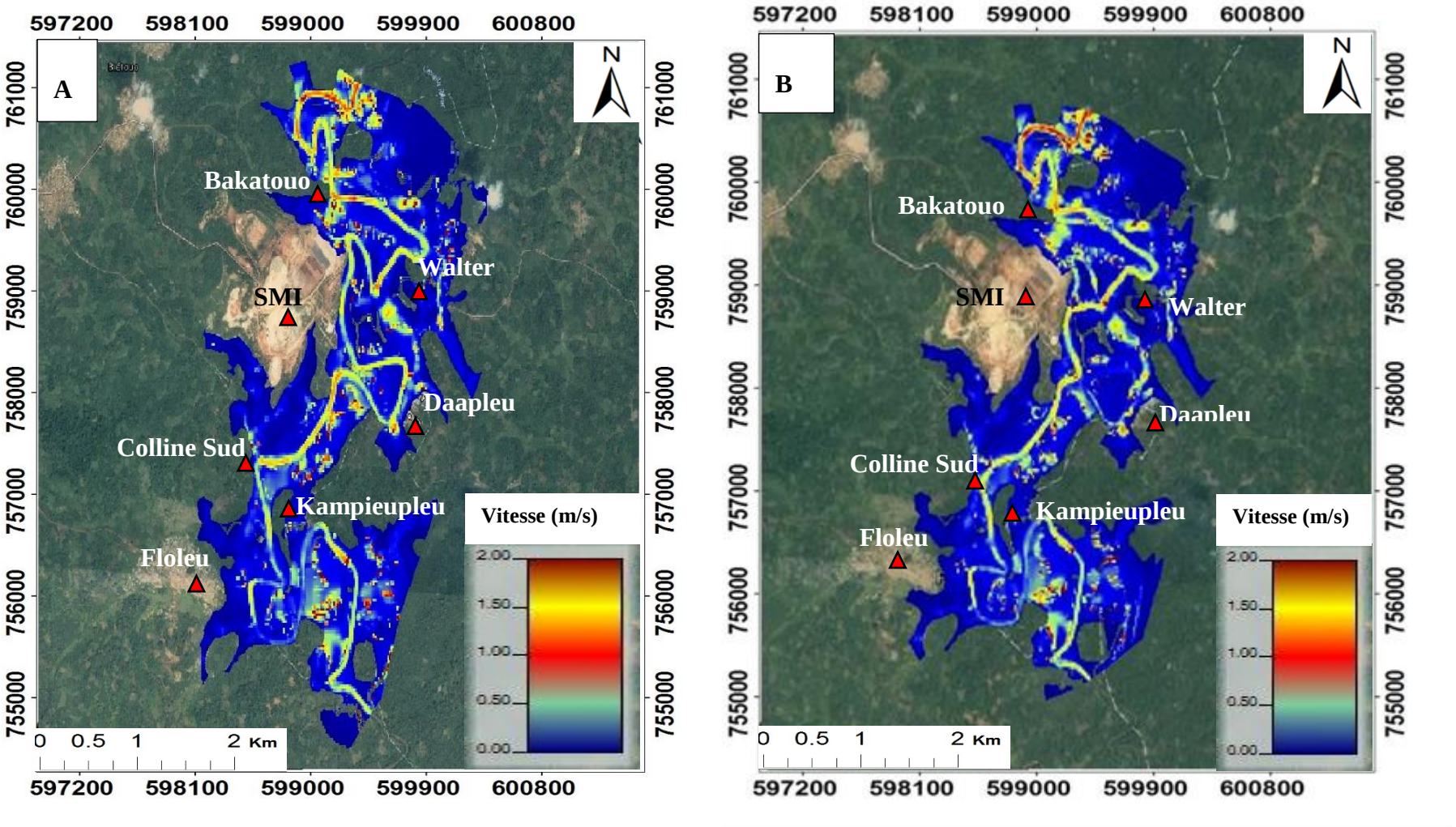


Figure 86 : Répartition des vitesses du fleuve Cavally pour une période de retour de 20 dans les conditions initiales (A) et futures (B).

- **Cartes de la répartition des vitesses de propagation des crues pour la période de retour de 50 ans**

Le Tableau XXXIII présente les valeurs caractéristiques des vitesses pour une période de retour 50 ans dans les conditions initiales et futures du fleuve Cavally. Les vitesses moyennes des crues sont respectivement de 0,39 ± 0,47 m/s et 0,38 ± 0,46 m/s dans les conditions initiales et futures la crue 50 ans. Ces valeurs moyennes sont sensiblement égales.

Tableau XXXIII : Valeurs caractéristiques des vitesses du Cavally pour la période de retour de 50 ans dans les conditions initiales et futures.

	Période de retour (Ans)	Min (m/s)	Max (m/s)	Moyenne (m/s)	Écart-type (m/s)
Conditions initiales	50	0	2,87	0,39	0,47
Conditions futures		0	2,24	0,38	0,46

La distribution des vitesses pour la période de retour de 50 ans dans les conditions initiales et futures est présentée à la Figure 87. Les valeurs des vitesses les plus importantes sont observées au niveau du lit mineur du fleuve.

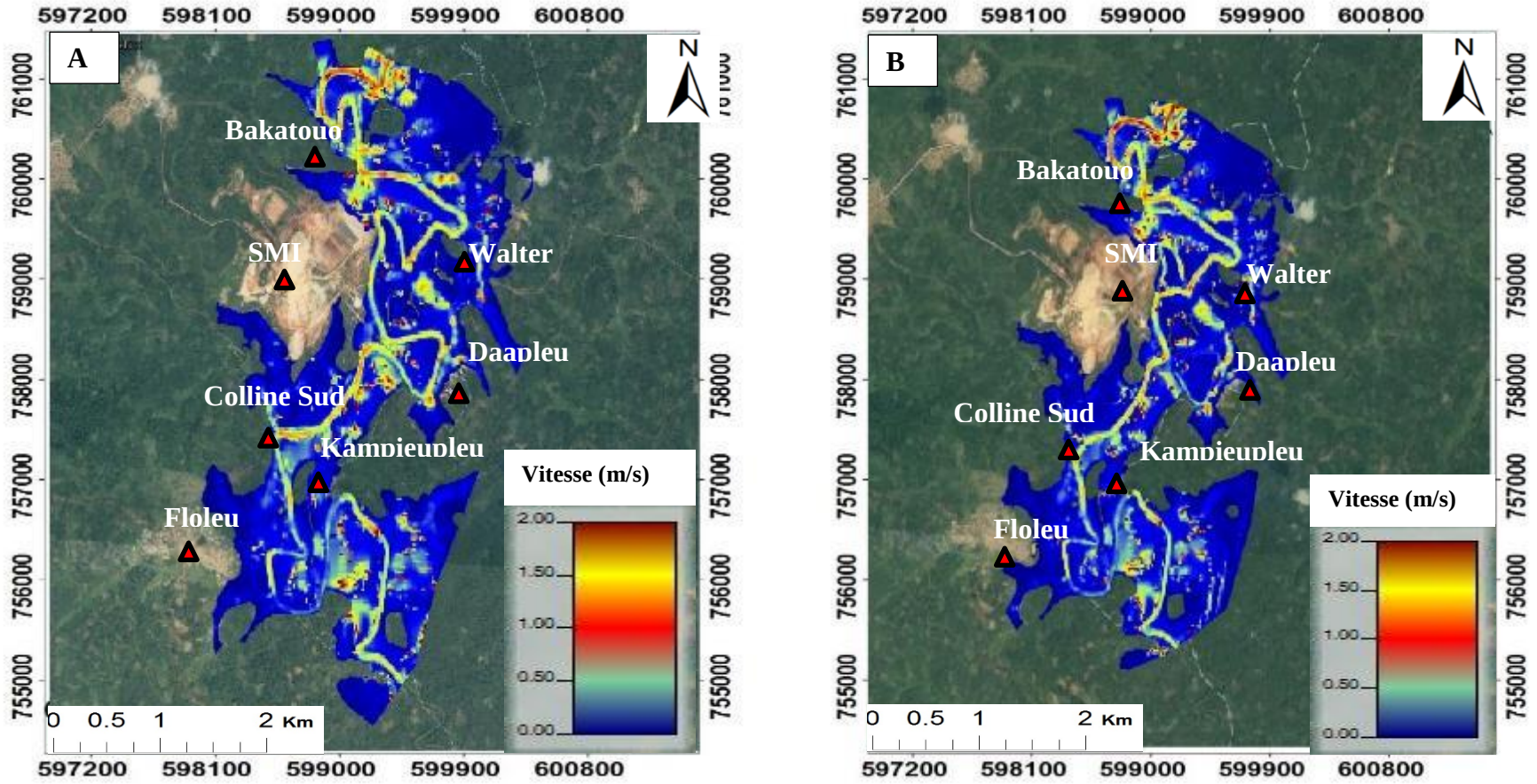


Figure 87 : Répartition des vitesses du fleuve Cavally pour les périodes de retour de 50 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

- **Cartes de la répartition des vitesses de propagation des crues pour la période de retour de 100 ans**

Les vitesses moyennes des crues sont respectivement de 0,41 ± 0,45 m/s et 0,40 ± 0,51 m/s dans les conditions initiales et futures la crue 100 ans (Tableau XXXIV). Les vitesses sont sensiblement égales dans les deux conditions.

Tableau XXXIV : Valeurs caractéristiques des vitesses du Cavally pour le débit de projet de 100 ans dans les conditions initiales et futures.

	Périodes de retour (année)	Min (m/s)	Max (m/s)	Moyenne (m/s)	Ecart-type (m/s)
Conditions initiales	100	0	2,92	0,41	0,45
Conditions futures		0	2,65	0,40	0,51

La distribution spatiale des vitesses des crues pour la période de retour de 100 ans dans les conditions initiales et futures montre que les vitesses sont plus importantes au niveau du lit mineur et relativement faibles en s'éloignant du lit mineur (Figure 88).

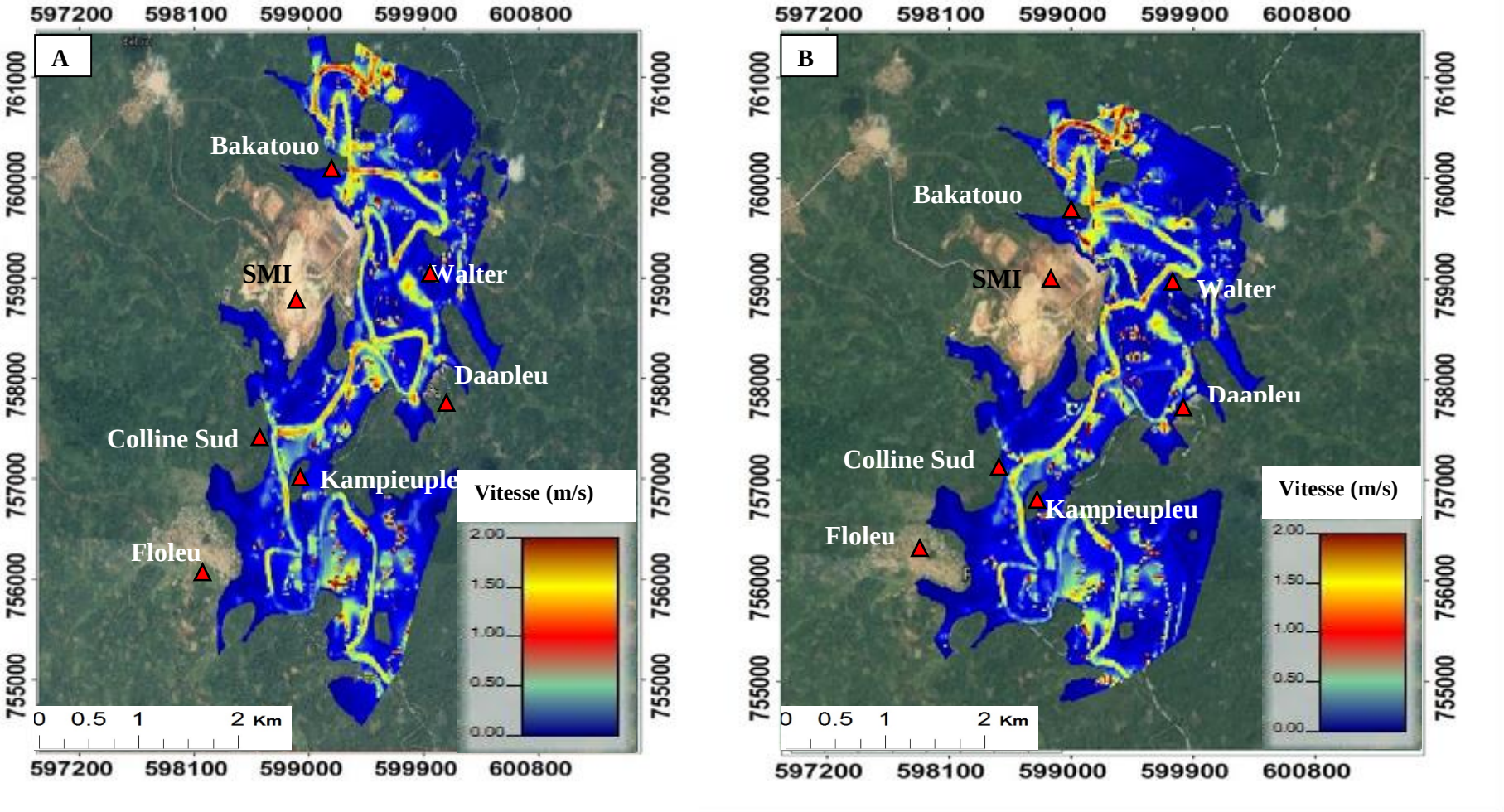


Figure 88 : Répartition des vitesses maximales des crues du Cavally pour la période de 100 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

Au niveau du lit mineur, les valeurs caractéristiques des vitesses dans les conditions initiales, sont présentées dans le Tableau XXXV pour chaque période de retour.

Tableau XXXV : Valeurs caractéristiques de la répartition de la vitesse au niveau du lit mineur du Cavally pour chaque débit de projet dans les conditions initiales.

	100 ans	*50 ans*	*20 ans*	**10 ans**
Max (m/s)	3	2,04	2,16	2,14
Movenne (m/s)	0.79	0.76	0.73	0.69
Ecart-type (m/s)	0,33	0,31	0,30	0,29
Min (m/s)	0,19	0,18	0,16	0,12

Ces vitesses ont pour valeurs moyennes respectives de 0,79 ± 0,33 m/s ; 0,76± 0,305 m/s ; 0,728 ± 0,300 m/s ; 0,690 ± 0,287 m/s pour les débits de période de retour 100 ; 50 ; 20 et 10 ans.

La variation de la vitesse des crues dans le mineur du Cavally pour chaque période de retour dans les conditions initiales est présentée à la Figure 89

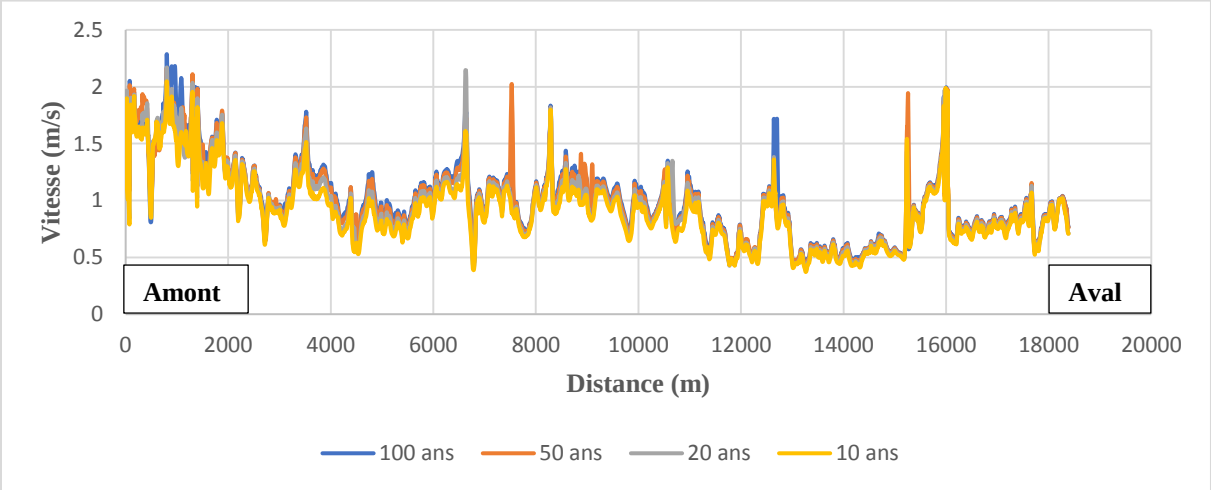


Figure 89 : Variation de la vitesse dans le lit mineur du Cavally pour chaque période de retour dans les conditions initiales.

Dans les conditions futures, les valeurs caractéristiques des vitesses au niveau du lit mineur, sont présentées dans le Tableau XXXVI pour chaque période de retour.

Tableau XXXVI : Valeurs caractéristiques des vitesses au niveau du lit mineur pour chaque période de retour dans les conditions futures.

	100 ans	*50 ans*	*20 ans*	*10 ans*
Maximum	2,29	2,16	2,17	2,05
Moyenne	0,10	0,99	0,95	0,91
Ecart-type	0,33	0,33	0,31	0,30
Minimum	0,45	0,41	0,39	0,37

Ces vitesses ont respectivement pour valeurs moyennes de 0,1 ± 0,33 m/s ; 0,1 ± 0,33 m/s ; 0,95 ± 0,31 m/s ; 0,91 ± 0,3 m/s pour les débits de période de retour de 100 ; 50 ; 20 et 10 ans.

La variation de la vitesse des crues dans le mineur du Cavally pour chaque période de retour dans les conditions futures est présentée à la Figure 90.

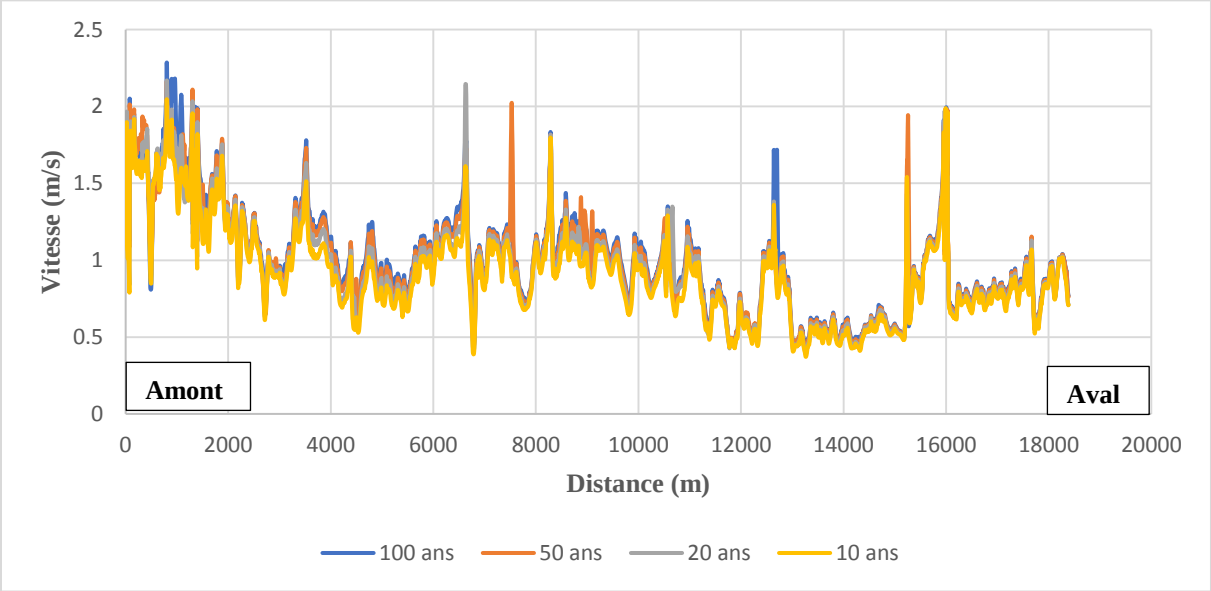


Figure 90 : Variation de la vitesse des crues dans le lit mineur du Cavally en fonction de chaque période de retour dans les conditions futures.

Des écarts sur les vitesses sont observés au niveau des anciens méandres (réduction des vitesses) et de la dérivation (augmentation des vitesses) après le détournement. Ainsi, la coupure des méandres provoque-t-elle des survitesses en amont en aval des méandres.

Les distances sur lesquelles des survitesses sont observées en amont et en aval des coupures des méandres sont présentées dans le Tableau XXXVII, en considérant un premier seuil de 0,05 m/s et un second seuil de 0,1 m/s.

Tableau XXXVII : Distance en amont et en aval des zones de dérivation sur lesquelles des survitesses sont observées.

	Survitesse > 0,1 m/s		*Survitesse > 0,05 m/s*	
	En amont	En aval	En amont	En aval
Bakatouo	400 m	300 m	1100 m	1200 m
Walter	300 m	100 m	400 m	400 m
Daapleu	300 m	200 m	500 m	300 m
Colline Sud	100 m	100 m	200 m	300 m

8.2.3.2.3. Cartes de la répartition des altitudes à la surface libre du Cavally dans les conditions initiales et futures pour les périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans

- **Cartes de la répartition des altitudes à surface libre pour la période de 10 ans**

Le Tableau XXXVIII présente les valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre (ASL) de la propagation des crues dans les conditions initiales et futures pour une période de retour de 10 ans. Les valeurs moyennes sont respectivement de 261,47±0,98 m et de 261,42±1,04 m dans les conditions initiales et futures.

Tableau XXXVIII : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre dans les conditions initiales et futures pour la périodes de retour 10 ans.

	Périodes de retour (ans)	Min (m)	Max (m)	Moyenne (m)	Ecart-type (m)
Conditions initiales	10	258,26	263,23	261,47	0,98
Conditions futures		256,06	263,26	261,42	1,04

La répartition des altitudes de la surface libre de l'eau est présentée par les images de la Figure 91 concernant la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales et futures. Il ressort que les niveaux d'eau les plus importants sont observés avant le méandre de Bakatouo dans l'ordre de 263 m. Aussi, le niveau d'eau a-t-il baissé au niveau des conditions futures (Figure 91 B) dans l'ensemble.

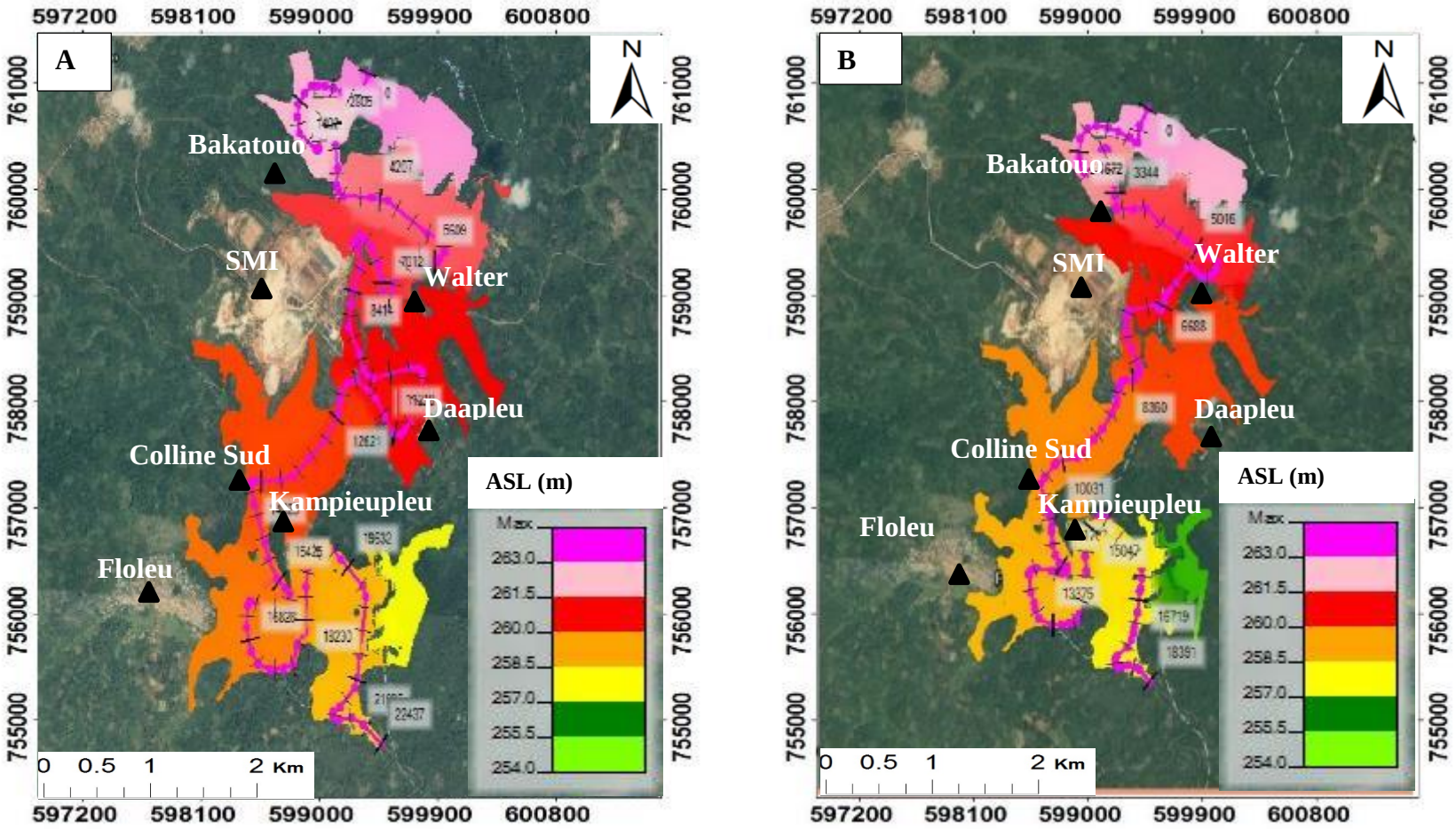


Figure 91 : Etendue des altitudes de surface libre (ASL) des inondations du fleuve Cavally pour la période de retour de 10 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

❖ Cartes de la répartition des altitudes à surface libre pour la période de 20 ans

Le Tableau XXXIX présente les valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre (ASL) de la propagation des crues dans les conditions initiales et futures pour une période de retour de 20 ans. Les valeurs moyennes sont respectivement de 261,54±0,96 m et de 261,48±0,99 m dans les conditions initiales et futures.

Tableau XXXIX : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre dans les conditions initiales et futures pour la périodes de retour 20 ans.

	Périodes de retour (ans)	Min (m)	Max (m)	Moyenne (m)	Ecart-type (m)
Conditions initiales	20	258,78	263,30	261,54	0,96
Conditions futures		256,46	263,35	261,48	0,99

La répartition des altitudes de la surface libre de l'eau est présentée par les images de la Figure 92 concernant la période de retour de 20 ans dans les conditions initiales et futures. Il ressort que les niveaux d'eau les plus importants sont observés avant le méandre de Bakatouo dans l'ordre de 263 m. Aussi, le niveau d'eau a-t-il baissé au niveau des conditions futures (Figure 92 B) dans l'ensemble.

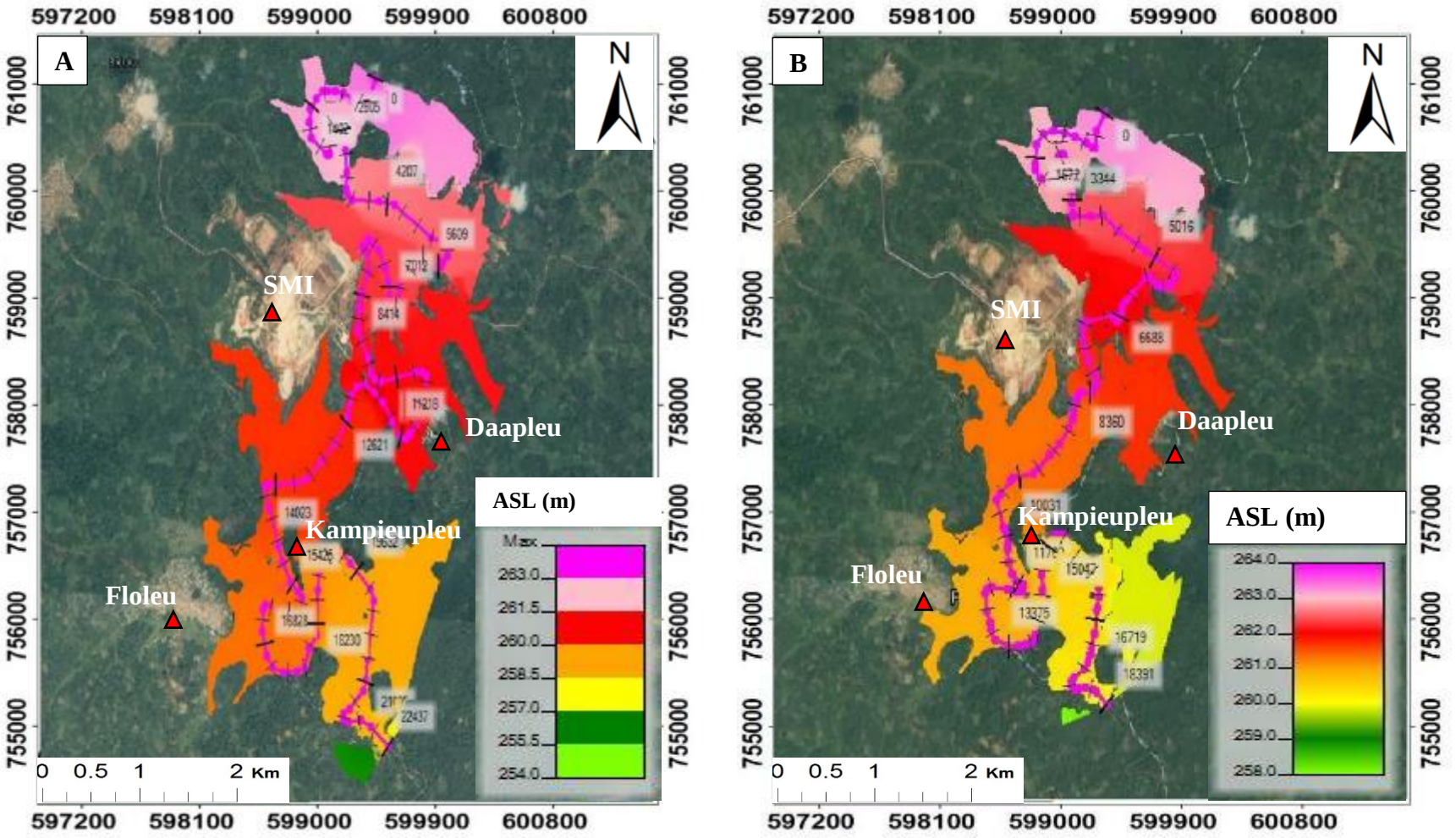


Figure 92 : Etendue des altitudes de surface libre (ASL) des inondations du fleuve Cavally pour la période de retour 20 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

❖ Cartes de la répartition des altitudes à surface libre pour la période de 50 ans

Le Tableau XL présente les valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre (ASL) de la propagation des crues dans les conditions initiales et futures pour une période de retour de 50 ans. Les valeurs moyennes sont respectivement de 261,64±0,93 m et de 261,62±0,86 m dans les conditions initiales et futures.

Tableau XL : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre dans les conditions initiales et futures pour la périodes de retour 50 ans.

	Périodes de retour (ans)	Min (m)	Max (m)	Moyenne (m)	Ecart-type (m)
Conditions initiales	50	258,87	263,38	261,64	0,93
Conditions futures		256,69	263,59	261,62	0,86

La répartition des altitudes de la surface libre de l'eau est présentée par les images de la Figure 93 concernant la période de retour de 50 ans dans les conditions initiales et futures. Il ressort que les niveaux d'eau les plus importants sont observés avant le méandre de Bakatouo dans l'ordre de 263 m. Aussi, le niveau d'eau a-t-il baissé au niveau des conditions futures (Figure 93 B) dans l'ensemble.

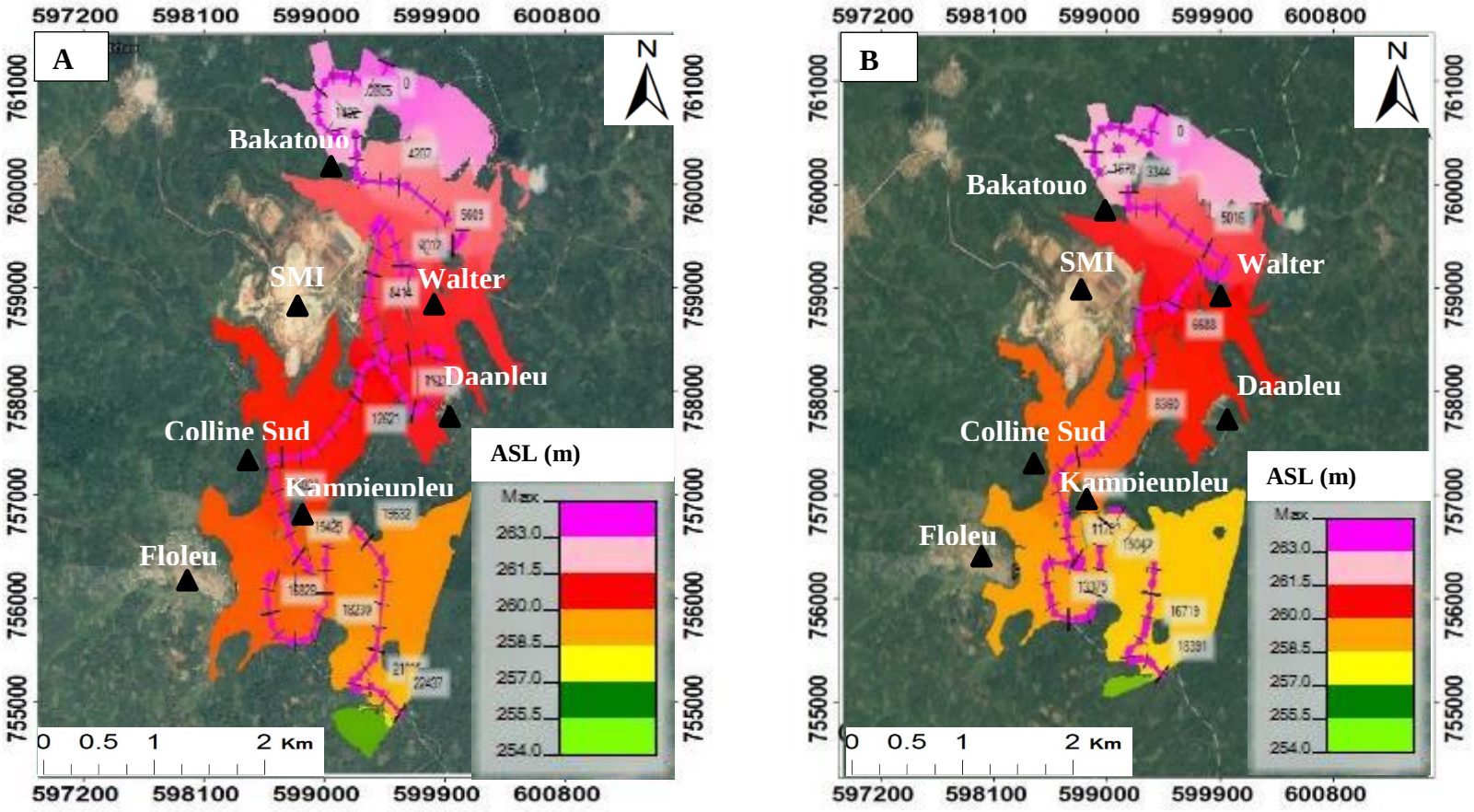


Figure 93 : Etendue des altitudes de surface libre (ASL) des inondations du fleuve Cavally pour la période de retour 50 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

❖ Cartes de la répartition des altitudes à surface libre pour la période de 100 ans

Le Tableau XLI présente les valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre (ASL) de la propagation des crues dans les conditions initiales et futures pour une période de retour de 100 ans. Les valeurs moyennes sont respectivement de 261,76±0,90 m et de 261,72±0,79 m dans les conditions initiales et futures.

Tableau XLI : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre dans les conditions initiales et futures pour la périodes de retour 100 ans.

	Périodes de retour (ans)	Min (m)	Max (m)	Moyenne (m)	Ecart-type (m)
Conditions initiales	100	259,01	263,66	261,76	0,90
Conditions futures		260,60	263,75	261,72	0,79

La répartition des altitudes de la surface libre de l'eau est présentée par les images de la Figure 94 concernant la période de retour de 100 ans dans les conditions initiales et futures. Il ressort que les niveaux d'eau les plus importants sont observés avant le méandre de Bakatouo dans l'ordre de 263 m. Aussi, le niveau d'eau a-t-il baissé au niveau des conditions futures (Figure 94 B) dans l'ensemble.

Les altitudes à surface libre (ASL) des crues présentent des valeurs maximales en amont de la section étudiée et relativement faibles en aval (Figure 94).

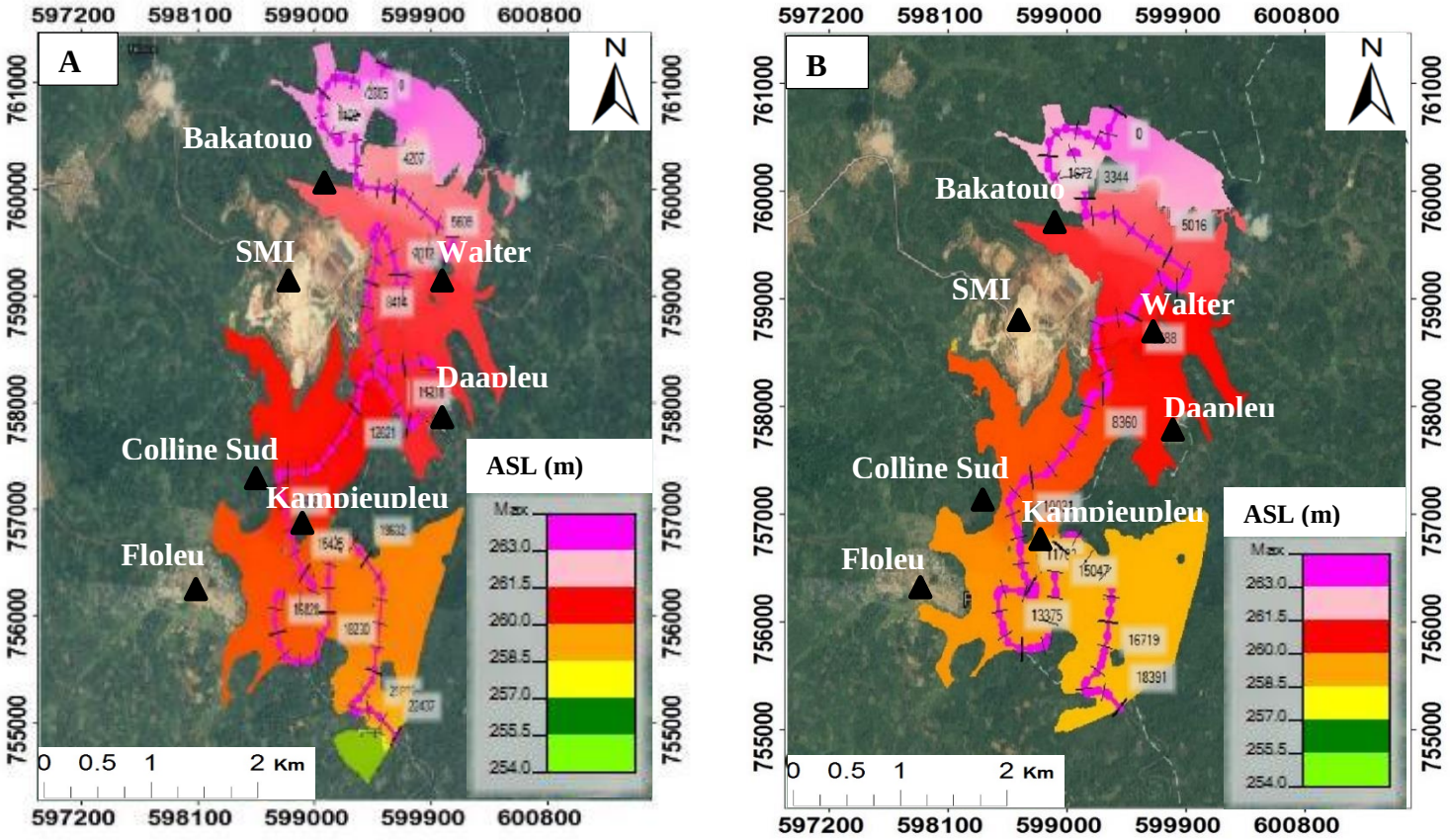


Figure 94: Répartition des altitudes à surface libres maximales des crues du Cavally pour la période de retour de 100 ans dans les conditions initiales (A) et futures (B).

Le profil en long de la portion du Cavally étudiée dans les conditions initiales présente des valeurs moyennes d'altitudes à surface libre respectives de 261,72 ± 0,79 m ; 261,66 ± 0,80 m ; 261,54 ± 0,84 m ; 261,43 ± 0,861 m pour les périodes de retour de 100 ; 50 ;20 ; 10 ans (Tableau XLII).

Tableau XLII : Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre de la propagation des crues au niveau du lit mineur aux différentes périodes de retour.

	100 ans	***50 ans***	***20 ans***	**10 ans**
Max (m)	263,44	263,39	263,31	263,23
Moyenne (m)	261,72	261,66	261,54	261,43
Ecart-type (m)	0,80	0,80	0,84	0,86
Min (m)	260,30	260,23	260,08	259,86

La Figure 95 illustre bien les différents profils en long du fleuve Cavally pour chaque période de retour.

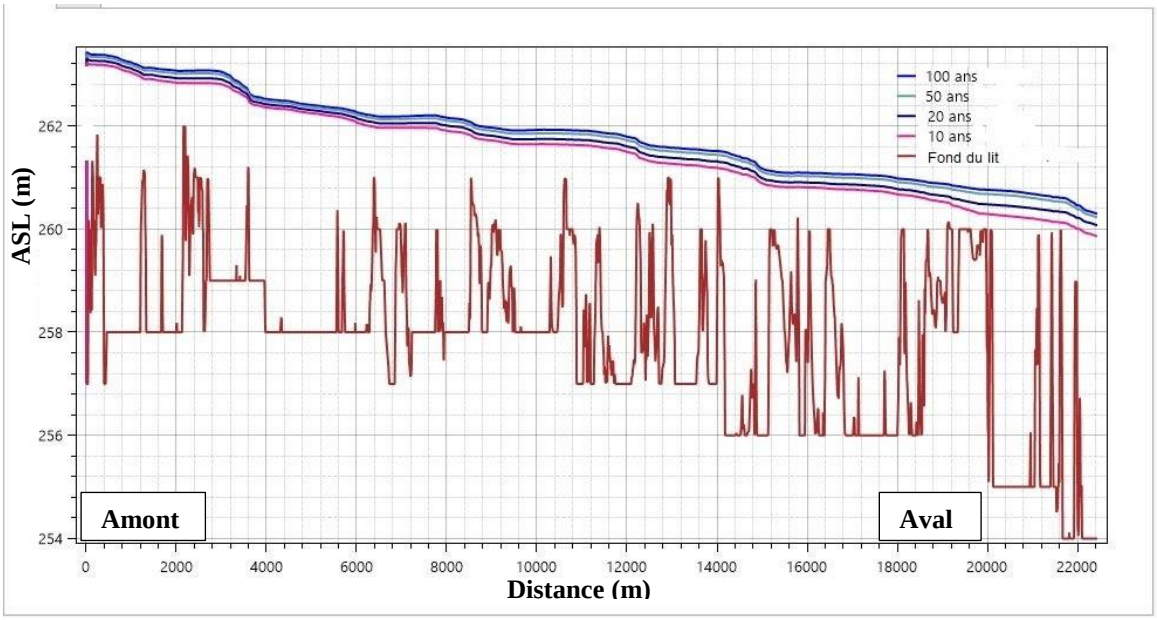


Figure 95 : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée dans les conditions initiales pour chaque période de retour.

Le profil en long de la portion du Cavally étudiée dans les conditions futures présente des valeurs moyennes d'altitudes à surface libre respectives de 261,76 ± 0,84 m ; 261,66 ± 0,89 m ; 261,53 ± 0,93 m ; 261,44 ± 0,94 m pour les périodes de retour de 100 ;50 ;20 ; 10 ans (Tableau XLIII).

Tableau XLIII : Valeurs caractéristiques des ASL des crues au niveau du lit mineur pour chaque période de retour.

	100 ans	***50 ans***	***20 ans***	**10 ans**
Max (m)	263,50	263,48	263,35	263,26
Moyenne (m)	261,76	261,66	261,53	261,44
Ecart-type (m)	0,84	0,89	0,93	0,94
Min (m)	260,61	260,31	260,00	259,85

La Figure 96 donne l'allure des différents profils en long du cours d'eau pour chaque période de retour.

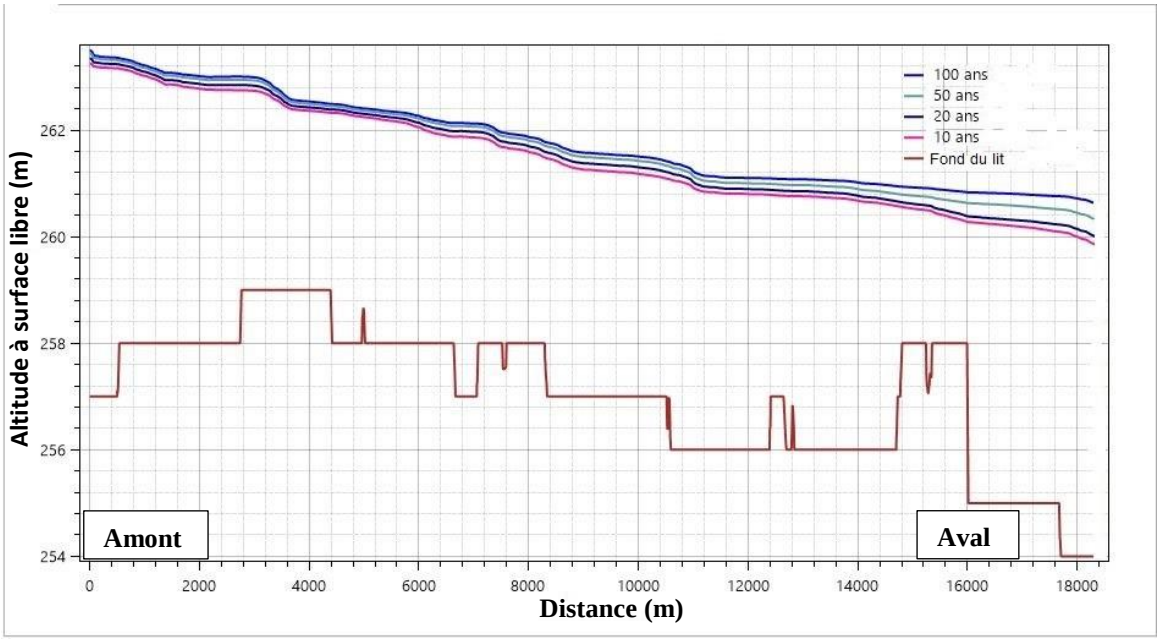


Figure 96 : Profil en long du fleuve Cavally sur la portion modélisée dans les conditions futures pour chaque période de retour.

8.2.4. Comparaison des levés bathymétriques avec la profondeur simulée par le modèle pour différentes périodes de retour

La variation de la profondeur du fleuve Cavally enregistrée lors des levés bathymétriques est comparée aux profondeurs simulées par le modèle à différentes périodes de retour (Figure 97). Au regard de cette figure, les profondeurs enregistrées lors des levés bathymétriques sont relativement plus élevées que celles simulées par le modèle de propagation des crues.

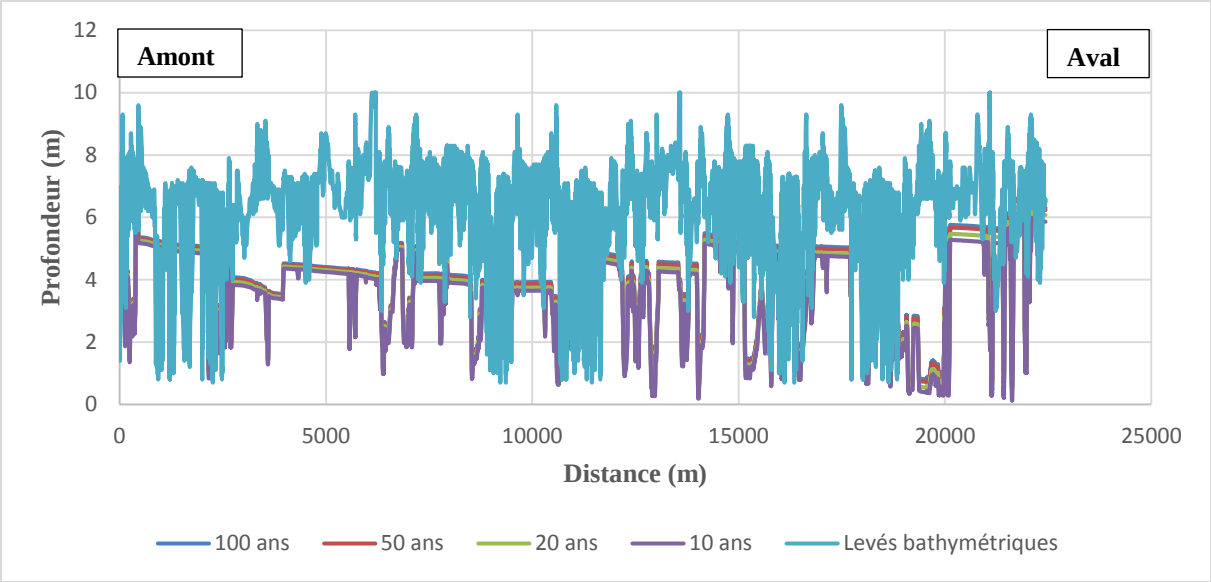


Figure 97 : Comparaison du levé bathymétrique avec la profondeur simulée en fonction de la période de récurrence des crues.

8.2.5. Comparaison des altitudes à la surface libre de l'eau avant et après la construction des ouvrages hydrauliques

La comparaison des valeurs moyennes des altitudes à la surface libre de l'eau avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques, montre une différence de niveau d'eau relativement faible (Tableau XLIV).

Tableau XLIV : Comparaison des altitudes à la surface libre de l'eau avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques.

Périodes *de retour (année)*	***Altitude à la surface libre de l'eau (ASL) moyennes (m)***		
	Avant	**Après**	**Différence**
10	261,47 ± 0,98	261,42 ± 1,04	0,05
20	261,54 ± 0,95	261,48 ±0,99	0,07
50	261,64 ± 0,93	261,62 ± 0,86	0,02
100	261,76 ± 0,90	261,72 ± 0,79	0,04

Une baisse de niveau d'eau est constatée après l'intégration des ouvrages hydrauliques sur le fleuve. Cette légère baisse entraine également la réduction des surfaces inondables dans le périmètre d'exploitation de la SMI.

8.3. Discussion

Cette étude a pour objectif de simuler le fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI.

Dans une première approche, l'objectif est de simuler le fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally à travers un modèle de propagation de crues dans les conditions initiales d'écoulement, avant la réalisation des aménagements prévus.

Le modèle de propagation des crues montre que les profondeurs, les vitesses et les altitudes de la surface libre (ASL) de l'eau de la portion étudiée du cours d'eau sont sensiblement les mêmes, avec une différence de quelques centimètres à chaque débit donné. Cependant, les plus hautes élévations de la surface de l'eau sont observées en amont de la zone d'exploitation de la SMI. L'étendue des plaines inondables varie selon l'élévation de la surface de l'eau de 260,96 m à 263,66 m sur des dizaines de kilomètres à proximité du lit mineur du fleuve Cavally. Les zones situées dans un rayon d'environ 5 km autour de la station Ity sont les plus exposées avec un niveau d'eau de plus de 263,66 m, comparativement aux zones en aval avec un niveau d'eau maximal compris 258,78 m et 259,85 m.

Les plus grandes altitudes à surface libre de l'eau observées en amont de la section du cours d'eau pourraient s'expliquer par la production de crue à proximité de la zone d'apport d'eau dans le modèle. Ces ondes ont pour effet de produire les niveaux d'eau les plus élevés autour de la zone d'émission. Cependant, la pratique intense d'activités d'orpaillage clandestines dans le lit du fleuve Cavally dans cette zone, modifie considérablement la rugosité du lit du cours d'eau. Cela pourrait également perturber fortement le lit du cours. Il va sans dire que plus la distance entre le point d'émission des ondes zone est grande, plus les altitudes de surface libre de l'eau sont faibles. Les résultats obtenus dans cette étude sont confirmés par les travaux de Baptista (1990) ; Archambeau (2006) qui ont utilisé le modèle WOLF2D pour la modélisation de la propagation des ondes de crue en écoulement permanent en Belgique. Des études récentes de Gharagozlou *et al.* (2011) ; Boudjelal *et al.* (2015) ; Bouchenafa (2017) ont également confirmé que les inondations sont plus importantes au niveau des surfaces fortement anthropisées. Les superficies inondées sont respectivement de 21,74 km^2 ; 20,67 km^2 ; 18,81 km^2 et 18,15 km^2 pour des périodes de retour respectivement de 100 ; 50 ; 20 et 10 ans. Ces zones inondées, à l'exception de celle générée par la crue centennale (21,74 km^2), sont approximativement identiques pour les crues de 10 et 20 ans.

Une seconde approche a consisté à simuler le fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally après l'intégration de tous les ouvrages hydrauliques.

Le modèle des écoulements du fleuve Cavally intégrant les ouvrages hydrauliques simule bien les vitesses du cours d'eau. Les vitesses dans les canaux sont comprises entre 0,45 et 2 m/s. Celles des rives gauche et droite du canal sont comprises entre 0,1 et 0,8 m/s. Ces vitesses sont quasiment similaires à celles mesurées sur le Cavally en période de crue. La capacité d'auto curage de ces canaux est ainsi assurée. Ces résultats sont similaires aux travaux réalisés par plusieurs auteurs dans le domaine de la modélisation des ouvrages hydrauliques sur des cours d'eau (Burguete & García, 2001 ; Parhi *et al.*, 2012 ; Kim & Kang, 2013 ; Kane *et al.*, 2017 ; Goktas *et al.*, 2018). Ces auteurs soutiennent que l'installation ou la construction d'un ouvrage hydraulique sur un cours d'eau ne devrait pas perturber significativement les paramètres hydrodynamiques de ce cours d'eau. Toutefois, il convient de souligner qu'au niveau du fleuve Cavally et particulièrement dans la localité d'Ity, des orpailleurs mènent régulièrement leurs activités dans le lit du fleuve. Ces activités modifient considérablement la morphologie du cours d'eau et donc par ricochet les paramètres hydrodynamiques sont également influencés.

Les activités d'orpaillage jouent ainsi un rôle important dans le processus de génération des inondations. En effet, plusieurs auteurs soutiennent que l'occupation anarchique des zones potentiellement inondables pour la construction des habitations et autres installations non contrôlées favorise l'apparition des inondations (Hostache *et al.*, 2007 ; Kangah & Della, 2015). Le modèle de propagation des crues a montré qu'une baisse de niveau d'eau est constatée au niveau de chaque période de retour de projet après l'intégration des ouvrages hydrauliques sur le cours d'eau. Cette baisse est relativement faible (0,04 m en moyenne) comparativement aux fluctuations inter annuelles (6 à 7 m) du Cavally. Ainsi, la construction des ouvrages hydrauliques dimensionnés n'entraine pas une modification significative des écoulements du fleuve Cavally. Toutefois, Bouvard (2004) rapporte que les grands travaux d'aménagement peuvent entrainer le déchaussement des piles des ponts, l'abaissement des nappes phréatiques, l'instabilité des talus des berges et autres ouvrages de génie civil. Ainsi, l'impact des survitesses sur les ouvrages et les berges du fleuve Cavally provoquées en amont et en aval de la zone de coupure des méandres de Bakatouo, Walter et Colline Sud pourra être minimisé par la construction des digues de protection en amont et en aval de chaque canal de dérivation.

Conclusion partielle

Cette partie du travail a pour objectif de simuler le fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI.

Dans une première approche, il a été question de simuler la propagation des crues dans les conditions initiales du fleuve Cavally aussi bien en écoulement non permanent qu'en

écoulement permanent. Cette approche a permis de mettre en évidence l'ampleur de la propagation des ondes de crue ainsi que la localisation des zones vulnérables aux inondations dans les conditions initiales d'écoulement du fleuve Cavally. Il convient de rappeler que les zones inondables les plus exposées sont observées près de la Société des Mines d'Ity (SMI), dans la partie amont (Ity) où les élévations de la surface de l'eau et les profondeurs de l'étendue de la crue sont les plus élevées, contrairement à la partie aval (Floleu) où ces paramètres ont des valeurs relativement faibles.

Dans une seconde approche, la propagation des crues a été simulée en tenant compte de tous les ouvrages hydrauliques prévus sur le fleuve Cavally. Les résultats ont montré que la construction des ouvrages hydrauliques sur le fleuve Cavally n'a pas trop d'influence sur le fonctionnement hydrodynamique dudit fleuve. Ce qui montre que les canaux ont été bien dimensionnés. 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. Aussi convient-il de rappeler que les activités des orpailleurs clandestins dans le fleuve perturbent également les paramètres hydrodynamiques du fleuve Cavally. Ces contraintes nous interpellent d'ajuster régulièrement les modèles dans le but d'approfondir la compréhension du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally. Ainsi, le suivi du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally nécessite une mise à jour des modèles par l'actualisation des données sur la morphologie et la granulométrie du lit de ce cours d'eau.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a pour objectif principal d'établir un modèle numérique pour dimensionner des canaux de dérivation et simuler leur influence sur le fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally dans la zone d'Ity. Pour y parvenir nous nous sommes fixés quatre (4) objectifs spécifiques. Le premier consiste à caractériser la variabilité hydro climatique et à analyser l'occurrence des évènements extrêmes pluviométrique et hydrologique futurs dans le bassin versant du fleuve Cavally. Le deuxième vise à dimensionner les canaux de dérivation sur le fleuve Cavally. Le troisième consiste à évaluer l'impact des activités humaines sur la morphologie du lit du Cavally dans le périmètre d'exploitation de la SMI. Quant au quatrième objectif, il est consacré à la simulation du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity.

Concernant la variabilité hydro climatique, on constate une variabilité interannuelle globalement excédentaire pour toutes les stations (Danané, Zouan-Hounien, SMI-Ity et Sipilou). Cependant, quelques années après la grande rupture pluviométrique de 1970, on assiste à une sècheresse intense d'environ 6 années pour les stations de Danané, Zouan-Hounien et SMI-Ity. Quant à la station de Sipilou, on constate qu'elle n'a pas connue de perturbation pluviométrique après la rupture de 1970.

Aussi, convient-il de rappeler que la pluie moyenne interannuelle du bassin versant est de 1535,9 ± 214,2 mm. Cette étude a également permis de mettre en évidence que la loi de Weibull à trois (3) paramètres s'ajuste le mieux aux modules pluviométriques et hydrologiques du bassin versant du fleuve Cavally.

Pour ce qui concerne l'occupation du sol et son impact sur l'évolution morphologique du lit du Cavally, il ressort que le traitement des images satellitaires LandSat Oli 8 de 2016 a permis de montrer que l'occupation du sol est moins prononcée sur le bassin versant du fleuve Cavally et cela se justifie par une végétation dominante à 85,14 %. Cependant, l'orpaillage clandestin mené dans le lit cours d'eau du fleuve Cavally et sa plaine alluviale présente d'énormes risques sur la stabilité du lit du cours d'eau. Dans cette étude, la morphologie du lit du cours d'eau a été étudiée grâce à l'utilisation conjointe des outils de télédétection et de SIG. Les images satellitaires (LandSat) ayant servi à la mise en place de la carte de suivi interannuel du cours d'eau a permis de montrer que ces images sont encore bien adaptées à ce genre d'étude. De l'analyse des résultats de ces images, il ressort que la morphologie du Cavally a véritablement subi des perturbations à partir de 2011. Sur toute la zone d'étude, la présence d'orpailleurs est assez remarquable. Particulièrement la portion du cours d'eau comprise entre la SMI et le village de Floleu connait des perturbations accentuées dues aux activités d'orpaillage.

Au niveau des dimensions des canaux de dérivation, il a été question de la réalisation d'un modèle hydraulique pour dimensionner quatre (4) canaux de dérivation (Bakatouo, Walter, Daapleu et Colline Sud) capable d'assurer un fonctionnement hydraulique similaires aux conditions initiales (niveaux d'eau, débit, vitesse) du fleuve Cavally. Le dimensionnement a été effectué grâce à la méthode du modèle rugueux de référence (MMR). Les conditions hydrauliques (niveaux d'eau, débit, vitesse) dans ces canaux après la dérivation demeureront sensiblement les mêmes que l'état naturel du cours d'eau. Les niveaux d'eau augmentent légèrement (environ 20 cm) en amont des chenaux, ce qui sera insignifiant par rapport aux fluctuations totales du Cavally qui varient en une année de 6 à 7 m. La réalisation des canaux n'aura donc pas un impact significatif sur le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally.

Concernant le modèle du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally avant et après la construction des ouvrages hydrauliques, cette étude a permis de mettre en évidence l'ampleur de la propagation des ondes de crue ainsi que la localisation des zones vulnérables aux inondations dans les conditions initiales du fleuve Cavally. Les zones inondables les plus exposées sont observées près du périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (SMI). Par ailleurs, les observations sur le terrain ont montré que les activités des orpailleurs clandestins dans le fleuve perturbent significativement la morphologie du lit du fleuve Cavally. Ces contraintes nous interpellent d'ajuster régulièrement les modèles dans le but d'approfondir la compréhension du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally. Ainsi, le suivi du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally nécessite une mise à jour des modèles par l'actualisation des données sur la morphologie et la granulométrie du lit de ce cours d'eau.

Recommandations

Dans le but d'assurer une protection de l'environnement et d'atténuer les impacts des activités d'orpaillage sur le fleuve Cavally, nous formulons les recommandations suivantes à l'endroit des autorités administratives et coutumières, de la SMI et des populations riveraines.

A l'endroit des autorités administratives et coutumières

Les activités des orpailleurs clandestins modifient énormement la morphlogie et la rugosité du lit du fleuve Cavally et génèrent des matières en suspension. Cela affecte le fonctionnement hydrodynamique et la qualité des eaux du fleuve Cavally. Pour résoudre ce problème, nous recommandons aux autorités locales compétentes et aux autorités administratives en charges de la surveillance des plans d'eau l'interdiction de l'orpaillage clandestin dans le lit du fleuve Cavally.

Pour un bon suivi de la dynamique du fleuve Cavally , il nécessaire que la Direction de l'hydrologie assure l'entretien des stations hydrométriques et la collecte des données de débit.

A l'endroit de la SMI

Les ouvrages hydrauliques dimensionnés et construits sur le fleuve Cavally doivent fonctionner normalement sans toutefois perturber les activités socio-économiques des populations riveraines. Pour préserver cet intérêt, nous recommandons à la Société des Mines d'Ity, le respect des cahiers de charges de la construction des ouvrages hydrauliques prévus sur le fleuve Cavally. Par ailleurs, il serait judicieux d'actualiser fréquemment le présent modèle hydraulique par des compagnes de terrain.

A l'endroit des populations riveraines

La pratique de l'orpaillage dans le lit du fleuve Cavally est dangereuse pour l'environnement et peut causer de graves risques d'inondation et sanitaires pour les populations riveraines. Pour éviter cette situation, nous exhortons les populations à s'orienter vers la pratique d'activités socio-économiques compatibles avec la protection de l'environnement et la qualité des eaux du fleuve Cavally.

Perspectives

Sur la base des connaissances acquises au cours de cette étude, quelques solutions ont été proposées pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally. La poursuite des recherches s'avère essentielle pour obtenir un large éventail d'informations sur la compréhension du fonctionnement hydrodynamique du fleuve Cavally. C'est pourquoi nous proposons dans les futurs travaux :

- mettre à jour les modèles par l'actualisation des données de débit, de niveau d'eau, de vitesses du courant et des données sur la morphologie et la granulométrie du lit du Cavally, dans le but d'approfondir la compréhension du fonctionnement hydrologique de ce fleuve ;
- élaborer un modèle 1D couplé à un modèle 2D en écoulements non permanents afin de mieux comprendre le passage entre le débordement du lit du fleuve et l'étendue de l'inondation des zones adjacentes au cours d'eau ;
- élaborer un modèle nappe-rivière pour évaluer l'impact des canaux sur la nappe ;
- élaborer des cartes d'aléa inondation de la zone d'étude en tenant compte de tous les modes d'occupation du sol (MOS) à l'aide d'un système d'information géographique (SIG).

REFERENCES

Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'connell P.E. & Rasmussen J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen,"SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, 87(1–2): 61–77.

Achour B. & Bedjaoui A. (2006). Discussion of Explicit Solutions for Normal Depth Problem, by P.K. Swamee, P. N. Rathie. *Journal of Hydraulic Research*, 44(5): 715–717.

Achour B. & Sehtal S. (2013). La Méthode du Modèle Rugueux (MMR): application au calcul de la profondeur normale dans une conduite circulaire. *Courrier du Savoir*,(17): 99–103.

Alexeevsky N.I., Chalov R.S., Berkovich K.M. & Chalov S.R. (2013). Channel changes in largest Russian rivers: natural and anthropogenic effects. *International Journal of River Basin Management*, 11(2): 175–191.

Ambroise B. (1999a).La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant: processus, facteurs, modèles.HGA, Bucuresti, 206

Ambroise B. (1999b). Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempérés: 2 - Modélisation systémique et dynamique. *Revue des sciences de l'eau*, 12(1): 125.

Anctil F. & Coulibaly P. (2004). Wavelet Analysis of the Interannual Variability in Southern Québec Streamflow. *Journal of Climate*, 17(1): 163–173.

Araghinejad S., Azmi M. & Kholghi M. (2011). Application of artificial neural network ensembles in probabilistic hydrological forecasting. *Journal of Hydrology*,

Araud Q. (2012). Simulations des écoulements en milieu urbain lors d'un évènement pluvieux extrême. Thèse De Doctorat, Université de Strasbourg (France), 290.

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), 419p.

Artigue G. (2012). Prévision des crues éclair par réseaux de neurones : généralisation aux bassins non jaugés. Thèse De Doctorat, Université de Montpellier II (France), 318P.

ASCE (2000a). Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2): 115–123.

ASCE (2000b). Articifial Neural Networks in Hydrology .II: Hydrological Applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2): PP 124-137.

Assani A.A. (1999). Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshana) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Nino/La Nina). *Sécheresse*, 9(4): 245–252.

Bader J.-C., Belaud G., Lamagat J.-P., Ferret T. & Vauchel P. (2017). Modélisation de propagation d'écoulement entre lits mineur et majeur sur les fleuves Sénégal et Niger. *Hydrological Sciences Journal*, 62(3): 447–466.

Bamba O., Pelede S., Sako A., Kagambega N. & Miningou M.Y.W. (2013). Impact de l'artisanat minier sur les sols d'un environnement agricole aménagé au burkina faso. *Journal des Sciences*, 13(1): 1–11.

Baptista M. (1990). Contribution à l'étude de la propagation de crues en hydrologie. Thèse De Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Paris), 292p.

Barredo J. (2007). Major flood disaster in Europe: 1950-2005. *Natural Hazards*, 42(1): 125–148.

Barsi J.A., Lee K., Kvaran G., Markham B.L. & Pedelty J.A. (2014). The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. *Remote Sensing*, 6(10): 10232–10251.

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.

Bates P.D. & De Roo A.P.J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1–2): 54–77.

Ben Mammou A. & Rabbia M.C. (1990). L'imagerie satellitaire pour l'étude des réeservoirs : applications à la retenue du barrage Sidi Salem (Tunisie), Satellite et gestion de l'eau au Sahel. *Télédétection et cartographie*, 1(2): 75–88.

Bendjoudi H. & Hubert P. (2002). Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological sciences journal*, 47(6): 921–930.

Besse P.C., Cardot H., Faivre R. & Goulard M. (2005). Statistical modelling of functional data. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 21(2): 165–173.

Beven K. & Binley A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6: pp 279-298.

Bogdanowicz E., Strupczewski W.G., Kochanek K. & Markiewicz I. (2014). Flood Risk for Embanked Rivers. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 02(03): 135–143.

Borga M., Anagnostou E.N., Blöschl G. & Creutin J.-D. (2010). Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls. *Journal of Hydrology*, 394(1–2): 1–3.

Bouchenafa W. (2017). Modélisation des inondations en tunnel en cas de crue de la Seine pour le Plan de Protection des Risques Inondations de la RATP (PPRI). Thèse De Doctorat, Université de Technologie de Compiègne (France), 278.

Boudjelal S., Fourar A. & Merrouchi F. (2015). Modélisation en 2D des écoulements brusquement instationnaires dans un canal prismatique à surfaface libre. *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*,(22): 7–13.

Brou L.A., Kouassi K.L., Yao A.B., Kouadio Z.A., Konan K.S., Konan K.F., Kamagate B. & Koné D. (2019). Hydro-Climatic Variability and Human Activities Impact on the Morphology of the Cavally River Bed, Western Côte d'Ivoire. *OALib*, 06(09): 1–14.

Burguete J. & García-Navarro P. (2001). Efficient construction of high-resolution TVD conservative schemes for equations with source terms: application to shallow water flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 37(2): 209–248.

Cázares-Rodríguez J.E., Vivoni E.R. & Mascaro G. (2017). Comparison of Two Watershed Models for Addressing Stakeholder Flood Mitigation Strategies: Case Study of Hurricane Alex in Monterrey, México. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(9): 05017018.

Champredonde R. (2008). *Modélisation,Spatialisation de l'étendue d'une crue, Applications au bassin de la Lèze*.

Chapuis M. (2012). Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés: éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance. Thèse De Doctorat, Aix-Marseille Université, 253p.

Chareb Y.I. (2005). Contribution à la méthodologie des études de protection contre les inondations : Application des modèles HEC-RAS et HEC-FDA,. Mémoire Master, Université des sciences et technologies d'Oran Mohamed Boudiaf (Algérie), 117.

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.

Chow V.T. (1959).Open Channel Hydraulics.McGRAW-Hill Classic, New York, 728

Chua L.H.C. & Wong T.S.W. (2010). Improving event-based rainfall–runoff modeling using a combined artificial neural network–kinematic wave approach. *Journal of Hydrology*, 390(1–2): 92–107.

CNRA (2009). *La direction régionale du Centre National de Recherche Agronomique de Man en quelques mots et chiffres.*

Coulibaly P., Anctil F. & Bobee B. (2000). Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *Journal of Hydrology*, 230(3): 244–257.

Dawson C.W., Abrahart R.J., Shamseldin A.Y. & Wilby R.L. (2006). Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 319(1–4): 391–409pp.

Demeke G.K., Asfaw D.H. & Shiferaw Y.S. (2019). 3D Hydrodynamic Modelling Enhances the Design of Tendaho Dam Spillway, Ethiopia. *Water*, 11(1): 82.

Duan Q.Y., Sorooshian S. & Gupta H. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(n°4): pp 1015-1031.

Dusseux P. (2014). Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole. Thèse De Doctorat, Université Européene (Brétagne, France), 283.

Elcin Kentel (2009). Estimation of river flow by artificial neural networks and identification of input vectors susceptible to producing unreliable flow estimates. *Journal of Hydrology*, 375(3–4): 481–488.

Erpicum S. (2006). Contribution à la modélisation de la turbulence en écoulements quasitridimensionnels à surface libre. Maillage adaptatif multibloc et calage objectif des paramètres . 2006, Université de Liège. Thèse De Doctorat, 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. *RGLL*,(N°08 dec): 15 p.

Fernandez J. (2014). Guide pour la numérisation d'un inventaire de zones humides: Logiciel ArcMap10. *Forum des marais Atlantiques*,: 37.

Feybesse J., Milesi J.P., Verhaeghe PH. & Johan V. (1990). Le domaine de Touleupley-Ity (Côte d'Ivoire) - une unité « birimiènne » charriée sur les gneiss archéens du domaine de Kénéma-Man lors des premiers stades de l'orogenèse éburnéenne. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 310(II): 285–291.

Fischer-Antze T., Stoesser T., Bates P. & Olsen N.R.B. (2001). 3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 39(3): 303–310.

Folk R.L. (1966). A review of grain-size parameters. *Sedimentology*, 6(2): 73–93.

Folk R.L. & Ward W.C. (1957). A Study in the Significance of Grain-Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3–26.

Friedman G.M. (1962). On Sorting, Sorting Coefficients, and the Lognormality of the Grain-Size Distribution of Sandstones. *The Journal of Geology*, 70(6): 737–753.

Friedman G.M. (1967). Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and rive sands. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37(2): 327–354.

Geoffroy J. (2007). Modélisation des paramètres morphogènes du cours inférieur de la Bruche (Bas-Rhin) et analyse de la sensibilité du modèle HEC-RAS à la qualité des données topographiques. Mémoire Master, (CEVH-ENGEES) et (LIV-ULP) (Paris), 64.

Gharagozlou A., Nazari H. & Seddighi M. (2011). Spatial Analysis for Flood Control by Using Environmental Modeling. *Journal of Geographic Information System*, 03(04): 367–372.

Gharbi M., Soualmia A., Dartus D. & Masbernat L. (2016). Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda Riverin Tunisia. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7: 3017–3026.

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.

Gnouma R. (2006). Aide à la Calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques: Application au bassin versant de l'Yzeron. Thèse De Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (Lyon, France), 448 p.

Gnoumou Y., Yergeau M., Bénie G.B., Traoré K., Chakroun H., Goita K. & Tao A. (1995). Cartographie opérationnelle des ressources en eau de surface au Burkina Faso, 1991. Satellite et gestion de l'eau au Sahel. *Télédétection et cartographie*, 1(2): 99–109.

Godunov S.K. (1959). A difference method for numerical calculation of discontinuous solutions of the equations of hydrodynamics. *Matematicheskii Sbornik*, 89(3): 271–306.

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.

Goodell C. (2013). Stabilizing a Dynamic Unsteady HEC-RAS Model. *The RAS SOLUTION*,

Goodman J.B. & LeVeque R.J. (1985). On the accuracy of stable schemes for 2D scalar conservation laws. *Mathematics of computation*, 45(171): 15–21.

Goula B.T.A., Konan B., Brou Y.T., Savané I., Fadika V. & Srohourou B. (2007). Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale: cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Lognormale et de Gumbel. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(2): 49–67.

Heinerich S., Dejaifve P., Esquirol A., LPO N. & ONF (2011). Cartographie du lit de la rivière Allier et de ses annexes dans la RNN du Val d'Allier, Reserve Naturelle Nationale du Val d'Allier. *Reserve Naturelle de France*,: 22.

Hirsch C. (2007).Fundamentals of computational fluid dynamics. Charles Hirsch ; Vol. 1, Elsevier/Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 656

Horritt M.S. & Bates P.D. (2002). Evaluation of 1-D and 2-D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268: 87 – 99.

Hostache R., Puech C. & Raclot D. (2007). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeo : European Journal of Geography*,

Hsu K., Gupta H. & Sorooshian S. (1995). Artificial neural network modelling of the rainfall-runoff process. *Water ressources research*, 31: 2517–2530.

Hyung-Il E., A. Vasan & Slobodan P. Simonovic (2012). Integrated Reservoir Management System for Flood Risk Assessment Under Climate Change. *Water Resources Management*, 26(13): 3785–3802.

James L.M. & Beresford W.G. (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178): 317–345.

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.

Kangah A. & Della A.A. (2015). Détermination des zones à risque d'inondation à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du système d'information géographique (SIG) : Cas du bassin-versant de Bonoumin-Palmeraie (commune de Cocody, Côte d'ivoire). *Geo-Eco-Trop.*, 39(2): 297–308.

Karagiorgos K., Thaler T., Hübl J., Maris F. & Fuchs S. (2016). Multi-vulnerability analysis for flash flood risk management. *Natural Hazards*, 82(1): 63–87.

Kasuri L. (2014). Modelling for Ecosystem Restoration Hydrodynamic Modelling of the Yolo Bypass Using HEC-RAS. Master Thesis, UNIVERSITY OF CALIFORNIA DAVIS (USA)

Kim C. & Kang J. (2013). Case Study: Hydraulic Model Study for Abandoned Channel Restoration. *Engineering*, 05(12): 989–996.

Koffi Y.B. (2007). Modélisation pluie-débit en région tropicale humide: Application des réseaux de neurones sur quatre stations hydrométriques du Bandama Blanc (Bada, Marabadiassa, Tortiya et Bou), Nord de la Côte d'Ivoire. Thèse De Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 233 p.

Kouadio Z.A. (2011). Dynamique de l'Occupation du Sol et du Comportement Hydrologique: Cas des Bassins Versants Cotiers de l'Agnéby et du Boubo (Côte d'Ivoire). Thèse De Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 198 p.

Kouamé K.F. (2011). Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL. Doctorat Ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 423.

Kouassi K.L. (2007). Hydrologie, Transport Solide et Modélisation de la Sédimentation dans les Lacs des Barrages Hydroélectriques de Côte d'Ivoire: Cas du Lac de Taabo. Thèse De Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 198 p.

Kouassi K.L., Brou L.A., Yao A.B., Kouadıo 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.

Kouassi Kouakou.L., Kouassi K.M., Konan K.S., Mélèdje N.H., Koffi Y.B. & Biémi J. (2013). Modélisation Pluie-Débit à L'aide des Réseaux de Neurones Artificiels sur le Bassin Versant Transfrontalier de la Bia (Côte D'ivoire - Ghana). *European Journal of Scientific Research*, 109(1): pp.133-140.

Kreis N. (2004). Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation. Application à la vallée de la Thur (Haut-Rhin). Doctorat, Ecole Nationale de Génie de l'Eau et de l'Environnement (Strasbourg), 351.

Lahsaini M. & Tabyaoui H. (2018). Modelisation Hydraulique Mono Dimensionnel Par HEC RAS, Application Sur L'oued Aggay (Ville De Sefrou). *European Scientific Journal, ESJ*, 14(18): 110.

Lecce S.A. (2013). Stream power, channel change, and channel geometry in the Blue River, Wisconsin. *Physical Geography*, 34(4–05): 293–314.

Lenoir T. (2011). Mécanismes de rétention du cuivre dans les sols: évaluation statistique des approches macroscopiques et spectroscopiques. Doctorat, Université de Grénoble (France), 268.

Li L.C., Tang C.A., Li G., Wang S.Y., Liang Z.Z. & Zhang Y.B. (2012). Numerical Simulation of 3D Hydraulic Fracturing Based on an Improved Flow-Stress-Damage Model and a Parallel FEM Technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(5): 801–818.

Lin G.-F. & Wu M.-C. (2009). A hybrid neural network model for typhoon-rainfall forecasting. *Journal of Hydrology*, 375(3–4): 450–458.

Madsen H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235(n° 3-4): pp 276-288.

Mcculloch W.S. & Pitts W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5: 115–133.

Melching C.S. (1995). Reliability estimation. *In*: *Computer models of watershed hydrology*, Editor Vijay p. singh, pp. 69–118.

Mélèdje N.H. (2016). Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux de sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé1. Doctorat Unique, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 169p.

Meylan P., Favre A.C. & Musy A. (2008).Hydrologie fréquentielle, une science prédictive.Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 174

Meylan P. & Musy A. (1999).Hydrologie fréquentielle.HGA, Bucarest, 413

Montz B.E. & Gruntfest E. (2002). Flash flood mitigation: recommendations for research and applications. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 4(1): 15–22.

Mouelhi S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse De Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (Paris, France), 323.

Muller A. (2006). Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France. Thèse De Doctorat Ès Science, Université de Montpellier II (France), 246.

N'Da D.H. (2007). Etude et suivi par télédétection et système d'information géographique d'une aire protégée soumise aux pressions anthropiques : cas du parc national de la Marahoué. Thèse De Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 139.

Nelder J.A. & Mead R.A. (1965). A Simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, Vol. 9: 308–313.

Ngo A.T. (2014). Evaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (centre Viêt-Nam). Thèse De Doctorat, Université d'Orléans (Orléand, France), 429 p.

Nielsen R. (1990).Neurocomputing.Addison-Wesley Publishing Company, 433 p

Noarayanan L., Murali K. & Sundar V. (2012). Manning's 'n' co-efficient for flexible emergent vegetation in tandem configuration. *Journal of Hydro-environment Research*, 6(1): 51–62.

Novak P., Guinot V., Jeffrey A. & Reeve D.E. (2010).Hydraulic Modelling: An Introduction: Principles, Methods and Applications.CRC Press, 614

OMM (1990). *Guide des pratiques climatologiques*.

Onétié Z.O., Coulibaly A., Baka D., Fossou N.M.R., Youan T.M., Yao K.A.F. & Aoulou K.A. (2016). Apport du SIG et de l'analyse multicritère dans la prospection hydrogéologique du socle précambrien de Gagnoa (Centre-Ouest De La Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12(23): 137–154.

Özel T. & Nadgir A. (2002). Prediction of flanck wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H-13 steel with chamfered and honed CBN tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42: 287–297.

Padonou M.M.N. & Sarr M.P. (2009). Contribution de la Télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) A l'amélioration de la gestion des eaux de surface dans un bassin versant : Cas du barrage de Mogtedo au Burkina Faso. *Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF*,: 7.

Papon A. (1973). Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire: Synthèse des travaux de l'opération SASCA 1962-1968. *Mémoire du BRGM*, N° 80: 285 p.

Parhi P.K. (2013). HEC-RAS Model for Mannnig's Roughness: A Case Study. *Open Journal of Modern Hydrology*, 03(03): 97–101.

Parhi P.K., Sankhua R.N. & Roy G.P. (2012). Calibration of Channel Roughness for Mahanadi River, (India) Using HEC-RAS Model. *Journal of Water Resource and Protection*, 04(10): 847–850.

Payraudeau S. (2002). Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditérranéens. Thèse De Doctorat, ENGREF Montpellier (Montpellier, France), 225.

Pirotton M. (1994). Modélisation des discontinuités en écoulement instationnaire à surface libre. Du ruissellement hydrologique en fine lame à la propagation d'ondes consécutives aux ruptures de barrages. Thèse De Doctorat, Université de Liège (Liège, Belgique)

Proust S. (2005). Ecoulements non-uniformes en lits composés : effets de variations de largeur du lit majeur. Thèse De Doctorat, INSA (Lyon, France), 383.

Randrianarivony R.N., Lauret P., Randriamanantany Z.A. & Gatina J.C. (2009). Modélisation du régime annuel des petites rivières en vue d'installation de microcentrales hydroélectriques. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 5(1): 11p.

Refsgaard J.C. & Storm B. (1996). Construction, calibration and validation of hydrological models. *In*: *Distributed Hydrological Modelling.*, pp. 41–42.

Reineck H.-E. & Singh I.B. (1980). Fluvial Environment. *In*: *Depositional Sedimentary Environments: With Reference to Terrigenous Clastics*, eds. Reineck H.-E. & Singh I.B., Springer Berlin Heidelberg, pp. 257–314.

Rosenbrock H.H. (1960). An automatic method for finding the greatest or the least value of a fonction. *The Computer Journal*,(vol. 3): 175–184.

Rosier B., Boillat J.-L. & Schleiss A.J. (2010). Semi-empirical model for channel bed evolution due to lateral discharge withdrawal. *Journal of Hydraulic Research*, 48(2): 161–168.

Sahu B.K. (1964). Depositional Mechanisms from the Size Analysis of Clastic Sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34: 73–83.

Sallemi M. (2013). Cartographie de l'occupation du sol : Guide Pratique. *Observatoire du Sahara et du Sahel*,: 28.

Singh V. (2001). Kinematic wave modelling in water resources: A historical perspective. *Hydrological Processes*, 15: 671–706.

Singh V.P. (1995).Watershed modeling: Computer Models of Watershed Hydrology.V.P Singh (Editor), Colorado, USA,

SNC-LAVALIN INC. (2015). *Site-Wide Hydrogeology Field Investigation Program*.

Soro G.E. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse De Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 193.

Stoker J.J. (1957).Water Waves The Mathematical Theory With Applications.Interscience Publishers, Inc., 609

Stokes G. (1845). On the theories of the internal friction of fluids in motion. *Math. Phys. Papers*, 1: 75–129.

Tagini B. (1962). *Essai de division structurale du précambrien de Côte d'Ivoire*.

Tangara M. (2005). Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris (France), 374p.

Timbadiya P.V., Patel P.L. & Porey P.D. (2011). Calibration of HEC-RAS Model on Prediction of Flood for Lower Tapi River, India. *Journal of Water Resource and Protection*, 03(11): 805–811.

Tran D.T. (2015). Métrologie et modélisation des écoulements à forte pente autour d'obstacles: application au dimensionnement des passes naturelles. Doctorat, Université de Toulouse (France)

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, pp. 369–372.

Tyson P.D., Dyert T.G. & Mametse M.N. (1975). Secular changes in South African rainfall: 1880 to 1972. *Quart Journal Roy Meteor Soc.*,: 101: 817-833.

USACE (2010).Hydrologic Engineering Center-River Analysis System: Hydraulic Reference Manual.US Army Corps of Engineers, Davis, CA, 417

USACE (2016).Hydrologic Engineering Center-River Analysis System: Hydraulic Reference Manual.US Army Corps of Engineers, Davis, CA, 539

Vermote E., Tanré D., Deuze J.L., Herman M. & Morcette J.-J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35: 675–686.

Wang X., Liu T., Shang S., Yang D. & Melesse A.M. (2010). Estimation of design discharge for an ungauged overflow-receiving watershed using one-dimensional hydrodynamic model. *International Journal of River Basin Management*, 8(1): 79–92.

Wu C.L., Chau K.W. & Fan C. (2010). Prediction of rainfall time series using modular artificial neural networks coupled with data-preprocessing techniques. *Journal of Hydrology*, 389(1–2): 146–167.

Yao A.B. (2015). Evaluation des Potentialités en Eau du Bassin Versant de la Lobo en vue d'une Gestion Rationnelle (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse De Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 225.

Yobouet A. (2011). Contribution de l'imagérie satellitaire au suivi des ressources naturelles dans la partie Est du Burkina Faso. Mémoire Master, 2iE (Ouagadougou, Burkina Faso), 64.

Zro B.G.F. (2012). Utilisation de la télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) pour la cartographie et l'évaluation de la fertilité rizicole des sols hydromorphes (gleysols) : cas d'un périmètre de la région du Bélier (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse De Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan-Cocody (Cote d'Ivoire)), 182.

Zueli K.B. (1981). Etude d'un milieu de forêt dense, analyse et cartographie des paysages de la région de Soubré (sud-ouest ivoirien). Thèse De Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 451.

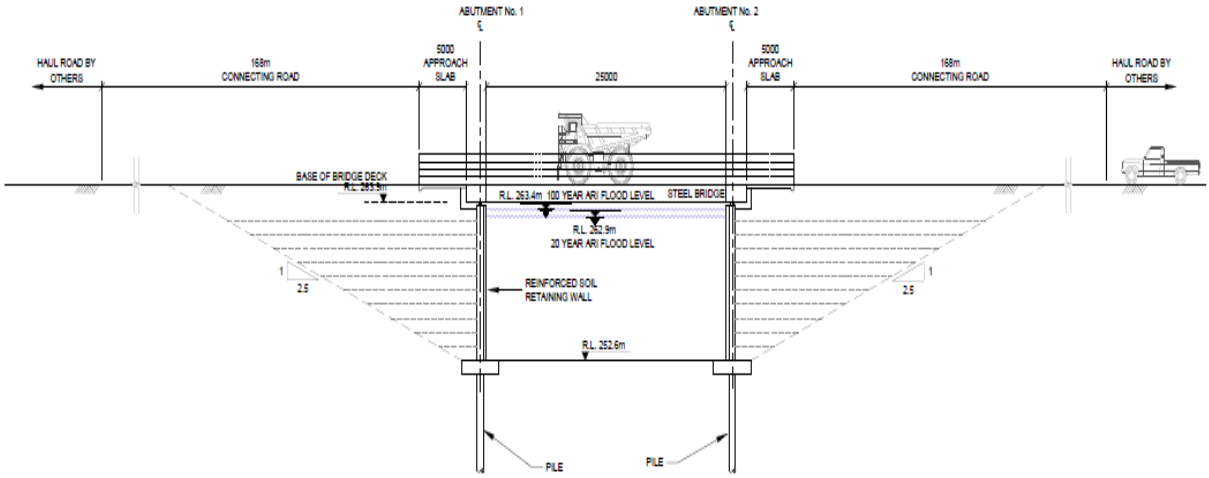
ANNEXES

Annexe 1 : Comparaison des longueurs des segments de 2011 et 2012.

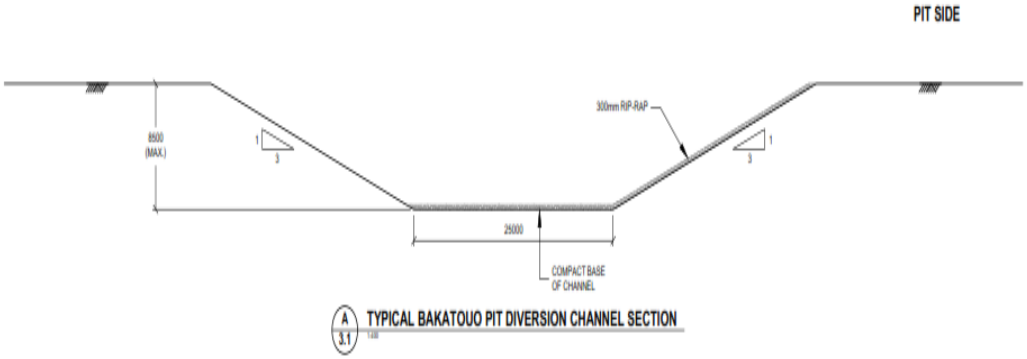
	Coordonnées		Longueur du segment		
Points de contrôle	Longitude (m)	Latitude (m)	Vectorisation (m)	Image ortho (m)	Ecart (%)
1	599236	761468	29,714	29,77	0,20
2	600638	760688	124,92	125,67	0,60
3	599840	760333	51,418	51,59	0,33
4	599590	760323	31,64	31,83	0,59
5	599409	759945	58,82	59,27	0,76
6	599800	758788	58,58	59,10	0,89
7	598246	757876	29,81	30,16	1,19
8	598156	757283	49,03	49,1	0,14
9	599244	761205	67,83	68,13	0,44
10	599563	755829	56,10	57,19	1,95

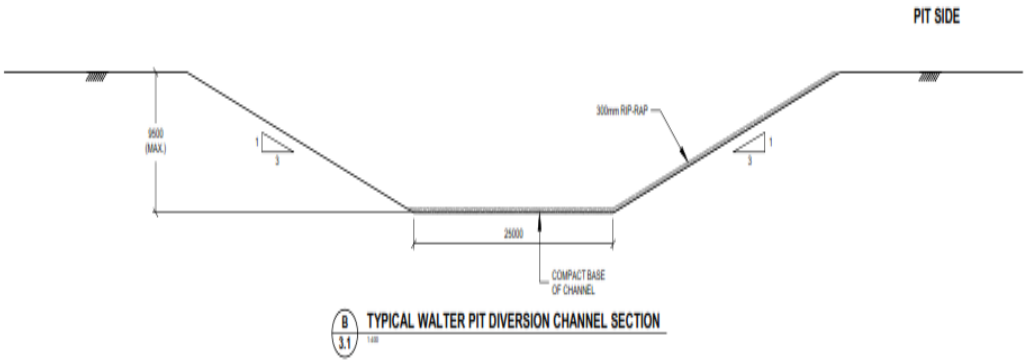
Annexe 2 : Comparaison des longueurs des segments de 2018 et google-earth.

	Coordonnées		**Longueur du segment**		
Points de contrôle	Longitude (m)	Latitude (m)	Vectorisation (m)	Google Earth (m)	Ecart (%)
1	599236	761468	45,246	45,14	0,23
2	600638	760688	135,94	134,03	1,41
3	599836	760333	68,80	69,11	0,45
4	599576	760325	48,85	49,1	0,51
5	599409	759945	59,09	58,6	0,83
6	599394	759788	97,62	97,96	0,35
7	599736	758734	154,34	153,41	0,60
8	598249	757940	89,17	88,62	0,62
9	598080	757445	171,95	172,92	0,56
10	599549	755831	64,585	64,63	0,07



Annexe 3 : Caractéristiques du pont de Daapleu





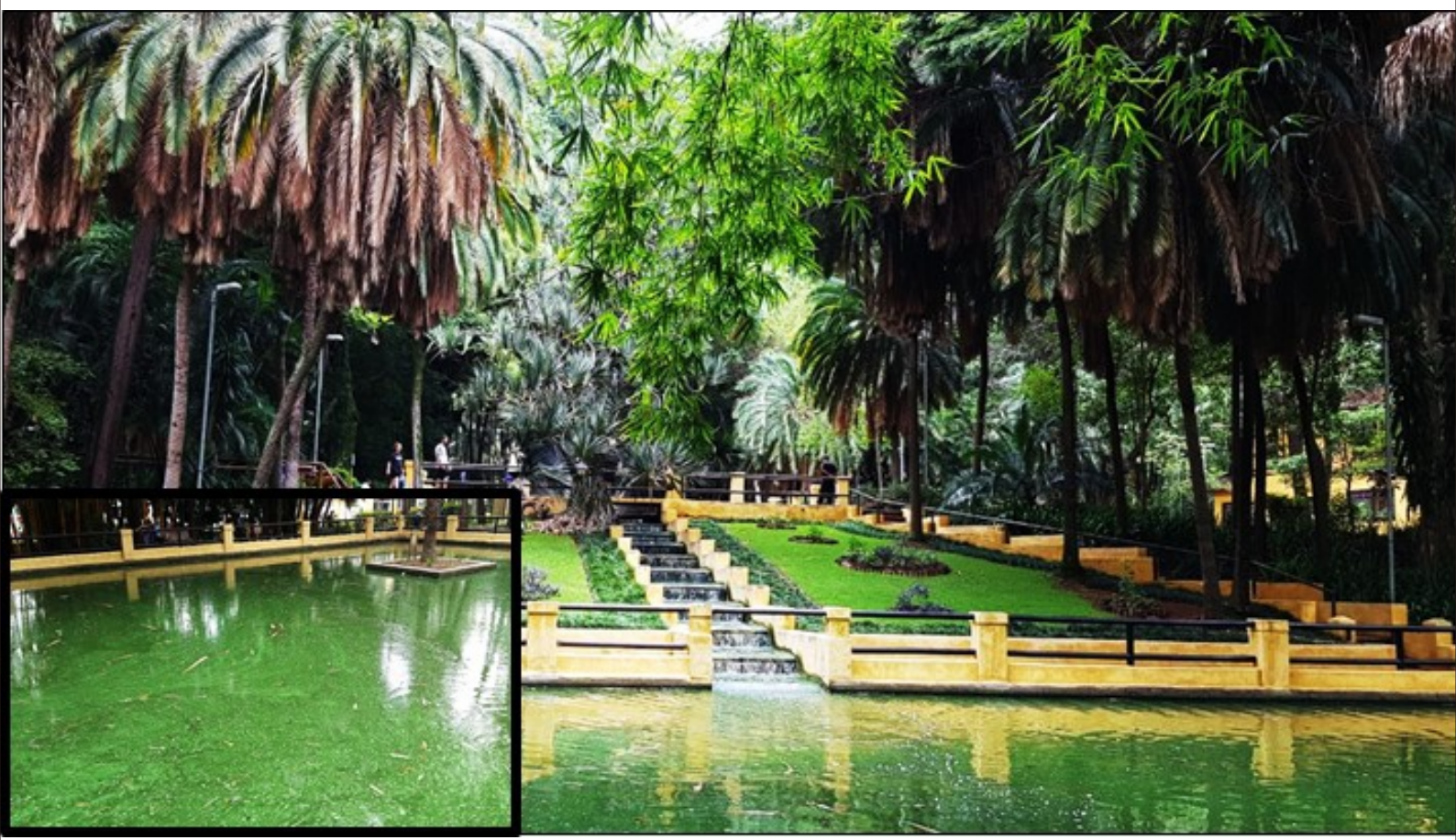
Annexe 4 : Caractéristiques des canaux de Bakatouo et de Walter

PUBLICATIONS ET ACTES DE COLLOQUE

ISSN: 1945-3094 Volume 11, Number 8, August 2019

Scientific Research Publishing

Journal of Water Resource and Protection



ISSN: 1945-3094

9 771945 309008 08

www.scirp.org/journal/jwarp

Journal Editorial Board

ISSN: 1945-3094 (Print) ISSN: 1945-3108 (Online)

http://www.scirp.org/journal/jwarp

Editor-in-Chief

Prof. Jian Shen	College of William and Mary, USA

Editorial Board

Dr. Assad Ahmed Al-Thukair	King Fahd University of Petroleum & Minerals, Saudi Arabia
Prof. Sam F. Atkinson	University of North Texas, USA
Dr. Amitava Bandyopadhyay	University of Calcutta, India
Dr. Helen Bridle	Heriot-Watt University, UK
Prof. Peter Dillon	Trent University, Canada
Prof. Taisheng Du	China Agricultural University, China
Dr. Karina Yew-Hoong Gin	National University of Singapore, Singapore
Prof. Madan Kumar Jha	Indian Institute of Technology, India
Dr. Paul Kay	University of Leeds, UK
Prof. Zhaohua Li	Hubei University, China
Prof. Pan Liu	Wuhan University, China
Dr. Damodhara Rao Mailapalli	Indian Institute of Technology, India
Dr. Arash Massoudieh	The Catholic University of America, USA
Prof. Jiho Min	Chonbuk National University, South Korea
Prof. Ping-Feng Pai	National Chi Nan University, Chinese Taipei
Prof. Mohamed Nageeb Rashed	Aswan University, Egypt
Dr. Dipankar Saha	Ministry of Water Resources Government of India, India
Prof. Vladimir Soldatov	Institute of Physical Organic Chemistry, Belarus
Dr. Matthias Templ	Vienna University of Technology, Austria
Dr. Stijn W. H. Van Hulle	Ghent University, Belgium
Prof. Aswani K. Volety	Florida Gulf Coast University, USA
Dr. Yiping (Rocky) Wu	Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, USA
Prof. Muqi Xu	Chinese Academy of Sciences, China
Prof. Xiaohua Yang	Beijing Normal University, China
Dr. Y. Jeffrey Yang	US Environmental Protection Agency, USA
Dr. Jinsheng You	University of Nebraska, USA
Prof. Fan Zhang	Chinese Academy of Sciences, China
Dr. Chunli Zheng	Xi'an Jiaotong University, China

Scientific Research Publishing

Journal of Water Resource and Protection, 2019, 11, 937-1109
http://www.scirp.org/journal/jwarp
ISSN Online: 1945-3108
ISSN Print: 1945-3094

Table of Contents

Volume 11 Number 8 August 2019

Distributed Hydrological Model for Assessing Flood Hazards in Laos

S. Phrakonkham, S. Kazama, D. Komori, S. Sopha.....937

Restoration of Stocks of the Sea Cucumber *Holothuria fuscogilva* in the Red Sea with Transplanted Wild Juveniles

M. H. Hasan, K. S. Johnson.....959

The Role of Wastewater Treatment Plants in the Environmental Dissemination of Antibiotic Resistant Bacteria (ARB) and Resistance Genes (ARG)

A. M. Nasser, H. Fawaqa, Y. Nitzan.....981

Prioritization of W. Alarab Sub-Watersheds (North Jordan) for Conservation Measures Using RS, GIS, and Multi-Criteria Analysis

Y. Farhan, S. Nawaieh.....995

Removal of Herbicides from Water Using Heterogeneous Photocatalysis Case Study: MCPA Sodium Monohydrate

S. Khalaf, J. H. Shoqeir, L. Scrano, R. Karaman, S. A. Bufo, T. A. Kurniawan.....1024

1D-2D Hydraulic Modeling of a Diversion Channel on the Cavally River in Zouan-Hounien, Cote d'Ivoire

K. K. Lazare, B. L. Alexis, Y. A. Berthe, K. Z. Alex, K. K. Séraphin, K. K. Félix, K. Bérenger.....1036

The Loading Capacity of the Elands River: A Case Study of the Waterval Boven Wastewater Treatment Works, Mpumalanga Province, South Africa

S. Dlamini, T. K. Gyedu-Ababio, A. Slaughter.....1049

Irish Water and Scottish Water: A Comparison

R. McDermott, B. Solan, S. McCord, K. Littlewood.....1064

Groundwater Flow Modeling by Using the Permeability Induced by Satellite Lineaments in Discontinuous Aquifers and Semi-Arid Context: A Case Study of the Liptako Region (South-West of Niger)

S. G. Inaytoulaye, Y. Koussoube, A. K. H. Saley, I. Sandao, P. Hayes, B. Ousmane.....1090

Journal of Water Resource and Protection (JWARP)
Journal Information

SUBSCRIPTIONS

The *Journal of Water Resource and Protection* (Online at Scientific Research Publishing, www.SciRP.org) is published monthly by Scientific Research Publishing, Inc., USA.

Subscription rates:
Print: $89 per issue.
To subscribe, please contact Journals Subscriptions Department, E-mail: sub@scirp.org

SERVICES

Advertisements
Advertisement Sales Department, E-mail: service@scirp.org

Reprints (minimum quantity 100 copies)
Reprints Co-ordinator, Scientific Research Publishing, Inc., USA.
E-mail: sub@scirp.org

COPYRIGHT

Copyright and reuse rights for the front matter of the journal:
Copyright © 2019 by Scientific Research Publishing Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Copyright for individual papers of the journal:
Copyright © 2019 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc.

Reuse rights for individual papers:
Note: At SCIRP authors can choose between CC BY and CC BY-NC. Please consult each paper for its reuse rights.

Disclaimer of liability
Statements and opinions expressed in the articles and communications are those of the individual contributors and not the statements and opinion of Scientific Research Publishing, Inc. We assume no responsibility or liability for any damage or injury to persons or property arising out of the use of any materials, instructions, methods or ideas contained herein. We expressly disclaim any implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose. If expert assistance is required, the services of a competent professional person should be sought.

PRODUCTION INFORMATION

For manuscripts that have been accepted for publication, please contact:
E-mail: jwarp@scirp.org

Journal of Water Resource and Protection, 2019, 11, 1036-1048
http://www.scirp.org/journal/jwarp
ISSN Online: 1945-3108
ISSN Print: 1945-3094

1D-2D Hydraulic Modeling of a Diversion Channel on the Cavally River in Zouan-Hounien, Cote d'Ivoire

Kouassı Kouakou Lazare*, Brou Loukou Alexis, Yao Affoué Berthe, Kouadıo Zilé Alex, Konan Kouakou Séraphin, Konan Koffi Félix, Koffı Bérenger

Department of Geology, University Jean Lorougnon GUEDE, Daloa, Cote d'Ivoire
Email: *k_lazare@yahoo.fr

How to cite this paper: Lazare, K.K., Alexis, B.L., Berthe, Y.A., Alex, K.Z., Séraphin, K.K., Félix, K.K. and Bérenger, K. (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**, 1036-1048.
https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.118061

Received: June 23, 2019
Accepted: August 23, 2019
Published: August 26, 2019

Copyright © 2019 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

Abstract

On the Cavally River, located on the border between Côte d'Ivoire and Liberia, several hydraulic structures such as bridges and diversion channels are planned to be made in recent years in the operating perimeter of the Ity mining company. A 1D-2D hydraulic model was developed to design a diversion channel to cut a meander of the Cavally River in order to ensure hydraulic operation similar to the initial conditions of the river (water levels, flow and velocities). This model was designed with a flow rate of 240 m^3/s and a Manning coefficient of 0.052 $m^{1/3}\cdot s^{-1}$ for the minor bed and 0.06 $m^{1/3}\cdot s^{-1}$ for the major bed. The results from the hydraulic model show that the hydraulic conditions (water levels, velocities) in the channel before and after the diversion remain almost like those of the Cavally River.

Keywords

Hydraulic Modeling, Diversion Channel, Cavally River, Ity, Côte d'Ivoire

1. Introduction

Intensification of human activities on watersheds in general is one of the factors that favor erosion phenomena and roughness modification as well as the section of rivers [1]. Among these activities, mining activities and infrastructure construction (dams, bridges, diversion of waterways, etc.) occupy a prominent place. Therefore, an understanding of these developments through hydrological and hydraulic studies is necessary to ensure the protection of the environment in general and hydro systems in particular [2] [3] [4] [5] [6]. To provide precise answers to their understanding, several studies have already been conducted using different hydraulic models [7]. Among the main anthropogenic causes of the

modification of the functioning of rivers, some authors such as Alexeevsky *et al.* (2013) [8] and Maio *et al.* (2013) [9] underlined the preponderant role of the construction of infrastructures or their suppression on the modification of river geometry. Côte d'Ivoire has four major rivers (Cavally, Sassandra, Bandama and Comoe). Their basins undergo anthropogenic activities of all kinds. The Cavally River, located on the border between Côte d'Ivoire and Liberia, crosses the Ity Mining Company (SMI) exploitation zone in Zouan-Hounien. The Cavally River has a lot of meanders in this area and the stream bed is heavily disturbed by illegal miners. Several hydraulic structures such as bridges and diversion channels are planned to be constructed on the watercourse namely the construction of a diversion channel on the river bed. Therefore, the diversion of watercourses can have undesirable social and environmental consequences, namely the modification of social structures and the hydrological dysfunction of the watershed concerned. In addition, whole villages may be engulfed or people may be forced to find new livelihoods or change their way of life [8] [10]. In view of all the consequences that such a project can generate, in-depth studies must be carried out to size the diversion channel to ensure hydraulic conditions like the initial state of the watercourse. The main objective of this study is to establish a 1D-2D hydraulic model to design a diversion channel capable of ensuring flow conditions hydraulically like the initial conditions of the watercourse.

2. Material and Methods

2.1. Study Area

The Cavally River is a lower cross border watershed between Guinea, Ivory Coast and Liberia. Located in the west of Côte d'Ivoire, the Cavally River begins in Guinea, in the North of Mount Nimba with more than 1000 meters as approximate altitude (**Figure 1**). The lower watershed covers a complete area of 28,800 Sq. km at Tate hydrometric station located at 60 km from the mouth. Côte d'Ivoire doesn't possess but about 15,000 Sq. km of watershed [11]. In the framework of this study, the chosen outlet is the hydrometric station of Floleu located at downstream of the Ity station in the Zouan-Hounien region. The low watershed has an area of 3647.53 Sq. km. The region of Zouan-Hounien is in the mountain region of Côte d'Ivoire; its relief is hilly. Zouan-Hounien is in the forest area and its climate is the mountain climate with two seasons: one rainy season from May to October and one dry season from November to March. The annual average temperature is 25.6˚C. The annual average precipitation is 1866 mm. The driest month is January with a precipitation of 15 mm. The most important precipitations are recorded in September and they are 357 mm in average [12].

2.1.1. Characterization of Derivation Area

The meander of the Cavally River that will be cut is located in the vicinity of the Ity mining company between kilometer point PK7 + 400 and PK10 + 400. The meander is 3 km long (**Figure 2**).

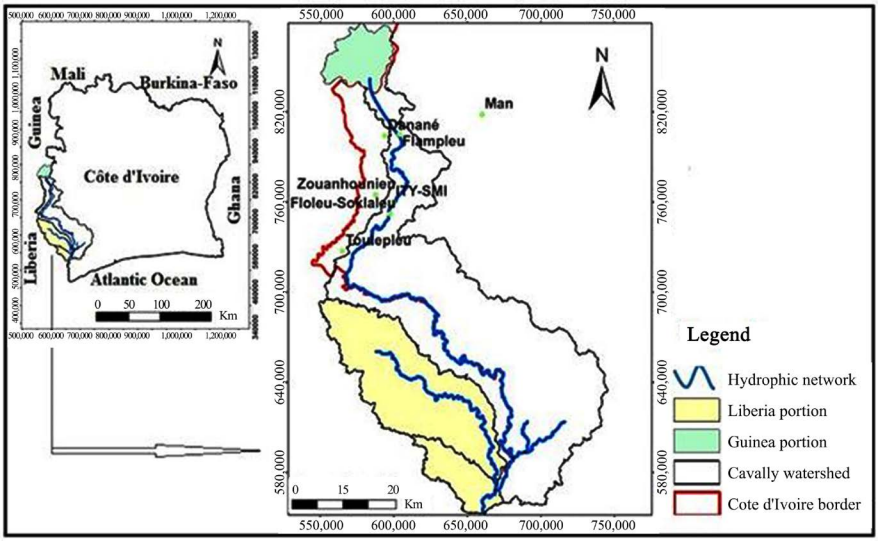


Figure 1. Study area of sub-watershed of Cavally River.

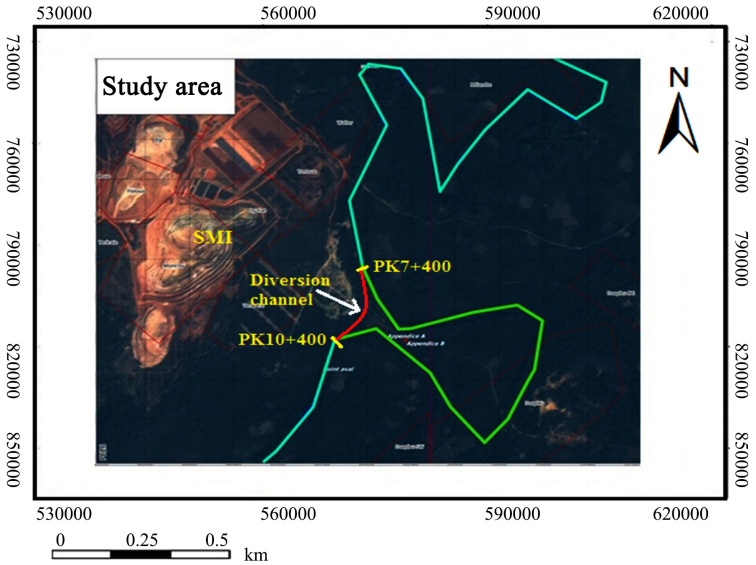


Figure 2. Implementation area of the diversion channel on the Cavally River bed.

2.1.2. Data Acquisition and Analysis

The measurements of water flows and the profiles of water levels between Ity station (upstream) and Floleu station (downstream) of the diversion channel were respectively carried out from July to October 2015, in October 2018 (rainy season) and February 2019 (dry season). The flows of the river were measured by means of an Acoustic Doppler current profiler (ADCP). The measurements of the profiles of water levels were realized by means of a differential Global Positioning System (GPS) models STONEX S8 Plus. Displacements on the river were carried out using an outboard motor boat made for 26 km along the Cavally River with a step of 200 m between 2 points of measurements. A digital elevation model (DEM) with 90 m resolution was used for the determination of altitudes and the slopes (https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/).

This DEM was corrected by combining with a Lidar image of 1.30 m resolution using the Global Mapper version 15 triangulation tools.

2.2. Methods

2.2.1. Diversion Channel Design Criteria

The diversion channel was designed for a return period of 2 years with a flow rate of 240 m^3/s, after flood estimation by frequency analysis. The Cavally River hydrology was studied using records from three hydrometric stations: Flampleu, Ity and Toulepleu (see **Figure 1**). Long term daily flow (1955-2001) and water level measurements were used.

The diversion channel was designed to not to increase in the water flow elevation of the river during the floods. To this end the channel will have approximatively similar cross section area as the river in natural condition.

In order to avoid sediment deposition and erosion of the slab the average flow velocity in the channel was maintained between 0.5 m/s and 1.5 m/s as recommended by several authors [4] [13]. The hydraulic parameters determined are presented by Equations (1), (2) and (3) and (**Figure 3**).

- Wet section (S)

$$S = (b + my)\, y \tag{1}$$

- Wet perimeter (P)

$$p = b + my \tag{2}$$

- Hydraulic radius (R_h)

$$R_h = \frac{S}{P} = \frac{(b + my)\, y}{b + my} \tag{3}$$

where: b: width of the channel bottom; y: depth; m: slope coefficient.

2.2.2. Modeling Water Surface Elevation by HEC-RAS

Frequency Analysis was used to select the law that best fits the flood estimation of the Ity station to obtain the most appropriate return period for the derivation channel sizing. The model allowed understanding the evolution of the distribution of the hydraulic parameters which are among others the velocities, the water levels and the flows before the realization of the diversion channel while considering the results of the frequency analysis.

For the purposes of this study, flows are considered non-permanent given the variation in hydraulic parameters (flows, water levels, depths, velocities) as a function of time. The hydraulic design of the diversion channel was based on the simulation the flow using HEC-RAS 1D-2D hydrodynamic software for natural and modified conditions. The equations used in the case of a non-stationary flow are among others the conservation of the mass (Equation (4)) and the conservation of the momentum (Equation (5)) [14].

- Mass conservation

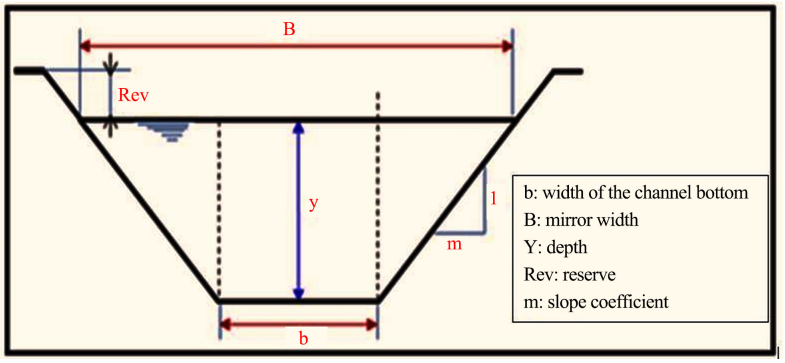


Figure 3. Diversion channel geometry.

The unsteady differential form of the mass conservation equation is:

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}+q=0 \tag{4}$$

- Momentum conservation

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}&=-g\frac{\partial H}{\partial x}+v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)-c_f u+fv\\ \frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}&=-g\frac{\partial H}{\partial y}+v_t\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)-c_f v+fu\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

where t is time, h is the water surface elevation, u and v are the velocities components in the x and y direction respectively, q is a source/sink flux term, g is the gravitational acceleration, v_t is the horizontal eddy viscosity coefficient, c_f is the bottom friction coefficient, and f is the Coriolis parameter.

The mesh of the 2D model was realized on 50 m by 50 m. The Digital Elevation Model (DEM) was created by the fusion of an airborne LiDAR survey provided by SMI and a SRTM 90 digital elevation model. The SRTM 90 was adjusted by −3.85 m to obtain the same reference system as the LiDAR.

A flood hydrograph was imposed as a boundary condition upstream during the calibration phase of the model over the period from January 01 to April 30, 1988 with a time step of one hour (1 hour) and a longitudinal slope of 0.000194 m/m downstream. The results were validated over a dry period (01 January to 26 March 1983) and a wet period (18 July to 10 October 2015) by comparing simulated results with field observations. These periods were chosen to understand the behavior of the model regardless of the season and the consistency of the data obtained on the watershed. The fit between the predicted and observed values was evaluated using two functions: the Nash coefficient and the correlation coefficient given respectively by the Equations (6) and (7):

$$Nash=1-\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(q_{ci}-q_{oi}\right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(q_{oi}-\bar{q}_o\right)^2}} \tag{6}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(q_{ci} - \overline{q_c}\right)\left(q_{oi} - \overline{q_o}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(q_{ci} - \overline{q_c}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(q_{oi} - \overline{q_o}\right)^2}} \quad (7)$$

In these two expressions, n represents the height of the sequence, q_{oi} represents the observed flow for calculated flow for the pace time i in m^3/s; q_{ci} is the calculated flow for the pace time i in m^3/s; q_0 is the observed average flow in m^3/s.

3. Results and Discussion

3.1. Results

3.1.1. Diversion Channel Design

The diversion channel has a length of 280 m, the manning coefficient retained is n = 0.06 $m^{1/3}\cdot s^{-1}$. The average speed allowed in the canal is V = 1.1 m/s, a bank fruit m = 2.5 m for a longitudinal slope of the diversion channel S_f = 0.0036 m/m, a base b = 25 m a mirror width B = 65 m; depth y = 7 m; a wet perimeter P = 54.3 m; a wet section S = 222 Sq m. The side slope of the diversion channel: 2.5H: 1.0V.

3.1.2. Hydraulic Modeling before and after the Diversion Channel Completion

Figure 4 and Figure 5 show the results of the calibration and the validation of the model after variation of the Manning coefficient. The calibration of the model lead to Manning coefficient values n = 0.052 $m^{1/3}\cdot s^{-1}$ for the minor bed and 0.06 $m^{1/3}\cdot s^{-1}$ for the major bed. The flows used are those of the year 1983, 1988 and 2015. The graphical observation (Figure 4 and Figure 5) shows a good synchronism between the simulated values and the observed values. This good similarity between observed and simulated flows is evidenced by the numerical results, which show a strong correlation of 0.94 and a Nash coefficient of 0.92 for the calibration period. Nash values are 0.95; 0.83 and correlation values are 0.97

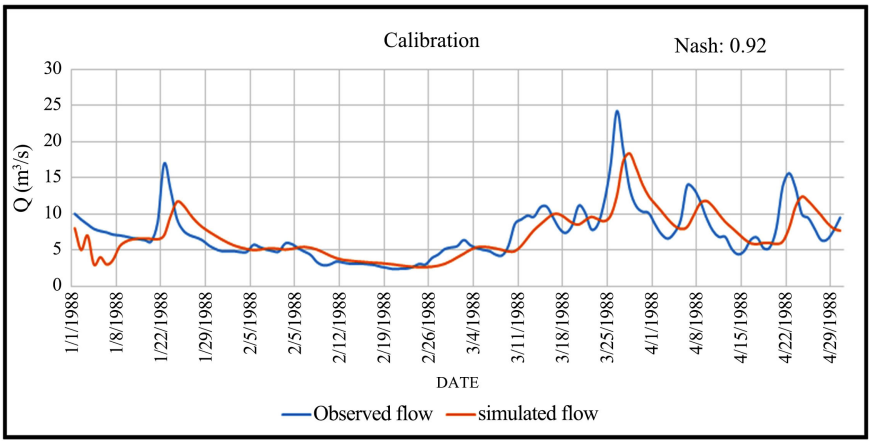


Figure 4. Comparison between observed and simulated flow rates after model calibration from 01 January to 30 April 1988.

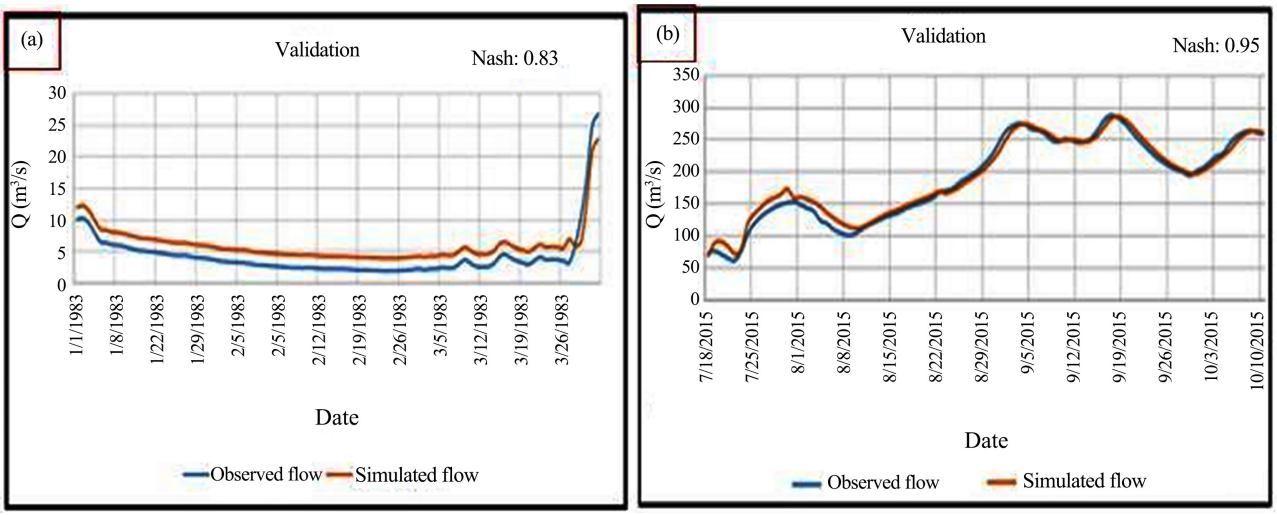


Figure 5. Comparison between flows observed and simulated after the model validation from January 1 to March 26, 1983(a) and from July 18 to October 10, 2015(b).

and 0.85 for validations periods. This good correlation between the simulated flow rates and observed flows shows that the hydraulic model reproduces well the dynamics of the flows of the watercourse.

3.1.3. Comparison of Cavally River Velocities before and after the Diversion Channel Completion

The velocities before and after the realization of the diversion channel are relatively low on the level of banks and high in the minor bed (**Figure 6**). These values in the same order of magnitude and lie between 0.10 and 1.6 m/s. Velocities decrease considerably by the upstream towards downstream. The highest velocities are in the zone of cut of the meander. It should be also noted that under the natural conditions there is an acceleration of the flow in concave banks at the entry of the meander.

3.1.4. Comparison of Water Levels before and after Diversion Channel Completion

The maps in **Figure 7** show the difference in water level before and after the installation of the diversion channel. It can be noted that downstream of the canal the water levels remain almost in their natural state channel. On the other hand, just upstream of the canal, water levels have decreased by about 0.2 m, resulting in a slight increase in the Cavally River's hydraulic capacity at this location.

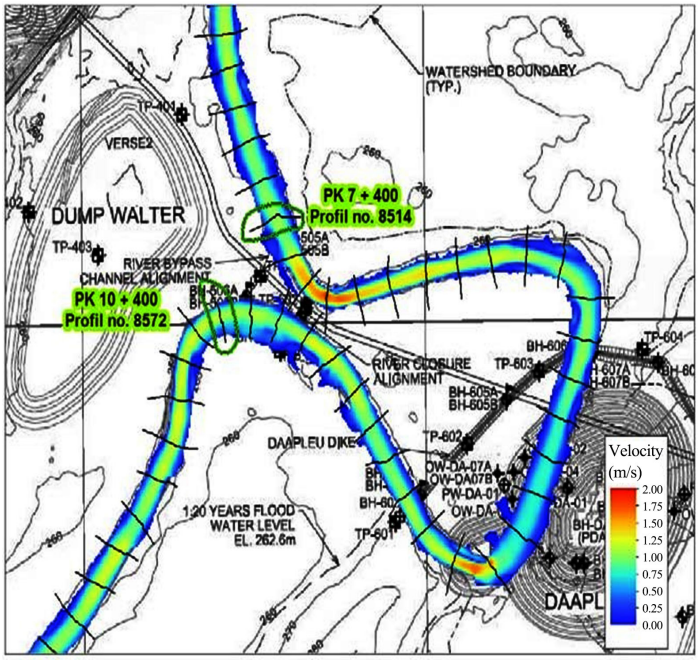
3.1.5. Flood Propagation Area Model before and after the Diversion Channel Construction

The maps in **Figure 8** show the propagation area of the Cavally River before the construction of the bypass channel for floods with the 20- and 100-years return period. With reference to this figure, the water level varies from 262.1 to 262.4 m for the 20-year flood, and from 262.4 to 262.7 m for the 100-year flood in the meander cut-off zone (diversion channel).

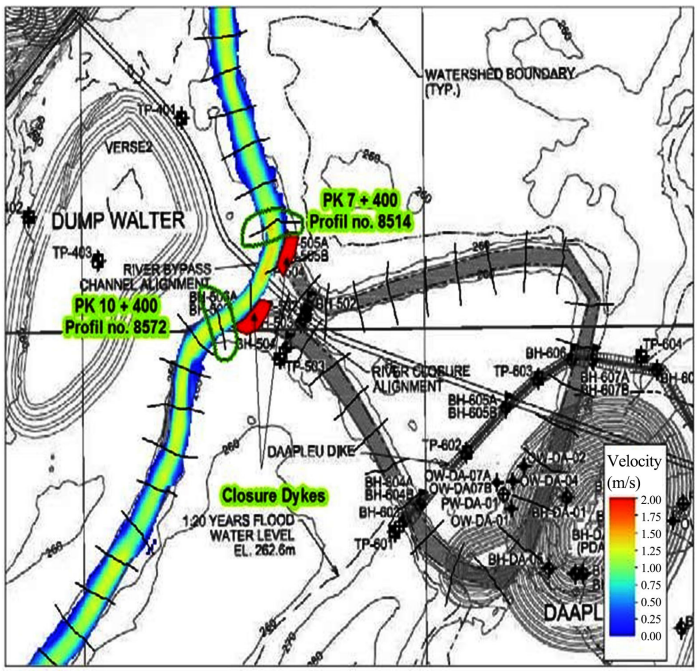
Flooding areas changed slightly in the meander cutting zone and the water

level decreased immediately downstream of the road by about 20 cm for both cases (Figure 9). In general, the difference in water levels of the floodplain is almost negligible.

With regard to the results of the flood propagation model the most important depths were observed at the upstream zone of the section of the watercourse. The water level increases of 20 cm upstream the channel (Figure 10).



(a)



(b)

Figure 6. Velocities distribution before (a) and after (b) diversion channel.

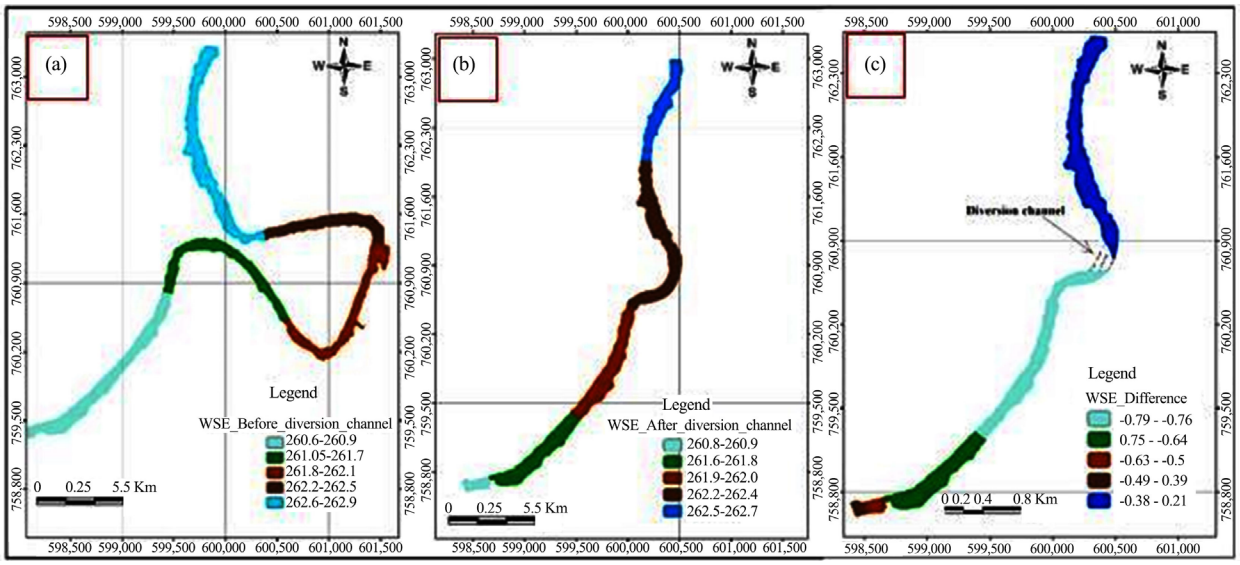


Figure 7. Difference in water surface elevation (c) between existing conditions (a) and future conditions (b).

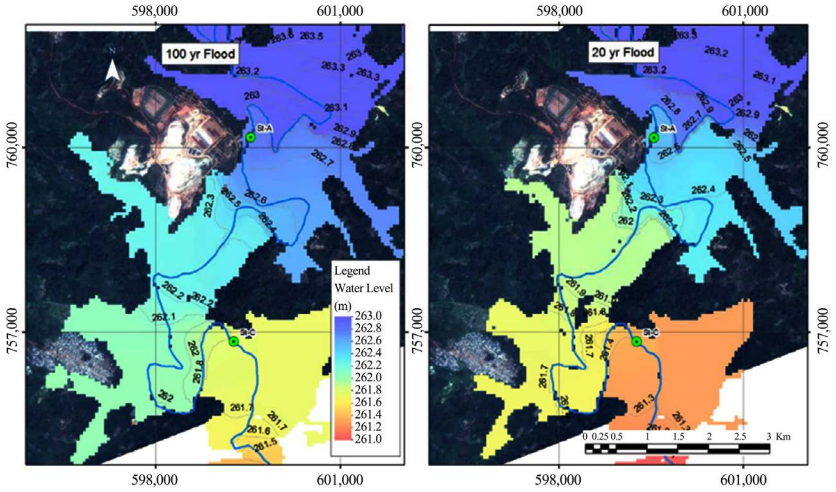


Figure 8. Flood propagation area before the diversion channel construction: 100 years (a) and 20 years (b).

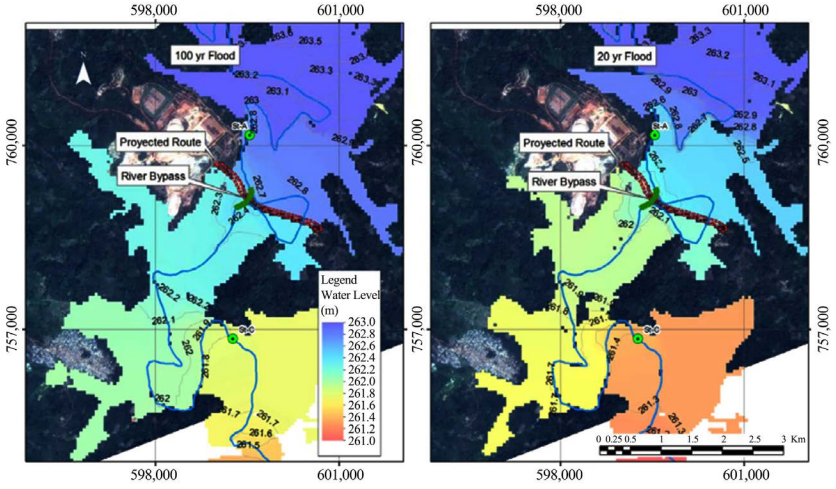


Figure 9. Flood propagation area after the diversion channel construction: 100 years (a) and 20 years (b).

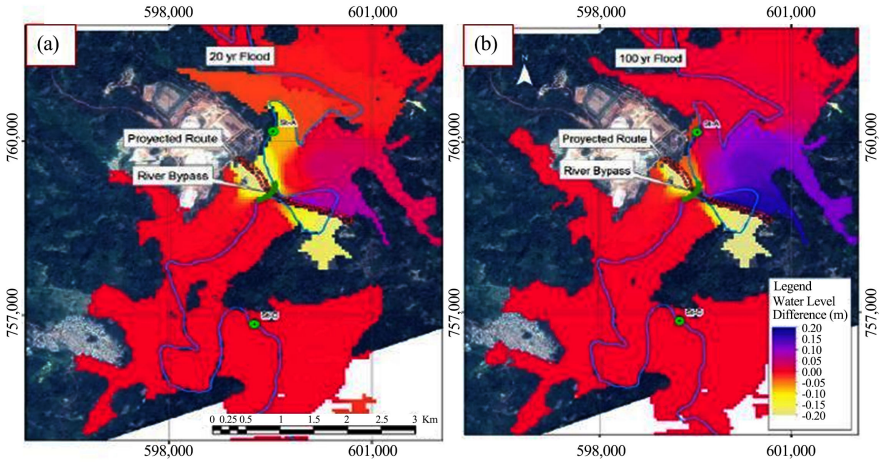


Figure 10. Water level difference after the diversion channel construction20 years (a) and 100 years (b).

3.2. Discussion

As part of the design of the Cavally River diversion channel using a 1D-2D hydraulic model, studies were carried out to impose flow conditions like the watercourse. The geometric characteristics of the bypass channel are justified by the iteration method. The two-year return period estimated for the sizing of the diversion channel is between the maximum flood interval (238 - 300 m^3/s) recorded on the catchment and respects the initial conditions of the flows of Cavally River. Wang *et al.* (2010) [15] showedthat the design flow must be estimated with the largest flood in the watershed in order to ensurebetter flow conditions.

The results obtained by the HEC-RAS model showed in general that the model reproduces well the conditions of flow of the river according to Nash coefficients which vary from 0.83 to 0.95 [6] [16].

The Manning coefficient used for the calibration and validation of the hydraulic model is 0.052 $m^{1/3}\cdot s^{-1}$ for the minor bed and 0.06 $m^{1/3}.s^{-1}$ for the major bed. This value is high, but this is quite acceptable considering the composition of the soils, gold panning activities in the stream bed as well as the nature of the existing vegetation at the level of Cavally River. The roughness of the watercourse is a highly variable parameter that depends on the number of factors such as surface roughness, vegetation cover, channel irregularities, channel alignment [17]. The values obtained in this study confirm those of many authors who indicate that the Manning-Strickler coefficient is generally high for highly anthropogenic streams through material extraction activities [18] [19].

The velocities before and after the derivation of the diversion channel are relatively low at the banks and high in the minor bed. It is important to note that under natural conditions there is an acceleration of the flow in the concave bank at the entrance of the meander. After completion of the bypass channel speeds become slightly high. This could be due to layer gradients that increase velocity vectors due to shape profiles and non-uniform velocity distribution at depth [20] [21].

Comparison of the water levels before and after the diversion of the river at Ity station showed that the Cavally River will not be really disturbed by this channel because the reduction of the water level by 0.2 m will cause an increase practically negligible flow velocity. Moreover the decrease in the water level (0.2 m) will be insignificant compared to the total fluctuations of the river which vary in a year from 6 to 7 m. The reduction of the water level is due to the diversion channel which contributes to a reduction of the fluctuations of water levels by minimizing the phenomena of flooding [22] [23] [24]. Therefore, the hydraulic conditions upstream and downstream of the diversion channel would not be significantly different from the existing natural conditions.

4. Conclusion

The work presented in this article focuses on the realization of a hydraulic model to design a diversion channel capable of ensuring a hydraulic operation like the initial conditions (water levels, flow and speed) of the Cavally River. About the diversion channel, it has a length of 280 m and to avoid an oversize of it, it has been dimensioned for a return period of 2 years with a flow rate of 240 m^3/s, an average speed of 1.1 m/s and a slope of 0.0036 m/m. Flow velocities in the Cavally River range from 0.1 to 1.6 m/s from upstream to downstream. Hydraulic conditions (water levels, flow and velocity) in the channel after diversion will remain substantially like the natural state of the watercourse. The diversion channel will therefore have no significant impact on the hydraulic operation of the Cavally River.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial and logistical support of the Ity Mining Company (SMI).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

[1] Rosier, B., Boillat, J.-L. and Schleiss, A.J. (2010) Semi-Empirical Model for Channel Bed Evolution Due to Lateral Discharge Withdrawal. *Journal of Hydraulic Research*, **48**, 161-168. https://doi.org/10.1080/00221681003704129

[2] Barredo, J. (2007) Major Flood Disaster in Europe: 1950-2005. *Natural Hazards*, **42**, 125-148. https://doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2

[3] Bogdanowicz, E., Strupczewski, W.G., Kochanek, K. and Markiewicz, I. (2014) Flood Risk for Embanked Rivers. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **2**, 135-143. https://doi.org/10.4236/gep.2014.23018

[4] Farina, G., Bolognesi, M., Alvisi, S., Franchini, M., Pellegrinelli, A. and Russo, P. (2017) Estimating Discharge in Drainage Channels through Measurements of Surface Velocity Alone: A Case Study. *Flow Measurement and Instrumentation*, **54**, 205-209.

https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.02.006

[5] Kane, S., *et al.* (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*, **6**, 304-319. https://doi.org/10.4236/cweee.2017.63020

[6] Shafizadeh-Moghadam, H., Valavi, R., Shahabi, H., Chapi, K. and Shirzadi, A. (2018) Novel Forecasting Approaches Using Combination of Machine Learning and Statistical Models for Flood Susceptibility Mapping. *Journal of Environmental Management*, **217**, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.089

[7] Moramarco, T. and Dingman, S.L. (2017) On the Theoretical Velocity Distribution and Flow Resistance in Natural Channels. *Journal of Hydrology*, **555**, 777-785. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.068

[8] Alexeevsky, N.I., Chalov, R.S., Berkovich, K.M. and Chalov, S.R. (2013) Channel Changes in Largest Russian Rivers: Natural and Anthropogenic Effects. *International Journal of River Basin Management*, **11**, 175-191. https://doi.org/10.1080/15715124.2013.814660

[9] Maio, L., Monaco, E., Ricci, F. and Lecce, L. (2013) Simulation of Low Velocity Impact on Composite Laminates with Progressive Failure Analysis. *Composite Structures*, **103**, 75-85. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.02.027

[10] Karagiorgos, K., Thaler, T., Hübl, J., Maris, F. and Fuchs, S. (2016) Multi-Vulnerability Analysis for Flash Flood Risk Management. *Natural Hazards*, **82**, 63-87. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2296-y

[11] Tricart, J., *et al.* (1973) Une Monographie Physique de la Côte-d'Ivoire. *Annales de Géographie*, **82**, 369-372. https://doi.org/10.3406/geo.1973.18905

[12] Brou, A.L., Kouassi, K.L., Konan, K.S., Kouadio, Z.A., Konan, K.K. and Bamory, K. (2017) Rain-Flow Modeling Using a Multi-Layer Artificial Neural Network on the Watershed of the Cavally River (Côte d'Ivoire). *Journal of Water Resource and Protection*, **9**, 1403. https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.912090

[13] Noarayanan, L., Murali, K. and Sundar, V. (2012) Manning's "n" Co-Efficient for Flexible Emergent Vegetation in Tandem Configuration. *Journal of Hydro-Environment Research*, **6**, 51-62. https://doi.org/10.1016/j.jher.2011.05.002

[14] USACE (2016) Hydrologic Engineering Center-River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, US Army Corp of Engineering. Version 5.0.

[15] Wang, X., Liu, T., Shang, S., Yang, D. and Melesse, A.M. (2010) Estimation of Design Discharge for an Ungauged Overflow-Receiving Watershed Using One-Dimensional Hydrodynamic Model. *International Journal of River Basin Management*, **8**, 79-92. https://doi.org/10.1080/15715121003714886

[16] Parhi, P.K. (2013) HEC-RAS Model for Mannnig's Roughness: A Case Study. *Open Journal of Modern Hydrology*, **3**, 97-101. https://doi.org/10.4236/ojmh.2013.33013

[17] Parhi, P.K., Sankhua, R.N. and Roy, G.P. (2012) Calibration of Channel Roughness for Mahanadi River, (India) Using HEC-RAS Model. *Journal of Water Resource and Protection*, **4**, 847-850. https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.410098

[18] Kasuri, L. (2014) Modelling for Ecosystem Restoration Hydrodynamic Modelling of the Yolo Bypass Using HEC-RAS. Master Thesis, University of California, Davis.

[19] Soualmia, A., Jouini, M., Masbernat, L. and Dartus, D. (2015) An Analytical Model for Water Profile Calculations in Free Surface Flows through Rockfills. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **53**, 209-215. https://doi.org/10.15632/jtam-pl.53.1.209

[20] Kimiaghalam, N., Clark, S.P. and Ahmari, H. (2016) An Experimental Study on the Effects of Physical, Mechanical, and Electrochemical Properties of Natural Cohesive Soils on Critical Shear Stress and Erosion Rate. *International Journal of Sediment Research*, **31**, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.01.001

[21] Hagivar, M.Y., Askar, M.B. and Moalemi, S. (2017) Investigation Flow Depth and Flow Speed Changes in the Karun River. *Open Journal of Marine Science*, **7**, 289-299. https://doi.org/10.4236/ojms.2017.72021

[22] Seng Mah, D.Y., Lai, S.H., Chan, R.A.R.B. and Putuhena, F.J. (2012) Investigative Modelling of the flood Bypass Channel in Kuching, Sarawak, by Assessing Its Impact on the Inundations of Kuching-Batu Kawa-Bau Expressway. *Structure and Infrastructure Engineering*, **8**, 705-714. https://doi.org/10.1080/15732471003770167

[23] Kim, C. and Kang, J. (2013) Case Study: Hydraulic Model Study for Abandoned Channel Restoration. *Engineering*, **5**, 989-996. https://doi.org/10.4236/eng.2013.512120

[24] Campisano, A., Cutore, P. and Modica, C. (2014) Improving the Evaluation of Slit-Check Dam Trapping Efficiency by Using a 1D Unsteady Flow Numerical Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, **140**, 401-424. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000868.

International Journal of Science and Research (IJSR)
ISSN: 2319-7064
www.ijsr.net

Volume 8 Issue 9, September 2019

International Journal of Science and Research (IJSR)
ISSN: 2319-7064
ResearchGate Impact Factor (2018): 0.28 | SJIF (2018): 7.426

Analysis of the Occurrence of Extreme Rainfall and Hydrological Events in the Cavally River watershed (Western Côte d'Ivoire)

BROU Loukou Alexis[1], KOUASSI Kouakou Lazare[2], KOUADIO Zilé Alex[3], Abdoulaye BARRY[4], KONAN Kouakou Séraphin[5], KONAN Koffi Félix[6]

[1, 2, 3, 5, 6]Laboratoire des Sciences et technologies de l'Environnement, Université Jean Lorougnon GUEDE, Daloa

[4]Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire (ISAV) de Faranah, Guinée ; Correspondant: BROU Loukou Alexis

Abstract: ***In Côte d'Ivoire, the lack of knowledge of flows at the outlet of basins and the frequency of floods sometimes lead to poor sizing of hydraulic structures. The Cavally River watershed has suffered in recent years from recurrent flooding phenomena that cause significant damage to the population. The objective of this study is to analyse the occurrence of extreme rainfall and hydrological events that may occur in the Cavally River watershed located in western Côte d'Ivoire. To achieve this objective, daily data from three (03) hydrometric stations located on the Cavally River and three (03) rainfall stations were used. To do this, three (3) statistical methods of frequency analysis (Gumbel, Fréchet and Weibull) were adopted. These analyses show that the statistical law that best fits the series of maximum flows and maximum rains is the Weibull law. Project rains of 2; 5; 10; 10; 20; 50 and 100 years are 91.2; 133; 160; 187; 221; 246 mm respectively. The project flows are 246; 293; 316; 334; 353 and 365 m^3/s respectively for the return periods of 2; 5; 10; 20; 50 and 100 years. These results could guide decision-making on the design of hydraulic structures in the western region of Côte d'Ivoire.***

Keywords: Frequent analysis,hydrological and rainfall extremes, return period, Cavally River

1. Introduction

Rainfall and hydrological extremes (drought and flooding) have become increasingly recurrent and worrying for populations in recent years[1].Therefore, knowledge of these extreme events is essential in the planning and design of important infrastructure, such as reservoirs, dams, diversion channels, bridges, etc. [2], [3]. This knowledge necessarily requires the implementation of statistical models to predict floods and low water levels in a watershed. However, the choice of the ideal law for quantile estimation is the real problem in applied hydrology. The Cavally River watershed has suffered recurrent flooding in recent years, causing major damage to the population. In the face of all these events, the implementation of reliable statistical models is necessary to enable decision-makers to have accurate and up-to-date information in the design of hydraulic structure construction projects. In this perspective, several studies have already been carried out both in the world [4]–[7] and in Côte d'Ivoire through regional statistical models [2], [8]. Unfortunately, these statistical models tend to overestimate or underestimate extreme rainfall and hydrological events, hence the need to use local statistical laws that adjust better by minimizing errors and biases [9], [10]. In the Cavally River watershed, a study on the prediction of flows in response to rainfall has already been carried out [11]. Although for a quantity of rainfall falling on the Cavally catchment area, the flow at the outlet is known, the occurrence of these future rainfall and hydrological events is almost unknown. The objective of this paper is to analyze the occurrence of extreme rains and flows in the Cavally River watershed through local statistical models.

2. Material et Methods

2.1. Presentation of the study area

The Cavally watershed is one of the transboundary basins of West Africa. It is shared between Guinea, Côte d'Ivoire and Liberia. The Cavally River originates in Guinea, north of Mount Nimba, at an altitude of more than 1000 m (Figure 1). It is 700 km long and serves as the border between Liberia and Côte d'Ivoire from its middle course (south of Toulépleu) for about 330 km. The watershed has a total area of 28,800 km^2 at Taté, a hydrometric station located 60 km from the mouth. In Côte d'Ivoire, cavally drains an area of 15,000 km^2[12].

For the purpose of this study, the outlet chosen is the Floleu hydrometric station with an area of 3647 km^2 located downstream of the Ity station in the Zouan-Hounien region (Figure 1).

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

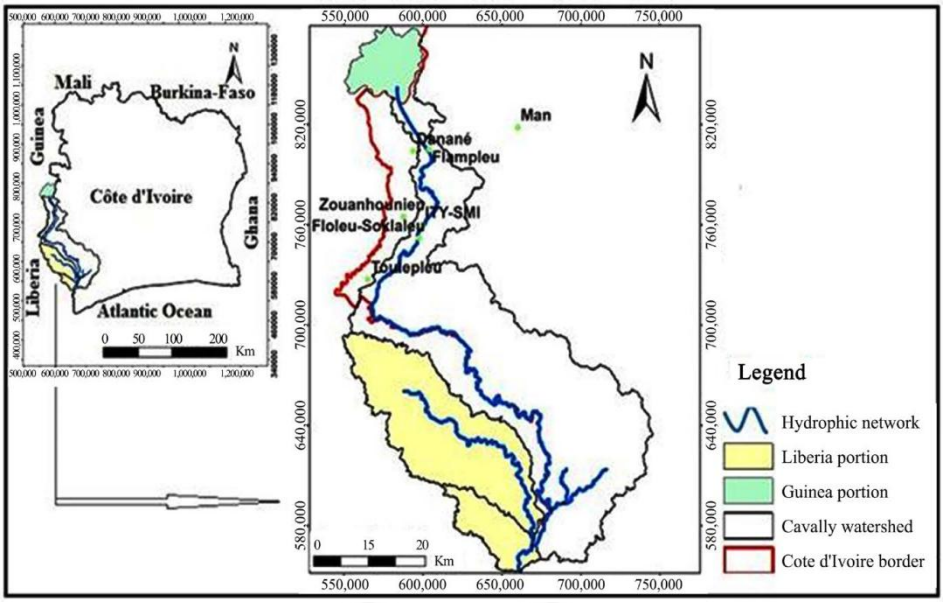


Figure 1: Geographical location of the Cavally River watershed

2.2. Environmentalcontext

The Cavally watershed belongs to two types of climate: the mountain climate in its northern part up to Zouan-Hounien and the equatorial transition climate in its southern part from Toulépleu to the mouth. This northern part of the basin (Figure 2), which is the subject of this study, is a forest area characterized by a mountain climate with two seasons.

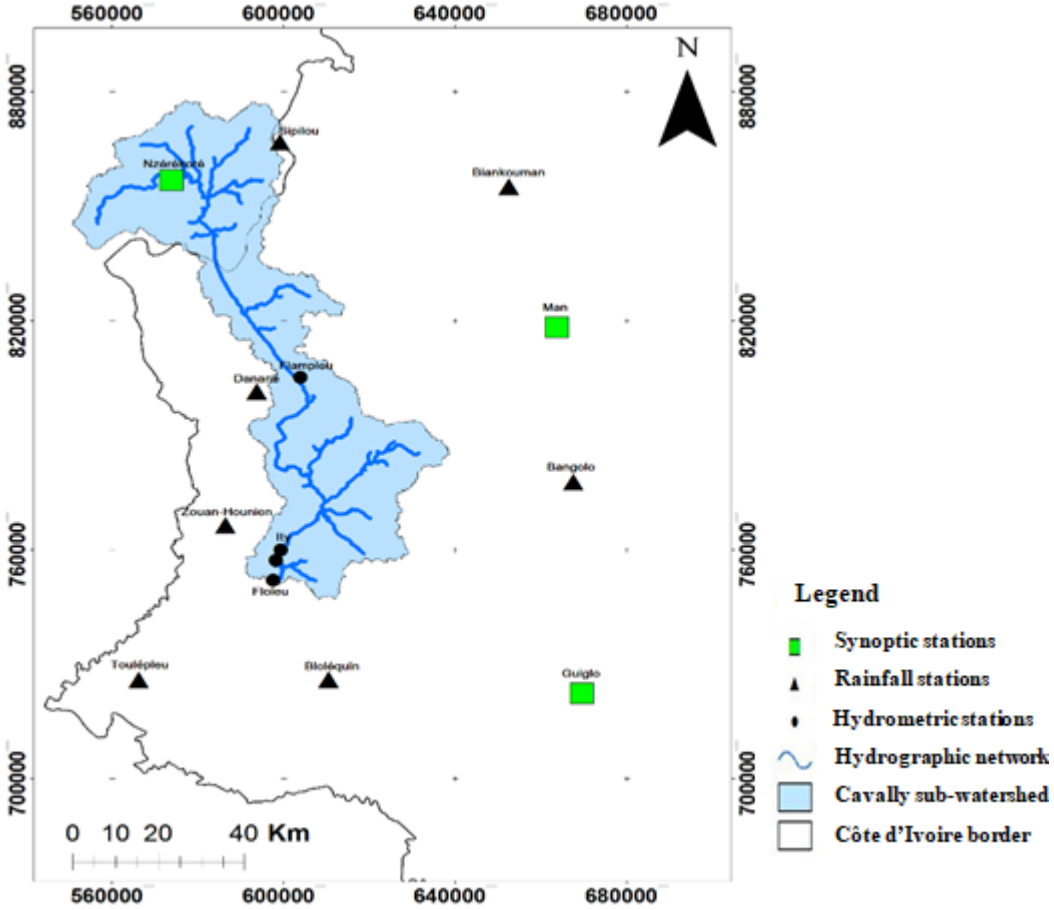


Figure 2: Cavally sub-watershed including hydromeric and rainfall stations

A rainy season from March to October and a dry season from November to February with an average annual rainfall of 1866 mm (1970-2010). The least rainy month is January with an average rainfall below 15 mm. September is the wettest month with an average rainfall of 236 mm. The average annual temperature is 25.6°C (Figure 3). This regime is close to the boundaries between the tropical transition and equatorial transition type [11].

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

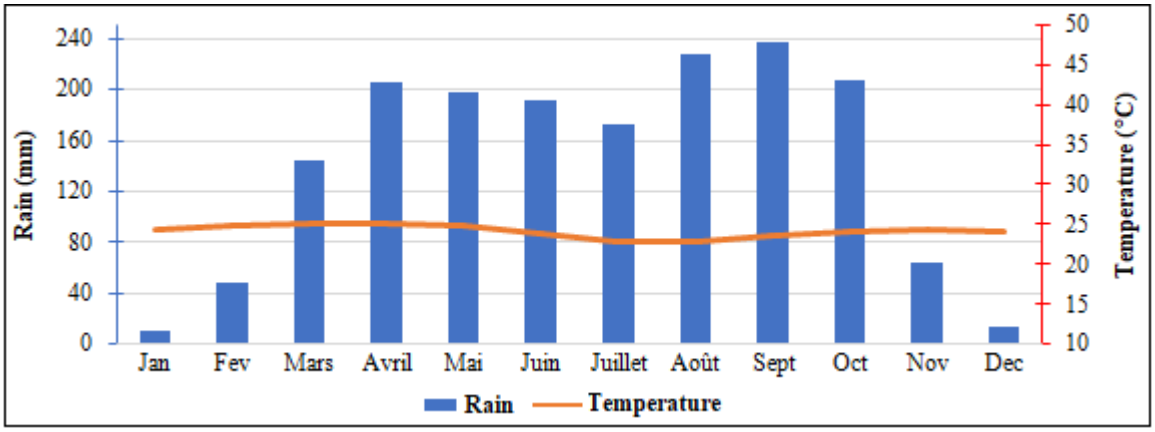


Figure 3 : Umbrothermal diagram of the station of Zouan-Hounien

2.3. Data collection and analysis

The data used are hydrometric and rainfall data at daily time steps. Flow and water level data are from three (3) Flampleu, Ity and Toulepleu hydrometric stations. The rainfall data are those of the Danané and Zouan-Hounien stations. The daily flow data come from the General Directorate of Infrastructure and Human Hydraulics (DGIHH) under the supervision of the Ministry of Economic Infrastructure of the Republic of Côte d'Ivoire. The dailyrainfall data wereacquiredfrom the Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire et Maritime (SODEXAM). The data collection periods are recorded in Table 1.

Table 1: Hydrometric and rainfall stations used according to the data collection period

Stations	Type of stations	Type of data	Collection period
Flampleu	Hydrometrics	Daily flows	1955-2001 (46 years)
Ity			1980-2001 (21 years)
Toulépleu			1970-2004 (34 years)
Zouan-Hounien	Rainfall	Daily rainfall	1970-2018 (48 years)
Danané			1997-2018 (21 years)
Nzerekouré	Synoptic	Monthly rain, temperature and relative humidity	1961-2018 (57 years)

2.4. Methods

2.4.1. Mapping of annualaveragerainfall

The average rainfall distribution was calculated using the isohyet method over the period 1970 to 2010. And the spatialization of this rain was done using the krigging method using Geographic Information System (GIS) tools.

2.4.2. Frequency analysis of rainfall and extreme flows

Frequency analysis is used, in particular to estimate the magnitude of the temporal event XT with which a return period T is associated (quantile of return period T or probability of exceeding (p=1/T)). The XT estimate of the quantile value is obtained by adjusting a probability distribution F (x ;θ) to a sample of n observations x= {x1 ;... ;;xn}, where θ represents the parameter vector associated with the probability distribution F. The main steps of frequency analysis as described by Mélèdje[13]are :

2.4.2.1. Data selection

- Homogeneity (the data come from a homogeneous sample, so there is no significant difference in the average of sub-samples);
- Stationarity (no upward or downward trend in the data trend);
- Independence (no autocorrelation in series).

2.4.2.2. Checkingstationarity

The adjustment of a statistical distribution to the sample requires checking the stationarity of the data chronicle. This adjustment is made on the basis of an ordered sample for which an exceedance probability p or a non-exceedance probability q (q = 1-p) is calculated. Several empirical formulas exist to calculate the probability that ordered rains will not be exceeded. The one used in this study is the Cunnane formula already used by Soro[2]) and Mélèdje[13]:

$$q = \frac{k-q}{n-2q+1} \qquad \textit{Equation 1}$$

Where :
*k*is the rank of observations (ranked from lowest to highest) ;
*n*is the sample size ;
q=0,4(constant of the Cunnane formula).

Using the theoretical model provided by the adjusted statistical law, extrapolation is carried out to obtain the values of the quantiles (value of XT for a return period T). The relationship between the probability of not exceeding and the return period is :

$$T = \frac{1}{1-q} \qquad \textit{Equation 2}$$

2.4.2.3. Choosingstatisticalmodels

The choice of the different statistical models used to adjust the annual maximums (MAXAN) is based on theoretical considerations[9], [14]mentioned bySoro[2]. And the recommendations of previous work on this subject[2], [8], [15].The statistical models used a priori to adjust the variables of extreme daily rainfall are presented in Table 2 below.

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

Table2 : Pre-selected statistical models for adjusting extreme rainfall and daily flows**.**

Sampling mode	Statistical model	Probabilitydensityfunction	Parameters
MAXAN	GEV-EV1 (Gumbel law)	*Equation 1* $f(x)=\frac{1}{\alpha}\exp\left[-\frac{x-u}{\alpha}-\exp\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$	*α, u*
	GEV-EV2 (Fréchetlaw)	*Equation 2* $f(x)=\frac{1}{\alpha}\left(1-\frac{x-u}{\alpha}\right)\exp\left\{-\left[1-k(x-u)/\alpha\right]^{\frac{1}{k}}\right\}$	*α, u, k*
	GEV-EV3 (Weibulllaw)	*Equation 3* $f(x)=\frac{1}{\alpha}\left(1-\frac{x-u}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k}-1}\exp\left\{1\left[1-k(x-u)/\alpha\right]^{\frac{1}{k}}\right\}$	*α, u, k*

2.4.2.4. Criteria for comparingprobabilitylaws

The purpose of these comparison criteria is to determine the statistical law that best adjusts the annual maxima taking into account the number of parameters (principle of parsimony)[2], [16]. For this study, two comparison criteria were used :Akaike information criteria (AIC) and Bayesian Information Criteria (BIC).

2.4.2.4.1. Akaike information criteria (AIC)

Akaike's information criteria[17]is based on a pseudo distance between a true unknown distribution (g), and an arbitrary distribution (f) set by θ. The Akaike Comparison Criterion (AIC) selects the model that achieves the best bias-variance trade-off for the number of N data available. The expression of the AIC criterion is defined as follows[18] :

$$AIC = -2ln(L) + 2k \qquad Equation\ 6$$

With :*L*: the likelihood of the sample; *k*: number of parameters of the statistical law.

2.4.2.4.2. Bayesian Information Criteria (BIC)

The Bayesian Information Criteria[19]The Bayesian Information criterion is placed in a Bayesian context of selection of the statistical model. We are looking here for the statistical model (M_{BIC}) that maximizes the posterior distribution of the models, i.e. the most likely model based on the data. The Bayesian criterion is a minimization of the bias between the fitted model and the unknown true distribution[2].The expression of the Bayesian criterion is as follows[18] :

$$BIC = -2\,ln(L) + 2kln(N) \qquad Equation\ 7$$

With *L* the likelihood of the sample ;*k* the number of parameters and *N* the sample size.

The best statistical model is the one with low AIC and BIC criteria values. [20].

3. Results and Discussion

3.1. Results

3.1.1. Rainfallparametersanalysis

3.1.1.1. Spatial analysis of rainfall in the Cavally River watershed

The spatial and temporalvariability analysis of the annual rainfall indices over the period 1970-2018 made it possible to place the Cavally catchment area in its spatial and temporal context (Figure 4). Rainfall in the north and south of the basin varies between 1611 mm and 1757 mm, while in the central part of the catchment area it varies between 1758 mm and 1970 mm. The results obtained show a heterogeneous distribution of rainfall intensities over the entire basin. It should be noted that the Cavally catchment area has a heterogeneous distribution but excess rainfall because rainfall amounts are above normal, which is about 1600 mm in western Côte d'Ivoire.

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

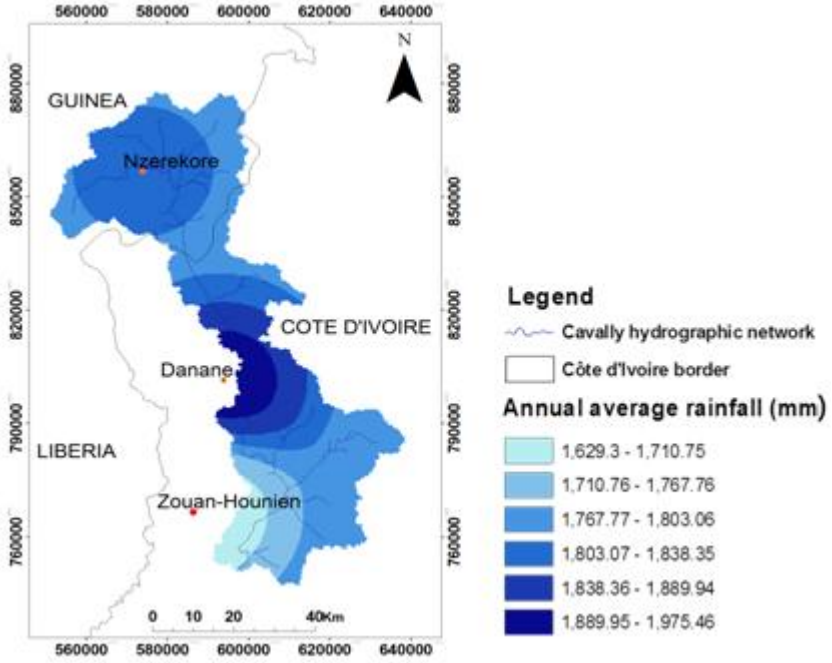


Figure 4 : Variation in the average annual rainfall amounts of the Cavally sub-basin from 1970 to 2018

3.1.1.2. Annualaveragerainfallcharacteristics

Table 3 presents the statistical characteristics of the annual rains at the Zouan-Hounien station. In the study area, annual rainfall varies from 997.8 mm to 1961.7 mm with an interannual average of 1535.9 mm..

Table 3: Annual precipitation characteristics at the Zouan-Hounien station.

Station	Period	Minimum	Average	Maximum	Standard deviation	Coefficient of variation
Zouan-Hounien	1970-2018	997,8	1535,9	1961,7	214,2	0,14

For the chronicle of the data used, it is the 3-parameter Weibull law that fits well with the maximum rainfall modules with low BIC and AIC criteria (Table 4).

Table 4: Statisticallawsapplied.

Statistical Law	Number of parameters	Comparison criteria		Rankings
		BIC	AIC	
Weibull	3	427,69	424,83	1
GEV	3	430,75	426,44	2
Gumbel	2	435,82	432,95	3

Table 5 presents the annual rainfall in dry and wet periods for different return periods.With regard to this table, Weibull's law fits better (Table 4) with the annual rainfall data series for both wet and dry periods. As an illustration, we observe 1970 mm of rain which corresponds to a rainfall of 100 years and 1560 mm corresponding to a rainfall of 2 years under Weibull's law.

Table 5 : Annual rainfall in dry and wet periods for various return periods.

Estimated annual rainfall according to return periods (mm)							
Return periods		100	50	20	10	5	2
Statistical laws	GEV	1970	1940	1880	1810	1730	1550
	Gumbel	2510	2340	2120	1950	1780	1510
	Weibull	1970	1930	1860	1800	1730	1560

3.1.1.3. Estimation of the quantiles of extreme rainfall

The experimental frequencies were determined using Hazen expression after ranking in ascending order (Figure 5). Return period rains of 2 years, 5 years, 10 years, 20 years, 50 years and 100 years were statistically estimated from available rainfall data. An illustration of the results of the graphical comparison criterion (Figure 5D) for the Ity station is presented in the graphs in Figure 5. According to the visual examination by the graphical method, the Weibull law (W2, A) has the advantage of being a simple model for the station of Ity whose annual daily rainfall values are well correlated to this law which shows good behaviour compared to the laws of Gumbel (EV1, B) and Gev (GEV, C) (Figures 5).

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

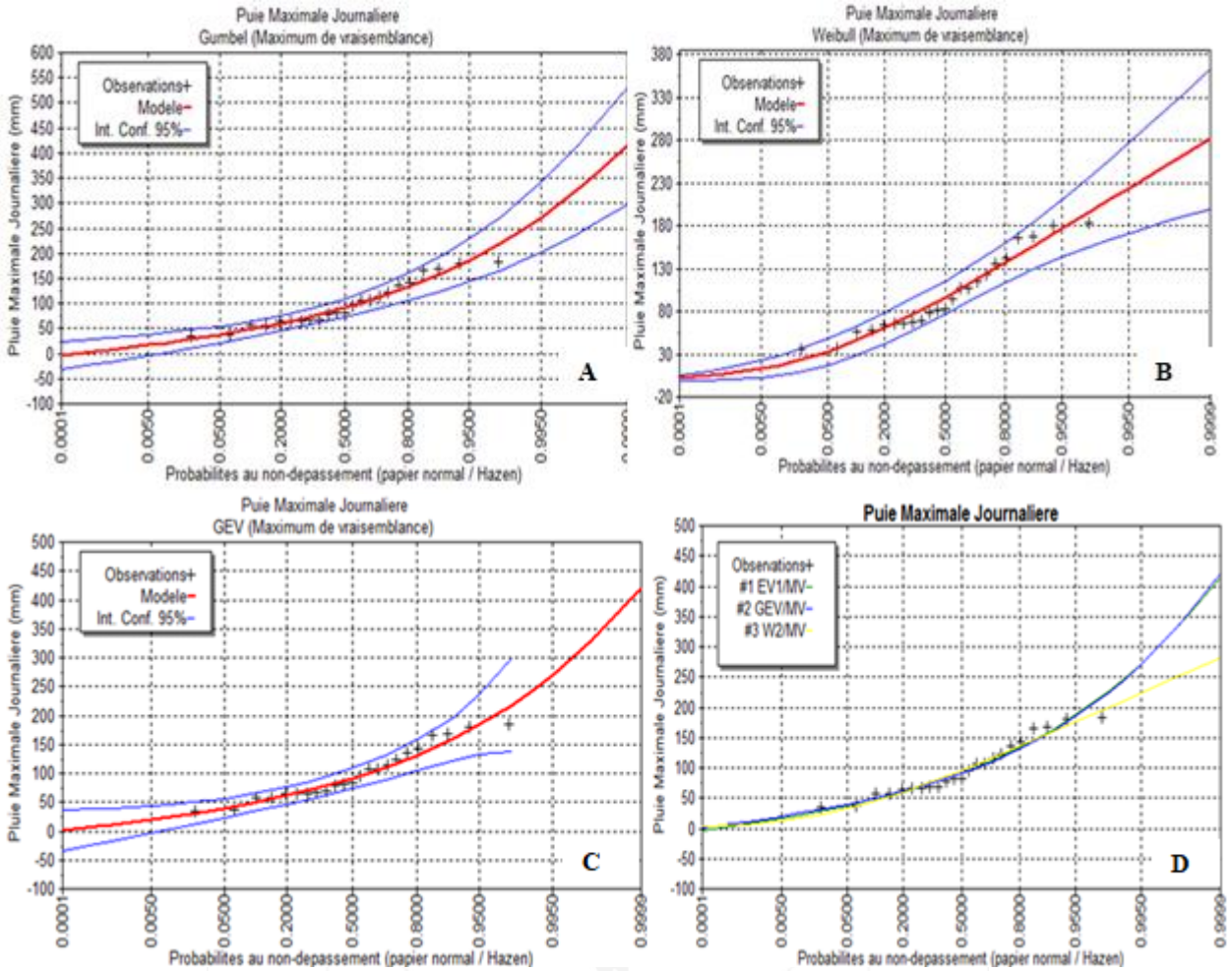


Figure 5: Adjusted Gumbel (A), Weibull (B) and GEV (C) laws and the graphical comparison criterion (D) by the maximum likelihood method to the Zouan-Hounien daily rainfall series

In the study area, daily rains of rare frequencies on an interannual scale were recorded on 12 August 1977 with a rainfall of 184 mm at the Zouan-Hounien station. The values of the return period quantiles of 2, 5, 10, 50 and 100 years were estimated using the maximum likelihood method for the period 1976 to 2000 expressed in mm (Table 6).

Table 6: Maximum daily rainfall (mm) from different return periods.

Rainfall station	Rainfall quantiles (mm)					
	2 years	5 years	10 years	20 years	50 years	100 years
Zouan-Hounien	91.2	133	160	187	221	246

3.1.2. Analysis of the hydrological frequency model

3.1.2.1. Choice of hydrological frequency model

Return period flows of 2 years, 5 years, 10 years, 20 years, 50 years and 100 years were statistically estimated from the available flow data. An illustration of the results of the graphical comparison criterion (Figure 6D) for the Ity station is presented in the graphs in Figure 6. According to the visual examination by the graphical method, the Weibull law (W2, A) has the advantage of being a simple model for the station of Ity whose values of the annual daily flows are well correlated to this law which shows a good behaviour compared to the laws of Gumbel (EV1, B) and Gev (GEV, C) (Figures 6).

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

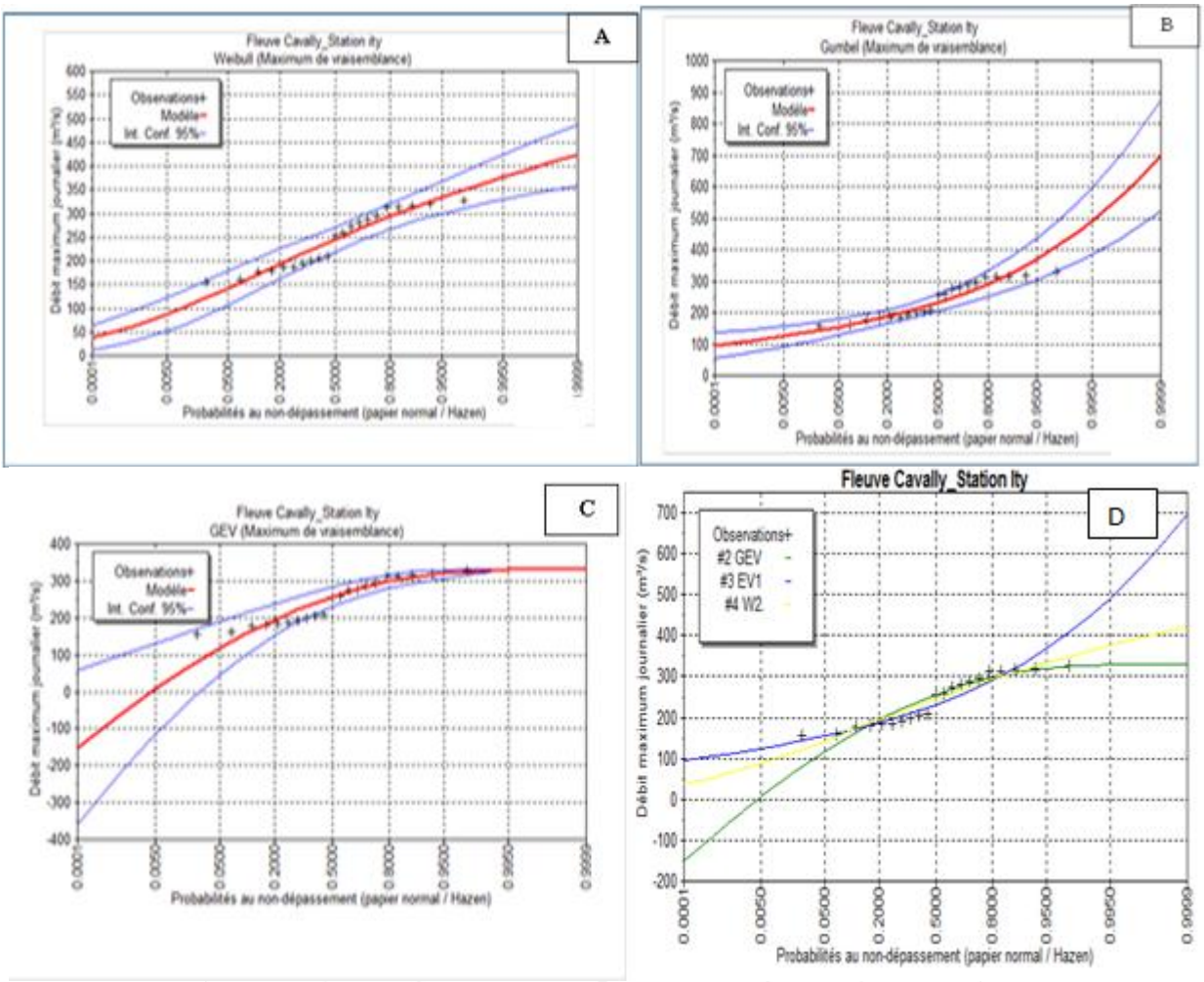


Figure 6 : Weibull's Laws (A), Gumbel's Laws (B) and GEV's Laws (C) adjusted and the graphical comparison criterion (D) by the maximum likelihood method to the annual average flow series of the Ity station

Table 7 presents the ranking of the competing laws. According to the comparison criteria, it is Weibull's law that fits well with the hydrological modules of the Cavally River, then comes Gumbel's law, followed by the GEV law. Hence the choice of Weibull's law for the frequency model of adjustment to the Cavally River modules.

Table 7: Comparison of statistical laws for the adjustment of modules from the Cavally River to the Ity station

Statistical Law	Nomber of parameters	comparison criteria		rankings
		BIC	AIC	
WEIBULL	3	236,145	234,056	1
GUMBEL	2	236,993	234,904	2
GEV	3	237,277	234,143	3

3.1.2.2. Different flood quantiles

Flood quantiles for various return periods are recorded in Table 8. Under Weibull's law, the flood quantiles of 100 and 2-year return periods are 365 and 246 m^3/s respectively. Only the quantiles of the return period of the best laws (retained) are presented.

Table 8: Flood quantiles and return flow periods at Ity station.

Return period (years)	Weibull (m^3/s)
100	365
50	353
20	334
10	316
5	293
2	246

3.1.3. Rain and flows for different return periods

The rain and flood quantiles for each return period are recorded in Table 9. For the purposes of this table, a centennial rainfall of 246 mm corresponds to a centennial flow of 365 m^3/s, for a return period of 2 years, a rainfall of 91.2 mm corresponds to a flood of 246 m^3/s.

Table 9: Rain and flood quantiles corresponding to the different return periods.

Return period (years)	Rain quantiles (mm)	Flood quantiles (m^3/s)
100	246	365
50	221	353
20	187	334
10	160	316
5	133	293
2	91,2	246

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

3.2 Discussion

The analysis of the spatial and temporal variability of the annual rainfall indices over the period 1970-2018 made it possible to increase the spatial and temporal distribution of the annual average rainfall in the Cavally catchment area. Indeed, rainfall in the north and south of the basin varies between 1611 mm and 1757 mm respectively, while in the central part of the catchment area it varies between 1758 mm and 1970 mm. It should be noted that the Cavally catchment area has a heterogeneous distribution but excess rainfall because rainfall amounts are above normal, which is about 1600 mm in western Côte d'Ivoire. This gradual increase is explained by the return to normal, hence the respect of rainfall in western Côte d'Ivoire, with a short dry season and a long rainy season. Moreover, due to its relatively large vegetation among that of Côte d'Ivoire, it contributes favourably to the rainfall balance, because rain and forest are undoubtedly linked since the more it rains, the more dense the natural vegetation is and vice versa. These results are corroborated byKouamé, Kouamé and Sorokoby*et al.* [21]–[23] on environmental changes that have occurred, including rainfall and changes in vegetation cover in recent decades. It is also supported by Kouamé [22]which states that the number of days in the rainy season had decreased throughout the western region of Côte d'Ivoire, but this decrease has so far increased quite sharply, just after the climatic break-up of the 1970s, which had a significant impact on rainfall. According toGoula*et al.*[8], Analysis of the average rainfall values between 1950 and 1998 reveals an inequality in the spatial distribution of rainfall in Côte d'Ivoire. A decrease in annual heights and the number of days of annual rainfall is observed, from the shoreline to the north, along a southwestern/northeastern axis (or gradient). This spatial distribution is explained by the continentalization effect, due to the impoverishment of the air mass carrying precipitation as it moves inland. Linked to the presence of predominant landforms in the west of the country, we note the existence of a second West-East axis of decline. Indeed, at equal latitude, the mountainous regions of the West receive more water levels (in the order of a few hundred millimetres) than those located in the East. This remark is also supported by the work of Boko et al.[24], which states that a decrease amounted to 4.6% in the 1980s.

In terms of frequency analysis, this study showed that Weibull's law fits better with the flood module of the Cavally River. Concerning the chronicle of rainfall data, the statistical analysis showed that the probability distribution of maximum daily annual rainfall follows Weibull's law with three (3) parameters.

These results are in line with those ofSoro[2], on the statistical modelling of extreme rainfall in Côte d'Ivoire showing that Weibull's law fits well with the rainfall data series in western Côte d'Ivoire. Therefore, for the chronicle of the data used, Weibull's law. However, the work of several authors recommends the use or combination of several parametric tests [4], [25]–[27] . However, the consistency and quality of the time series of rainfall and hydrological data could influence the results of frequency analysis through the choice of the statistical adjustment law. Indeed, several authors suggest that for a good frequency analysis, the chronicle of rainfall and hydrological data should be at least greater than 30 years [3], [10], [28].

An exceptional rainfall of 184 mm height corresponding almost to a 20-year rainfall quantile (187 mm) occurred on August 12, 1977.

4. Conclusion

The objective of this study is to analyze the occurrence of future extreme rainfall and hydrological events in the Cavally River watershed through local statistical models. This study also highlighted the statistical law that best fits the rainfall and hydrological modules of the Cavally River watershed. This is Weibull's law with three (3) parameters. It should also be recalled that the average interannual rainfall in the catchment area is 1535.9 ± 214.2 mm. Exceptional rainfall survived on August 12, 1977 with a height of 184 mm that could be qualified as a rainfall return period of 20 years since this rainfall quantile (20 years) is 187 mm. This study could serve as a basis for the design of hydraulic structures in the western region of Côte d'Ivoire.

References

[1] I. M. Bahari, I. Bouzou Moussa, and O. Faran Maiga, ‘Évolution des caractéristiques pluviométriques et recrudescence des inondations dans les localités riveraines du fleuve Niger’, *VertigO - la revue électronique en sciences de l’environnement*, May 2018.
[2] G. E. Soro, ‘Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d’Ivoire’, Thèse de doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d’Ivoire, 2011.
[3] G. Ragulina and T. Reitan, ‘Generalized extreme value shape parameter and its nature for extreme precipitation using long time series and the Bayesian approach’, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 62, no. 6, pp. 863–879, Apr. 2017.
[4] T. A. Buishand, ‘Extreme rainfall estimation by combining data from several sites’, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 36, no. 4, pp. 345–365, Aug. 1991.
[5] P. Calow and G. E. Petts, Eds., *The Rivers handbook: hydrological and ecological principles: in two volumes*. Oxford ; Boston: Blackwell Scientific Publications, 1992.
[6] K. Beven, J. Bathurst, E. O’connell, I. Littlewood, J. Blackie, and M. Robinson, ‘Hydrological Modelling’, *Progress in Modern Hydrology: Past, Present and Future*, Aug. 2015.
[7] J. O. Knighton and M. T. Walter, ‘Critical rainfall statistics for predicting watershed flood responses: rethinking the design storm concept’, *Hydrological Processes*, vol. 30, no. 21, pp. 3788–3803, Apr. 2016.
[8] B. T. A. Goula, B. Konan, Y. T. Brou, I. Savané, V. Fadika, and B. Srohourou, ‘Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale: cas de la Côte d’Ivoire par comparaison des lois Lognormale et de Gumbel’, *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 52, no. 2, pp. 49–67, 2007.
[9] D. Koutsoyiannis, ‘Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation /

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

Statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: I. Recherche théorique', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 49, no. 4, p. null-590, Aug. 2004.

[10] S. Kusangaya, M. L. Warburton Toucher, and E. A. van Garderen, 'Evaluation of uncertainty in capturing the spatial variability and magnitudes of extreme hydrological events for the uMngeni catchment, South Africa', *Journal of Hydrology*, vol. 557, pp. 931–946, Feb. 2018.

[11] A. L. Brou, K. L. Kouassi, K. S. Konan, Z. A. Kouadio, K. K. Konan, and K. Bamory, 'Rain-Flow Modeling Using a Multi-Layer Artificial Neural Network on the Watershed of the Cavally River (Côte d'Ivoire)', *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 09, no. 12, p. 1403, Nov. 2017.

[12] J. Tricart *et al.*, 'Une monographie physique de la Côte-d'Ivoire', in *Annales de Géographie*, 1973, vol. 82, pp. 369–372.

[13] N. H. Mélèdje, 'Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux de sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé1', Doctorat unique, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2016.

[14] S. El Adlouni, B. Bobée, and T. B. M. J. Ouarda, 'On the tails of extreme event distributions in hydrology', *Journal of hydrology*, 2008.

[15] A. Muller, 'Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France.', Thèse de doctorat ès Science, Université de Montpellier II, France, 2006.

[16] M. M. Y. Lemay, 'Sur le principe de parcimonie dans l'ajustement des modèles ARMA', *Statistique et analyse des données*, vol. 14, no. 2, p. P. 81-95, 1989.

[17] H. Akaike, 'A new look at the statistical model identification', *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 19, no. 6, pp. 716–723, Dec. 1974.

[18] E. Lebarbier and T. Mary-Huard, 'Le critère BIC : fondements théoriques et interprétation', INRIA, Research Report RR-5315, 2004.

[19] G. Schwarz, 'Estimating the Dimension of a Model', *The Annals of Statistics*, vol. 6, no. 2, pp. 461–464, 1978.

[20] H. Khaled and R. A. Ramachandro., 'Flood Frequency Analysis', *CRC Press*, 2001. [Online]. Available: https://www.crcpress.com/Flood-Frequency-Analysis/Hamed-Rao/p/book/9780849300837. [Accessed: 20-Sep-2018].

[21] K. F. Kouamé, 'Hydrogéologie des régions de montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire)', Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 1999.

[22] K. F. Kouamé, 'Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL', Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2011.

[23] V. M. Sorokoby, M. B. Saley, K. F. Kouamé, E. M. V. Djagoua, K. Affian, and J. Biemi, 'Variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques et son incidence sur le tarissement dans les bassins versant de Bô et Débo (département de Soubré au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)', *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 2, no. 3, pp. 287–299, 2013.

[24] K. A. N. N. Boko, G. Cissé, B. Koné, and D. Séri, 'Variabilité climatique et changements dans l'environnement à Korhogo en Côte D'ivoire : Mythes ou réalité ?', *European Scientific Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 158–170, 2016.

[25] N. P. Fawthrop, 'Modelling Hydrological Processes for River Management', in *The Rivers Handbook*, P. Calow and G. E. Petts, Eds. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 1994, pp. 187–212.

[26] K. S. Gbafa, S. Tiem, and K. Kokou, 'Intensity - duration - frequency curves and hydrological response of retention ponds in the city of Lome (Togo, West Africa)', *Research Journal of Engineering Sciences*, vol. 6, no. 11, pp. 7–19, 2017.

[27] L. A. N'Cho, A. Alla Della, and A. L. Brou, 'Frequency Analysis of the Bia River for preventive management of floods down the Ayame 1 Dam', *Baluki*, vol. II, no. 4, pp. 1–16, 2018.

[28] T. R. Marthews, E. M. Blyth, A. Martínez-de la Torre, and T. I. E. Veldkamp, 'A global scale evaluation of extreme events in the earth to observe project', *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, pp. 1–23, Jan. 2019.

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

Open Access Library Journal
2019, Volume 6, e5629
ISSN Online: 2333-9721
ISSN Print: 2333-9705

Hydro-Climatic Variability and Human Activities Impact on the Morphology of the Cavally River Bed, Western Côte d'Ivoire

Brou Loukou Alexis[1*], Kouassi Kouakou Lazare[1], Yao Affoué Berthe[1], Kouadio Zilé Alex[1], Konan Kouakou Séraphin[1], Konan Koffi Félix[1], Kamagate Bamory[2], Koné Diakaria[3]

[1]Department of Geology, Laboratory of Sciences and Technology of Environment, University Jean Lorougnon GUEDE, Daloa, Daloa, Côte d'Ivoire
[2]Université Nangui-Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire
[3]Office National de l'Eau Potable (ONEP), Direction des Ressources en Eau, Abidjan, Côte d'Ivoire
Email: *brou.alexis@ujlg.edu.ci

How to cite this paper: Alexis, B.L., Lazare, K.K., Berthe, Y.A., Alex, K.Z., Séraphin, K.K., Félix, K.K., Bamory, K. and Diakaria, K. (2019) Hydro-Climatic Variability and Human Activities Impact on the Morphology of the Cavally River Bed, Western Côte d'Ivoire. *Open Access Library Journal*, **6**: e5629.
https://doi.org/10.4236/oalib.1105629

Received: July 23, 2019
Accepted: September 21, 2019
Published: September 24, 2019

Copyright © 2019 by author(s) and Open Access Library Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

Abstract

The Cavally watershed is covered by a large forest area, where for decades there has been intense agricultural and mining activity (modern and traditional). Anthropogenic pressures and hydro climatic variability can significantly alter the hydrological response of the Cavally River watershed. The objective of this study is to assess the impact of hydro climatic variability and land-use dynamics on the availability of water resources in the Cavally River basin. To achieve this objective, two methodological approaches were used, a first approach was used to calculate the rainfall and hydrometric indices to determine the different hydro-climatic trends of the watershed. The second approach consists in analyzing the inter-annual morphological evolution of the bed of the Cavally River by using Landsat images from 1986s, 2011s and 2018s. The results of this study show that several successive years of drought were observed in the Cavally Basin from 1970 to 1980. Analysis of hydro-climatic trends showed that rainfall has declined, and the land use map analysis showed that the vegetation cover has been significantly degraded (Four common land use classes were finally mapped. They are represented by dense vegetation with 13.11%; degraded vegetation and crops with 72.04%; water with 4.73%; built areas and bare soils with 10.12%). About the evolution of the Cavally River bed, illegal gold miners could be the cause of the increase in the surface area of the water body located between the SMI and the Floleu village (Section 3 where the morphology of the Cavally River bed has increased considerably by 13.70% between 1986 and 2011 and by 55.93% between 2011 and 2018). Indeed, this area is frequented daily by gold miners who carry out their activities both in the minor bed and on the banks of the river.

Subject Areas

Hydrology

Keywords

Land Cover, Hydro Climatic Variability, Human Activities, Cavally River, Côte d'Ivoire

1. Introduction

Water environment deterioration is a prominent issue in river basin management throughout the world, which has become a serious threat to water security [1]. Surface water was gradually polluted due to natural and anthropogenic activities [2], such as water-rock interactions [3], industrial and municipal waste water emissions [4], nutrient losses [5], excessive dam and sluice constructions [6]. Water resources are sensitive to climate change and variability [7]. In recent years, the question of hydro-climatic variability is a challenge for the world and for African Countries in particular. It is explained by factors inherent to the climate system and the climatic variability greatly affects water resources with consequences on various sectors of activity [8]. Also, the hydrological cycle and water systems are extensively influenced by climate variability and human activities [9] [10] [11] [12]. Also, changing weather patterns will have complex and nonlinear impacts on many human and environmental systems, including on processes governing the mobilization and transport of sediment within watersheds [13]. Changing climate is an additional stressor that can enhance the effects of these anthropogenic influences [14]. For example, higher temperatures lead to increased evapotranspiration and thus, if not counterbalanced by increased precipitation, to declining streamflow [15] [16]. The Cavally watershed is covered by a large forest area, where for decades there has been intense agricultural and mining activity (modern and traditional). As mining activity is a source of considerable environmental and health impacts and issues, which vary according to the ecological context, extraction methods and type of ore, codes are very important to regulate this sector [17]. Despite the measures taken by the State, this sector is facing several difficulties, particularly those related to gold panning. The illegally artisanal gold mining activity is a very lucrative activity in which many actors, operating at various levels and with specific roles, find their financial benefit [18]. The other causes of the development of clandestine gold mining are the under-selling of traditional agricultural products (cocoa and coffee) and the ignorance of the negative medium and long-term impacts of gold panning on the biophysical and human environment by most of the actors involved in the sector. The latter aspect is observed in Zouan-Hounien, in the west of Côte d'Ivoire where the bed of the Cavally River stream is the place where this activity is developed. Gold panning is not in itself a bad activity, but the tech-

nologies used, the technologies used are not adapted and the tools are rudimentary ("hunter-gatherer" approach). This new way of practicing gold panning raises questions about the impacts of this activity on certain characteristics of the watercourse (velocities, flow, etc.). The objective of this study is to assess the impact of hydro climatic variability and land-use dynamics on the availability of water resources in the Cavally River basin.

2. Material and Methods

2.1. Study Area

The Cavally River is a lower cross border watershed between Guinea, Ivory Coast and Liberia. Located in the west of Ivory Coast, the Cavally River begins in Guinea, in the North of Mount Nimba with more than 1000 meters as approximate altitude (Figure 1). 700 km long, its riverbed constitutes the border between Liberia and Ivory Coast from its middle way (at the South of Toulépleu) on about 330 km. The lower watershed covers a complete area of 28,800 Sq. Km at Tate hydrometric station located at 60 km from the mouth. Côte d'Ivoire doesn't possess but about 15,000 Sq. km of watershed [19]. In the framework of this study, the chosen outlet is the hydrometric station of Floleu located at downstream of the Ity station in the Zouan-Hounien region. The low watershed has got an area of 3647.53 Sq. km (Figure 1). The region of Zouan-Hounien is in the mountain region of Côte d'Ivoire; its relief is hilly. Zouan-Hounien is in the forest area and its climate is the mountain climate with two seasons: one rainy season from May to October and one dry season from November to March. The annual average temperature is 25.6˚C. The annual average precipitation is 186 mm. The driest month is January with a precipitation of 15 mm. The most important precipitations are recorded in September and they are 357 mm in average.

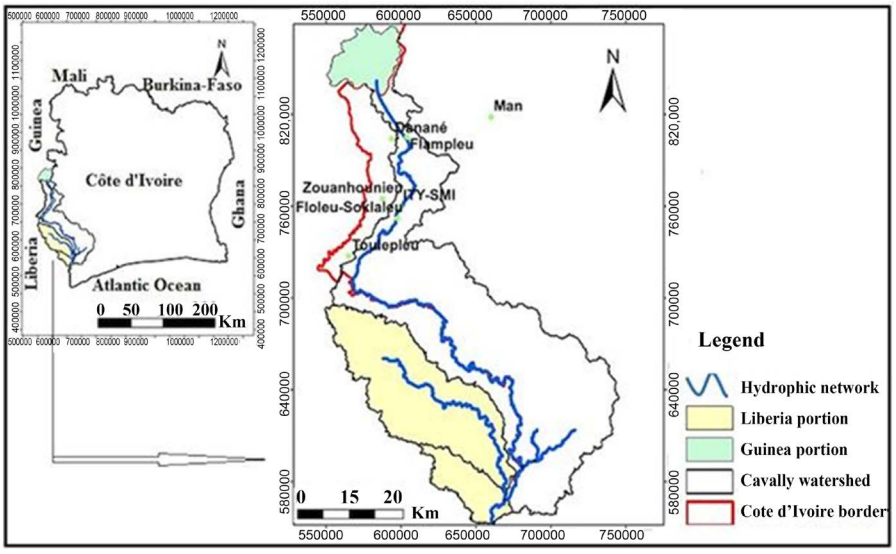


Figure 1. Study area of sub-watershed of Cavally River.

2.2. Data Collection and Analysis

The methodological approach used is based on annual rainfall data. The rainfall data used are those of Danané, Toulepleu and Zouan-Hounien meteorological stations and three (3) hydrometric stations (Flampleu (Danané), Ity (Zouan-Hounien) and Toulepleu). They cover the period 1970-2010. To carry out this study, two methods were used: a first approach was used to calculate the rainfall and hydrometric index to determine the different hydro-climatic trends of the watershed. The study of hydro-climatic variability was carried out by analysing data collected at the stations. Based on the rainfall variability, periods of rainfall deficit over time and space have been identified. The second approach consists in analyzing the inter-annual morphological evolution of the bed of the Cavally River.

2.3. Index Precipitation Methods

The evolution of precipitation and runoff was carried out by the method of calculating the NICHOLSON rainfall index (Equation (1)) and the low-pass filter method of "HANNING of order 2" (Equation (2)) where they expressed by the following equations.

$$I = \frac{x_i - \overline{x}}{\sigma} \tag{1}$$

with I: rainfall or hydrological index, x_i: annual module of the variable recorded during year I, $\overline{x}$: interannual mean of the variable over the period of study, σ : standard deviation of the hydro-climatic series over the period of study. For HANNING'S Low Pass filter method, the first step is to filter the data to eliminate seasonal variation. This filter is made using the recommended equations. According to this method, each term in the series is calculated as follows:

$$X(t) = 0.06x_{(t-2)} + 0.25x_{(t-1)} + 0.38x_{(t)} + 0.25x_{(t+1)} + 0.06x_{(t+2)} \tag{2}$$

$X(t)$: $X(t)$ is the weighted rainfall total of the term t; $X_{(t-2)}$ and $X_{(t-1)}$: total observed flows of two terms immediately preceding the term t. $X_{(t+2)}$ and $X_{(t+1)}$: observed rainfall totals of two terms immediately following the term t. The first two $[X_{(1)}, X_{(2)}]$ and the last two $[X_{(n-1)}, X_{(n)}]$ terms of the series are calculated using the following expressions (being the size of the series):

$$X_1 = 0.54x_1 + 0.46x_2 \tag{3}$$

$$X_2 = 0.25x_1 + 0.5x_2 + 0.25x_3 \tag{4}$$

$$X_{n-1} = 0.25x_{(n-2)} + 0.5x_{(n-1)} + 0.25x_n \tag{5}$$

$$X_n = 0.54x_n + 0.46x_{(n-1)} \tag{6}$$

To better visualize periods of a deficit and excess flow, moving averages are centered and reduced by the following formula:

$$Y_t' = (x_t - m)/\sigma \tag{7}$$

where: m is the average of the series of weighted averages and σ is the stan-

dard deviation of the series of weighted moving averages.

2.4. Decadal Variability of Rainfall over the Basin

The annual average rainfall distribution was calculated by the isohyet method over the period 1970 to 2010.

Rainfall data from stations in the basin and surrounding areas made it possible to trace the isohyets of the 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 and 2001-2010 decades. They are prepared with the maximum likelihood that considers the region, the hydrographic network and the quality of the measurements.

2.5. Morphological Evolution of the Cavally River Bed

The satellite images are made up of three scenes from the Landsat sensor (Land Satellite) from the website http://earthexplorer.usgs.gov. The scenes use the visible (B, R, V) and near infrared bands were taken on January 07, 1986, January 12, 2011 and January 22, 2018 respectively. This month's choice (January) allows the river environment to the same season and to minimize the risk of over-or underestimating the contours of the reservoir. Indeed, the surface area of a water body may also be underestimated by the presence of aquatic vegetation or overestimated by the presence of wet soils surrounding the water bodies during the recession period [20]. In addition, Landsat 4.5 and 8 satellites provide images that include near-infrared spectral bands. This is very important because water surfaces absorb all this type of radiation [20]. The image processing consisted in making the coloured composition of the different images, vectorizing the contours of the plan each year and validating the vectorizations. About the colour composition, the bands used are respectively bands 4; 5 and 6, for the 2018 and 3 satellite images; 4 and 5 for the 2011 and 1986 images. These bands were used for the red, green and blue channels respectively. This classification brings out the different entities of the image as well as possible. The outline of the watercourse was delimited by digitalization (vectorization) using a GIS tool. The digitalization consisted, from each image used, in reviewing the outlines of the watercourse. A validation of the vectorization layers is required after the realization of these layers. Thus, the 2011 and 2018 contour vectorizations were respectively checked with the ortho image of 03/12/2012 and the Google earth image of 19/01/2018. To do this, segments parallel to the horizontal (transverse) were drawn and measured at precise and easily identifiable locations on the map, including areas of curvature. Cross-sectional segments prevent errors related to the length of the segments that could be caused by the existence of different measuring angles. The plots were validated if and only if the difference between the lengths of the segments measured on the reference images and the vectorized layers is less than 5%. Otherwise the vectorizations are taken over and the segments are recalculated. After the map was validated, sections were defined to evaluate the area most affected by the gold panning phenomenon. A total of five sections were defined on the stream; one upstream section of the study area,

three sections in the study area and one downstream section of the study area. The area of each section of the stream for the three years (1986, 2011 and 2018) was determined using the GIS tool. Indeed, the calculation of surfaces is a statistical method for estimating the level of evolution of the river bed [20].

$$I(\%) = \frac{S_f - S_i}{S_i} \times 100 \quad (8)$$

where, I is increase area (%), S_f et S_i (Sq Km) are the surfaces calculated for the final and initial years considered.

Figure 2 shows a summary diagram of all the activities carried out to achieve the interannual morphological evolution of the Cavally river.

3. Results and Discussion

3.1. Distribution of Annual Rainfall from the Cavally Watershed

Figure 3 shows the distribution of annual rainfall from the Cavally Basin. The average annual rainfall from the Cavally Basin is 1804.29 ± 47.63 mm.

3.2. Decadal Variability of Rainfall of the Cavally Watershed

The study of decadal rainfall variability from the isohyets of the 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 and 2001-2010 decades shows a general increase in rainfall for the 11 rainfall stations (Figure 4).

The decade 1971-1980 was made by the presence of isohyets characteristic of rainfall amounts between 1500 mm and 1850 mm. The rainfall stations of Toulepleu, Guiglo and Bangolo are the only ones with the lowest rainfall (1500 mm);

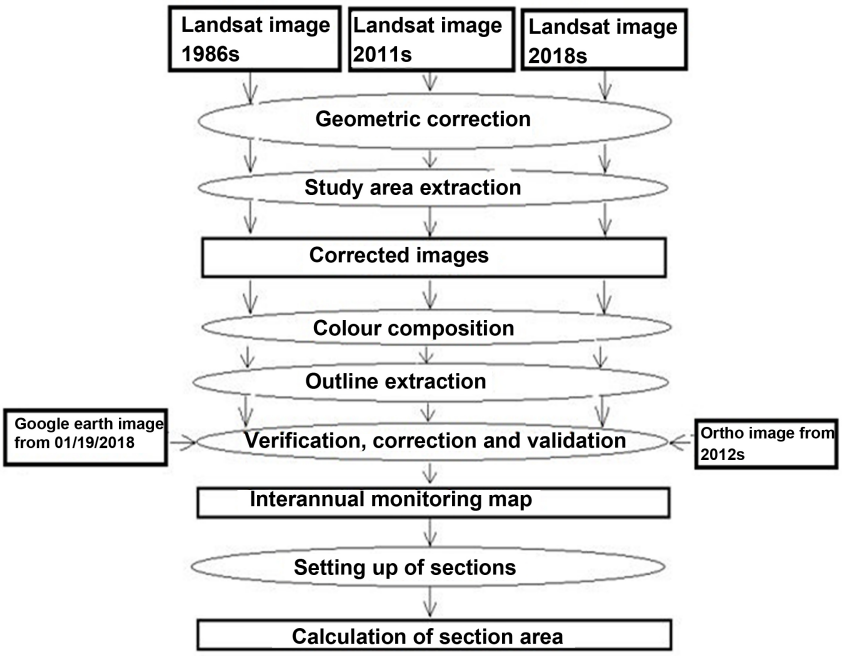


Figure 2. Conceptual diagram of the implementation of the inter-annual evolution of the bed of the Cavally River watercourse.

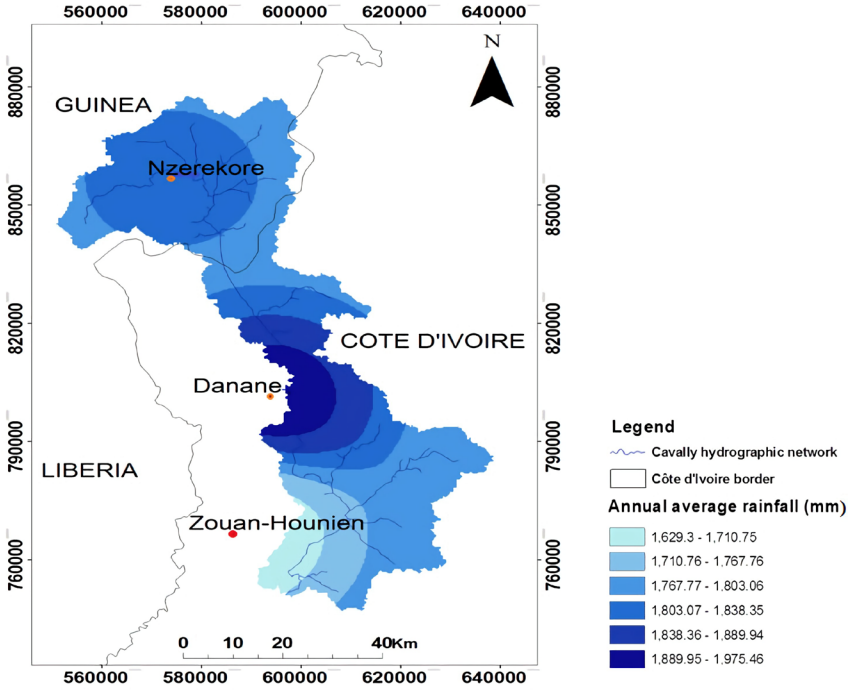


Figure 3. Annual average rainfall of Cavally sub watershed (1970-2010).

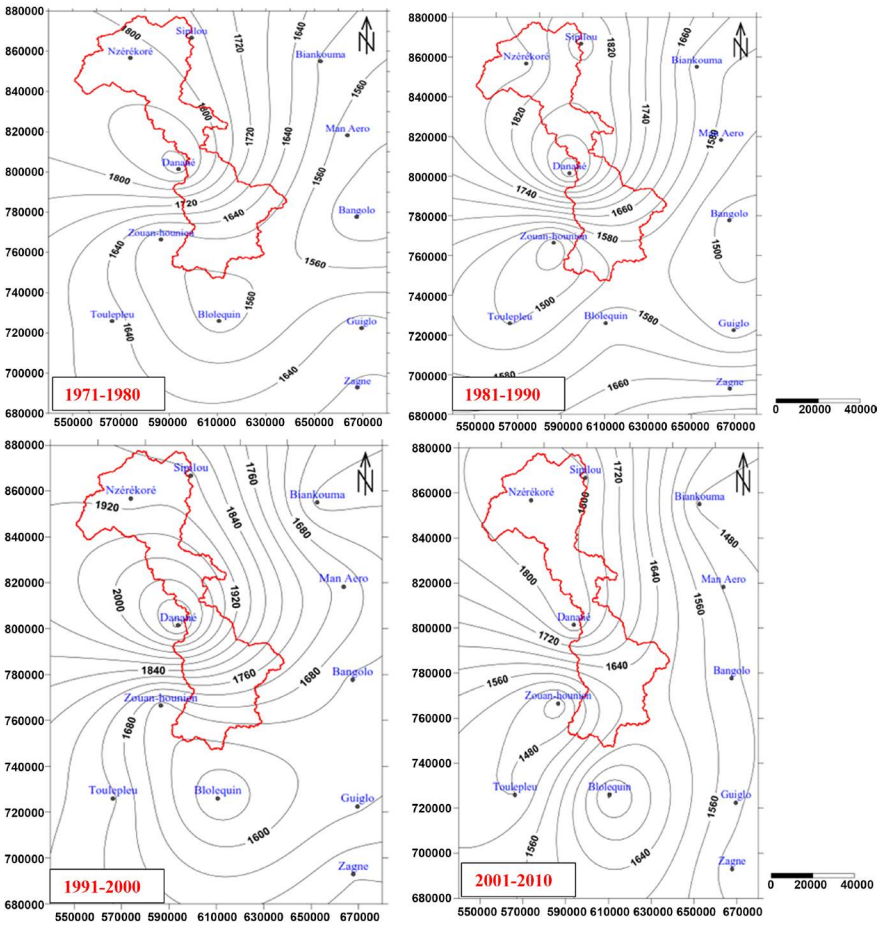


Figure 4. Maps of the decade isohyets 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 and 2001-2010.

the other stations receive rainfall amounts between 1600 and 1850 mm. The decade 1981-1990 saw an increase in rainfall with the appearance of isohyets 1700 mm, 1850 mm and 1900 mm. The decade 1991-2000 also saw an increase in rainfall with the appearance of isohyets 1950 mm and 2000 mm in the Danané and Taï areas. The decade 2001-2010 also recorded an increase in rainfall similar to the decade 1991-2000 with the appearance of the 1950 mm and 2000 mm isohyets.

This could be explained by the return to normal rainfall in western Côte d'Ivoire, following the major rainfall breaks observed in West Africa from the 1960s and 1970s.

3.3. Index Precipitation

The evolution of Nicholson indices associated with seasonal elimination by HANNING filter shows that inter-annual variations in rainfall at the Nzerekore, Danané, Zouan-Hounien and Toulepleu stations are characterized alternating wet, normal years and dry season.

The analysis of the Nicholson indices and the 2nd order HANNING filter makes it possible to distinguish 3 climatic trends at the Toulepleu station: from 1971 to 1980 for wet period, 1981 to 1992 dry season and 1993 to 1994 to 1998 wet season. 3 periods for wet season and 4dry periods at Danané station. 3 periods for wet season and 4dry periods at Zouan-Hounien station. Trends at the Nzerekore station vary rapidly from one period to another (Figure 5).

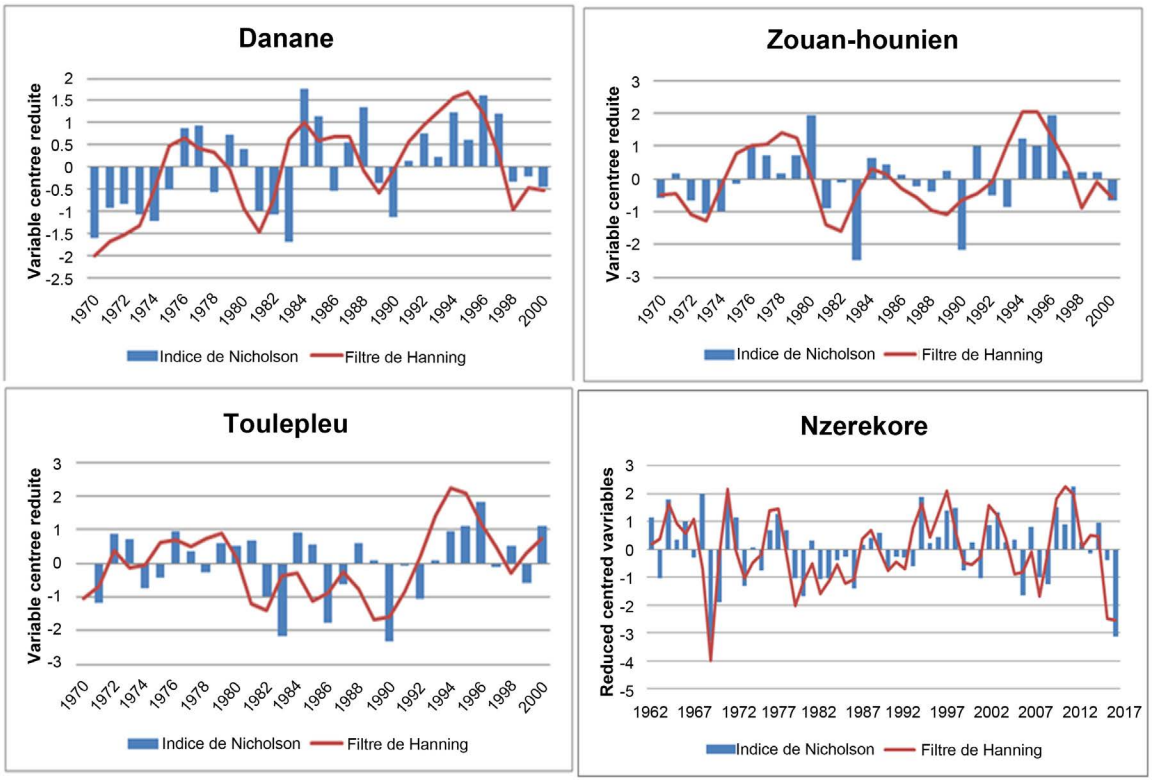


Figure 5. Annual rainfall for four stations from Cavally watershed.

3.4. Inter-Annual Variation in Flows of the Cavally River

Flampleu station was chosen to monitor the hydrological variability of the Cavally watershed for the length of its series. The evolution of the reduced centred indices and Hanning filtering makes it possible to distinguish the periods of fluctuations from the following annual flow modules (Figure 6):

- a deficit period from 1974 to 1991, marked by a sharp drop in flows indicating a dry period;
- a surplus period from 1992 to 1999, corresponding to a wet period marked by abundant flows;
- a deficit period from 2001 to 2011, indicating a dry period with a considerable decrease in flows;
- a surplus period from 2012 to 2015, announcing a return of humidity at the end of the observation period.

3.5. Morphology of the Cavally River Bed

3.5.1. Land Use Map of the Study Area

Four (4) common land use classes were finally mapped (Figure 7). They are represented by dense vegetation with 13.11%; degraded vegetation and crops with 72.04%; water with 4.73%; built areas and bare soils with 10.12%. Discrimination between the different thematic classes is statistically significant with overall statistical accuracy ranging from 80.5% to 82.2%.

3.5.2. Dynamic Evolution of the Cavally River Bed

Figure 8 shows the deformations of the streambed in this area on these three dates. The bed of the Cavally River stream in the Zouan-Hounien area underwent a change from 1986 to 2018. The contours of the Cavally River from 1986 (yellow) and 2011 (red) are very similar. Some deviations from these contours are observed in some areas of the watercourse. However, the contours of the 2018 watercourse (blue) show remarkable deformations.

Figure 9 shows the illegal gold miners operating and degradation of the bank of the Cavally River dues to this activity.

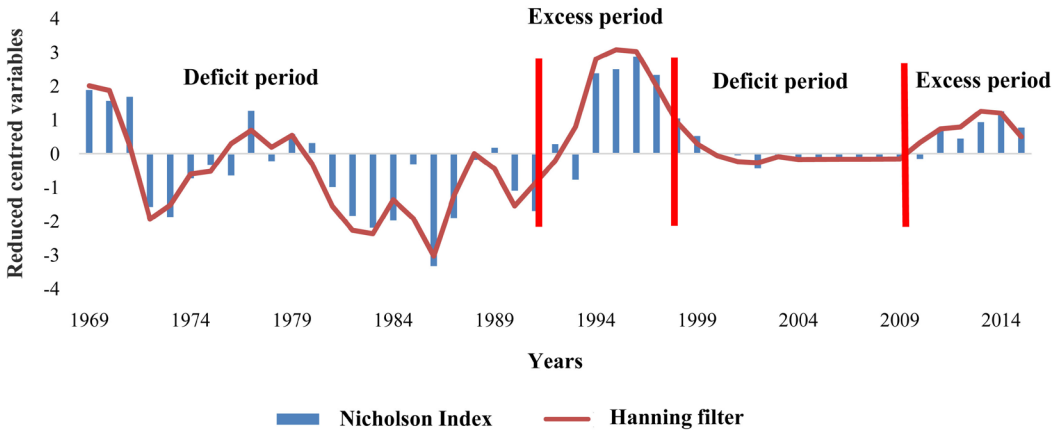


Figure 6. Variation of annual modules of the Cavally River flows to Flampleu Station (1969-2015).

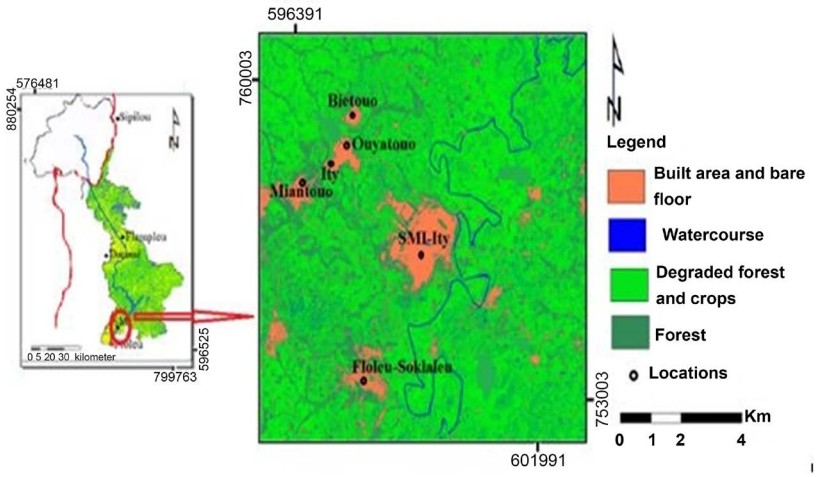


Figure 7. Land use map of the study area.

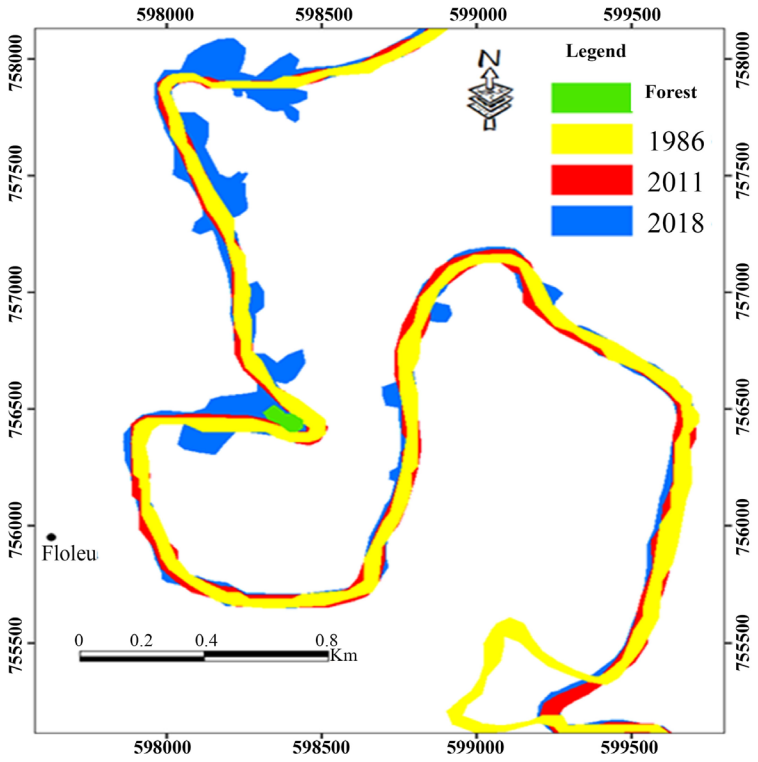


Figure 8. Inter-annual monitoring map of the Cavally River streambed from 1986, 2011 and 2018 in Section 3.

3.5.3. Evolution of the River Bed

The areas of the sections of the stream increased from 1986 to 2018. From 1986 to 2011, the surfaces of the sections increased from 3.33% to 18.18%. Sections 2 and 3 have a surface change of more than 10%, which are 18.18% and 17.65% respectively. Between 2011 and 2018, the increase in section surfaces ranged from 19.35% to 55.00%. The rates of increase in Sections 1 and 5, which are 17.65% and 12.50% respectively, are the lowest, while the rate in Section 3 (55.00%) is the highest (Table 1).

Figure 9. Degradation of the banks of the Cavally River due to illegal gold panning activities.

Table 1. Summary table of section surfaces.

		Area (Sq Km)			Increase area (%)	
		1986	2011	2018	1986-2011	2011-2018
Upstream	Section 1	0.30	0.31	0.37	3.33	19.35
	Section 2	0.11	0.13	0.16	18.18	23.08
Study area	Section 3	0.17	0.20	0.31	17.65	55.00
	Section 4	0.39	0.41	0.51	5.13	24.39
Downstream	Section 5	0.30	0.32	0.36	6.67	12.50

The dynamics of the Cavally River watercourse in the study area were determined using Landsat images. These types of images, with very high resolutions (30 m of resolution), have made it possible to establish, with sufficient precision, the annual interannual monitoring of the Cavally River. Mapping water bodies using Landsat images is an accurate method, both recent and old. Thus, in Burkina Faso and Tunisia, for monitoring the configuration of water bodies over several years, [20] [21] [22] used these types of images. However, the vectorization of the contours of the water body remains a rather tedious task to accomplish because of the quality of the image. This generally leads to an underestimation or overestimation of the volume of the water body. To overcome these consequences, orthophotos and aerial photographs are needed to facilitate the estab-

lishment of water body boundaries [23] [24]. Since these two types of photographs have a relatively low spatial resolution (0.5 m resolution), this would make it possible to differentiate between the different elements of the earth's surface and to highlight water bodies and vegetation clearly.

In general, the validation of results from GIS processing is carried out through field visits [25] [26]. In this study, the data used to validate the different contour layers are of a cartographic type. However, they were very satisfactory because the distances between the distances of the sections measured on the vectorized maps and the validation maps are almost zero, less than 1%. Nevertheless, a field visit would be more advantageous in the context of a more comprehensive study. About the evolution of the riverbed, illegal gold panning could be the cause of the increase in the surface area of the water body located between the SMI and the village of Floleu (Section 3). Indeed, this area is frequented daily by gold miners who carry out their activities both in the minor bed and on the banks of the river. [18] [27] argue that clandestine gold mining weakens soils, gradually destroys Arab lands, destabilizes banks and predisposes the soil to often intense erosion processes. Indeed, artisanal gold mining is generally accompanied by the opening of trenches, wells, scraping and turning the soil. Given the flow rate and flow velocity of the Cavally River, the presence of these trenches would indeed favor the erosion of the banks and therefore the deformation of the bed of the watercourse.

4. Conclusion

This study showed that the vegetation cover has deteriorated considerably (four common land use classes were finally mapped). They are represented by dense vegetation (13.11%; degraded vegetation and crops (72.04%); water (4.73%); built areas and bare soils (10.12%)), the climate has been highly variable with a succession of dry and wet periods. The Cavally River watershed is subject to significantly hydro-climatic variability. This variability could have a significant impact on the water resources of the watershed. In recent years (2011s to 2018s), the Cavally River bed has undergone very significant modifications due to the massive presence of illegal gold panners operating in the bed with a degradation surface ranging from 13.70% between 1986 and 2011 to 55.00% between 2011 and 2018. Given the importance of the flows and flow rates of the Cavally River, the presence of trenches dug by these illegal gold panners would favor the erosion of the banks and therefore the deformation of the bed of the watercourse.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

[1] Zhai, X., Xia, J. and Zhang, Y. (2014) Water Quality Variation in the Highly Dis-

turbed Huai River Basin, China from 1994 to 2005 by Multi-Statistical Analyses. *Science of the Total Environment*, **496**, 594-606. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.101

[2] Sundaray, S.K., Panda, U.C., Nayak, B.B. and Bhatta, D. (2006) Multivariate Statistical Techniques for the Evaluation of Spatial and Temporal Variations in Water Quality of the Mahanadi River-Estuarine System (India)—A Case Study. *Environmental Geochemistry and Health*, **28**, 317-330. https://doi.org/10.1007/s10653-005-9001-5

[3] Li, S., Xia, X., Tan, X. and Zhang, Q. (2013) Effects of Catchment and Riparian Landscape Setting on Water Chemistry and Seasonal Evolution of Water Quality in the Upper Han River Basin, China. *PLoS ONE*, **8**, e53163. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053163

[4] Vegas, M., Pardo, R., Barrado, E. and Deban, L. (1998) Assessment of Seasonal and Polluting Effects on the Quality of River Water by Exploratory Data Analysis. *Water Research*, **32**, 3581-3592.

[5] Zhu, Z. and Wen, Q.X. (1994) Nitrogen in Soils of China. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Nitrogen%20in%20soils%20of%20China&author=Z.L.%20Zhu&publication_year=1994

[6] Zhang, Y., Xia, J., Liang, T. and Shao, Q. (2010) Impact of Water Projects on River Flow Regimes and Water Quality in Huai River Basin. *Water Resources Management*, **24**, 889-908. https://doi.org/10.1007/s11269-009-9477-3

[7] Mehran, A., *et al.* (2017) Compounding Impacts of Human-Induced Water Stress and Climate Change on Water Availability. *Scientific Reports*, **7**, 6282. https://doi.org/10.1038/s41598-017-06765-0

[8] Jun, X. and Beyaitan Bantin, A. (2017) The Impact of Hydro Climatic Variability on Water Resources of Lake Chad Hydro Graphic Basin. *Hydrology*: *Current Research*, **8**. https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000282

[9] Vorosmarty, C.J. (2000) Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, **289**, 284-288. https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284

[10] Milliman, J.D., Farnsworth, K.L., Jones, P.D., Xu, K.H. and Smith, L.C. (2008) Climatic and Anthropogenic Factors Affecting River Discharge to the Global Ocean, 1951-2000. *Global and Planetary Change*, **62**, 187-194. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.001

[11] Li, Y., He, D., Li, X., Zhang, Y. and Yang, L. (2016) Contributions of Climate Variability and Human Activities to Runoff Changes in the Upper Catchment of the Red River Basin, China. *Water*, **8**, 414. https://doi.org/10.3390/w8090414

[12] Mekonnen, D.F., Duan, Z., Rientjes, T. and Disse, M. (2018) Analysis of Combined and Isolated Effects of Land-Use and Land-Cover Changes and Climate Change on the Upper Blue Nile River Basin's Streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**, 6187-6207. https://doi.org/10.5194/hess-22-6187-2018

[13] Stryker, J., Wemple, B. and Bomblies, A. (2018) Modeling the Impacts of Changing Climatic Extremes on Streamflow and Sediment Yield in a Northeastern US Watershed. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, **17**, 83-94. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.003

[14] Lutz, S.R., Mallucci, S., Diamantini, E., Majone, B., Bellin, A. and Merz, R. (2016) Hydroclimatic and Water Quality Trends across Three Mediterranean River Basins. *Science of the Total Environment*, **571**, 1392-1406. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.102

[15] Pandžić, K., Trninić, D., Likso, T. and Bošnjak, T. (2009) Long-Term Variations in Water Balance Components for Croatia. *Theoretical and Applied Climatology*, **95**, 39-51. https://doi.org/10.1007/s00704-007-0366-5

[16] Lespinas, F., Ludwig, W. and Heussner, S. (2010) Impact of Recent Climate Change on the Hydrology of Coastal Mediterranean Rivers in Southern France. *Climatic Change*, **99**, 425-456. https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1

[17] Bauma, K.F. (2017) Etude sur l'utilisation du mercure et du cyanure dans l'exploitation artisanale de l'or au Nord et Sud-Kivu. Les voix de l'Est du Congo. Save Act Mine, 18.

[18] Bohbot, J. (2017) L'orpaillage au Burkina Faso: Une aubaine économique pour les populations, aux conséquences sociales et environnementales mal maîtrisées. *EchoGéo*, 42. https://doi.org/10.4000/echogeo.15150

[19] Tricart, J., *et al.* (1973) Une monographie physique de la Côte-d'Ivoire. *Annales de Géographie*, **82**, 369-372. https://doi.org/10.3406/geo.1973.18905

[20] Charreton, B.M., Finch, J.W., Gresillon, J.M., Lamachère, J.M., Pallas, P. and Puech, C. (1995) Télédétection et gestion des ressources en eau. FAO, Atelier International, Montpellier, France.

[21] Ben Mammou, A. and Rabbi, M.C. (1990) L'imagerie satellitaire pour l'étude des réservoirs: applications à la retenue du barrage Sidi Salem (Tunisie), Satellite et gestion de l'eau au Sahel. *Télédétection et cartographie*, **2**, 75-88.

[22] Yobouet, A. (2011) Contribution de l'imagérie satellitaire au suivi des ressources naturelles dans la partie Est du Burkina Faso. Mémoire Master, 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso.

[23] Padonou, M.M.N. and Sarr, M.P. (2009) Contribution de la Télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) A l'amélioration de la gestion des eaux de surface dans un bassin versant: Cas du barrage de Mogtedo au Burkina Faso. *Journées d'Animation Scientifique de l'AUF*, 7.

[24] Heinerich, S., Dejaifve, P.-A., Esquirol, N., LPO and ONF (2011) Cartographie du lit de la rivière Allier et de ses annexes dans la RNN du Val d'Allier, Reserve Naturelle Nationale du Val d'Allier. *Reserve Naturelle de France*, 22.

[25] Youan, T.M. (2008) Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest: Cas de la région de Bondoukou (nord-est de la côte d'ivoire). Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan-cocody, Cote d'Ivoire.

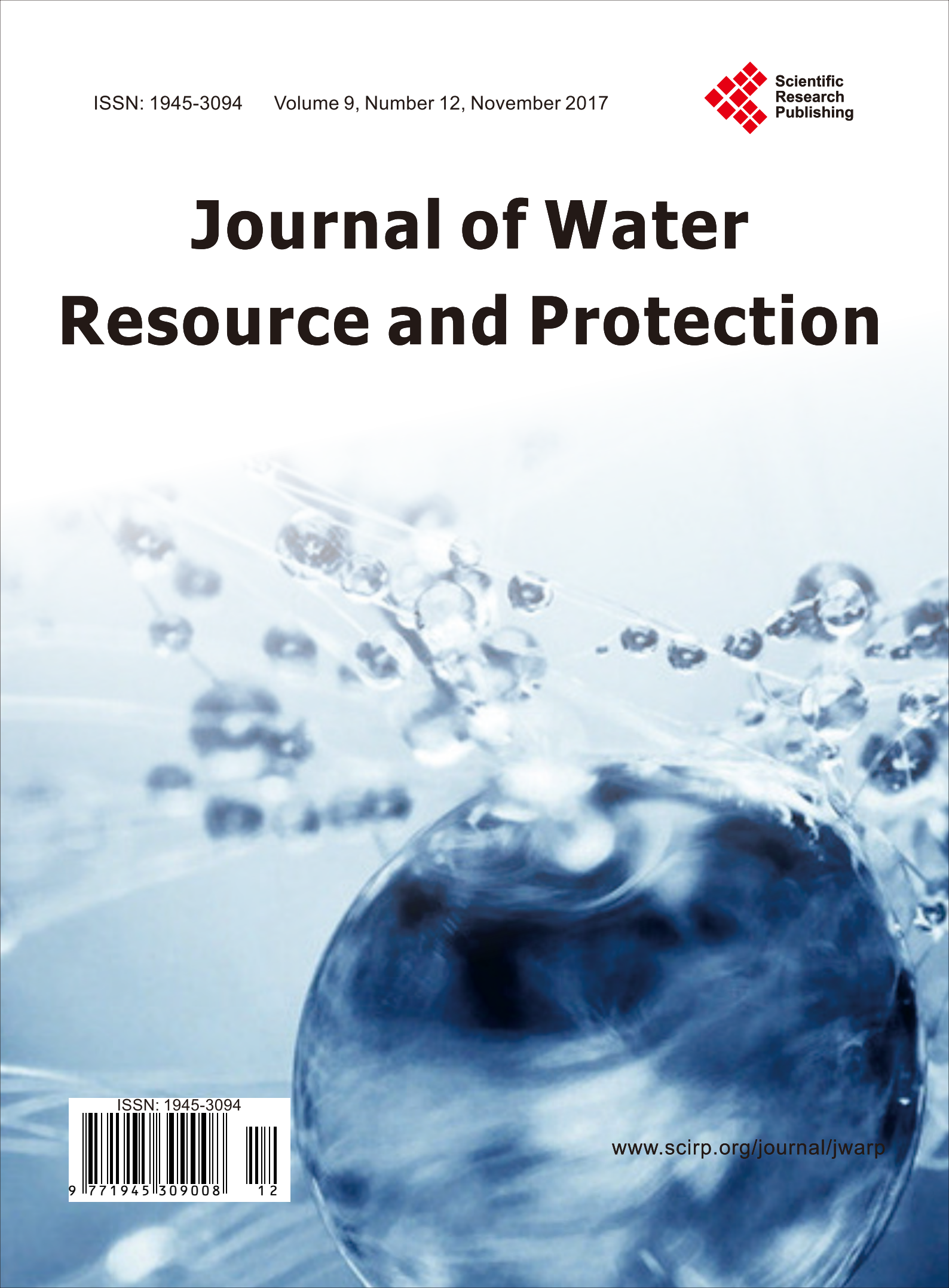
[26] Zro, B.G.F. (2012) Utilisation de la télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) pour la cartographie et l'évaluation de la fertilité rizicole des sols hydromorphes (gleysols): Cas d'un périmètre de la région du Bélier (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan-Cocody, Cote d'Ivoire.

[27] Ouédraogo, I. (2012) Impact de l'exploitation minière industrielle sur la santé humaine et environnementale au Burkina Faso: Cas de la mine d'or de Essakane SA. Mémoire Master, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, France.

ISSN: 1945-3094 Volume 9, Number 12, November 2017

Scientific Research Publishing

Journal of Water Resource and Protection



ISSN: 1945-3094

www.scirp.org/journal/jwarp

Journal Editorial Board

ISSN: 1945-3094 (Print) ISSN: 1945-3108 (Online)

http://www.scirp.org/journal/jwarp

Editor-in-Chief

Prof. Jian Shen	College of William and Mary, USA

Editorial Board

Dr. Assad Ahmed Al-Thukair	King Fahd University of Petroleum & Minerals, Saudi Arabia
Prof. Sam F. Atkinson	University of North Texas, USA
Dr. Amitava Bandyopadhyay	University of Calcutta, India
Dr. Helen Bridle	Heriot-Watt University, UK
Prof. Peter Dillon	Trent University, Canada
Prof. Taisheng Du	China Agricultural University, China
Dr. Karina Yew-Hoong Gin	National University of Singapore, Singapore
Prof. Madan Kumar Jha	Indian Institute of Technology, India
Dr. Paul Kay	University of Leeds, UK
Prof. Zhaohua Li	Hubei University, China
Prof. Pan Liu	Wuhan University, China
Dr. Damodhara Rao Mailapalli	Indian Institute of Technology, India
Dr. Arash Massoudieh	The Catholic University of America, USA
Prof. Jiho Min	Chonbuk National University, South Korea
Prof. Ping-Feng Pai	National Chi Nan University, Chinese Taipei
Prof. Mohamed Nageeb Rashed	Aswan University, Egypt
Dr. Dipankar Saha	Ministry of Water Resources Government of India, India
Prof. Vladimir Soldatov	Institute of Physical Organic Chemistry, Belarus
Dr. Matthias Templ	Vienna University of Technology, Austria
Dr. Stijn W. H. Van Hulle	Ghent University, Belgium
Prof. Aswani K. Volety	Florida Gulf Coast University, USA
Dr. Yiping (Rocky) Wu	Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, USA
Prof. Muqi Xu	Chinese Academy of Sciences, China
Prof. Xiaohua Yang	Beijing Normal University, China
Dr. Y. Jeffrey Yang	US Environmental Protection Agency, USA
Dr. Jinsheng You	University of Nebraska, USA
Prof. Fan Zhang	Chinese Academy of Sciences, China
Dr. Chunli Zheng	Xi'an Jiaotong University, China

Scientific Research Publishing

Journal of Water Resource and Protection, 2017, 9, 1319-1585
http://www.scirp.org/journal/jwarp
ISSN Online: 1945-3108
ISSN Print: 1945-3094

Table of Contents

Volume 9 Number 12 November 2017

Applicability of Galway River Flow Forecasting and Modeling System (GFFMS) for Lake Tana Basin, Ethiopia

T. A. Dessalegn, M. A. Moges, D. C. Dagnew, A. Gashaw……1319

Forecasting the Rainfall Pattern on Upstream of Hirakud Reservoir Using L-Moment for Accessing the Inflow

K. K. Gupta, A. K. Kar, J. Jena, D. R. Jena……1335

Performance of Twelve Mass Transfer Based Reference Evapotranspiration Models under Humid Climate

K. Djaman, K. Koudahe, M. Sall, I. Kabenge, D. Rudnick, S. Irmak……1347

Sensitivity Analysis of the Penman-Monteith Reference Evapotranspiration to Climatic Variables: Case of Burkina Faso

P. M. Ndiaye, A. Bodian, L. Diop, K. Djaman……1364

Physical-Mathematical Foundations of the Penman Equation from the Perspective of the First Law of Thermodynamics and Energy Balance Theory

M. Mundo-Molina, E. De Coss-Gomez……1377

Effect of Transient Acid Spikes on Developmental Stages of *Lepomis* Fishes

W. G. Hagar, Q. Xu, J. P. Ebersole……1391

Rain-Flow Modeling Using a Multi-Layer Artificial Neural Network on the Watershed of the Cavally River (Côte d'Ivoire)

B. L. Alexis, K. K. Lazare, K. K. Séraphin, K. Z. Alex, K. K. Félix, K. Bamory……1403

Groundwater Monitoring with Passive Seismic Interferometry

C. Voisin, M. A. Romero Guzmán, A. Réfloch, M. Taruselli, S. Garambois……1414

Recharge Estimation of Hard Rock Aquifers under Sahelian Climate Conditions Using Water Table Fluctuation: Case Study of Tougou Catchment, Burkina Faso

M. Koïta, W. J. P. Sandwidi, A. E. Dara……1428

Water-Energy Prototype Model for the NEMS Modeling Platform: Thermoelectric Water Demand and Its Implications on Regional Electricity Market

E. Shuster, A. K. S. Iyengar, L. Goudarzi, D. Keairns, C. Court, C. Zelek……1449

Journal of Water Resource and Protection, 2017, 9, 1319-1585
http://www.scirp.org/journal/jwarp
ISSN Online: 1945-3108
ISSN Print: 1945-3094

Evaluation of Eleven Reference Evapotranspiration Models in Semiarid Conditions

K. Djaman, K. Koudahe, C. O. Akinbile, S. Irmak……1469

Nutrient and Chlorophyll *a* Variability at a Micro-Scale Level in a Suspended Mussel Culture

A. Moriki, D. Petridis, C. Papadimitriou, I. Fantidou, N. Kapageridis……1491

Water Quality and Ecotoxicity Assessment in Surface Waters from Cubatão River and Surroundings, São Paulo, Brazil

V. S. G. Garcia, E. T. D. Matsushita, L. C. A. Mesquita, D. I. T. Fávaro, S. I. Borrely……1510

Geo-Electrical and Borehole Investigation of Groundwater in Some Basalts on the South-Eastern Flank of Mount Cameroon, West Africa

A. E. Djieto Lordon, C. M. Agyingi, V. E. Manga, N. N. Bukalo, E. T. Beka……1526

Physico-Chemical and Biological Characteristics of the Nklobisson Artificial Lake in Yaounde, Cameroon

J. Ndjama, G. A. Ajeagah, N. G. R. Nkoue, W. Jude, N. E. B. Birama, G. E. T. Eyong, A. A. Ako, M. Bello, T. R. V. Ntchantcho, J. V. Hell……1547

Water Quality Assessment by Measuring and Using Landsat 7 ETM+ Images for the Current and Previous Trend Perspective: Lake Tana Ethiopia

M. A. Moges, P. Schmitter, S. A. Tilahun, E. K. Ayana, A. A. Ketema, T. E. Nigussie, T. S. Steenhuis……1564

Journal of Water Resource and Protection, 2017, 9, 1403-1413
http://www.scirp.org/journal/jwarp
ISSN Online: 1945-3108
ISSN Print: 1945-3094

Rain-Flow Modeling Using a Multi-Layer Artificial Neural Network on the Watershed of the Cavally River (Côte d'Ivoire)

Brou Loukou Alexis[1*], Kouassi Kouakou Lazare[1], Konan Kouakou Séraphin[1], Kouadio Zilé Alex[1], Konan Koffi Félix[1], Kamagate Bamory[2]

[1]Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire
[2]Université Nangui-Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire
Email: *broualexis30@gmail.com

How to cite this paper: Alexis, B.L., Lazare, K.K., Séraphin, K.K., Alex, K.Z., Félix, K.K. and Bamory, K. (2017) Rain-Flow Modeling Using a Multi-Layer Artificial Neural Network on the Watershed of the Cavally River (Côte d'Ivoire). *Journal of Water Resource and Protection*, **9**, 1403-1413.
https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.912090

Received: September 15, 2017
Accepted: November 25, 2017
Published: November 28, 2017

Copyright © 2017 by authors and Scientific Research Publishing Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

Abstract

Water resources management is nowadays a significant stake for the world. However, missing or bad quality of the hydro-climatic historical data available of the studied area makes sometimes hydrological studies difficult. Generally, conceptual rain-flow models are designed to bring an appropriate answer with the correction of gaps and prediction of the flows. Historical hydro-climatic data of the Ity station, located on Cavally River, contain gaps which must be bridged. This study aims to establish a rainfall-runoff model through artificial neural networks for filling the gaps into the flow data series of the hydrometric station of Ity on the watershed of Cavally River. A multi-layer perceptron of feed forwards with two entries (monthly average rain and evapotranspiration) and an exit (flows) was established with flow evapotranspiration data. Comparison of the criteria of performance of the various architectures of the neural network model showed that architecture 2-3-1 gives best results. This architecture provides Nash coefficients of 75.79% and correlation linear coefficient of 95.64% for the calibration and Nash coefficients of 73.32% and correlation linear coefficient of 98.33% for the validation. The correlations between simulated flows and observed flows are strong. The correlation coefficients are 83.89% and 83.08% respectively for the calibration and validation.

Keywords

Rain-Flow Modeling, Artificial Neural Network, Cavally River, Côte d'Ivoire

1. Introduction

The management of water resources constitutes a major stake for most of the

countries in the world. For instance, the prevision of future hydrologic conditions is of capital importance in the planning and the management of water resources [1]. To predict flows, knowledge of the data on flows and/or past and present rains is necessary. However, the absence or the poor quality (gaps, measuring mistakes…) of hydro climatic data makes these hydrological studies difficult. Therefore filling of gaps is necessary before any use. Correlation methods between stations of same areas for filling gaps are often limited by the weak density of stations on the watersheds. The rain-flow model could bring an adequate solution to fill the gaps in the series of flow and rain data [2]. Indeed, the simulation of flow is one solution in the filling of gaps in the series of data, the reconstitution of historical flows. Owing to the difficulties to state nonlinear models, recent attempts resorts to artificial neurons networks (ANN) for the hydrological modeling of complex watersheds. Since early 1990s, artificial neurons networks have been used successfully in domains linked to hydrology such as the modeling of rain-flow, quality of water, strategy of water management, prevision of precipitation, hydrological chronological series [3], the estimation of non-measured floods [4], the prevision of typhoon-rain [5], the estimation of the flow of a river [6], for ameliorating the modeling rain-flow based on rainy events [7], the predictions of the chronological series of the height of rain [8], the modeling of the relation rain-flow [2]. Plus the distribution of Markov range for the probable distribution of rain in the lower watershed of the Bia [9]. Artificial neurons networks (ANNs) use dependent data. They do not impose any functional relation between independent and dependent variables in so far as this relation is terminated by the data in the learning process (or calibration) [10]. Mathematically, an ANN can be considered as universal approximation. For its capacity to learn and to generalize "the knowledge" of pairs of sufficient data artificial neurons networks can solve complex problems on big scale such as the recognition of forms, classification, association, check, nonlinear modeling and other problems [11]. This article aims to establish a model of rain-flow of the Cavally watershed of the hydrometric station of Ity in order to determine the flow and to fill the detected gaps in the series of the recorded historical data.

2. Material and Methods

2.1. Presentation of the Study Area

The Cavally River is a lower cross border watershed between Guinea, Ivory Coast and Liberia. Located in the west of Ivory Coast, the Cavally River begins in Guinea, in the North of Mount Nimba with more than 1000 meters as approximate altitude (**Figure 1**). 700 km long, its riverbed constitutes the border between Liberia and Ivory Coast from its middle way (at the South of Toulépleu) on about 330 km. The lower watershed covers a complete area of 28,800 Sq Km at Tate hydrometric station located at 60 km from the mouth. Côte d'Ivoire doesn't possess but about 15,000 Sq km of watershed [12]. In the framework of this study, the chosen outlet is the hydrometric station of Floleu located at

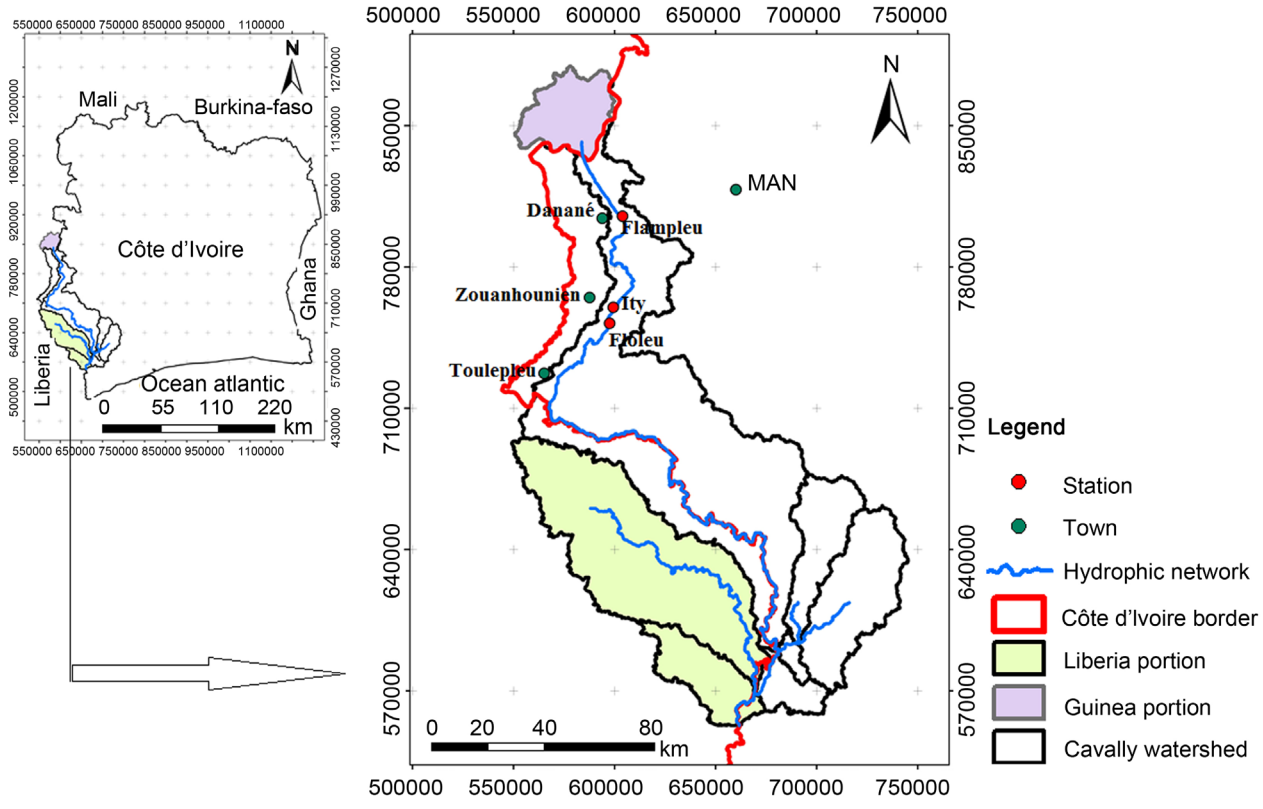


Figure 1. Study area of sub-watershed of Cavally River.

downstream of the Ity station in the Zouan-Hounien region. The low watershed has got an area of 3647.53 Sq km (Figure 1). The region of Zouan-Hounien is located in the mountain region of Côte d'Ivoire; its relief is hilly. Zouan-Hounien is located in the forest area and its climate is the mountain climate with two seasons: one rainy season from May to October and one dry season from November to March. The annual average temperature is 25.6˚C. The annual average precipitation is 186 mm. The driest month is January with a precipitation of 15 mm. The most important precipitations are recorded in September and they are 357 mm in average.

2.2. Data Acquisition and Analysis

The data used in the framework of this study are issued by three (3) hydrometric stations (Flampleu, Ity and Toulépleu) providing data about rain and temperature on the exploitation site of the Mining company of Ity (SM1). The daily data about flows are provided by the general office of infrastructures and human hydraulic (DGIHH) under the authority of the Ministry of Economic Infrastructures of the Republic of Côte d'Ivoire, whereas the data about monthly rains were acquired via the Company of development and Airport and Maritime exploitation (SODEXAM). To obtain the same pace of time like monthly rains, daily flows were transformed in monthly flows. These data cover the period from 1980 to 2001 for flows and from 1990 to 2007 for hydro-climate data. In

order to permit the model to correctly simulate the provided data, a period of common basis was chosen by taking into account the quality of data that is to say with less gaps over a continuous period from August 1990 to December 2001. The potential monthly evapotranspiration was calculated by the formula of THORNTHWAITE (1994). The characteristic values are recorded in Table 1.

2.3. Rain-Flow Modeling Method by Neural Network

The setting of an artificial neural network constitutes four (4) steps: data search, pre-treatment of these data, learning and evaluation of the model. In this study, a perception of feed forwards retro propagation model with two layers, one hidden layer and one layer of exit was constituted (Figure 2).

To set neural network model, the data about average rain, ETP and flows on monthly pace on a continuous period from August 1990 to December 2001 were used. These data are firstly normed between the interval [0; 1] in order to permit an efficient treatment accepted by the in and out functions of the network [13]. The functions used for the normalization of the entry vector are given by the following relation [14].

$$X_N = \left(X - X_{\min}\right)\frac{X_{N\max} - X_{N\min}}{X_{\max} - X_{\min}} + X_{N\min} \quad (1)$$

X_N = normalized value corresponding to the elements of the entries vector (Rain, ETP), X = Real value of an element of the entries vector, $X_{\min}$ = minimum

Table 1. Hydro-climatic and flow data characteristics of Ity region.

	Flow (m^3/s)	Rain (mm)	Temperature (˚C)	ETP (mm)
Maximum	327.27	531.70	28	141.42
Average	143.69	151.37	25.76	85.9
Minimum	76.52	0.0	24	62.90
STDEVA	59.28	109.51	1.03	14.10

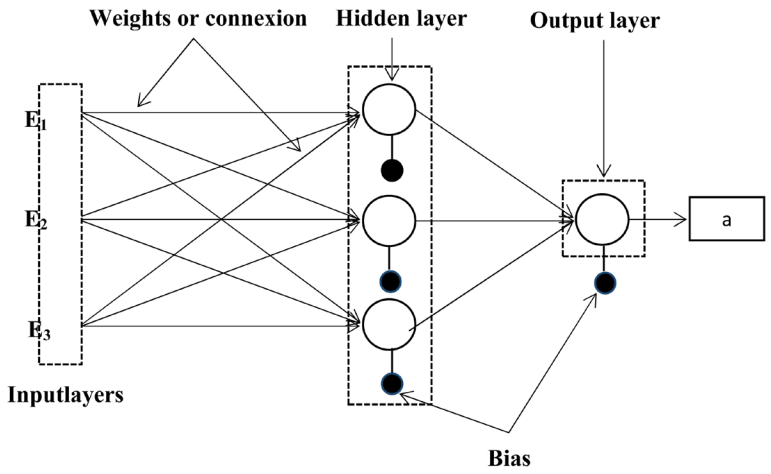


Figure 2. Multi-layers neuron network model.

value of an element of the entries vector, $X_{\max}$ = maximum value of an element of the entries vector, $X_{N\min}$ = minimum value of the normalization vector [0; 1] equal 0, $X_{N\max}$ = maximum value of the normalization vector [0; 1] equal 1.

These data are then subdivided in three (3) sub-sets: calibration, test and validation done respectively according to proportions of 50%, 30% and 20% equivalent respectively to 5; 3 and 2 years (**Figure 3**). A multi-layer perception of feed forwards model two (2) entries (average rain and ETP) and one exit (flows) with an architecture varying from one neuron to five hidden neurons. The network so constituted is trained in supervised way by an algorithm of second order (Levenberg Marquardt) according to retro propagation. In addition, to make converge rapidly the model, the weights and initial bias were fixed to 0, 1.

The programming was done under Matlab software R 2014 version. The artificial neural network developed in this study has the following characteristic:

- Mistake criterium: quadratic mistake.
- Activation function: Sigmoid function bounded from 0 to 1;
- Initial weights: 0, 1.
- Initial bias: 0.1;
- Number of iterations: 500.

The model is assessed with two (2) digital criteria (Nash coefficient and correlation coefficient) and graphic criteria (hydrograph of the observed and simulated of flows).

2.3.1. Nash Coefficient

In order to quantify the precision of the simulation and reliability of the model, Nash coefficient is applied on the obtained results [15]. Nash coefficient is then expressed by the following relation:

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(q_{oi} - q_{ci}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(q_{oi} - \bar{q}_o\right)^2} \times 100 \tag{2}$$

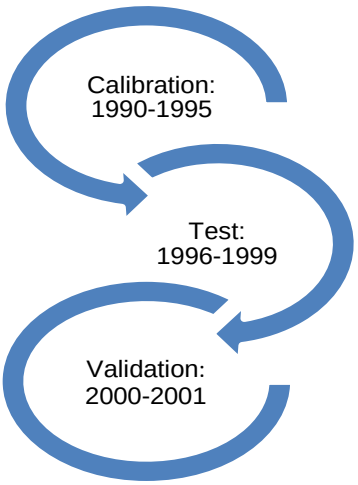


Figure 3. Process of data distribution into artificial neuron network model.

2.3.2. Correlation Coefficient

Noted R, the correlation coefficient on Pearson coefficient is the square root of the determination coefficient given by the relation:

$$R = \frac{\sum_i (q_{oi} - \overline{q}_o)(q_{ci} - \overline{q}_c)}{\sqrt{\sum_i (q_{oi} - \overline{q}_o)^2 \times \sum_i (q_{ci} - \overline{q}_c)^2}} \quad (3)$$

In these two expressions, n represents the height of the sequence, q_{oi} represents the observed flow for calculated flow for the pace time i in m^3/s; q_{ci}, is the calculated flow for the pace time i in m^3/s; $\overline{q}_o$ is the observed average flow in m^3/s.

3. Results and Discussion

In modeling by neural network, to avoid an over learning (modeling of the raw), the obtained results are starting from the reserved data for learning must be validated on a new set of data. Table 2 presents the criteria of estimation of the performance of the model in accordance with four [4] architectures (2-3-1; 2-4-1; 2-5-1 and 2-6-1) at the calibration and validation levels.

Observing this table, all the architectures given better performance criteria in accordance with the criteria of evaluation of the performance of a model, which must be higher than 60% for the Nash criteria and 80% for the correlation coefficient. However in the modeling of artificial neural network more the quantity of hidden layer is higher more the model becomes complex and unstable. To reduce this complexity of the model, it is necessary to choose the models which have fewer layers. There by the most appropriate model in the framework of this study is architecture model 2-3-1. So, the results of calibration and validation will be presented this way. Figure 4 presents respectively the hydrographs and the correlation between the observed and the simulated flows by model 2-3-1 at the calibration level.

Although there are some gaps, model simulates better the flows. Indeed, gaps are noticed at the level of hydrographs of the observed and the simulated flows at the level of the calibration step of the model (Figure 4) but, Nash coefficient (75.79%) is for superior to 60% value from which a model can be considered efficient and stable. The linear correlation between the observed and the simulated flow sis strong with a correlation coefficient of 95.64% at the calibration level as

Table 2. Criteria of evaluation of artificial neural network the model performance for different structures.

			Structures of model			
			2-3-1	2-4-1	2-5-1	2-6-1
Criteria of valuation	NASH	Calibration	**75.79**	74.18	73.68	74.21
		Validation	**73.33**	74.64	74.02	73.75
	Correlation coefficient	Calibration	**95.64**	95.81	97.43	95.96
		Validation	**98.33**	98.4	96.93	98.86

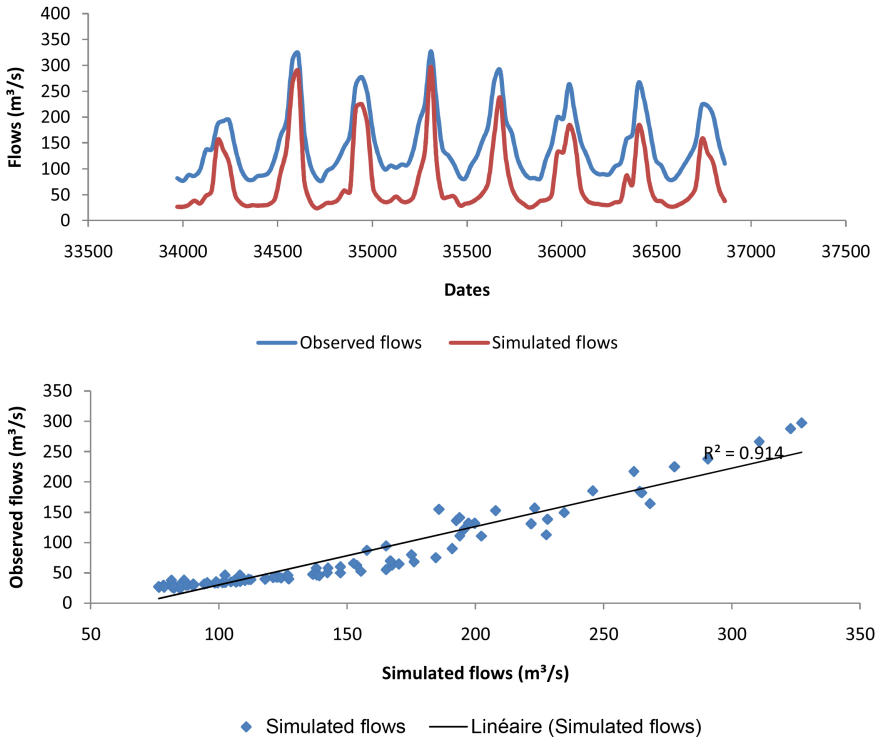


Figure 4. Hydrographs and graphical representation of the correlation between observed and simulated flow rates for the 2-3-1 structure of ANN model at the calibration level.

presented in **Figure 4**. **Figure 5** presents respectively flow hydrographs and the correlation between the observed and simulated flows by model 2-3-1 at the level of the validation model.

This step of validation model 2-3-1 presents Nash coefficients and respective linear correlation of 73.32% and 98.33%. These two criteria (Criterion of Nash and coefficient of correlation) allow appreciating the reliability and the stability of the artificial neurons network model. In effect, when the criterion of Nash is superior to 60% and the coefficient of linear correlation is superior to 80%, the model can be considered efficient. So, the analysis of the results shows that for three (3) hidden neurons, the model presents good performance criteria.

The **Table 3** summarizes performance criteria for the Artificial Neural Network model 2-3-1.

However, the tasks done [2] at the station of Bianouan on the river Bia revealed that the model with hidden neurons also gives interesting results with some criteria of Nash of 60.37% and the coefficient of correlation of 83.08% for validation. This difference in results could be explained by the density of the series of data for modeling which used a 26 year series of data whereas in this study the series of data is 10 years old. The model of neural network developed with the data of average rain, ETP calculated by the THORNTHWAITE method and the method of flow over the period from 1990 to 2001 gave good results with the architecture. Therefore, three (3) hidden neurons are necessary to well simulate flows at hydrometric station of Ity starting from two (2) entries (average

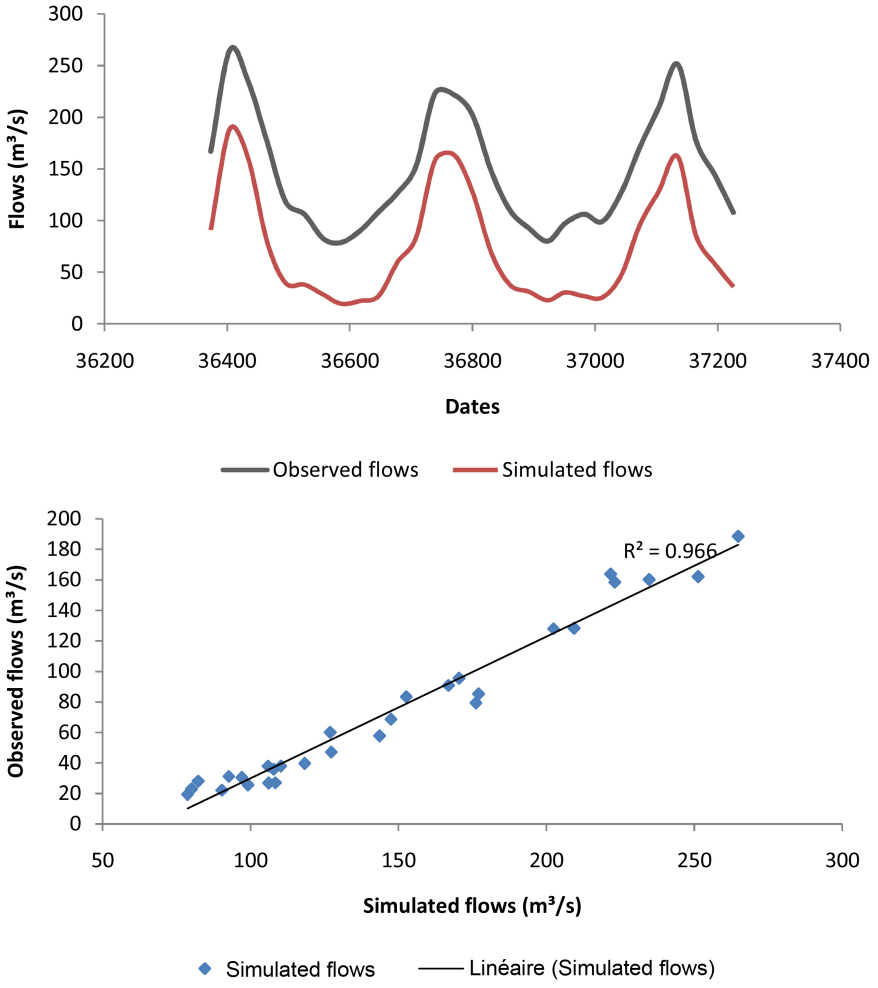


Figure 5. Hydrographs and graphical representation of the correlation between Observed (Qobs) and simulated (Qcal) flow rates for the 2-3-1 structure of ANN model at the validation level.

Table 3. Performance criteria for the artificial neural network model 2-3-1.

Criteria of evaluation	Calibration	validation
Criterion of Nash	75.79%	73.32%
Coefficient of correlation	95.64%	98.33%

rain and ETP calculated by the THORNTHWAITE). The tasks of [16] cited by [2] sunstroke and temperature and used with the average rain could simulate better the flows [17].

However, some gaps are noticed between the observed flows and the simulated flows by architecture 2-3-1 of the artificial neurons networks at the artificial neurons networks at the validation level. These differences can be explained by the fact that the artificial neurons networks are models which are influenced by the number of variables of entries model, the length of the series of data for the tuning and the quality of data. In fact, although the two variables of entries (average rain and ETP) well-simulate the flows at the station of Ity, the flows at

this station are not only influence drain and ETP. According to [18]; [19] and [2], vegetation, the level of the stream, the capacity of retention of water of the soil, relief and the others losses are factors which influence the transformation of rain in flow. Consequently, [20] it is proven that by increasing the number of variables of entries of a model of artificial neurons network by one (1) to three (3) entries, the performance of the model improves considerably. The results obtained in this study (model 2-3-1) compared with those obtained (model 2-4-1) by [2] give approximately similar results. Since then, we could say that the number of neurons does not influence a lot the performance of the model to transform the rain in flow when comparatively with the quantity of data, the number entries data in the network.

4. Conclusion

This study allowed establishing a model of rain-flow thank to the artificial neuron network (multi-layer perception a feed forwards model) which is used to feel the gaps in the series of flows of the hydrometric station of Ity on the Cavally River. The results obtained through this model of artificial neuron network show that architecture 2-5-1 gives satisfactory results with 73.68% as Nash criterion at the tuning level and simulated flows of 97.43%, at test phase level a Nash criterion of 77.95%, and a very strong correlation of 98.42%, and the validation level a Nash criterion of 66.41% for a correlation between observed flows and simulated flows of 96.93%. This model will help in addition to the filling of gaps at the level rain data and flows, the evaluation of the impacts of anthropic activities on the down watershed of the Cavally River.

References

[1] Araghinejad, S., Azmi, M. and Kholghi, M. (2011) Application of Artificial Neural Network Ensembles in Probabilistic Hydrological Forecasting. *Journal of Hydrology*, **407**, 94-104. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.011

[2] Kouassi, K.L., Kouassi, K.M., Konan, K.S., Meledje, N.H., Koffi, Y.B. and Biémi, J. (2013) Modélisation Pluie-Débit à L'aide des Réseaux de Neurones Artificiels sur le Bassin Versant Transfrontalier de la Bia (Côte D'ivoire—Ghana) [Rainfall-Flow Modeling Using Artificial Neural Networks on the Transboundary Basin of the Bia (Ivory Coast-Ghana).]. *European Journal of Scientific Research*, **109**, 133-140.

[3] ASCE (2000) Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, **5**, 115-123. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(115)

[4] Dawson, C.W., Abrahart, R.J., Shamseldin, A.Y. and Wilby, R.L. (2006) Flood Estimation at Ungauged Sites Using Artificial Neural Networks. *Journal of Hydrology*, **319**, 391-409. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.032

[5] Lin, G.-F. and Wu, M.-C. (2009) A Hybrid Neural Network Model for Typhoon-Rainfall Forecasting. *Journal of Hydrology*, **375**, 450-458. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.047

[6] Kentel, E. (2009) Estimation of River Flow by Artificial Neural Networks and Identification of Input Vectors Susceptible to Producing Unreliable Flow Estimates. *Journal of Hydrology*, **375**, 481-488. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.051

[7] Chua, L.H.C. and Wong, T.S.W. (2010) Improving Event-Based Rainfall—Runoff Modeling Using A Combined Artificial Neural Network—Kinematic Wave Approach. *Journal of Hydrology*, **390**, 92-107. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.037

[8] Wu, C.L., Chau, K.W. and Fan, C. (2010) Prediction of Rainfall Time Series Using Modular Artificial Neural Networks Coupled with Data-Preprocessing Techniques. *Journal of Hydrology*, **389**, 146-167. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.040

[9] Meledje, N.H., Kouassi, K.L., Alexis, N.Y. and Savané, I. (2013) Probability Distribution of Rainfall in the Bia Watershed: Contribution of Markov Chains. *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, **363**, 379-385.

[10] Coulibaly, P., Anctil, F. and Bobee, B. (2000) Daily Reservoir Inflow Forecasting Using Artificial Neural Networks with Stopped Training Approach. *Journal of Hydrology*, **230**, 244-257. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00214-6

[11] ASCE (2000) Articifial Neural Networks in Hydrology. II: Hydrological Applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, **5**, 124-137. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(124)

[12] Tricart, J., *et al.* (1973) Une monographie physique de la Côte-d'Ivoire. *Annales de Géographie*, **82**, 369-372.

[13] Özel, T. and Nadgir, A. (2002) Prediction of Flanck Wear by Using Back Propagation Neural Network Modeling When Cutting Hardened H-13 Steel with Chamfered and Honed CBN Tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **42**, 287-297. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00103-1

[14] Mélèdje, N.H. (2016) Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux de sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé1 [Modeling the Hydrological Dynamics and Sediment Flow in the Lake of the Hydroelectric Dam of Ayame1.]. Doctorat unique, Université Nangui Abrogoua, Abidjan.

[15] Kouassi, K.L. (2007) Hydrologie, Transport Solide et Modélisation de la Sédimentation dans les Lacs des Barrages Hydroélectriques de Côte d'Ivoire: Cas du Lac de Taabo [Hydrology, Solid Transport and Modeling of Sedimentation in the Lakes of the Hydropower Dams of Côte d'Ivoire: Case of Lake Taabo.]. Thèse de doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan.

[16] Oudin, L. (2003) Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. [A Simple Formula of Potential Evapotranspiration for the Rainfall-Discharge Modeling at the Scale of a Watershed.] *La houille blanche*, **6**, 8 p.

[17] Zhang, B., Xu, D., Liu, Y., Li, F., Cai, J. and Du, L. (2016) Multi-Scale Evapotranspiration of Summer Maize and the Controlling Meteorological Factors in North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **216**, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.015

[18] Mouelhi, S. (2003) Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. [Towards a Coherent Chain of Conceptual Rain-Flow Models at Multi-Year, Annual, Monthly and Daily Times.] Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Paris.

[19] Koffi, Y.B. (2007) Modélisation pluie-débit en région tropicale humide: Application des réseaux de neurones sur quatre stations hydrométriques du Bandama Blanc (Bada, Marabadiassa, Tortiya et Bou), Nord de la Côte d'Ivoire. [Rainfall-Flow Modeling in the Humid Tropics Region: Application of Neural Networks at Four Bandama Blanc Hydrometric Stations (Bada, Marabadiassa, Tortiya and Bou),

Northern Côte d'Ivoire.] Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan.

[20] Randrianarivony, R.N., Lauret, P., Randriamanantany, Z.A. and Gatina, J.C. (2009) Modélisation du régime annuel des petites rivières en vue d'installation de micro-centrales hydroélectriques. [Modeling the Annual Regime of Small Rivers for the Installation of Micro Hydropower Plants.] *Afrique Science*: *Revue Internationale des Sciences et Technologie*, **5**, 11 p.

Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement : Volume 2 - Numéro 5 - Octobre 2017

JOURNAL INTERNATIONAL

Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement

ISSN (electronic): 1737-9350
ISSN (printed): 1737-6688

Volume 2 - Numéro 5 - Octobre 2017

Eau-Société-Climat'2017

Ressources en Eau et Changement Climatique: Impacts anthropiques et climatiques sur la variabilité des ressources en eau

Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie

Rédacteur en Chef : Pr Noureddine Gaaloul

Publié par :

l'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement en Tunisie (ASTEE*Tunisie*)

Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement
ISSN (electronic): 1737-9350 ; ISSN (printed): 1737-6688; Volume 2 - Numéro 5 - Octobre 2017

Modélisation Pluie-Débit à l'aide des Réseaux de Neurones Artificiels Multicouches sur le Bassin Versant du Fleuve Cavally à la station d'Ity (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)

Alexis Loukou BROU [1], Lazare Kouakou KOUASSI[1], Séraphin Kouakou KONAN[1],* Alex *Zilé KOUADIO*[1], *Félix Koffi KONAN[1], Bamory KAMAGATE*[2]

[1] Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire); (+225)07 701134,* brou.alexis@ujlg.edu.ci

[2] Université Nangui-Abrogoua, 08 BP 109 Abidjan 08 (Côte d'Ivoire)

Résumé

La gestion des ressources en eau constitue un défit important pour la plupart des pays du monde. La connaissance de ces ressources aussi bien sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif nécessite la disponibilité d'une bonne base de données historique. Cependant, l'absence ou la mauvaise qualité des données hydro-climatiques sur certains bassins rend parfois les études hydrologiques difficiles. Les modèles pluie-débit généralement conceptuels, peuvent être utilisés pour apporter une réponse aux comblements des lacunes. L'objectif de cet article est d'établir un modèle pluie-débit à la station hydrométrique d'Ity sur le bassin du Cavally pour le comblement des lacunes dans la série de données de débit. Pour ce faire, un perceptron multicouche de type feedforwards à deux entrées (pluie moyenne mensuelle et ETP) et une sortie (débits) a été utilisé. L'évapotranspiration a été calculée à l'aide de la méthode de THORNTHWAITE. Les critères de Nash et le coefficient de corrélation ont été utilisés pour évaluer la performance du modèle. La comparaison des critères de performance des différentes structures du modèle de réseau de neurones a montré que la structure 2-3-1 donne des résultats satisfaisants avec des critères d'évaluation de performance de 75,79% de critère de Nash et 95,64% de coefficient de corrélation linéaire au niveau du calage et 73,32% de critère de Nash et 98,33% de coefficient de corrélation linéaire au niveau de la validation. Les paramètres caractéristiques déterminés de ce modèle serviront à combler les lacunes issues des données hydro-climatiques pour étudier les variabilités hydro-climatiques du bassin versant du fleuve Cavally.

Mots clés : modèle pluie-débit, réseau neurones artificiels, Fleuve Cavally, Côte d'Ivoire

Rain-Flow Modeling using a Multi-layer Artificial Neural Network on the Watershed of the Cavally River (Côte d'Ivoire)

Abstract

Water resources management is nowadays a significant stake for the world. However, missing or bad quality of the available hydro-climatic historical data of the study area makes sometimes hydrological studies difficult. Generally, conceptual rain-flow models are designed to bring an appropriate answer to the correction of gaps and prediction of the flows. Hydro-climatic historical data of the Ity station, located on Cavally River, are made up of gaps which it is advisable to fill. The aim of this paper is to establish a model rain-flow of the watershed of Cavally River of the hydrometric station of Ity to determinate flows and fill gaps noted in the set of historical data recorded. For that, a multi-layer perceptron of feed forwards type at two entries (monthly average rain and evapotranspiration) and an exit (flows) were used. Model rain-flow was carried out starting from hydro-climatic historical data of the 3 stations located in the watershed of Cavally River over one period going from 1990 to 2001. Evapotranspiration was calculated through THORNTHWAITE method. Comparison of the criteria of performance of the various architecture of neural network model showed that architecture 2-3-1 gives best results with performance criteria of 75.79% for Nash criterion and 95.64% for correlation linear coefficient to the calibration level and 73.32% for Nash criterion and 98.33% for correlation linear coefficient to the validation level. Given parameters characteristic of this model will be used to study hydro-climatic variability of the watershed of Cavally River.

Key Words: rain-flow modeling, artificial neural network, Cavally River, Côte d'Ivoire

Introduction

La gestion de la ressource en eau constitue aujourd'hui un enjeu important pour la plupart des pays du monde. Par exemple, la prévision des conditions hydrologiques futures constitue une importance capitale dans la planification et la gestion des ressources en eau [1]. Pour prédire les débits, une connaissance des informations sur les débits et ou des pluies du passé et du présent est nécessaire. Malheureusement, l'absence ou la mauvaise qualité (lacunes, erreur de mesure…) des données historiques hydro-climatiques disponibles de la zone étudiée rend parfois difficile ces études hydrologiques. Un comblement des lacunes est donc nécessaire avant toute utilisation. Les méthodes de corrélation entre stations voisines utilisées couramment pour le comblement des lacunes sont très souvent limitées par la faible densité des stations sur les bassins versants. Les modèles pluie-débit pourraient apporter une réponse appropriée au comblements des lacunes dans les séries de débits et de pluie [2]. En effet, la simulation des débits constitue une solution pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques. En raison des difficultés de formulation des modèles non linéaires, les tentatives récentes ont recours à l'approche des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour la modélisation hydrologique de bassins versants complexes. Depuis le début des années 1990, les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés avec succès dans les domaines liés à l'hydrologie comme la modélisation pluie-débit, la qualité de l'eau, la politique de gestion de l'eau, la prévision des précipitations, les séries chronologiques hydrologiques [3]. Les réseaux de neuronnes permettent l'estimation des débits d'un fleuve[4], l'amélioration de la modélisation pluie-débit basée sur des évènements pluvieux[5], la modélisation de la relation pluie-débit[2]. Les RNA utilisent des données dépendantes. Ils n'imposent aucune relation fonctionnelle entre les variables indépendantes et dépendantes dans la mesure où cette relation est déterminée par les données dans le processus d'apprentissage (ou calibration) [6]. Mathématiquement, un RNA peut être considéré comme une approximation universelle. Pour sa capacité d'apprendre et de généraliser « la connaissance » de paires de données suffisantes, il est possible pour les réseaux de neurones artificiels de résoudre des problèmes complexes à grande échelle tels que la reconnaissance des formes, la classification, l'association, le contrôle, la modélisation non linéaire et bien d'autres [7]. L'objectif de cet article est d'établir un modèle pluie-débit du bassin du Cavally à la station hydrométrique d'Ity dans le but de déterminer des débits et de combler les lacunes observées dans la série de données.

1. Matériel et méthodes

1.1. Présentation de la zone d'étude

Le fleuve Cavally a un bassin versant transfrontalier entre la Guinée, la Côte d'Ivoire et le Libéria. Situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, le fleuve Cavally prend sa source en Guinée, au nord du Mont Nimba, à une altitude voisine de plus de 1000 m. Long de 700 km, le lit du Cavally sert de frontière entre le Libéria et la Côte d'Ivoire à partir de son cours moyen (au sud de Toulépleu) sur environ 330 km. Le bassin versant a une superficie totale de 28800 km^2 à Taté, station hydrométrique située à 60 km de l'embouchure. La superficie de la partie du bassin versant située en Côte d'Ivoire est d'environ 15000 km^2 [8]. Dans le cadre de cette étude, l'exutoire choisi est la station hydrométrique de Floleu située en aval de la station d'Ity dans la région de Zouan-Hounien. Son bassin versant a une superficie de 3647,53 km^2 (Figure 1). La région de Zouan-Hounien fait partie de la région des montagnes de la Côte d'Ivoire ; le relief y est accidenté. Zouan-Hounien se trouve en zone forestière et appartient au climat de montagne, marqué par deux saisons : une saison pluvieuse de Mai à Octobre et une saison sèche de Novembre à Mars. La température moyenne annuelle à Zouan-Hounien est de 25,6 °C. Les précipitations annuelles sont en moyenne de 1866 mm. Le mois le plus sec est celui de Janvier avec 15 mm. Les précipitations les plus importantes sont enregistrées en Septembre et sont de 357 mm en moyenne.

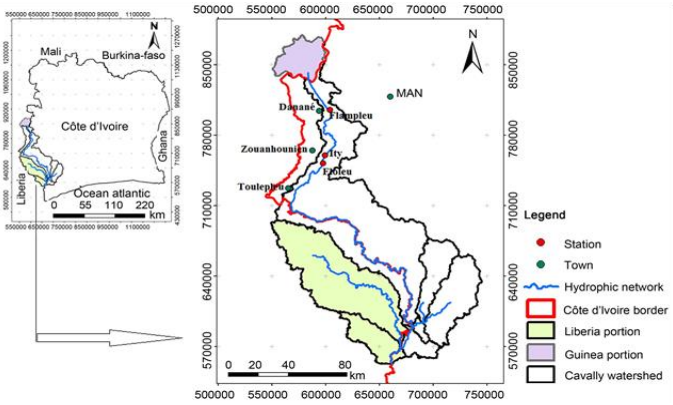


Figure 1: Situation de la zone d'étude

Acquisition et analyse des données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de trois (3) stations hydrométriques (Flampleu, Ity et Toulepleu) fournissant les données de débits situées sur le fleuve Cavally et d'une station pluviométrique fournissant les

données de pluies et de température sur le site d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (SMI). Les données de débits journaliers sont fournies par la Direction Générale des Infrastructures et de l'Hydraulique Humaine (DGIHH) sous tutelle du Ministère des Infrastructures Economiques de la République de Côte d'Ivoire, tandis que les données de pluies mensuelles ont été acquises à la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire et Maritime (SODEXAM). Pour avoir le même pas de temps que les pluies mensuelles, les débits journaliers ont été transformés en débits mensuels. Ces données couvrent la période de 1980 à 2001 pour les débits et de 1990 à 2007 pour les données hydro-climatiques. Afin de permettre au modèle de simuler correctement les données qui lui sont fournies, une période de base commune a été choisie en tenant compte de la qualité des données, c'est-à-dire contenant moins de lacunes sur une période continue allant de janvier 1990 à décembre 2001. L'évapotranspiration potentielle mensuelle a été calculée par la formule de THORNTHWAITE (1944). Les valeurs caractéristiques sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques des données hydro-climatiques et de débits dans la zone d'Ity

	Débits (m^3/	Pluie (mm	Température (°C	ETP (mm
Maximum	327,27	531,70	28	141,42
Moyenne	143,69	151,37	25,76	85,9
Minimum	76,52	0,0	24	62,90
Ecart-type	59,28	109,51	1.03	14,10

1.2. Modélisation pluie-débit par les réseaux de neurones artificiels (RNA)

La mise en place d'un modèle de RNA comprend quatre (4) étapes : la recherche de données, le prétraitement de ces données, l'apprentissage et l'évaluation du modèle [2]. Dans cette étude, un perceptron multicouche de type feedforwards retro propagation à deux (2) couches dont une couche cachée et une couche de sortie a été constitué. Pour la mise en place du modèle de réseaux neuronaux, les données de pluie moyenne, d'ETP et de débits au pas de temps mensuel sur une période continue d'Août 1990 à décembre 2001 ont été utilisées. Ces données sont d'abord normées entre l'intervalle [0 ;1] afin de permettre un traitement efficace et acceptées aux fonctions d'entrée et de sortie du réseau [9]. La fonction utilisée pour la normalisation du vecteur d'entrée est données par la relation suivante [10] :

$$X_N = (X - X_{min})\frac{(X_{Nmax} - X_{Nmin})}{(X_{max} - X_{min})} + X_{Nmin} \qquad (1)$$

Où : X_N= Valeur normalisée correspondant aux éléments du vecteur d'entrées (pluie, ETP),
X= Valeur réelle d'un élément du vecteur d'entrées, X_{min}= Valeur minimum d'un élément du vecteur d'entrées, X_{max}= Valeur maximum d'un élément du vecteur d'entrées, X_{Nmin} = Valeur minimum du vecteur de normalisation [0 ; 1] égale à 0, X_{Nmax} = Valeur maximum du vecteur de normalisation [0 ; 1] égale à 1. Ces données sont par la suite subdivisées en trois (3) sous-ensembles ; calage, test et validation respectivement selon les proportions de 50%, 30% et 20% équivalent à 5, 3 et 2 ans. Un perceptron multicouche de type feedforwards à deux (2) entrées (pluie moyenne et ETP) et une sortie (débits) avec une architecture variant d'un neurone à six neurones cachés a été construit. Le réseau ainsi constitué est entrainé de façon supervisée par un algorithme de deuxième ordre (LEVENBERG MARQUARDT) selon la règle de retro propagation. En outre, pour faire converger rapidement le modèle, les poids et les biais initiaux ont été fixés à 0,1.

Les programmations ont été effectuées sous le logiciel Matlab version R2014a. Le réseau de neurone artificiel développé dans cette étude a les caractéristiques suivantes : le critère d'erreur : erreur quadratique ; la fonction d'activation : fonction sigmoïde bornée de 0 à 1 ; le pas de gradient : 25 ; les poids initiaux : 0,1 ; les biais initiaux : 0,1 ; les nombre d'itérations : 500. Le modèle est évalué avec deux (2) critères numériques (coefficient de Nash et coefficient de corrélation) et un critère graphique (hydrogrammes des débits observés et simulés).

Coefficient de Nash

Dans le but de quantifier la précision de la simulation et la fiabilité du modèle, le coefficients de Nash est appliqué sur les résultats obtenus [11]. Le coefficient de Nash est alors exprimé par la relation suivante :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(q_{oi} - q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^{n}(q_{oi} - \overline{q}_o)^2} \times 100 \qquad (2)$$

Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation ou coefficient de Pearson, noté R est la racine carrée du coefficient de détermination donnée par la relation :

$$R = \frac{\sum_i (q_{oi} - \overline{q_0})(q_{ci} - \overline{q_c})}{\sqrt{\sum_i (q_{oi} - \overline{q_0})^2 \times \sum_i (q_{ci} - \overline{q_c})^2}} \qquad (3)$$

Dans ces deux expressions, n représente la taille de la série, q_{oi} représente le débit observé pour le pas de temps i en m^3/s ; q_{ci}, le débit calculé pour le pas de temps i en m^3/s ; $\overline{q_0}$, le débit moyen observé en m^3/s ; $\overline{q}_c$, le débit moyen calculé en m^3/s.

2. Résultats et discussion

En modélisation par les réseaux de neurones, pour éviter un sur apprentissage (modélisation du brut), les résultats obtenus à partir des données réservées à l'apprentissage doivent être validés sur un nouveau jeu de données. Le tableau 2 présente les critères d'évaluation de la performance du modèle en fonction de quatre (4) architectures (2-3-1, 2-4-1, 2-5-1 et 2-6-1) au niveau du calage et au niveau de la validation.

Tableau 2: Critères d'évaluation de la performance du modèle de réseaux de neurones artificiels pour différentes architectures

			Modèles			
			2-3	2-4-	2-5	2-6-1
Critères d'éval	NASH	Calage	75,	74,1	73,(	74,21
		Validation	73,	74,6	74,(	73,75
	Coefficient corrélatio	Calage	95,	95,8	97,4	95,96
		Validation	98,	98,4	96,9	98,86

Au regard de ce tableau, toutes les architectures donnent de meilleurs critères de performance conformément aux critères d'évaluation de la performance d'un modèle qui doivent être supérieurs à 60% pour le critère de NASH et 80% pour le coefficient de corrélation. Toutefois en modélisation des RNA, plus le nombre de couches cachées est élevé plus le modèle devient complexe et instable [12]. Pour réduire ainsi cette complexité du modèle, il est nécessaire de faire le choix des modèles dont il y a moins de couches. De ce fait, le modèle le plus approprié dans le cadre de cette étude est le modèle d'architecture 2-3-1. Ainsi, les résultats de l'ensemble de calage et de validation seront donc présentés. La figure 3 présente respectivement les hydrogrammes et la corrélation entre les débits observés et les débits simulés par le modèle 2-3-1 au niveau du calage. Bien qu'il y ait quelques écarts, le modèle simule mieux les débits. En effet, des écarts sont constatés au niveau des hydrogrammes des débits observés et des débits simulés lors du calage du modèle (Figure 3). Toutefois, le coefficient de Nash (75,79%) montre que le modèle est performant et stable. La corrélation linéaire entre les débits observés et les débits simulés est forte avec un coefficient de corrélation de 95,64% au niveau du calage tel que présenté à la figure 3.

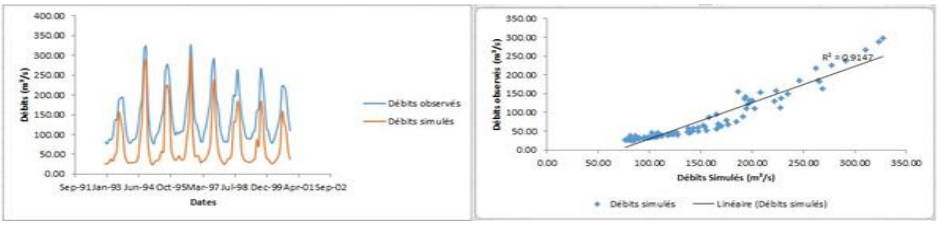


Figure 3:Hydrogrammes des crues et corrélation entre les débits observés et les débits simulés par l'architecture 2-3-1 au niveau du calage

La figure 4 présente respectivement les hydrogrammes de crue et la corrélation entre les débits observés et les débits simulés par le modèle 2-3-1 lors de la validation. Cette étape de la validation du modèle 2-3-1 présente des coefficients de Nash et de corrélation linéaire respectifs de 73,32% et 98,33%.

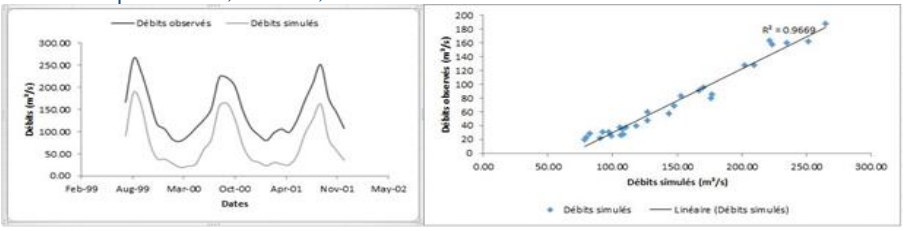


Figure 4:Hydrogrammes de crue et la corrélation entre les débits observés et les débits simulés par le modèle 2-3-1 au niveau de la validation

Les critères de Nash et le oefficient de corrélation permettent d'apprécier la fiabilité et la stabilité du modèle de RNA. En effet, lorsque que le critère de Nash est supérieur à 60% et le coefficient de corrélation linéaire est supérieur à 80%, le modèle peut être considéré comme performant et stable. Ainsi, l'analyse des résultats montre que pour trois neurones cachés, le modèle présente de bons critères de performance. Les travaux réalisés par [2] à la station de Bianouan sur la rivière Bia ont révélé cependant, que le modèle à quatre neurones cachés a donné également de résultats intéressants avec des critères de Nash de 68,37% et le coefficient de corrélation de 83,08% pour la validation. Cette différence de résultats pourrait s'expliquée par la densité de la série de données utilisées pour la modélisation. [2] ont utilisé une série de données de 26 ans tandis que dans cette étude la série de données est de 10 ans. Le modèle de réseaux de neurones développé avec les données de pluie moyenne, d'ETP calculée par la méthode de THORNTHWAITE et de débit sur la période de 1990 à 2001 a donné de bons résultats avec l'architecture 2-3-1. Ainsi, trois (3) neurones cachés sont nécessaires pour bien simuler les débits à la station hydrométrique d'Ity à partir de deux (2) entrées (pluie moyenne et ETP calculée par la méthode THORNTHWAITE). Les travaux de [13] cités par [2] ont montré qu'une formulation d'ETP faisant intervenir l'insolation et la température, utilisée avec la pluie moyenne simulerait mieux les débits. Des écarts sont cependant observés entre les débits observés et les débits simulés par l'architecture 2-3-1 du modèle de réseau de neurones artificiels au niveau de la

validation. Ces décalages peuvent s'expliquer par le fait que les RNA sont des modèles influencés par le nombre de variables d'entrées du modèle, la longueur de la série de données pour le calage et la qualité des données. En effet, bien que les deux (2) variables d'entrées (pluie moyenne et ETP) simulent bien les débits à la station d'Ity, les débits à cette station ne sont pas seulement influencés par la pluie et l'ETP. Selon [14] ; [15] et [2], la végétation, l'ordre du cours d'eau, la capacité de rétention en eau du sol, le relief et les autres pertes sont des facteurs qui influencent la transformation de la pluie en débit. Ainsi, [16] ont-ils montré qu'en augmentant le nombre de variables d'entrées d'un modèle de réseau de neurones artificiels de un (1) à trois (3) entrées, la performance du modèle s'améliore considérablement. Les résultats obtenus dans cette étude (modèle 2-3-1) comparés avec ceux obtenus (modèle 2-4-1) par [2] donnent des résultats sensiblement similaires. Dès lors, on pourrait dire que le nombre de neurones n'influence pas trop la performance du modèle à transformer la pluie en débit à comparer à la quantité des données, le nombre de données d'entrées dans le réseau.

Conclusion

Cette étude a permis d'établir un modèle pluie-débit à l'aide de réseau de neurone artificiel (RNA) (perceptron multicouche de type feedforwards) pour combler les lacunes dans les séries de débits de la station hydrométrique d'Ity sur le fleuve Cavally. Les résultats obtenus avec ce modèle de réseau de neurone artificiel montrent que l'architecture 2-3-1 donne des résultats satisfaisants avec au niveau du calage un critère de Nash de 75,79% et une forte corrélation entre débits observés et débits simulés de 95,64%, et au niveau de la validation un critère de Nash de 73,32% pour une corrélation entre débits observés et débits simulés de 98,33%. Ce modèle pourra aider en plus du comblement des lacunes au niveau des données de pluie et de débits, à l'évaluation des impacts des activités anthropiques sur le bassin versant du fleuve Cavally.

Références

[1] S. Araghinejad, M. Azmi, and M. Kholghi, 'Application of artificial neural network ensembles in probabilistic hydrological forecasting', *Journal of Hydrology*, 2011.

[2] K. L. Kouassi, K. M. Kouassi, K. S. Konan, N. H. Meledje, Y. B. Koffi, and J. Biémi, 'Modélisation Pluie-Débit à L'aide des Réseaux de Neurones Artificiels sur le Bassin Versant Transfrontalier de la Bia (Côte D'ivoire - Ghana)', *European Journal of Scientific Research*, vol. 109, no. 1, p. pp.133-140, 2013.

[3] ASCE, 'Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts', *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 115–123, 2000.

[4] Elcin Kentel, 'Estimation of river flow by artificial neural networks and identification of input vectors susceptible to producing unreliable flow estimates', *Journal of Hydrology*, vol. 375, no. 3–4, pp. 481–488, 2009.

[5] L. H. C. Chua and T. S. W. Wong, 'Improving event-based rainfall–runoff modeling using a combined artificial neural network–kinematic wave approach', *Journal of Hydrology*, vol. 390, no. 1–2, pp. 92–107, 2010.

[6] P. Coulibaly, F. Anctil, and B. Bobee, 'Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach', *Journal of Hydrology*, vol. 230, no. 3, pp. 244–257, 2000.

[7] ASCE, 'Articifial Neural Networks in Hydrology. II: Hydrological Applications', *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 5, no. 2, p. PP 124-137, 2000.

[8] J. Tricart *et al.*, 'Une monographie physique de la Côte-d'Ivoire', in *Annales de Géographie*, 1973, vol. 82, pp. 369–372.

[9] T. Özel and A. Nadgir, 'Prediction of flanck wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H-13 steel with chamfered and honed CBN tools', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, pp. 287–297, 2002.

[10] N. H. Mélèdje, 'Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux de sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé1', Doctorat unique, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2016.

[11] K. L. Kouassi, 'Hydrologie, Transport Solide et Modélisation de la Sédimentation dans les Lacs des Barrages Hydroélectriques de Côte d'Ivoire : Cas du Lac de Taabo', Thèse de doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2007.

[12] É. Larouche, *Exploration de différentes architectures de réseaux de neurones pour la prédiction de la glace atmosphérique sur les conducteurs des réseaux électriques*. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi, 2002.

[13] L. Oudin, 'Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant', *La houille blanche*, vol. 6, p. 8p, 2003.

[14] S. Mouelhi, 'Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier', Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Paris, France, 2003.

[15] Y. B. Koffi, 'Modélisation pluie-débit en région tropicale humide : Application des réseaux de neurones sur quatre stations hydrométriques du Bandama Blanc (Bada, Marabadiassa, Tortiya et Bou), Nord de la Côte d'Ivoire', Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2007.

[16] R. N. Randrianarivony, P. Lauret, Z. A. Randriamanantany, and J. C. Gatina, 'Modélisation du régime annuel des petites rivières en vue d'installation de microcentrales hydroélectriques', *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, vol. 5, no. 1, p. 11p, 2009.

Modélisation de la propagation des crues du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)

Lazare Kouakou KOUASSI[1], Alexis Loukou BROU[1], , Alex Zilé KOUADIO[1] , Séraphin Kouakou KONAN[1], Félix Koffi KONAN[1], Bamory KAMAGATE[2], Diakaria KONÉ[3]*
[1]Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire) ; (+225) 09 56 05 70 k_lazare@yahoo.fr ;
[2]Université Nangui Abrogoua, 08 BP 109 Abidjan 08 (Côte d'Ivoire) ; kambamory2@yahoo.fr ;
[3]Office National de l'Eau Potable (ONEP), Direction des Ressources en Eau, Abidjan, Côte d'Ivoire ; konediak@live.fr

Résumé

Les crues sont des phénomènes naturels aléatoires aux conséquences souvent désastreuses. En Côte d'Ivoire, face à la récurrence de ces événements, la compréhension et la prévision des crues représentent un moyen intéressant de prévention des risques d'inondation. Le fleuve Cavally, situé à la frontière entre la Côte d'Ivoire et le Libéria, traverse la zone d'exploitation de la société des mines d'Ity (SMI). Le Cavally présente beaucoup de méandres dans cette zone et le lit du cours d'eau est très perturbé par des orpailleurs clandestins. Dans le but d'étendre ses activités de part et d'autre du fleuve, la SMI envisage de couper l'un des principaux méandres et de construire un canal de dérivation pour dévier le fleuve ainsi qu'un pont et une digue pour faciliter les déplacements sur le site des travaux. Ces aménagements vont sans doute perturber le régime du Cavally dont les crues causent fréquemment des dégâts sur les activités agricoles des populations riveraines. Dans cette étude, un modèle 2D a été conçu afin de simuler l'écoulement du fleuve Cavally et sa plaine inondable dans les conditions initiales avant la réalisation des travaux. Ce modèle a été réalisé à partir des données historiques et des mesures de débits effectués durant trois mois pendant la période de crue et d'un modèle numérique d'élévation (MNE).

Mots clés : modèle de propagation de crues, Fleuve Cavally, modèle 2D, Côte d'Ivoire

Flood propagation Modeling of the Cavally River in the operating area of the Ity Mines Company (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)

Abstract

The floods are random natural phenomena with the often-disastrous consequences. In Côte d'Ivoire, face of the recurrence of these events, comprehension and prediction of the floods represent an interesting means of prevention of the risks of flood. The Cavally river, located at the border between the Côte d'Ivoire and Liberia, crosses the zone of exploitation of the company of the mines of Ity (SMI). Cavally presents many meanders in this zone and the bed of the river is very disturbed by clandestine gold washers. With an aim of extending its activities on both sides river, the SMI plans to cut one of the principal meanders and to build a diversion canal to deviate the river as well as a bridge and a dam to facilitate displacements on the building site. These installations undoubtedly will disturb the mode of Cavally whose floods frequently cause damage on the agricultural activities of the bordering populations. In this study, a model 2D was designed to simulate the flow of Cavally and it's easily flooded plain under the initial conditions before the realization of work. This model was carried out starting from the historical data and of measurements of flows carried out during three months for the period of raw and a digital elevation model (DEM).

Key Words: flood propagation modeling, Cavally River, 2D model, Côte d'Ivoire

Introduction

Les inondations causées par les crues constituent un phénomène courant et récurrent dans l'histoire de l'humanité. Néanmoins, depuis quelques années, ces phénomènes semblent survenir à un rythme accéléré et deviennent plus dévastateurs. Une connaissance précise de ces phénomènes aléatoires est nécessaire pour la prévention des risques [1]. Pour apporter des réponses précises à la compréhension des problèmes d'inondations, plusieurs études ont été déjà menées à travers différents modèles hydrologiques et hydrauliques [2]; [3]; [4] ; ; [5]; [6] ; [7] ; [8] et [9]. En Côte d'Ivoire, face à la récurrence de ces événements, la compréhension et la prévision des crues représentent un moyen intéressant de prévention des risques d'inondation. Cependant, la prévision des crues à travers des modèles facilement compréhensibles est actuellement très peu développée ; ce qui conduit à la non maîtrise de ces phénomènes tant en milieu urbain qu'en milieu rural. Il en résulte donc une méconnaissance des mécanismes de propagation des ondes de crues le long des principaux cours d'eau ivoiriens et un manque de suivi de l'évolution des crues aux conséquences souvent désastreuses. Par conséquent, la capacité des décideurs ivoiriens à répondre à ce type de catastrophe sur la base d'informations scientifiques fiables reste extrêmement limitée. Le fleuve Cavally, situé à la frontière entre la Côte d'Ivoire et le Libéria, traverse la zone d'exploitation de la société des mines d'Ity (SMI). Le Cavally présente beaucoup de méandres dans cette zone (figure 1) et le lit du cours d'eau est très perturbé par des orpailleurs clandestins. Dans le but d'étendre ses activités de part et d'autre du fleuve. La SMI envisage de couper l'un des principaux méandres et de construire un canal de dérivation pour dévier le fleuve ainsi qu'un pont et une digue pour faciliter les déplacements sur le site des travaux. Ces aménagements vont sans doute perturber le régime du Cavally dont les crues causent fréquemment des dégâts sur les activités agricoles des populations riveraines. Cette étude vise à simuler l'écoulement du fleuve Cavally et sa plaine inondable dans les conditions initiales avant la réalisation des travaux. La section du cours d'eau étudié est entre Ity et Floleu dans le département de Zouan-Hounien.

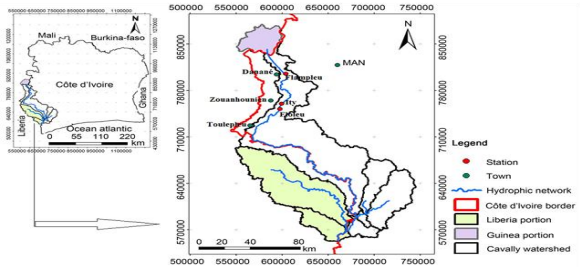


Figure 5: Localisation de la zone d'étude

1. Matériel et méthodes

1.1. Collecte de données

Les données utilisées pour cette étude sont issues des stations pluviométriques et hydrométriques se trouvant dans le bassin versant et les stations attenantes. Il s'agit des données historiques journalières de débits, de niveau d'eau et de pluies. Ces données ont servi à calculer les différentes périodes de retour qui ont été utilisées pour la modélisation des crues de période de retour 10, 20 et 100 ans (Tableau 1). Ces différentes crues ont été calculées à l'aide du logiciel HYFRAN suivant la loi de Weibull.

Tableau 3: Débits de crue en fonction des périodes

Période de retour	Débits (m^3/s)
10 ans	316
20 ans	334
100 ans	365

Un modèle numérique d'élévation (MNE) de 90 m de résolution a été utilisé pour la détermination des altitudes et les pentes à l'aide du logiciel ArcGIS 10.2.2 (http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1). Une image satellitaire de type LANDSAT L8 OLI_TIRS datant de la période de décembre 2015 à Février 2016 de résolution 30 m (http://earthexplorer.usgs.gov/wms/custom/0101605288603) a également été utilisée. Cette image a été utilisée pour la réalisation de la carte d'occupation du sol à l'aide du logiciel ENVI version4.7.

1.2. *Modélisation de la propagation des crues en 2D*

Les équations de Saint-Venant ont été utilisées pour la modélisation de la propagation des crues en 2D. Pour ce faire, une formulation sans terme temporel de ces équations a été établie et plusieurs schémas de résolution de grands systèmes linéaires ont été implémentés [10]. Ces équations sont les équations du mouvement fluide souvent utilisées pour la modélisation des ondes longues telles que les inondations et les ondes de tempête [11]. Il s'agit d'un ensemble d'équations différentielles partielles non linéaires, consistant en l'équation de continuité (équation 1) et l'équation des moments (équation 2), décrite dans le plan horizontal comme suit :

Equation de contiuité

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial hV_x}{\partial x}+\frac{\partial hV_y}{\partial y}=q \quad (1)$$

Equations des moments

$$\begin{cases} S_{fx}=S_{0x}-\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{V_x}{g}\cdot\frac{\partial V_x}{\partial x}-\frac{V_y}{g}\cdot\frac{\partial V_x}{\partial y}-\frac{1}{g}\cdot\frac{\partial V_x}{\partial t} \\ S_{fy}=S_{0y}-\frac{\partial h}{\partial y}-\frac{V_y}{g}\cdot\frac{\partial V_y}{\partial y}-\frac{V_x}{g}\cdot\frac{\partial V_y}{\partial x}-\frac{1}{g}\cdot\frac{\partial V_y}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

Avec h : profondeur ; V_x, Vy : vitesses suivant les directions x et y ; S_{fx}, S_{fy} : rugosités ; S_{ox}, S_{oy} : pentes, g : accélération de la pesanteur, q : débit latéral, t : temps

1.3. Calibration du modèle 2D

Le logiciel HEC-RAS version 5.03 a été utilisé pour la modélisation de la propagation des cures en 2D. Le maillage de la zone inondable donne une superficie de 38,69 km^2 pour une maille ayant 30 m sur 30 m, soit un total de 42987 mailles. La simulation a été effectuée en écoulement permanent à partir des périodes de retour de 10, 20, et 100 ans avec des débits respectifs de 316, 334 et 365 m^3/s. La pente moyenne utilisée pour la condition aux limites en aval est de 0,000194 m/m. Le coefficient de Manning choisi pour la calibration est de 0,066. Cela se justifie par le fait que dans cette section du cours d'eau, des zones d'orpaillage ont été observées dans le lit du fleuve Cavally. Cette activité modifie considérablement la rugosité du fleuve car le lit est constamment perturbé. Le choix du coefficient de Manning est fondé sur les travaux de Chow[12]. Les sorties du modèle sont les profondeurs de l'étendue de l'inondation, les vitesses de propagation des crues et les altitudes de la surface libre du cours d'eau.

La validation du modèle passe par la vérification des résultats de la simulation à travers une comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs observées. Si les erreurs et le pourcentage d'erreur sont relativement faibles tendant vers zéro alors dans ce cas le modèle est ajusté [13].

2. Résultats et discussion

2.1. *Résultats*

Les résultats obtenus dans cette étude seront présentés sous forme de cartes et de tableaux. Ces résultats concernent donc uniquement les altitudes de la surface libre de l'eau issues des différentes périodes de retour. La figure 2 ci-dessous présente ainsi les cartes des altitudes de la surface libre du cours d'eau par rapport aux différentes périodes de retour montrant les étendues des différentes crues. Ces cartes montrent que les altitudes de surface libre de l'eau les plus élevées sont dans la partie amont du tronçon du fleuve Cavally où le maximum peut atteindre environ 265 m. L'altitude moyenne de la surface libre du cours d'eau pour chaque période de retour respective (10, 20 et 100 ans) est de 260,875 ± 0,831 m, 260,905 ± 0,807 m et 260,918 ± 0,777 m (tableau 2). Les surfaces inondées sont respectivement de 18,15 ; 18,81 et 21,74 km^2 soit 46,91 ; 56,19 ; 48,62% pour les crues de 10, 20 et 100 ans.

Tableau 4: Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre du cours d'eau concernant les différentes périodes de retour

Periodes de retour	*Minimum (m)*	*Maximum (m)*	*Moyenne (m)*	*Ecart type (m)*
10 ans	258,003	264,868	260,875	0,831
20 ans	258,782	265,102	260,905	0,807
100 ans	259,009	265,664	260,918	0,777

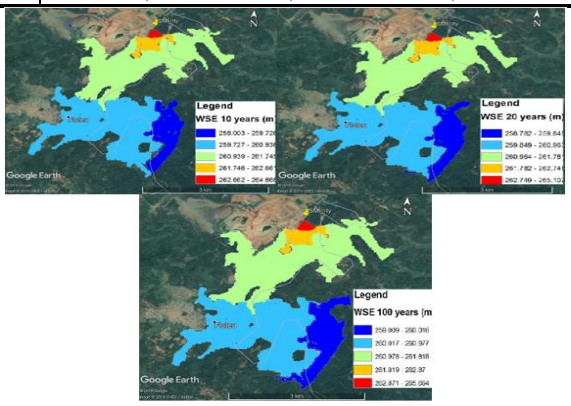


Figure 6 : Cartographie des altitudes de la surface libre en fonction des périodes de retour

Le tableau 3 ci-dessous présente les erreurs et le pourcentage d'erreurs issus des calculs itératifs effectués par le modèle numérique. Au regard de ce tableau, les pourcentages d'erreurs convergent bien vers zéro, ce qui montre que le modèle a bien simulé les différentes crues.

Tableau 5: Erreurs et pourcentage issus des calculs itératifs effectués par le modèle HEC-RAS

Periodes de retour	Erreurs	% erreurs
10 ans	1,569	0,000442
20 ans	0,5137	0,000137
100 ans	0,3190	0,000078

2.2. *Discussion*

Les altitudes de la surface libre du cours d'eau varient très peu à quelques centimètres près au niveau de chaque débit donné. L'étendue des plaines inondables varie avec des altitudes de surface libre de l'eau de 260,964 m à 265,664 m sur des dizaines de kilomètres aux voisinages du lit mineur du fleuve Cavally. Les zones situées dans un rayon d'environ 5 km de la station d'Ity sont les plus exposées avec un niveau d'eau de plus de 265,96 m contrairement à celles situées en aval dont les niveaux d'eau maximum varient de 258,78 m à 259,85 m. Cependant il ne faudrait pas occulter la pratique intense de l'orpaillage clandestin dans le lit du cours d'eau dans cette zone qui modifie considérablement la rugosité du lit du fleuve car ce lit fortement perturbé. Les résultats obtenus dans cette étude sont confirmés par les travaux de Baptista [2] et par ceux d'Archambeau [10] dans le même contexte de modélisation de la propagation des ondes de crue. Selon ces auteurs, toutes modifications du sol (déboisement, pratiques agricoles, imperméabilisation) réduisent la pénétration de l'eau dans celui-ci, favorise le ruissellement et donc une concentration des eaux, conduisant à augmenter les périmètres immergés donc une grande surface inondable. Des études récentes de [14]–[16] ont également confirmé que les inondations sont plus importantes dans les zones de décharge et au niveau des surfaces suffisamment anthropisées. Les zones inondées sont respectivement de 21,74 km^2, 18,81 km^2 et 18,15 km^2 soit de 56,19 ; 48,62 et 46,91% de la zone inondable pour les inondations de 100, 20 et 10 ans.

Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'étendue de la propagation des ondes des crues ainsi que la localisation des zones vulnérables à l'inondation. Aussi, convient-il de rappeler que les zones inondables les plus exposées sont observées au voisinage de la Société des Mines d'Ity c'est-à-dire dans la partie amont (Ity) où les pressions anthropiques sont plus importantes. Les résultats de cette étude pourraient être utilisés comme un outil d'aide à la décision dans la gestion des risques d'inondation. Cependant, une modélisation 1D-2D serait intéressante en écoulement non permanent afin de mieux comprendre le passage du débordement du lit du fleuve à l'inondation des zones attenantes au cours d'eau.

Remerciements :

Cette étude a été rendu possible grâce aux concours de la Société des Mines d'Ity (SMI) qui a financé la collecte des données sur le terrain.

Références

[1] A. T. Ngo, 'Evaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (centre Viêt-Nam)', Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Orléand, France, 2014.
[2] M. Baptista, 'Contribution à l'étude de la propagation de crues en hydrologie', Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1990.
[3] M. Tangara, 'Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global', Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris, France, 2005.
[4] C. W. Dawson, R. J. Abrahart, A. Y. Shamseldin, and R. L. Wilby, 'Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks', *Journal of Hydrology*, vol. 319, no. 1–4, pp. 391-409pp, 2006.
[5] J. Barredo, 'Major flood disaster in Europe: 1950-2005', *Natural Hazards*, vol. 42, no. 1, pp. 125–148, 2007.
[6] R. Champredonde, 'Modélisation, Spatialisation de l'étendue d'une crue, Applications au bassin de la Lèze', Institut de Mécanique des Fluide de Toulouse, Toulouse, Rapport de stage master 1, 2008.
[7] M. Borga, E. N. Anagnostou, G. Blöschl, and J.-D. Creutin, 'Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls', *Journal of Hydrology*, vol. 394, no. 1–2, pp. 1–3, 2010.
[8] E. Hyung-Il, A. Vasan, and Slobodan P. Simonovic, 'Integrated Reservoir Management System for Flood Risk Assessment Under Climate Change', *Water Resources Management*, vol. 26, no. 13, pp. 3785–3802, Oct. 2012.
[9] K. Karagiorgos, T. Thaler, J. Hübl, F. Maris, and S. Fuchs, 'Multi-vulnerability analysis for flash flood risk management', *Natural Hazards*, vol. 82, no. 1, pp. 63–87, 2016.
[10] P. Archambeau, 'Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations', Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 2006.
[11] L. Kasuri, 'Modelling for Ecosystem Restoration Hydrodynamic Modelling of the Yolo Bypass Using HEC-RAS', Mémoire Master, UNIVERSITY OF CALIFORNIA DAVIS, USA, 2014.
[12] V. Chow, *Open Channel Hydraulics*, NY. 1959.
[13] USACE, *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*, US Army Corp of Engineering., vol. Version 4.1. 2010.
[14] A. Gharagozlou, H. Nazari, and M. Seddighi, 'Spatial Analysis for Flood Control by Using Environmental Modeling', *Journal of Geographic Information System*, vol. 03, no. 04, pp. 367–372, 2011.
[15] S. Boudjelal, A. Fourar, and F. Merrouchi, 'Modélisation en 2D des écoulements brusquement instationnaires dans un canal prismatique à surfaface libre', *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*, no. 22, pp. 7–13, 2015.
[16] W. Bouchenafa, 'Modélisation des inondations en tunnel en cas de crue de la Seine pour le Plan de Protection des Risques Inondations de la RATP (PPRI)', Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2017.

RESUME

Un modèle numérique a été utilisé pour simuler la dynamique hydrologique du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (SMI) à Zouan-Hounien ; à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Dans une première approche, la variabilité hydro climatique du bassin versant du Cavally a été étudiée. Les résultats révèlent qu'une variabilité interannuelle globalement excédentaire est observée pour toutes les stations : Danané, Zouan-Hounien, SMI-Ity et Sipilou. Cependant, quelques années après la grande rupture pluviométrique de 1970, on assiste à une période de sècheresse intense d'environ six (6) années pour les stations de Danané, Zouan-Hounien et SMI-Ity. L'analyse des extrêmes hydrologique et pluviométrique, a mis en évidence que la loi de Weibull à trois (3) paramètres s'ajuste le mieux aux modules pluviométriques et hydrologiques du bassin versant du fleuve Cavally. Dans la deuxième approche, l'utilisation conjointe des outils de télédétection et des SIG a permis de réaliser la carte de suivi interannuel du cours d'eau. Il ressort que la morphologie du Cavally a subi de réelles perturbations à partir de 2011. Sur toute la zone d'étude, des traces d'orpailleurs sont remarquées ; particulièrement sur la portion du cours d'eau comprise entre la SMI et le village de Floleu. La troisième approche a concerné la réalisation d'un modèle hydraulique pour dimensionner quatre (4) canaux de dérivation (Bakatouo, Walter, Daapleu et Colline Sud) capables d'assurer un fonctionnement hydraulique similaire aux conditions initiales (niveaux d'eau, débit, vitesse) du Cavally. Le dimensionnement a été effectué grâce à la méthode du modèle rugueux de référence (MMR). Les conditions hydrauliques (niveaux d'eau, débit, vitesse) dans ces canaux après la dérivation du fleuve Cavally sont similaires aux écoulements naturels de ce cours d'eau. Dans cette dernière approche qui concerne la simulation de la propagation des crues avant et après l'intégration des ouvrages hydrauliques, il a été démontré par les différents modèles numériques que la construction des ouvrages hydrauliques sur le fleuve Cavally n'a pas trop d'influence sur son fonctionnement hydrodynamique. Toutefois, les activités d'orpaillage effectuées dans le fleuve perturbent considérablement la morphologie du lit du fleuve et donc les paramètres hydrodynamiques. Ces contraintes nous interpellent d'ajuster régulièrement les modèles dans le but d'approfondir la compréhension du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally. Ainsi, le suivi du fonctionnement hydrologique du fleuve Cavally nécessite-t-il une mise à jour des modèles par l'actualisation des données sur la morphologie et la granulométrie du lit de ce cours d'eau.

Mots clés : modélisation, hydrologie, hydraulique, inondation, canal de dérivation, fleuve Cavally, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

A numerical model was used to simulate the hydrological dynamics of the Cavally River in the operating area of the Société des Mines d'Ity (SMI) in Zouan-Hounien; in western Côte d'Ivoire. In a first approach, the hydro-climatic variability of the Cavally watershed was studied. The results show that an overall excess interannual variability is observed for all stations: Danané, Zouan-Hounien, SMI-Ity and Sipilou. However, a few years after the major rainfall failure in 1970, there was an intense drought period of about six (6) years for the Danané, Zouan-Hounien and SMI-Ity stations. The analysis of the hydrological and rainfall extremes revealed that the three-parameter Weibull's law best fits the rainfall and hydrological modules of the Cavally River watershed. In the second approach, the joint use of remote sensing tools and GIS made it possible to produce the interannual monitoring map of the watercourse. It appears that the morphology of the Cavally has suffered real disruptions since 2011. Throughout the study area, traces of gold panners are noted; particularly on the portion of the stream between the MCH and the village of Floleu. The third approach involved the realization of a hydraulic model to design four (4) diversion channels (Bakatouo, Walter, Daapleu and Colline Sud) capable to ensure hydraulic operation similar to the initial conditions (water levels, flow, velocity) of the Cavally. The design was carried out using the reference rough model method (MMR). Hydraulic conditions (water levels, flow, velocity) in these canals after diversion are similar to the natural flow of the watercourse. In this last approach, which concerns the simulation of flood propagation before and after the integration of hydraulic structures, it has been demonstrated by the various numerical models that the construction of hydraulic structures on the Cavally River does not have much influence on its hydrodynamic functioning. However, gold panning activities in the river significantly affect the morphology of the riverbed and thus hydrodynamic parameters. These constraints require us to regularly adjust the models in order to deepen our understanding of the hydrological functioning of the Cavally River. Thus, monitoring the hydrological functioning of the Cavally River requires updating the models by updating data on the morphology and granulometry of the bed of this watercourse.

Keywords: modeling, hydrology, hydraulic, flood, diversion channel, Cavally River, Côte d'Ivoire.