

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix- Travail- Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES TECHNOLOGIES ET
GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
GEOSCIENCE ET APPLICATIONS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GÉOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET APPLICATIONS
LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SURPERFICIAL FORMATIONS AND APPLICATIONS

**MODELISATION DES INTERACTIONS EAUX DE SURFACE-EAUX
SOUTERRAINES ET IMPACTS SUR LES RISQUES D'INONDATION DANS LA
PARTIE AMONT DU BASSIN VERSANT DE LA MEFOU (SUD-CAMEROUN)**

Thèse présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat Ph.D en Sciences de la Terre

Option : Sols-Eau-Sciences Géotechniques

Spécialité : Hydrologie/Hydrogéologie-Environnement

Par

NSANGOU Daouda

Matricule : 11X0358

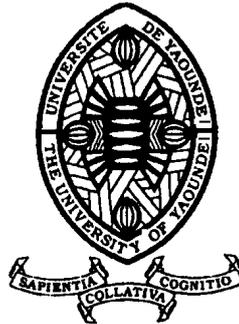
MASTER en Sciences de la Terre

Sous la direction de

NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy
Professeur

Université de Yaoundé I

Année académique 2022-2023



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace- Work- Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE TECHNOLOGIES AND
GEOSCIENCES

RESEARCH AND TRAINING UNIT
FOR GEOSCIENCES AND
APPLICATIONS



REPUBLIQUE DU CAMEROUN

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

**CENTRE DE RECHERCHE ET
DE FORMATION DOCTORALE
EN SCIENCES TECHNOLOGIE
ET GÉOSCIENCES**



REPUBLIC OF CAMEROON

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

**POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES**

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/PhD

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Option : Sols-Eau-Sciences Géotechniques

Nom et Prénoms du candidat : NSANGOU Daouda

Matricule : 11X0358

Titre de la thèse : « Modélisation des interactions eaux de surface-eaux souterraines et impacts sur les risques d'inondation dans la partie amont du bassin versant de la Mefou (Sud-Cameroun) »

Date de soutenance : Vendredi, le 21 juillet 2023.

Nous soussignés, membres du jury de soutenance de la thèse de Doctorat PhD, attestons que le candidat a effectué toutes les corrections, conformément aux observations formulées lors de la soutenance.

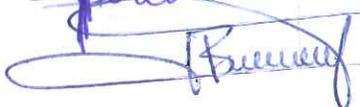
En foi de quoi, la présente **Attestation de correction** lui est délivrée, pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé, le... 25.07.2023

Le Président du Jury


Dr. NDOU GUY Paul-André

Les Membres

 HP. Tchouankoue
 BISSO D.

*A ma famille et plus particulièrement à
mon feu père NSANGO Abdoussalamou et
à ma feu mère MFANGAM Zénabou*

REMERCIEMENTS

Parvenu au terme de ce travail, je remercie le Tout Puissant, le miséricordieux, qui par sa Grâce, m'a permis d'être au bout de cette longue aventure. Mes remerciements sont également formulés à l'endroit des personnes et institutions qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je commencerai par le Pr NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy, Directeur de la présente thèse. Il a répondu avec spontanéité à ma sollicitation de travailler avec lui dans le cadre d'une thèse et m'a lancé sur la thématique « Modélisation des interactions eaux de surface-eaux souterraines et impacts sur les risques d'inondation dans le Bassin amont de la Mefou (Sud-Cameroun) ». J'ai beaucoup appris à vos côtés à travers votre expérience sur le terrain, mais aussi, votre rigueur scientifique et votre souci du travail bien fait. Je vous exprime mes sincères remerciements, ma profonde reconnaissance et surtout mon admiration. Que le tout puissant vous accorde une longue vie.

Mes sincères remerciements vont également à l'endroit du Chef de Département des Sciences de la Terre, le Pr NDJIGUI Paul-Désiré qui a su m'encourager durant ce travail. Il m'a toujours posé la question de savoir : « Mon fils ça va ? » à chaque fois que je le rencontrais. Il n'est seulement pas le Chef de département mais un père car, il nous a toujours donné des conseils que ce soit sur le plan académique que sur la vie sociale.

Mes remerciements s'adressent à tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I pour leurs enseignements, leurs multiples conseils et encouragements.

J'exprime ma profonde gratitude au Pr DZANA Jean Guy et, aux Drs KPOUMIÉ Amidou et MFONKA Zakari pour leur grande disponibilité et accompagnement scientifique durant toute cette thèse. Vos précieux conseils et vos encouragements m'ont été d'une grande utilité pour mener à bout ce travail.

Je remercie M. Willy Franck SOB, Directeur Général de SOGEFI pour m'avoir accepté dans sa structure où j'ai par ailleurs bénéficié de nombreuses formations dans le domaine de la modélisation. Je pense également aux Docteurs VANDERVAERE Jean-Pierre de l'IGE à l'Université de Grenoble Alpes, BRAUN Jean Jacques de l'IRD, JOURDAN Camille de l'Université de Montpellier et FLUIXÀ Javier du CREALP en Suisse pour leur franche collaboration scientifique.

Je n'oublierai pas Dr Maïmounatou Epse SOUMOU pour son implication dans l'aboutissement de ce travail.

Mes reconnaissances vont à l'endroit du Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé

I, du Centre de Recherche sur l'Eau et le Changement Climatique (CRECC) ex CRH de l'IRGM, de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), du projet ORE-BVET devenu SNO M-TROPICS financé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) et du LMI DYCOFAC de l'Institut National de Recherche pour le Développement (IRD) pour leurs précieuses aides.

J'exprime ma profonde gratitude envers mes aînés, camarades de laboratoire et ami(e)s. Je pense particulièrement aux Docteurs FOUPE TAKOUNJOU Alain, MOUNCHEROU Oumar Farouk, BON André Firmin, RAKOTONDRABÉ Felaniaina, MAMA Anselme Crepin, KOUASSY KALÉDJÉ Paulin Sainclair, EBODE Valentin Brice, EKOA Armel, FOSSI Donald Herman ; Messieurs : MOULIOM GBETKOM Alfred, MFOCHIVÉ Omar Farouk, NGOUH Abdou Nasser, MOUNKPOUNDAP Dalouta, NGANTCHA YENDE Chouaib, ZOBO MBELE Henri, NGOUH NKOUANDOU Hamad Choumous ; Mesdames BELLA ATANGANA Sorella, NGO BILLONG Totencine, ATOBA Audrey et NAP NJIEMESSA Fahtimatou Nounou.

Je tiens à remercier ma grande mère et oncle NJIFON MOLUH Hassan et ses épouses pour leurs conseils et soutiens multiformes dans l'accomplissement de ce travail. Je pense aussi à mon oncle NJOYA Aboubakar et ses épouses, mon oncle NDAM Ismaël et son épouse KETOU NJIKAM Fatimatou, mon oncle FIFEN Housseni et son épouse NSANGOU NZIE Nadia Leila, mon oncle MOLUH Salif Parfait et son épouse qui ont su m'encourager durant ces dernières années, merci pour l'assistance.

J'adresse aussi mes remerciements à mon grand frère MBOUANGOUERE Ousmanou et son épouse pour leurs soutiens inconditionnels.

Ma reconnaissance va à l'endroit de ma sœur aînée MBENJIKOUE NSANGOU Mariatou et son époux, mes cadets MOUN Mohamed Awelou, MOLUH NSANGOU Hassan et NJOYA Yacouba, sans oublier tous mes neveux et nièces.

Je voudrais enfin garder une pensée pieuse pour des personnes très chères que sont : mes grands-parents de regrettés mémoires ; il s'agit des feus Mounbagna Oumarou et MOLUH Mama, et, des feus Adjas YOH Joueretou et NTENTIE Chetou.

TABLE DE MATIERES

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DE MATIERES	iv
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES ANNEXES	xvii
RESUME	xviii
ABSTRACT	xix
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE I : MILIEU NATUREL DE LA ZONE D'ETUDE ET TRAVAUX

ANTERIEURS	7
INTRODUCTION	8
I.1. CADRE BIOPHYSIQUE ET HUMAIN DE LA ZONE D'ETUDE	8
I.1.1. Cadre biophysique	8
I.1.1.1. Situation géographique et administrative	8
I.1.1.2. Climat	9
I.1.1.3. Végétation.....	10
I.1.1.4. Orographie	12
I.1.1.5. Hydrographie	13
I.1.1.6. Caractéristiques géologiques	15
I.1.2. Cadre humain et activités socioéconomiques	21
I.1.2.1. Population et urbanisation	21
I.1.2.2. Activités socioéconomiques	22
I.2. TRAVAUX ANTERIEURS	23
I.2.1. Réponse hydrologique et types d'écoulements.....	23
I.2.1.1. Définition.....	23
I.2.1.2. Analyse des hydrogrammes et identification des types d'écoulement	24
I.2.1.3. Découpage de l'hydrogramme de crue et volumes écoulés par chaque réservoir	26
I.2.1.4. Quelques travaux antérieurs effectués en hydrologie au Cameroun	28
I.2.2. Modélisation en sciences hydrologiques	28
I.2.2.1. Généralités	28
I.2.2.2. Historique de la modélisation	29
I.2.2.3. Typologie des modèles	30

I.2.2.4. Données de base pour la modélisation.....	31
I.2.2.5. Domaines d'application des modèles dans les sciences hydrologiques	32
I.2.2.6. Quelques modèles appliqués au Cameroun	32
I.2.3. Risques hydro-climatiques.....	33
I.2.3.1. Généralités	33
I.2.3.2. Risques hydro-climatiques dans le monde	33
I.2.3.3. Typologie des inondations	34
I.2.3.4. Risques d'inondation au Cameroun.....	34
I.2.3.5. Cartographie des risques d'inondation	35
CONCLUSION.....	38

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES..... 39

INTRODUCTION	40
II.1. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ET CHOIX DU SITE D'ETUDE.....	40
II.1.1. Recherche bibliographique.....	40
II.1.2. Critères de choix du site d'étude : la partie amont du bassin versant de la Mefou à Nsimalen (BVAM).....	40
II.2. TRAVAUX DE TERRAIN.....	41
II.2.1. Reconnaissance du site d'étude : le BVAM.....	41
II.2.2. Description du site d'étude.....	41
II.2.3. Choix, réhabilitation/installation et description des stations hydro-climatiques.....	44
II.2.3.1. Stations climatiques.....	44
II.2.3.2. Stations hydrométriques	45
II.2.4. Collecte des données primaires	47
II.2.4.1. Paramètres climatiques.....	47
II.2.4.2. Paramètres hydrométriques	47
II.2.4.3. Inventaire des zones inondables dans la zone d'étude	47
II.2.5. Collecte des données secondaires.....	48
II.2.5.1. Collecte de données satellitaires.....	48
II.2.5.2. Collecte de paramètres climatiques	49
II.2.5.3. Acquisition de paramètres hydrométriques.....	51
II.2.5.4. Collecte de paramètres hydrodynamiques.....	51
II.3. TRAVAUX EN LABORATOIRE.....	51
II.3.1. Dépouillement des paramètres hydrométriques	51
II.3.2. Critique et validité des données hydro-pluviométriques	52
II.3.3. Extraction des séries chronologiques à analyser	52
II.3.3.1. Pluies journalières	53

II.3.3.2. Débits journaliers	53
II.3.4. Traitements statistiques des paramètres hydro-climatiques	54
II.3.4.1. Méthodes d'étude de la variabilité des séries	54
II.3.4.2. Méthodes de détection de changement dans les séries	55
II.3.4.3. Méthodes d'analyse fréquentielle des séries	58
II.3.5. Méthodes d'étude des basses eaux (étiages) et des hautes eaux (crues)	59
II.3.6. Séparation des hydrogrammes annuels	60
II.3.7. Cartographie de l'occupation du sol	61
II.3.7.1. Prétraitement des images	62
II.3.7.2. Affinage spectral	62
II.3.7.3. Suppression des bruits	63
II.3.7.4. Analyse en composante principale (ACP)	63
II.3.7.5. Classification	63
II.3.7.6. Évaluation de la précision	64
II.3.7.7. Détection des changements	64
II.3.8. Méthode de modélisation des interactions ‘eaux de surface-eaux souterraines’	65
II.3.9. Modélisation des risques d'inondation	65
II.3.9.1. Justification et choix de l'approche de modélisation	65
II.3.9.2. Procédure de modélisation	66
II.3.9.3. Identification des paramètres d'inondation	66
II.3.9.4. Cartographie et reclassification des paramètres du modèle	67
II.3.9.5. Analyse par paire des critères d'appréciation	72
II.3.9.6. Analyse Hiérarchique des Processus (AHP)	72
II.3.9.7. Cartographie de la susceptibilité aux inondations	73
II.3.9.8. Validation de la carte de susceptibilité aux inondations	74
CONCLUSION	75

CHAPITRE III : RESULTATS..... 76

INTRODUCTION	77
III.1. DOMAINES DE VARIATIONS DES PLUIES DANS LE BVAM A NSIMALEN	77
III.1.1. Pluies journalières	77
III.1.1.1. Nombre de jours de pluies par an	77
III.1.1.2. Fréquences des classes de hauteurs de pluies journalières	78
III.1.1.3. Pluies journalières maximales	79
III.1.2. Pluies mensuelles et saisonnières	81
III.1.2.1. Domaine de variations des pluies mensuelles et de pluies saisonnières	81
III.1.2.2. Occurrences d'apparitions des hauteurs de pluies mensuelles et saisonnières	81

III.1.3. Pluies annuelles.....	84
III.1.3.1. Domaine de variations des pluies annuelles	84
III.1.3.2. Occurrences d'apparitions des hauteurs de pluies annuelles en années sèches et humides	85
III.2. FLUCTUATIONS DES CARACTERISTIQUES HYDROMETRIQUES DANS LE BVAM À NSIMALEN	85
III.2.1. Débits journaliers et débits caractéristiques.....	85
III.2.2. Débits mensuels et saisonniers.....	86
III.2.3. Débits annuels	87
III.3. BILAN HYDROLOGIQUE DU BVAM À NSIMALEN	89
III.4. DYNAMIQUES DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BVAM À NSIMALEN	90
III.4.1. Validation des types d'occupation du sol	90
III.4.2. Distribution spatiale des types d'occupation du sol.....	91
III.4.2.1. Etat de l'occupation du sol en 1988	91
III.4.2.2. Etat de l'occupation du sol en 2000	91
III.4.2.3. Etat de l'occupation du sol en 2020	92
III.4.3. Changement des types d'occupation de sol	92
III.4.3.1. Changement de l'occupation du sol entre 1988-2000.....	92
III.4.3.2. Changement de l'occupation du sol entre 2000-2020.....	94
III.4.3.3. Changement de l'occupation du sol entre 1988-2020.....	94
CONCLUSION.....	94
CHAPITRE IV : INTERPRETATIONS ET DISCUSSION	96
INTRODUCTION	97
IV.1. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE DANS LE BVAM À NSIMALEN A DIFFERENTES ECHELLES DE TEMPS.....	97
IV.1.1. Echelle journalière	97
IV.1.1.1. Nombre de jours de pluies	97
IV.1.1.2. Classes de hauteurs de pluies journalières	98
IV.1.1.3. Pluies journalières maximales (pluies extrêmes).....	100
IV.1.2. Echelle mensuelle	101
IV.1.3. Echelle saisonnière	103
IV.1.4. Echelle annuelle	104
IV.2. ANALYSE DE LA FLUCTUATION DES DEBITS DE LA MEFOU À NSIMALEN A DIFFERENTES ECHELLES TEMPORELLES	108
IV.2.1. Echelle journalière	108
IV.2.2. Echelle mensuelle	108

IV.2.3. Echelle saisonnière	112
IV.2.4. Echelle annuelle	112
IV.3. RELATIONS PLUIES-DÉBITS DANS LE BVAM.....	114
IV.3.1. Pluies journalières-débits journaliers.....	114
IV.3.2. Pluies mensuelles-débits mensuels	114
IV.3.3. Pluies annuelles-débits annuels	116
IV.3.4. Analyse des hydrogrammes annuels et estimation des écoulements.....	117
IV.3.4.1. Etude des étiages et des volumes d'eau emmagasinés par l'aquifère.....	117
IV.3.4.2. Etude des hautes eaux	118
IV.3.4.3. Estimation des écoulements.....	120
IV.4. RELATION ENTRE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL ET LES ÉCOULEMENTS	123
IV.5. PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX INFLUENÇANT LES INTERACTIONS EAUX DE SURFACE-EAUX SOUTERRAINES ET LES RISQUES D'INONDATION DANS LE BVAN	124
IV.5.1. Relations pluies-niveaux statiques.....	124
IV.5.2. Relations cours d'eau-niveaux piézométriques	125
IV.5.3. Relation entre les systèmes pluies-cours d'eau et puits	126
IV.5.4. Modèle conceptuel des interactions eaux de surface-eaux souterraines dans le BVAM	128
IV.6. MODÈLE CONCEPTUEL DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX INONDATIONS DANS LA PARTIE URBANISÉE DU BASSIN VERSANT DE LA MEFOU	130
IV.6.1. Multi-influences des facteurs sur la susceptibilité aux inondations	130
IV.6.2. Analyse hiérarchique des processus (AHP).....	135
IV.6.3. Carte de susceptibilité aux inondations	136
IV.6.4. Validation.....	139
IV.6.5. Limites de la méthodologie de modélisation	141
CONCLUSION.....	142
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	144
REFERENCES.....	148
ANNEXES.....	168

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

ACP : Analyse en Composante Principale

AHP : Analyse Hiérarchique des Processus

AUC : Area Under the Curve

BFI : Base Flows Index

BT : Buishand Test

BUCREP : Bureau Central de Recherche et d'Etude de la Population

BVAM : Partie Amont du Bassin Versant de la Mefou

BVM : Bassin Versant de la Mefou

CARFAD : Centre Africain de Recherches Forestières Appliquées et de Développement

CGRC : Carte Géologique de Reconnaissance du Cameroun

CRECC : Centre de Recherche sur l'Eau et le Changement Climatique

CRED : Center for Research on the Epidemiology of Disasters

CUY : Communauté Urbaine de Yaoundé

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

DPC : Direction de la Protection Civile

ENVI : ENvironment for Visualizing Images

ETCCDI : Expert Team on Climate Change Detection an Indices

FHI : Flood Hazard Index

INC : Institut National de la Cartographie

IRGM : Institut de Recherche Géologique et Minière

LGIA : Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie

MINAT : Ministère de l'Administration Territoriale

MINEPDED : Ministère de l'Environnement, de la protection de la Nature et du Développement Durable

MINRESI : Ministère de la Recherche Scientifique et de l'Innovation

MINTRANS : Ministère des Transports

OS : Occupation du Sol

PADY : Projet d'Assainissement De Yaoundé

RI : Indice d'incohérence Aléatoire

SIG : Système d'Information Géographique

SNHT : Test Standard Normale d'Homogénéité

TWI : Topographical Wetness Index

UNDESA : United Nations Department of Economic and Social Affairs

USGS : United States Geological Survey

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques climatiques de la station de Mvan aéroport de 1964 à 2020.....	9
Tableau 2 : Caractéristiques physiographiques du bassin versant de la Mefou à Nsimalen (BVAM), du sous bassin versant du Mfoundi et des affluents du Mfoundi (Rive droite et rive gauche).....	43
Tableau 3 : Stations météorologiques et pluviométriques identifiées et/ou installées dans le BVAM	45
Tableau 4 : Stations hydrométriques inventoriées et réhabilitées dans le BVAM	47
Tableau 5 : Paramètres et résultats des modèles de séparation du débit de base pour les BV de Tooma et de la Mefou.....	61
Tableau 6 : Échelle d'évaluation des différentes classes de paramètres relatifs à la susceptibilité aux risques d'inondation	71
Tableau 7 : Échelle d'importance relative de Saaty	73
Tableau 8 : Valeur de l'indice d'incohérence aléatoire (RI).....	73
Tableau 9 : Domaine de variations de hauteurs de pluies journalières maximales par an, du nombre de jours de pluies par an et des classes de hauteurs de pluies journalières de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen	80
Tableau 10 : Quantile des hauteurs de pluies journalières maximales par an, du nombre de jours de pluies par an, des classes de hauteurs de pluies journalières et des pluies maximales dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020	80
Tableau 11 : Distributions des pluies mensuelles dans le bassin versant amont de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2020	83
Tableau 12 : Distributions des hauteurs de pluies annuelles et saisonnières dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020	83
Tableau 13 : Quantiles des pluies mensuelles du bassin versant amont de la Mefou à Nsimalen ...	84
Tableau 14 : Quantiles des pluies annuelles et saisonnières du BVAM à Nsimalen	84
Tableau 15 : Domaine de variations des débits caractéristiques de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019	86
Tableau 16 : Domaine de variations mensuelles des débits liquides de la Mefou à Nsimalen entre 1964 à 2019.....	88
Tableau 17 : Distributions annuelle et saisonnière des débits liquides de la Mefou à Nsimalen (1964-2019)	88
Tableau 18 : Termes du bilan hydrologique du BVAM à Nsimalen de 1964 à 2019	90

Tableau 19 : Matrice de confusion des classes d'occupation du sol du BVAM à Nsimalen en 1988	90
Tableau 20 : Matrice de confusion des classes d'occupation du sol du BVAM à Nsimalen en 2000	91
Tableau 21 : Matrice de confusion des classes d'occupation du sol du BVAM à Nsimalen en 2020	91
Tableau 22 : Distribution spatiale des types d'occupation du sol (OS) durant les années 1988, 2000 et 2020 dans le BVAM à Nsimalen	92
Tableau 23 : Evaluation du changement de l'occupation du sol durant les périodes 1988-2000, 2000-2020 et 1988-2020 dans le BVAM à Nsimalen	94
Tableau 24 : Tests d'homogénéités (à un niveau significatif de 5%) obtenus sur le nombre de jours de pluies par an, les pluies max par an et les classes de hauteurs de pluies journalières de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen	99
Tableau 25 : Tests d'homogénéité (à un niveau significatif de 5%) sur les pluies mensuelles du BVAM à Nsimalen (Période : 1964 - 2020)	99
Tableau 26 : Tests d'homogénéités (à un niveau significatif de 5%) obtenus sur les pluies annuelles et saisonnières de 1964 à 202 dans BVAM à Nsimalen	106
Tableau 27 : Tests d'homogénéités (à un niveau significatif de 5%) des débits journaliers et caractéristiques de la Mefou à Nsimalen	107
Tableau 28 : Résultats des tests d'homogénéité (à un niveau significatif de 5%) sur les débits liquides mensuels de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019	107
Tableau 29 : Tests d'homogénéités (à un niveau significatif de 5%) obtenus sur les débits liquides annuels et saisonniers de la Mefou à Nsimalen (1964-2019)	111
Tableau 30 : Valeurs numériques moyennes des différents types d'écoulements mensuels dans le BVAM à Nsimalen (période : 1964 à 2019).....	121
Tableau 31 : Agrégation des classes de facteurs avec les poids	133
Tableau 32 : Interdépendances entres facteurs de susceptibilité aux inondations.....	135
Tableau 33 : Matrice de comparaisons des paires de facteurs.....	135
Tableau 34 : Matrice de comparaison par paire des facteurs normalisées	136
Tableau 35 : Classe d'inondation et points régulièrement inondés dans le BV du Mfoundi	138

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation géographique et administrative de la zone d'étude : A) région du centre au Cameroun ; B) BVM dans la région du centre ; C) BVM et les limites de quelques départements de la région du Centre	8
Figure 2 : Principales unités climatiques du Cameroun.....	10
Figure 3 : Différentes zones agroécologiques du Cameroun	11
Figure 4 : Quelques formations végétales identifiées dans le BVM : a) champ de maïs à Koumassi, b) relique forestière rencontrée en bordure de route à Leboudi ; c) végétation en bordure du cours d'eau Mefou à Nsimalen ; d) végétation marécageuse à Nsimalen.....	12
Figure 5 : Géomorphologie du bassin versant de la Mefou	13
Figure 6 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Mefou à sa confluence avec le Nyong .	14
Figure 7 : Principales unités lithologiques du BVM.....	18
Figure 8 : Ensembles géologiques de la série de Yaoundé.....	19
Figure 9 : Exemple type de profil d'altération différencié de la région de Yaoundé.....	19
Figure 10 : Modèle conceptuel d'un paléo-profil d'altération de roche de socle	21
Figure 11 : Illustration du principe de la réponse hydrologique d'un bassin versant.....	23
Figure 12 : Hydrogramme type résultant d'un événement pluie-débit.....	25
Figure 13 : Différents processus d'écoulement dans un bassin versant : (a) écoulement souterrain en milieu saturé ; (b) écoulement par intumescence de la nappe ; (c) écoulement de retour	27
Figure 14 : Esquisse de : modèle agrégé (A) ; modèle distribué (B) ; modèle semi-distribué (C) ..	31
Figure 15 : Présentation du site d'étude : (a) bassin versant de la Mefou (BVM), (b) bassin versant de la Mefou à Nsimalen (BVAM).....	42
Figure 16 : Pluviomètres installés à : a) Nsimalen ; b) Etoud	44
Figure 17 : Equipements hydrométriques identifiés, réhabilités et/ou installés dans le BVAM	45
Figure 18 : Stations hydrométriques installées et/ou réhabilitées dans le BVAM : a) station de Nsimalen ; b) station d'Etoud.	46
Figure 19 : Exemples de quelques maisons présentant des laisses de crues dans le quartier Ahala II	48
Figure 20 : Répartition spatiale des ouvrages hydrauliques et des points d'essai de perméabilité à l'échelle de la partie urbaine du BVAM (bassin versant du Mfoundi)	50
Figure 21 : Courbe d'étalonnage ou de tarage de la Mefou à Nsimalen.....	52

Figure 22 : Critique et validation des données pluviométriques par la méthode de simple cumul : a) hauteurs de pluies annuelles, b) nombres de jours de pluies annuelles	53
Figure 23 : Procédure de cartographie d'occupation du sol à partir des images Landsat.....	62
Figure 24 : Modèle conceptuel de cartographie de susceptibilité aux inondations à partir de l'AHP et des SIG	68
Figure 25 : Variation du nombre de jours de pluies par an dans le BVAM de 1964 à 2020.....	77
Figure 26 : Variations des classes d'hauteurs de pluies journalières entre 1964 et 2020 dans le BVAM à Nsimalen.....	78
Figure 27 : Variation des pluies journalières maximales dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020	79
Figure 28 : Domaine de variations des pluies mensuelles de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen	82
Figure 29 : Diagramme ombrothermique à la station de Mvan aéroport (1964 - 2020).....	82
Figure 30 : Variations des hauteurs de pluies saisonnières de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen	82
Figure 31 : Domaine de variations des pluies annuelles dans le BVAM de 1964 à 2020.....	85
Figure 32 : Variations des débits caractéristiques et journaliers de la Mefou à Nsimalen	86
Figure 33 : Variations des débits moyens mensuels de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019	87
Figure 34 : Variations des débits moyens saisonniers de la Mefou à Nsimalen (1964-2019).....	87
Figure 35 : Bilan hydrologique de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019.....	89
Figure 36 : Etats de l'occupation du sol du bassin versant amont de la Mefou à Nsimalen : a) 1988 ; b) 2000 ; c) 2020	93
Figure 37 : Evolution de nombre de jours de pluies par an dans le bassin versant amont de la Mefou de 1964 à 2020	98
Figure 38 : Evolution des fréquences des classes de pluies de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen	100
Figure 39 : Evolution des pluies journalières maximales par an dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020	100
Figure 40 : Evolution des pluies Mensuelles dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020	102
Figure 41 : Evolutions des pluies saisonnières dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020	103
Figure 42 : Evolution des pluies annuelles dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020	105
Figure 43 : Variations des indices pluviométriques annuels de 1964 à 2020 dans BVAM à Nsimalen	106

Figure 44 : Evolutions des débits caractéristiques et journaliers de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019.....	109
Figure 45 : Evolution des débits moyens mensuels de la Mefou à Nsimalen (1964 à 2019)	110
Figure 46 : Fluctuations des débits moyens saisonniers de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019	111
Figure 47 : Evolution des débits annuels de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019	113
Figure 48 : Variations des indices de débits interannuels de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019	114
Figure 49 : Relations pluies mensuelles - débits mensuels.....	115
Figure 50 : Corrélations pluies mensuelles - débits mensuels	115
Figure 51 : Corrélations pluies annuelles-débits annuels	116
Figure 52 : Relation entre indices pluviométriques et indices de débits interannuels.....	117
Figure 53 : Evolution interannuelle du coefficient de tarissement de la Mefou à Nsimalen et du volume d'eau mobilisé par l'aquifère du BVAM entre 1964 et 2019.....	118
Figure 54 : Hydrogramme de crue de la Mefou à Nsimalen (mars 2018 - janvier 2019).....	120
Figure 55 : Inondation du 23 septembre 2018 : a) à la mairie de Yaoundé 7 (Nkolbisson) ; b) à la Voirie municipale ; c) à l'Avenue Kennedy	120
Figure 56 : Evolution mensuelles des différents types d'écoulements dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2019.....	122
Figure 57 : Evolution des différents types d'écoulement par année dans le BVAM à Nsimalen de la période allant de 1964 à 2019	122
Figure 58 : Evolution des coefficients d'écoulement (K_e) de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019	124
Figure 59 : Variations des niveaux statiques dans quelques ouvrages témoins (représentatifs) dans le BVAM.....	125
Figure 60 : Comparaison entre les débits mensuels et les niveaux piézométriques dans le BVAM	126
Figure 61 : Modèle conceptuel (3D) des interactions eaux de surface-eaux souterrains du bassin versant de la Mefou à Nsimalen.....	129
Figure 62 : Cartes thématiques : a) Occupation du sol ; b) Altitude.....	130
Figure 63 : Cartes thématiques : a) Géologie ; b) Pluie ; c) Densité de drainage ; d) Distance euclidienne	131
Figure 64 : Cartes thématiques : a) Densité de drainage ; b) Distance euclidienne ; c) TWI ; d) Niveau d'eau souterrain	132

Figure 65 : Esquisse schématique montrant l'influence interactive des facteurs concernant la susceptibilité aux inondations	134
Figure 66 : Carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant du Mfoundi	138
Figure 67 : Quelques épisodes d'inondations dans le bassin versant du Mfoundi : a) à entrer Cité Verte ; b) à Ayéné ; c) à Coron ; d) et e) à avenue Kennedy ; c) à Ahala.....	140
Figure 68: Quelques activités anthropiques qui favorisent l'apparition des inondations dans le bassin versant du Mfoundi : a), b) et c) ouvrages sous-dimensionnés ; d) occupation des zones marécageuses ; e) rejet des déchets urbains dans le lit du cours d'eau	141
Figure 69: Aire sous la courbe ‘’AUC’’ relatif à la validation du modèle de susceptibilité aux inondations	142

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Organigramme pour l'évaluation des termes du bilan hydrologique selon Thornthwaite	169
Annexe 2 : Coefficient de tarissement de la Mefou à Nsimalen et du volume mobilisé par l'aquifère de son bassin versant entre 1964 et 2019	170
Annexe 3 : Hydrogrammes annuels des débits de base de la Mefou à Nsimalen et de pluies journalières pour les années hydrologiques étudiées allant de 1964 à 2019	171
Annexe 4 : Valeurs numériques des différents types d'écoulement par année dans le BVAM à Nsimalen durant la période allant de 1964 à 2019	175
Annexe 5 : Liste des articles scientifiques issus de la thèse.....	176
Annexe 6 : Liste des colloques/conférences scientifiques issus de la thèse.....	177

RESUME

La variabilité et/ou le changement climatiques associés aux activités anthropiques sont à l'origine des risques hydro climatologiques observés actuellement dans les grandes métropoles du monde. C'est dans ce contexte que la présente étude a été menée afin d'évaluer les processus hydrologiques et les facteurs environnementaux qui contrôlent les interactions eaux de surface-eaux souterraines et les risques d'inondation dans la partie amont du bassin versant de la Mefou (BVAM) à Nsimalen. L'approche méthodologique classique adoptée prend successivement en compte la recherche bibliographique, les travaux de terrain (installation et réhabilitation des stations hydro-climatiques ; acquisition des pluies, des débits, des images satellites, des caractéristiques hydrodynamiques et des zones inondées) et, de laboratoire (dépouillement et traitement de paramètres hydro-climatiques, cartographie des informations géospatiales et modélisation de risques d'inondation). Les résultats montrent que, les hauteurs de pluies journalières maximales varient entre 50 mm et 107 mm pour une moyenne interannuelle de 70 ± 13 mm durant la période comprise entre 1964 et 2020 (57 ans). Ces hauteurs varient différemment d'une année à l'autre avec une légère tendance à la baisse sans aucune rupture significative. Les modifications majeures sont observées au niveau de l'évolution du nombre de jours de pluies par an et la classe des hauteurs de pluies extrêmes (supérieures à 30 mm) qui présentent des tendances à la baisse avec des ruptures obtenues durant les années hydrologiques 1988-1989 et 1987-1988 respectivement. Durant la période comprise entre 1964 et 2019 (32 ans, sans prendre en compte les différentes lacunes enregistrées dans cette série), les débits journaliers de la Mefou à Nsimalen varient entre $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ($2,35 \text{ l/s/km}^2$) et $29 \text{ m}^3/\text{s}$ (68 l/s/km^2). L'évolution des débits journaliers caractéristiques présente des tendances à la hausse suivie des ruptures significatives en 1976-1977, 1983-1984 et 2009-2010. Les débits annuels fluctuent entre $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$ et $13,64 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un module interannuel de $7,56 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à un débit spécifique de $17,80 \text{ l/s/km}^2$ et une lame d'eau écoulée de 564 mm/an ($K_e = 36\%$). L'évolution des débits moyens mensuels, saisonniers et annuels présentent des tendances à la hausse avec des ruptures observées en 1976-1977 et 1983-1984. Pendant la période comprise entre 1988 et 2020 (32 ans), l'évolution de l'état de l'occupation du sol révèle une augmentation des zones bâties d'environ 678% et des zones agricoles et sols nus (308%). Les surfaces végétales primaire et secondaire ainsi que les zones marécageuses ont quant à elles diminué de -59,68%, -25,33% et -90,42% respectivement. L'analyse et la modélisation des interactions eaux de surface et eaux souterraines montrent : (i) une réaction très rapide des débits des cours d'eau de la zone d'étude face aux averses ; (ii) un fort taux de l'écoulement rapide de crues (ruissellement et écoulement hypodermique) et ; (iii) une faible infiltration. La carte de susceptibilité aux inondations dans la partie urbanisée du BVAM avec la ville de Yaoundé met en évidence cinq grandes classes que sont : la classe très élevée qui représente 19,5% de la superficie de la zone modélisée à laquelle s'ajoutent les classes élevée (22%), modérée (23%), faible (26%), et très faible (9,5%). Les principaux paramètres qui influencent considérablement la génération des inondations dans cette zone sont l'occupation du sol, le relief avec l'altitude et la géologie.

Mots clés : Zone tropicale humide ; Afrique centrale ; Yaoundé ; Mefou et Mfoundi ; changement climatique ; activités anthropiques ; relations pluie-débit- nappe ; inondation.

ABSTRACT

Climate variability and/or change associated with anthropogenic activities are at the root of the hydro-climatological risks currently observed in the world's major metropolises. It is in this context that the present study was carried out to assess the hydrological processes and environmental factors controlling surface water-groundwater interactions and flood risks in the upstream part of the Mefou catchment (BVAM) at Nsimalen. The classic methodological approach adopted successively takes into account bibliographical research, field work (installation and rehabilitation of hydro-climatic stations; acquisition of rainfall, flow rates, satellite images, hydrodynamic characteristics and flooded areas...) and laboratory work (processing of hydro-climatic parameters, mapping of geospatial information and flood risk modelling). The results show that maximum daily rainfall varies between 50 mm and 107 mm, with an inter-annual average of 70 ± 13 mm over the period from 1964 to 2020 (57 years). These heights vary from year to year with a slight downward trend and no significant break. The major changes are seen in the number of rainy days per year and the class of extreme rainfall heights (over 30 mm) which show decreasing trends with breaks obtained during the hydrological years 1988-1989 and 1987-1988 respectively. During the period from 1964 to 2019 (32 years, without taking into account the various gaps recorded in this series), daily flows in the Mefou at Nsimalen range from $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (2.35 l/s/km^2) to $29 \text{ m}^3/\text{s}$ (68 l/s/km^2). Characteristic daily flows show upward trends, followed by significant breaks in 1976-1977, 1983-1984 and 2009-2010. Annual flows fluctuate between $4.35 \text{ m}^3/\text{s}$ and $13.64 \text{ m}^3/\text{s}$, i.e. an interannual modulus of $7.56 \text{ m}^3/\text{s}$, corresponding to a specific flow of 17.80 l/s/km^2 and a water level of 564 mm/year ($K_e = 36\%$). Average monthly, seasonal and annual flows show upward trends, with breaks observed in 1976-1977 and 1983-1984. Over the period from 1988 to 2020 (32 years), changes in land use show an increase in built-up areas of around 678% and in agricultural areas and bare soil (308%). Primary and secondary vegetation and marshland have decreased by -59.68%, -25.33% and -90.42% respectively. Analysis and modelling of surface and groundwater interactions show: (i) a very rapid response of river flows in the study area to downpours; (ii) a high rate of rapid flood runoff (runoff and hypodermic runoff) and; (iii) low infiltration. The map of susceptibility to flooding in the urbanized part of the BVAM with the city of Yaoundé highlights five main classes: the very high class, which represents 19.5% of the surface area of the modelled zone, to which are added the high (22%), moderate (23%), low (26%) and very low (9.5%) classes. The main parameters that significantly influence the generation of flood in this area are land use, relief with altitude and geology.

Keywords: Tropical humid zone; Central Africa; Yaoundé; Mefou and Mfoundi; climate change; anthropic activities; rainfall-flow-groundwater relationship; flooding.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource tout à la fois vitale et sans substitut possible. Elle constitue un enjeu capital pour le développement durable (Loudière et Gourbesville, 2020 ; UNESCO et ONU-Eau, 2020). A l'échelle de la planète, les réserves en eau sont estimées à environ 1400 millions de km³ (Castany, 1998 ; Perrin, 2000). Les océans qui constituent les eaux salées comptent pour 97,5% et des 2,5% restantes (eaux douces), les calottes glaciaires représentent environ 68,9% ; les eaux souterraines (30,8%), les lacs (0,26%), les marais (0,03%) et enfin, les fleuves et rivières pour seulement 0,006% (Perrin, 2000 ; Gleick et Palaniappan, 2010). Parmi ces eaux douces, les eaux de surface (fleuves, rivières et lacs) qui sont pourtant les moins représentées, sont les plus utilisées dans certaines régions du monde pour les activités socioéconomiques et culturelles telles que l'agriculture irriguée, l'élevage, l'aquaculture, la pêche, la sylviculture, l'hydroélectricité, le transport fluvial, le tourisme et même l'alimentation en eau potable et l'assainissement. Ces eaux sont également un atout indéniable pour la préservation de l'équilibre environnemental et de la biodiversité aquatique (Popovici et *al.*, 2019). Durant ces dernières années, les ressources en eau subissent des pressions énormes liées à la variabilité et/ou au changement climatiques, aux activités anthropiques et à une gestion irrationnelle de cette ressource. Ces différents forçages sont actuellement à l'origine de la dégradation quantitative et/ou qualitative de ses ressources en eau et des risques hydro-climatiques associés donc les plus importants sont les inondations, la sécheresse, les vagues de chaleur, les mouvements de masse, etc. (CRED, 2018 ; Aziz et *al.*, 2022).

L'impact de la variabilité et/ou du changement climatiques sur les ressources en eau a fait l'objet de plusieurs travaux à travers le monde (Colmet-Daage et *al.*, 2017 ; Blöschl et *al.*, 2019 ; OMM, 2020 ; GIEC, 2021). Ces études tirent la sonnette d'alarme quant aux effets du réchauffement climatique planétaire en cours, qui pourrait atteindre 1,5°C à 4,4°C d'ici 2100. Cette hausse généralisée des températures pourrait également modifier le régime des pluies avec des volumes précipités beaucoup plus intenses et des phases de sécheresse beaucoup plus sévères dans de nombreuses régions du monde. La majorité des études effectuées en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale met en exergue de nombreuses modifications tant en zone tropicale sèche (soudano-sahélienne) qu'en zone tropicale humide. C'est ainsi que l'évolution des pluies annuelles en zone tropicale sèche montre des baisses significatives d'environ -20% (Mahé et Paturel, 2009 ; Mahé et *al.*, 2011 ; Lodoun et *al.*, 2013 ; Faty et *al.*, 2019 ; Israel et *al.*, 2020). La zone tropicale humide quant à elle, indique une baisse de pluies annuelles comprise entre -10 et -20%. En ce qui concerne l'évolution des pluies mensuelles, elle montre des baisses significatives qui traduisent une modification des régimes hydro-pluviométriques saisonniers (Mahé et *al.*, 2013). Le nombre de jours de pluies annuelles indique des baisses relatives suivies des hausses des fréquences des pluies intenses

au cours de la période récente (Paturel *et al.*, 2010a ; 2010b ; Soro *et al.*, 2014 ; Yira *et al.*, 2017 ; Adja *et al.*, 2019). Les écoulements subissent quant à eux une augmentation comprise entre +30 à +100 % en zone soudano - sahélienne, contre une baisse de -40 à -60 % en zone tropicale humide, sans oublier des cas isolés d'augmentations spectaculaires des ruissellements et des écoulements dans les bassins urbains et péri-urbains (Dzana *et al.*, 2004 ; Yira *et al.*, 2017 ; Noufé *et al.*, 2018).

Pour ce qui est du Cameroun, les travaux effectués sur la variabilité hydro-climatique montrent des perturbations importantes au niveau thermique liées à un décalage ou à un prolongement anormal des périodes de froid (Sighomnou, 2004 ; Liéno, 2007 ; MINEPDED/CARFAD, 2019 ; Ebodé *et al.*, 2022). Le Cameroun fait ainsi face à une hausse généralisée des températures d'environ +0,2°C en moyenne depuis le début des années 1970 et +0,4°C au cours de la décennie 2000, par rapport à 1961-1990 (Sighomnou, 2004 ; Nonki *et al.*, 2020). Ces études indiquent également une baisse généralisée des pluies qui se caractérise par la diminution du cumul des pluies annuelles et des écoulements. Par ailleurs, les pluies sont de plus en plus incertaines et inégalement réparties (début tardifs ou précoces, abondance ou insuffisance, augmentation). Particulièrement marquées au cours de la décennie 1970 et 1980, les moyennes des déficits varient de -2% à -20% pour les pluies et de -15% à -35% pour les écoulements dans les cinq bassins hydrographiques du pays durant les décennies 1970 à 2010 (Sighomnou, 2004 ; MINEE, 2009 ; Dassou *et al.*, 2016, Nonki *et al.*, 2020 ; Kpoumié *et al.*, 2022). Si les déficits de pluies annuelles sont beaucoup plus importants dans les bassins de la partie septentrionale du Cameroun (bassins du Lac Tchad et de la Bénoué), les effets de la variabilité climatique sont moins visibles au sud, où les ressources sont encore abondantes dans l'absolu. La variabilité pluviométrique se manifeste également par une baisse globale mais non uniforme des pluies mensuelles sur l'ensemble du pays. Les mois de la saison sèche sont plus affectés, dans l'ensemble, que ceux de la saison humide. Dans les bassins situés en zone équatoriale du Sud Cameroun (bassin du Congo, bassin des fleuves côtiers comme le Nyong, le Ntem et le Nkam), la variabilité climatique est marquée par des modifications des pluies des saisons sèches qui induisent une tendance à un changement à long terme du déroulement du cycle hydrologique annuel. En effet, l'étude des pluies mensuelles et des débits mensuels montre une modification du régime hydro-pluviométrique qui se caractérise par la diminution des pluies de la grande saison sèche (décembre à mars), de la petite saison de pluies (avril à juin) et de la grande saison de pluies (septembre à novembre) et une augmentation des pluies de la petite saison sèche (juillet et août) (Liéno, 2007 ; Liéno *et al.*, 2008 ; Yevalla *et al.*, 2018).

Lorsque la variabilité et/ou le changement climatiques sont associés aux activités anthropiques, ils présentent également des impacts significatifs sur la dégradation des ressources en

eau et les risques hydro-climatologiques associés que sont la sécheresse, les inondations, les coulées boueuses, etc. (Magdalena *al.*, 2017 ; Blöschl, et *al.*, 2019 ; Popovici et *al.*, 2021). La détérioration qualitative des ressources en eau est caractérisée par des pollutions physique et/ou chimique de ces eaux à cause : (i) des rejets solides et liquides issus des usages domestiques, commerciaux et des activités industrielles dans les zones urbaines ; (ii) de l'insuffisance dans les systèmes d'assainissement ; (iii) des rejets des produits chimiques issus de l'exploitation minière ; (iv) de la déforestation pour le bois d'œuvre et bois de chauffe, le développement des infrastructures et de l'exploitation minière ; etc. La dégradation quantitative se manifeste quant à elle par une baisse des écoulements par rapport à celle des pluies à l'échelle des grands bassins fluviaux ruraux et/ou urbains. Toutefois, on peut noter dans les zones urbanisées, une augmentation des ruissellements et des écoulements qui sont pour la plupart du temps, à l'origine des inondations. Les études qui abordent ces aspects ont été surtout effectuées en Afrique de l'Ouest et Centrale (Li et *al.*, 2007 ; Mahé et *al.*, 2010 ; Soro et *al.*, 2013 ; Noufé et *al.*, 2018). Il ressort de ces travaux que l'augmentation des ruissellements et des écoulements est liée à la croissance démographique, l'urbanisation anarchique, la déforestation pour la construction des bâtis qui ont pour conséquence l'imperméabilisation des sols. Cette dernière a pour effet, la diminution de l'infiltration, de l'écoulement de base et de la réserve en eau souterraine d'une part, et, de l'augmentation des écoulements rapides de crue (ruissellement et écoulement de subsurface) et des inondations d'autre part (Ambroise, 1998 ; Musy, 2013).

Le Cameroun à l'instar des autres pays d'Afrique subsaharienne fait actuellement face à plusieurs risques et/ou catastrophes hydro-climatologiques que sont les inondations, les mouvements de masses, les vents violents, les vagues de chaleur, la sécheresse, etc. (CRED, 2018 ; MINEPDED/CARFAD, 2019). Parmi ces risques, les inondations sont les plus répandues sur le territoire national. Elles sont observées à des degrés divers dans les zones soudano-sahéliennes (Maroua, Kousseri, Maga, etc.), tropicales humides (Yaoundé, Bertoua, Batouri, etc.) et côtières (Douala, Kribi, Limbé, Yabassi, etc.) (Tchotsoua et *al.*, 2007 ; Leumbe Leumbe et *al.*, 2015 ; Bang et *al.*, 2017 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2019 ; MINEPDED/CARFAD, 2019). On peut citer à titre d'exemple : l'inondation du 5 septembre 2020 qui a eu lieu à Kousseri et qui a fait plus de 10 000 sinistrés, affecté près de 400 ménages et détruit 150 habitations (<https://www.villesetcommunes.info.cm>) ; les épisodes du 18 et 19 novembre 2016 à Batouri ayant causé des dégâts matériels importants (Kouassy Kalédjé et *al.*, 2019 ; 2022) ; celle survenue dans la nuit du 21 août 2020 à Douala, qui a touché environ 500 familles en laissant des dégâts matériels et économiques importants (<https://www.crtv.cm>) ; les évènements du 21, 22, 23 et 30 Juin 2022 qui ont sévèrement affecté plusieurs localités de la ville de Yaoundé comme la poste centrale, le Marché

Mfoundi, Nsimeyong, Melen, Nkolbisson et Obili. En effet, entre 2007 et 2015, les inondations ont affecté près de 367 276 personnes en laissant derrière elles des pertes en vies humaines, matérielles, économiques et environnementales (MINAT/DPC, 2017 ; CRED, 2018 ; MINEPDED/CARFAD, 2019). Ces différentes inondations ont pour cause la variabilité et/ou le changement hydro-climatiques, les caractéristiques orohydrographiques, l'accroissement de la population, la pauvreté, le sous-dimensionnement des ouvrages hydrauliques, l'insuffisance dans l'assainissement (MINEPDED/CARFAD, 2019). Ces causes ne prennent pas en compte la réponse hydrologique du bassin versant avec ses différents types d'écoulements (ruissellement, écoulement hypodermique et écoulement de base). On note que la plupart d'études menées jusqu'ici sur les inondations ont utilisé plusieurs approches complémentaires. Certaines se sont intéressées à l'usage des paramètres climatiques, orographiques et l'occupation du sol pour cartographier les risques d'inondation (Tchotsoua et *al.*, 2007 ; Leumbe Leumbe et *al.*, 2015 ; Moffo Zongning, 2017 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2019 ; Iroume et *al.*, 2022). D'autres quant à elles ont pris en compte les enquêtes socioéconomiques et les observations de terrain pour cartographier les risques d'inondation et inventorier les pertes et dégâts (Bang et *al.*, 2017 ; Bruckmann et *al.*, 2019). On remarque que tous ces travaux ne prennent pas simultanément en compte les interactions entre les eaux superficielles (eaux de pluies et eaux de surface) et les eaux souterraines ainsi que d'autres paramètres environnementaux explicatifs des risques d'inondation.

La présente étude est donc une contribution à l'amélioration des connaissances sur les risques d'inondation à partir des relations eaux de surface (pluies-débits) - eaux souterraines et les autres paramètres environnementaux naturels (caractéristiques géométriques et hydrographiques, types de roches et de sol, etc.) et anthropiques (démographie, urbanisation, occupation du sol et autres). Elle a pour objectif général d'évaluer les processus hydrologiques et les facteurs environnementaux explicatifs des risques d'inondation dans la partie amont du bassin versant de la Mefou (BVAM) dont l'exutoire est situé à Nsimalen.

Plus spécifiquement il s'agit :

- d'analyser la variabilité hydro-pluviométrique dans le BVAM à Nsimalen ;
- de cartographier et analyser la dynamique de l'état de l'occupation du sol dans ledit bassin versant ;
- d'identifier les processus hydrologiques et les facteurs environnementaux qui influencent les interactions eaux de surface-eaux souterraines et les risques d'inondations dans le BVAM ;
- de proposer un modèle conceptuel de susceptibilité aux inondations dans le BVAM.

La présente thèse s'articule autour de quatre (04) chapitres encadrés par une introduction générale et une conclusion générale et des perspectives.

Le chapitre I présente une revue de la littérature sur le milieu naturel et les travaux antérieurs complémentaires liés à la thématique développée. Le chapitre II décrit le matériel et l'approche méthodologique qui ont permis d'obtenir les résultats présentés dans le chapitre III et qui sont interprétés et discutés dans le chapitre IV.

**CHAPITRE I : MILIEU NATUREL DE LA ZONE
D'ETUDE ET TRAVAUX ANTERIEURS**

INTRODUCTION

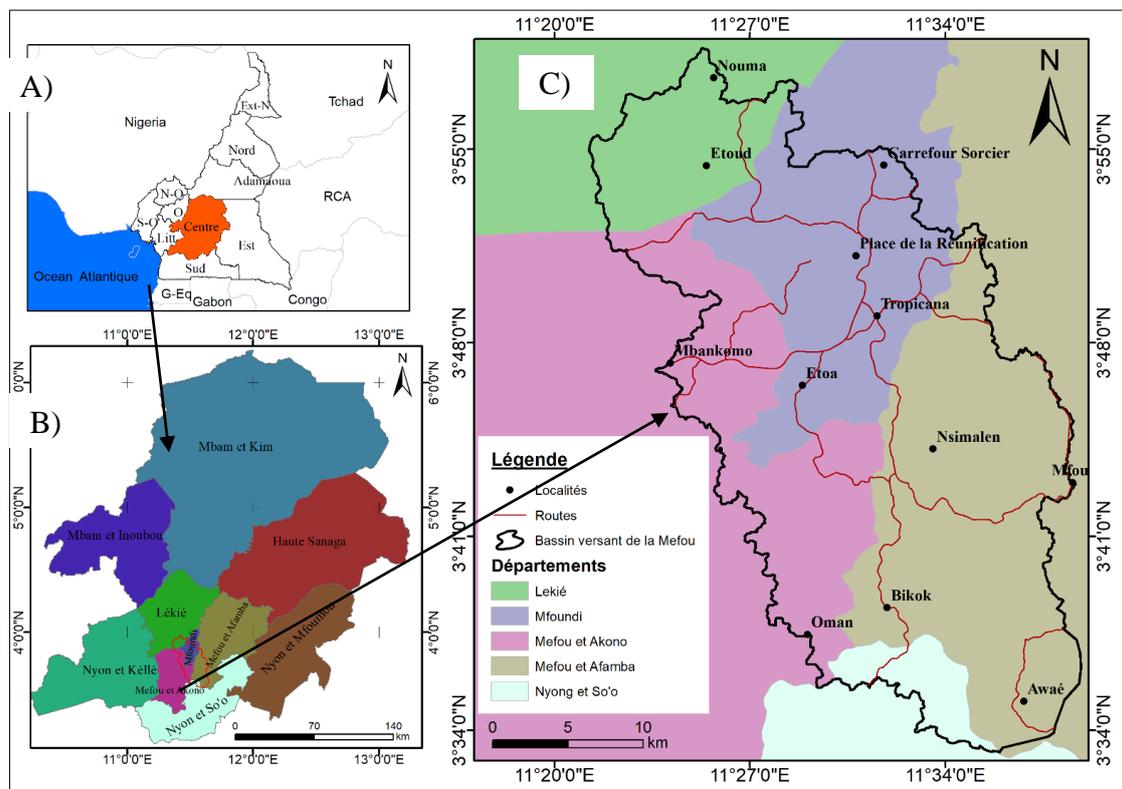
Ce chapitre présente la revue de la littérature sur le cadre biophysique et humain de la zone d'étude qui est le bassin versant de la Mefou (BVM), les travaux antérieurs sur quelques concepts relatifs aux processus hydrologiques, les techniques et/ou les outils utilisés pour la modélisation dans les sciences hydrologiques et enfin, la cartographie des risques hydro-climatiques.

I.1. CADRE BIOPHYSIQUE ET HUMAIN DE LA ZONE D'ETUDE

I.1.1. Cadre biophysique

I.1.1.1. Situation géographique et administrative

Le grand bassin versant de la Mefou dont l'exutoire se trouve à la confluence du fleuve Nyong à Mbalmayo, est situé dans la région du centre au Cameroun entre les latitudes 3°32' et 3°58' Nord, et les longitudes 11°21' et 11°36' Est (Figure 1). Il a une superficie de 840 km² et couvre partiellement cinq (5) des dix (10) départements de la région du Centre que sont : la Lékié au nord-ouest avec 11,3% de la superficie totale du BVM ; la Mefou et Akono à l'ouest (19,9%) ; le Nyong et So'o au sud (4,81%) ; la Mefou et Afamba à l'est et au nord-est (24,5%) et enfin, le Mfoundi (39,5%).



I.1.1.2. Climat

La caractérisation du climat de la zone d'étude (BVM) a été possible grâce aux informations relatives à la pluviométrie, la température et l'insolation recueillies à la station météorologique de la base aérienne militaire de Yaoundé.

I.1.1.2.1. Pluies

Les travaux récents montrent que la pluie moyenne interannuelle obtenue durant ces dernières années dans la zone d'étude est d'environ 1567 ± 227 mm (Abossolo et *al.*, 2015 et Bon et *al.*, 2016a) contre 1600 mm par an obtenue antérieurement par Olivry (1986) et Suchel (1987). Etant donné que la pluie est l'élément moteur dans la dynamique des ressources en eau et des risques d'inondation, l'étude beaucoup plus approfondie de ce paramètre sera abordée ultérieurement dans les chapitres III et IV.

I.1.1.2.2. Insolation

L'insolation est le temps pendant lequel le soleil a brillé. Sa valeur moyenne se situe entre 1500 et 1750 heures par an dans le Sud Cameroun (Suchel, 1987). Elle est croissante du sud vers le nord avec 1750 à 2000 heures par an entre le 4^{ème} et le 5^{ème} parallèle Nord. Le mois de janvier est le plus ensoleillé et juillet le plus brumeux.

I.1.1.2.3. Températures

La température moyenne interannuelle enregistrée dans le BVM est d'environ 24 °C pour une amplitude de 4,7 °C (Bon et *al.*, 2016a). Les températures moyennes mensuelles montrent que le mois le plus chaud est celui de février (25,9 °C) tandis que le mois le plus frais est celui de juillet avec 23,2 °C (Tableau 1).

Le régime climatique qui règne dans la zone d'étude est celui de la zone climatique n°4 caractérisée par un climat de type tropical et équatorial de transition à quatre (04) saisons inégalement réparties dans l'année (Figure 2) (Olivry, 1986 ; Suchel, 1987 ; Sighomnou, 2004).

Tableau 1 : Caractéristiques climatiques de la station de Mvan aéroport de 1964 à 2020

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Total	Moy
Pluies (mm)	98,4	131,5	242,3	355,4	358,6	417,6	186,8	610,5	425	501	246,5	97,5	1562	/
T (°C)	25,45	26,52	26,08	25,44	25,04	24,15	23,38	23,43	23,67	23,95	24,57	24,70	/	24,7

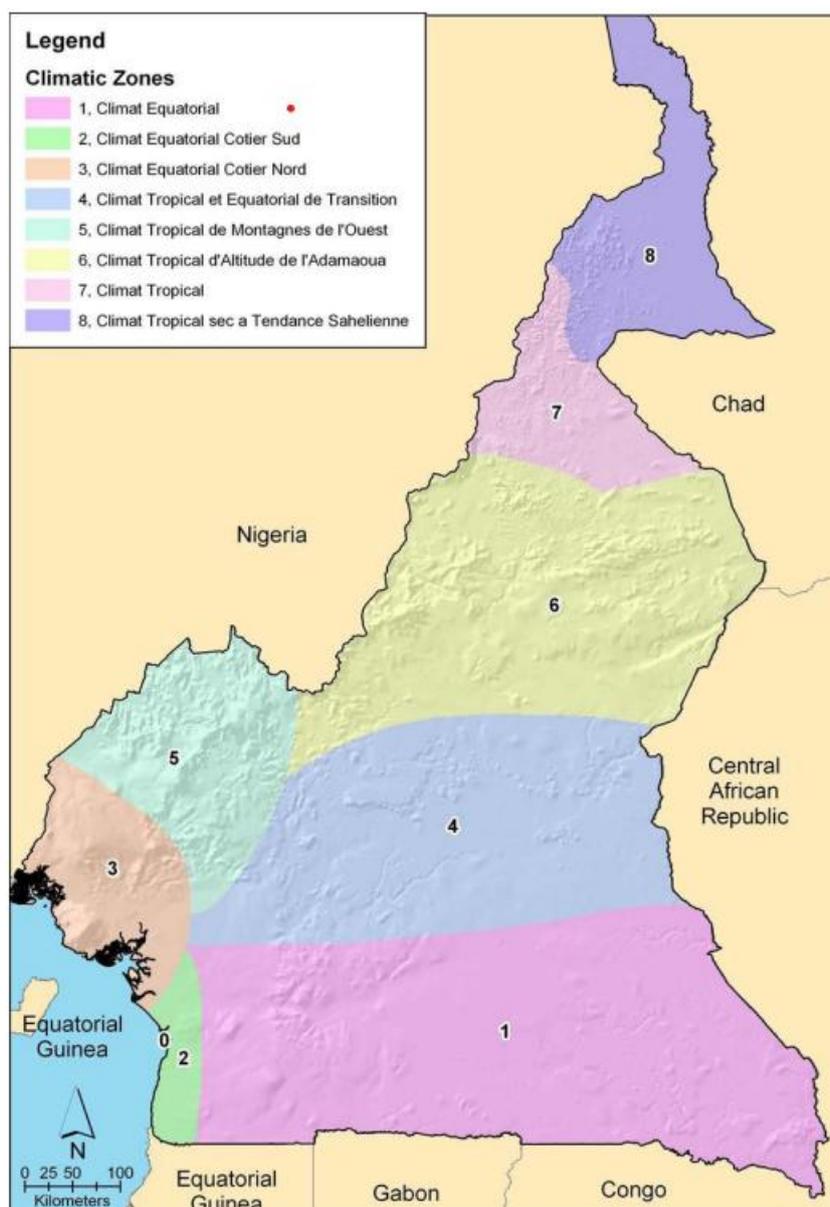


Figure 2 : Principales unités climatiques du Cameroun (Source : Olivry, 1986)

I.1.1.3. Végétation

Le BVM appartient au domaine de la forêt dense humide (Figure 3). Du fait de la croissance urbaine et des activités observées, la végétation de la zone d'étude est dominée par une forêt secondaire présentant un stade de dégradation très avancé (Figure 4) (Letouzey, 1969). De nombreux espaces laissés en jachère sont colonisés par une espèce très envahissante appelée *Chromolaena odorata* (Figure 4). Les bas-fonds marécageux sont peuplés par les raphias, les fougères aquatiques et parfois les bambous de chine. Le Nord du bassin présente une forêt primitive constituée des hautes herbes, arbustes et quelques grands arbres. La savane arbustive, dense est remarquable sur les sommets et les versants de certaines collines tandis que la strate arborescente faite de grands arbres se rencontre au Sud du bassin (Figure 4).

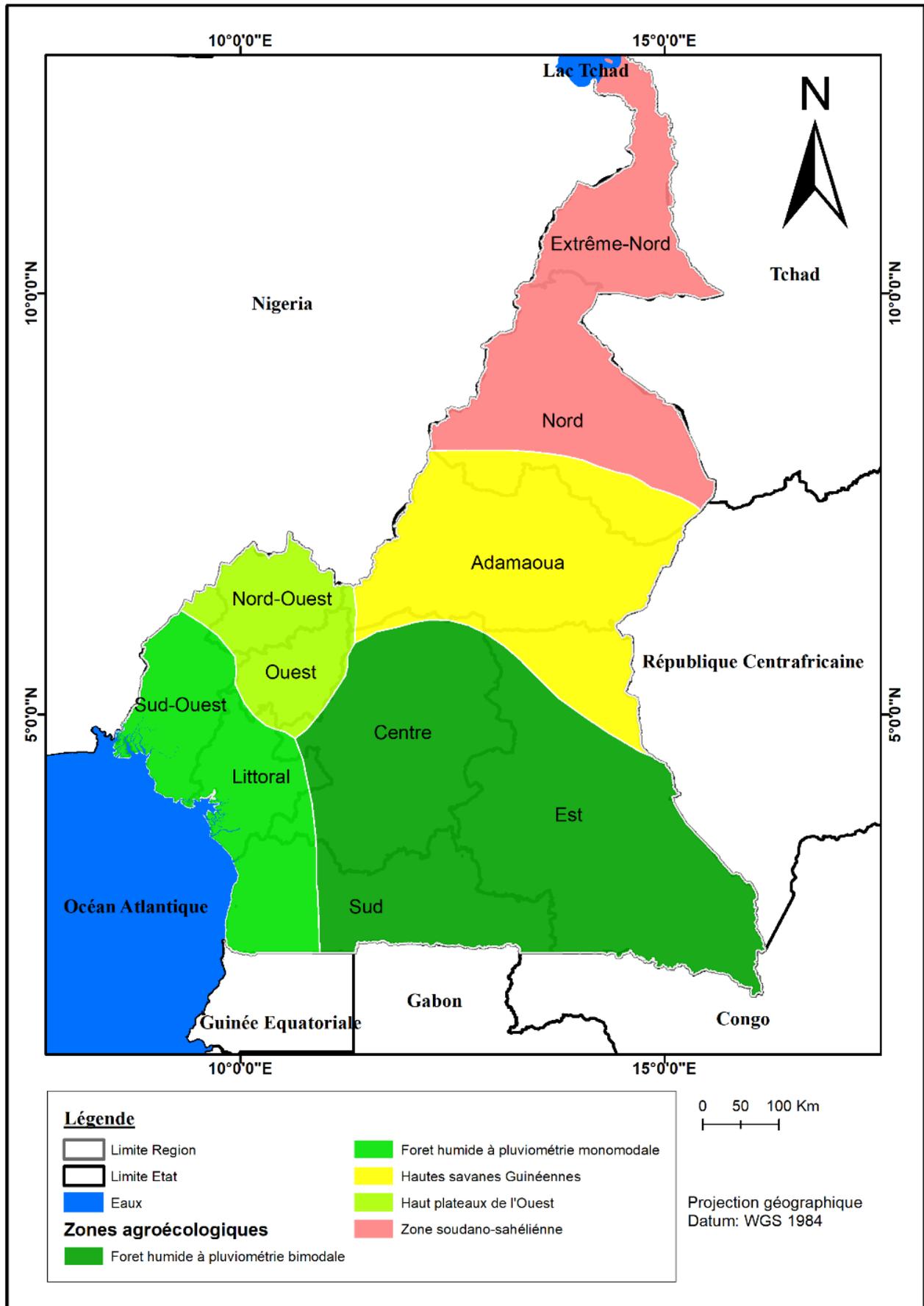


Figure 3 : Différentes zones agroécologiques du Cameroun (Source : IRAD, 2008)

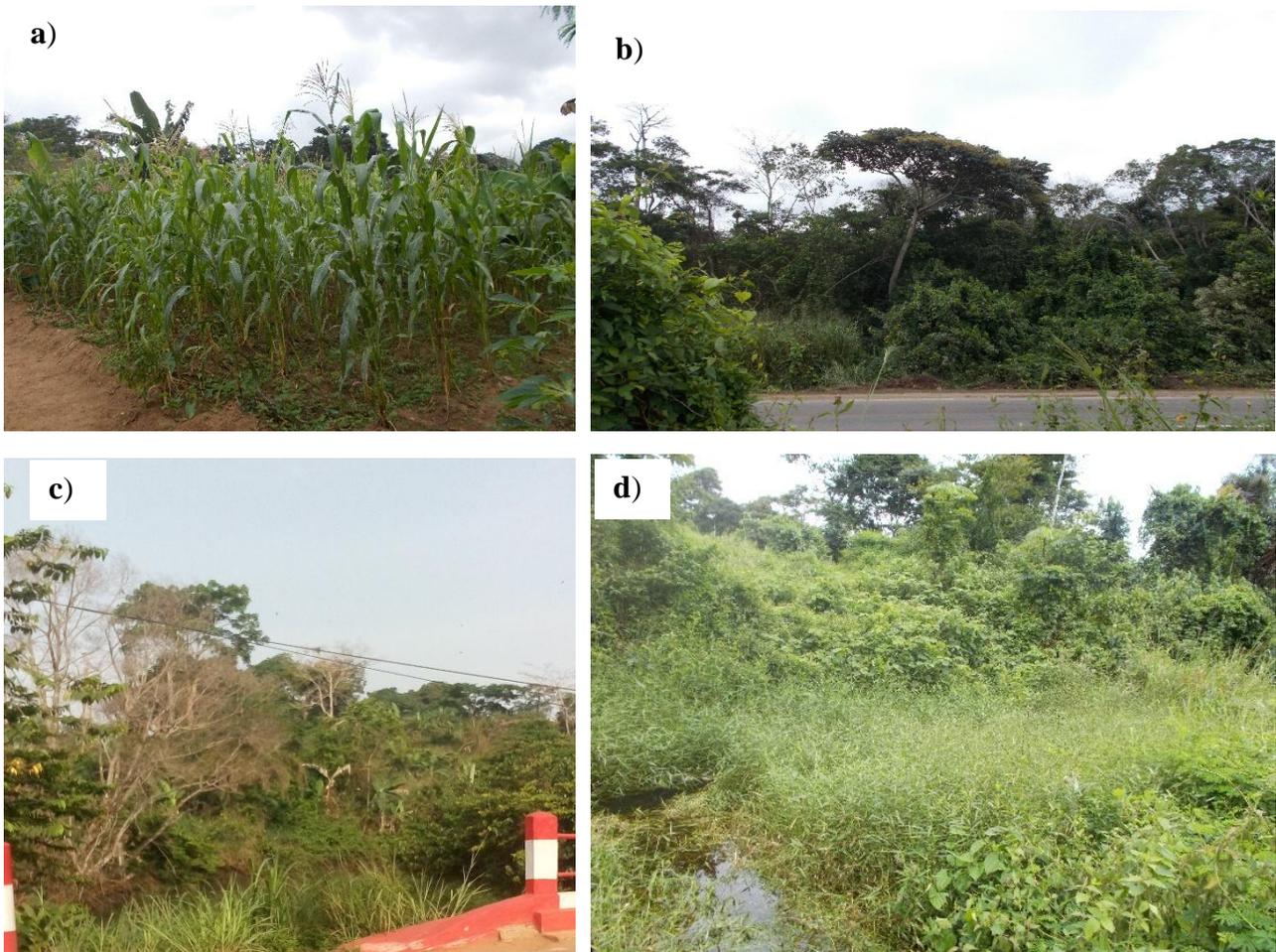


Figure 4 : Quelques formations végétales identifiées dans le BVM : a) champ de maïs à Koumassi, b) relique forestière rencontrée en bordure de route à Leboudi ; c) végétation en bordure du cours d'eau Mefou à Nsimalen ; d) végétation marécageuse à Nsimalen (*Cliché Nsangou, 2019*)

I.1.1.4. Orographie

Le BVM appartient à l'unité géomorphologique connue sous le nom du plateau sud camerounais d'altitude moyenne comprise entre 650 m et 900 m (Tchindjang, 2021). Du nord au sud, on observe une décroissance d'altitude, qui tombe en dessous de 600 m (Figure 5). L'alternance des collines et de vallées donne à ce bassin une structure en demi-orange aux larges vallées marécageuses et inondables. Ce relief est caractérisé par trois principales surfaces (Branchet et *al.*, 2018) :

- les reliefs résiduels d'altitudes comprises entre 850 à plus de 1100 m, qui sont des inselbergs qu'on retrouve dans la partie Nord et Nord-Ouest du bassin. On peut énumérer les monts Mbam-Minkoun, Fébé et Mbakolo ;
- les unités morphologiques d'altitudes comprises entre 750 et 850 m couvrant majoritairement le bassin du sud vers le nord ;

- les altitudes comprises entre 630 à 750 m, qui sont constituées des bas-fonds généralement occupés par les zones marécageuses et les cours d'eau.

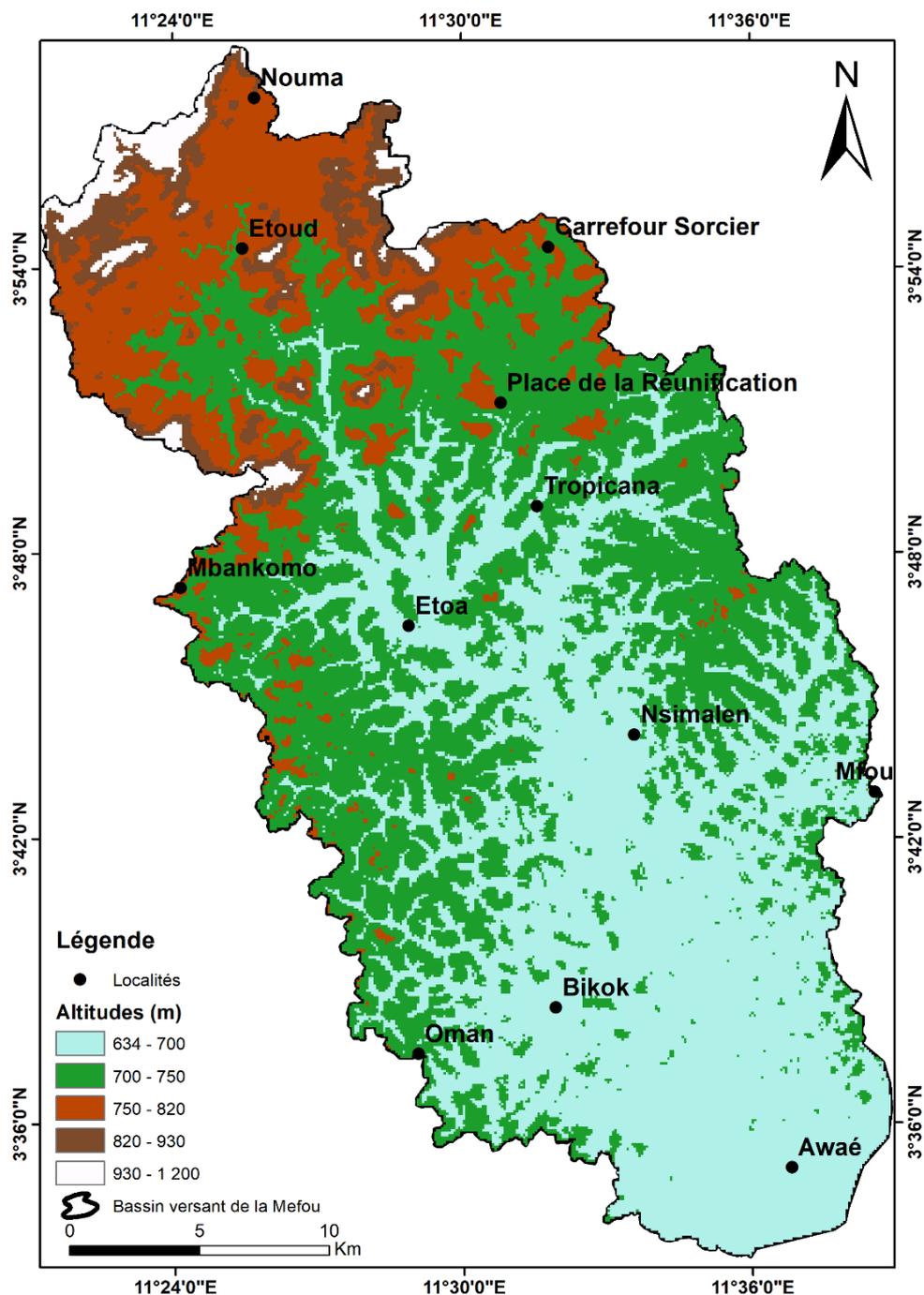


Figure 5 : Géomorphologie du bassin versant de la Mefou

I.1.1.5. Hydrographie

Le BVM est l'un des sous bassins en rive droite du grand bassin fluvial du Nyong (27 800 km²) (Olivry, 1986). La Mefou cours d'eau principal qui porte son nom, prend sa source aux pieds des monts Mbam-Minkoun et Nouma à plus de 1295 m d'altitude et s'écoule suivant une direction

NW-SE sur 66 km pour se jeter dans le Nyong à Odou (335 m d'altitude) après avoir traversé le barrage de Mopfou à Nkolbisson et une partie de la ville de Yaoundé. D'un réseau hydrographique fortement densifié et dendritique, il est grossi en rive gauche par le Mfoundi, l'Anga'a, l'Ezala, l'Abiergue, le Mbeme, le Ngou et en rive droite par Nga, Avoua, Etoa, Nsouo (Figure 6).

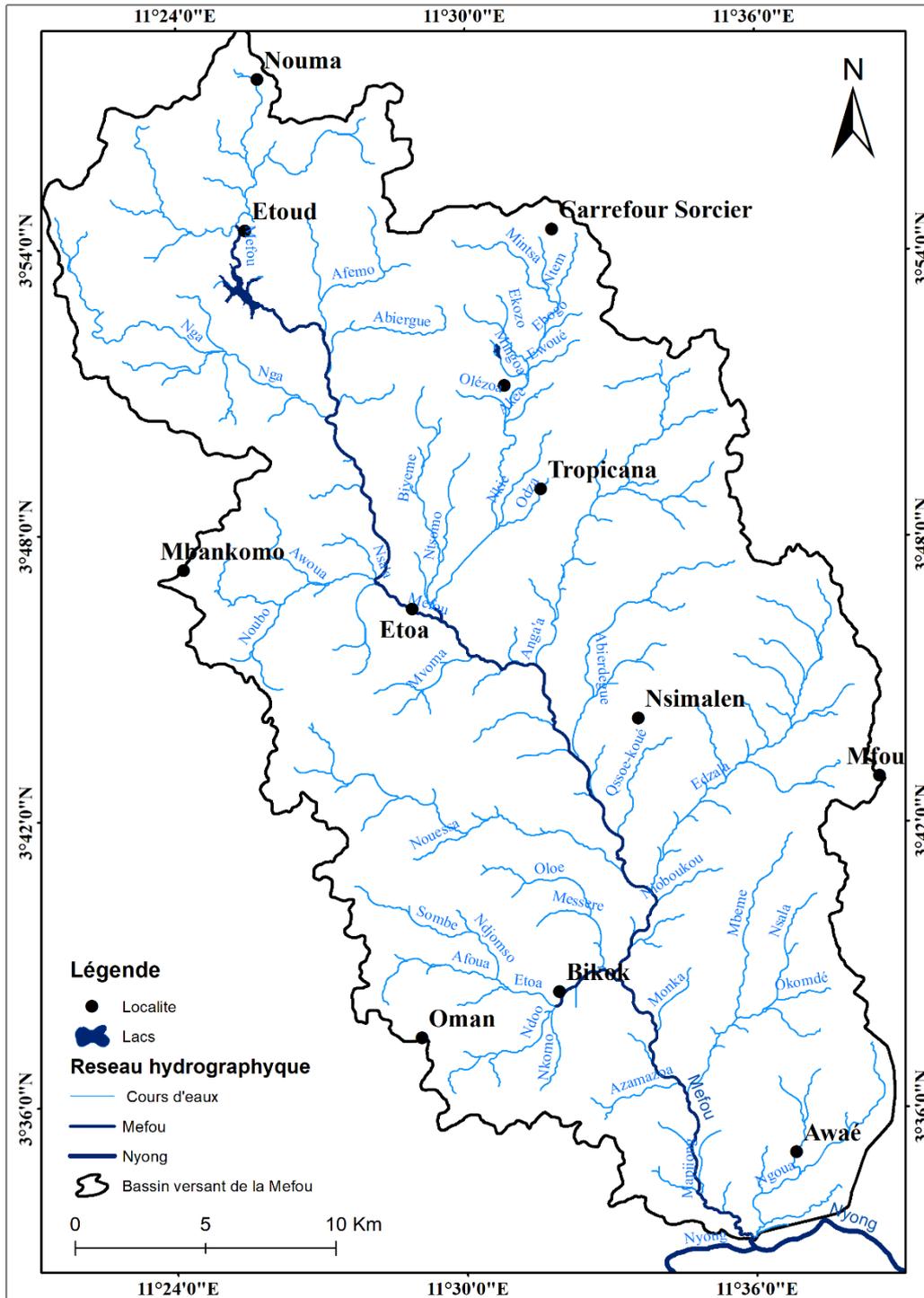


Figure 6 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Mefou à sa confluence avec le Nyong

I.1.1.6. Caractéristiques géologiques

I.1.1.6.1. Substratum géologique

La géologie du BVM dans l'ensemble reflète celle du groupe de Yaoundé (Metang et *al.*, 2022). D'après les travaux de Nzenti et *al.* (1988 et 1998), Toteu et *al.* (2004) et Metang et *al.* (2022), la région de Yaoundé et ses environs est située dans la zone mobile d'Afrique Centrale, plus précisément dans la zone panafricaine âgée de 600 à 540 millions d'années (Vicat, 1998). Encore appelée « Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale » ou chaîne des Oubanguides, elle couvre une grande partie de l'Afrique Centrale et presque la totalité du territoire camerounais (Mpesse, 1999 ; Mvondo, 2003). Cette chaîne comprend plusieurs séries (Lom, Yokadouma, Bengbis et Yaoundé). Ce bassin versant appartient plus spécifiquement à la série de Yaoundé, qui est constituée du groupe des granulites et migmatites (Mpesse, 1999 ; Mvondo Ondo, 2009), qui affleurent sur la bordure Nord du craton du Congo (Figure 7 et 8). Elle se subdivise en deux grands ensembles :

- un ensemble métasédimentaire (paragneiss) : formé de roches très alumineuses, riches en grenat, disthène et muscovite. Les principaux faciès sont des micaschistes à grenat et/ou disthène, des gneiss de haut degré à grenat et disthène, des gneiss à grenat et plagioclase. Ces roches sont composées, suivant la nature pétrographique, de plagioclase An₃₀₋₃₈ (20 à 50%), de quartz (25 à 40%), de feldspaths alcalins (15 à 20%), de grenat (10 à 20%), de biotite (5 à 10%), de disthène (2 à 3%), de dolomite (60%), de clinopyroxène (25%), de calcite (5%), de rutile, de graphite et d'olivine (Nzenti et *al.*, 1988) ;
- un ensemble métaplutonique (orthogneiss) : formé de roches sombres riches en grenat et pyroxène, moins structurées et moins abondantes que dans le paragneiss. Les principaux faciès sont des pyrcilasites qui affleurent en larges masses intrudant l'unité métasédimentaire, de pyribolites à grenat, de pyroxénites et de roches à biotite (Nzenti et *al.*, 1988). Les roches de cette unité sont composées de plagioclase An₃₀₋₃₅ (35 à 50%), de clinopyroxène (10 à 25%), de grenat (<10%), biotite (10%) et de quartz (5%). Accessoirement, on rencontre la magnésite, l'apatite et le zircon.

Associée à un magmatisme, la série de Yaoundé a subi plusieurs phases de tectonique souple ou cassante (D1, D2, D3 et D4) générant des structures en « carotte de sucre » pour les métasédiments et en « tablette de chocolat » pour les métaplutonites (Mvondo et *al.*, 2003 ; 2007). Cependant, diverses théories sont développées sur le nombre et les manifestations des phases tectoniques des gneiss migmatitiques de Yaoundé. La première phase (D1) responsable de la foliation S₀/S₁ et des plis intrafoliaux, est une tectonique de transposition alors que la seconde (D2), compressive et

caractérisée par des plans de cisaillement, de boudinage B2, des plis P2, des linéations de crénulation et d'étirement minéral, est une tectonique tangentielle (Nzenti et *al.*, 1988 ; Penaye et *al.*, 1993 ; Ngako et *al.*, 2003 ; Toteu et *al.*, 2006). La transition D1-D2 est caractérisée par la mise en place de roches mafiques et ultrabasiques et le développement des conditions de haute pression du faciès des granulites ($T=750-800^{\circ}\text{C}$, $P=10-12\text{ kbar}$). D'après Nzenti et *al.* (1988), ces deux phases correspondent aux phases de déformations majeurs ayant affectées les roches de la série de Yaoundé. Pour Mvondo et *al.* (2003 et 2007), Mvondo Ondo (2009) et Yonta Ngouné (2009), la phase D1 correspondrait à la mise en place des nappes, alors que la phase D2 représente une extension (N-S) parallèle à la chaîne et synchrone de la fusion partielle. La phase de déformation D3 est une phase fragile ou cassante caractérisée par des diaclases, des joints, des filons et des failles N-S et E-W. D'après Mvondo Ondo (2009), la D3 est une constriction générale verticale dont le raccourcissement maximal E-W à NW-SE est responsable de la configuration structurale actuelle de la portion sud de la chaîne panafricaine au Cameroun. La phase plicative D4 est attribuée aux coulées latérales subséquentes aux extensions crustales diachroniques (Mvondo et *al.*, 2007 ; Mvondo Ondo, 2009). Les plis correspondant à D3 et D4 ont des tendances respectives N-S à NE-SW et E-W à NW-SE et représentent des patrons de déformations régionales (Mvondo et *al.*, 2007). La D4 correspond à une phase de déformation fragile ou cassante post-panafricaine.

I.1.1.6.2. Couverture pédologique

Les sols d'une région résultent en général de l'action combinée de plusieurs facteurs dont : le climat, la végétation, la nature de la roche-mère, le type d'altération, l'histoire géomorphologique et les actions anthropiques. Les travaux reliant les organisations pédogénétiques aux processus morphogénétiques effectués par Ekodeck (1984), Yongue Fouateu (1986), Kamgang Kabayene Beyala (1987), Bilong et *al.* (1992) et Ndjigui et *al.* (2013) sur les sols de Yaoundé et ses environs ont permis d'identifier l'existence de trois types de sols dans la zone. Il s'agit :

- des sols ferrallitiques rouges qui sont les plus abondants et localisés au niveau des interfluves. Ces sols sont très épais parfois plus de 20 m, argileux et acides, constitués essentiellement de Kaolinite, d'Hématite, de Goethite, de Gibbsite et de Quartz. Le profil de ces sols montre de la base au sommet, trois ensembles (Figure 9) (Yongue Fouateu, 1986 ; Ekodeck et Kamgang Kabayene Beyala, 2002 ; Ndjigui et *al.*, 2013) :
 - un ensemble d'altération épais (5 m et plus), poreux et de couleur rouge violacé ; il comprend, de bas en haut : a) le niveau d'isaltéritique ou saprolite grossière (plusieurs mètres), à structure de la roche-mère conservée et surmontant le gniess non fissuré à la

base et ; b) le niveau d'allotérique tacheté ou vermiculé, peu épais (1 à 2 m) de faible porosité, constitué d'argiles tachetées rouges et jaunes ;

- un ensemble glébulaire, constitué de gros blocs de cuirasse et/ou de gravillons emballés dans un matériau rouge, argileux, meuble et poreux. Il comprend de bas en haut les matériaux nodulaires inférieur, les blocs et fragments ferrugineux et les matériaux nodulaires supérieurs hétérogènes ;
- un ensemble meuble, assez poreux et parcouru par des racines et radicelles. De nature argilo-sableuse et peu épaisse, il est de couleur rouge, brun rouge à rouge jaune (Ngon Ngon *et al.*, 2009).

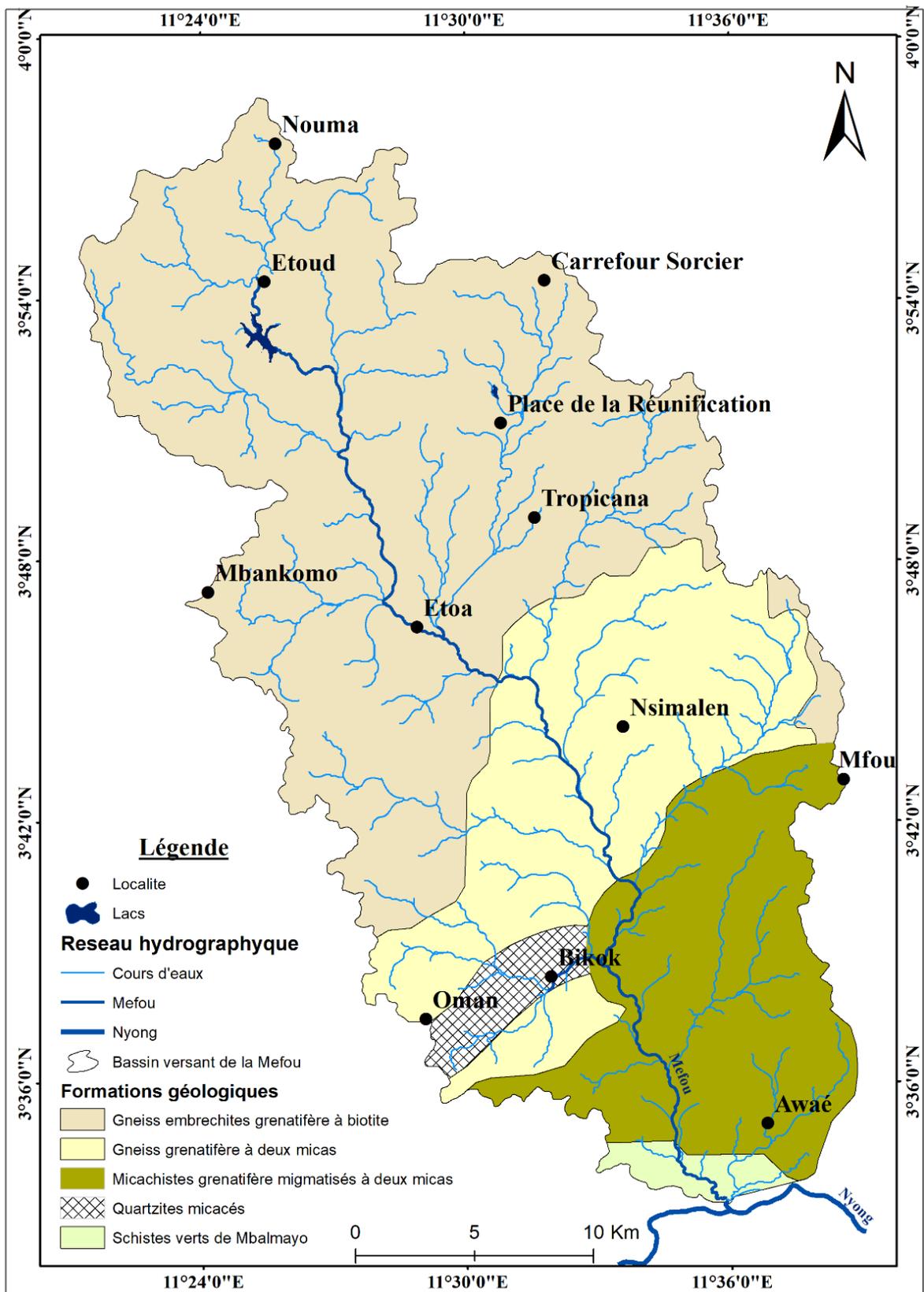


Figure 7 : Principales unités lithologiques du BVM (Sources : Leroy et Cirotteau, 1956 ; feuille n° NA 32 NE-E 22)

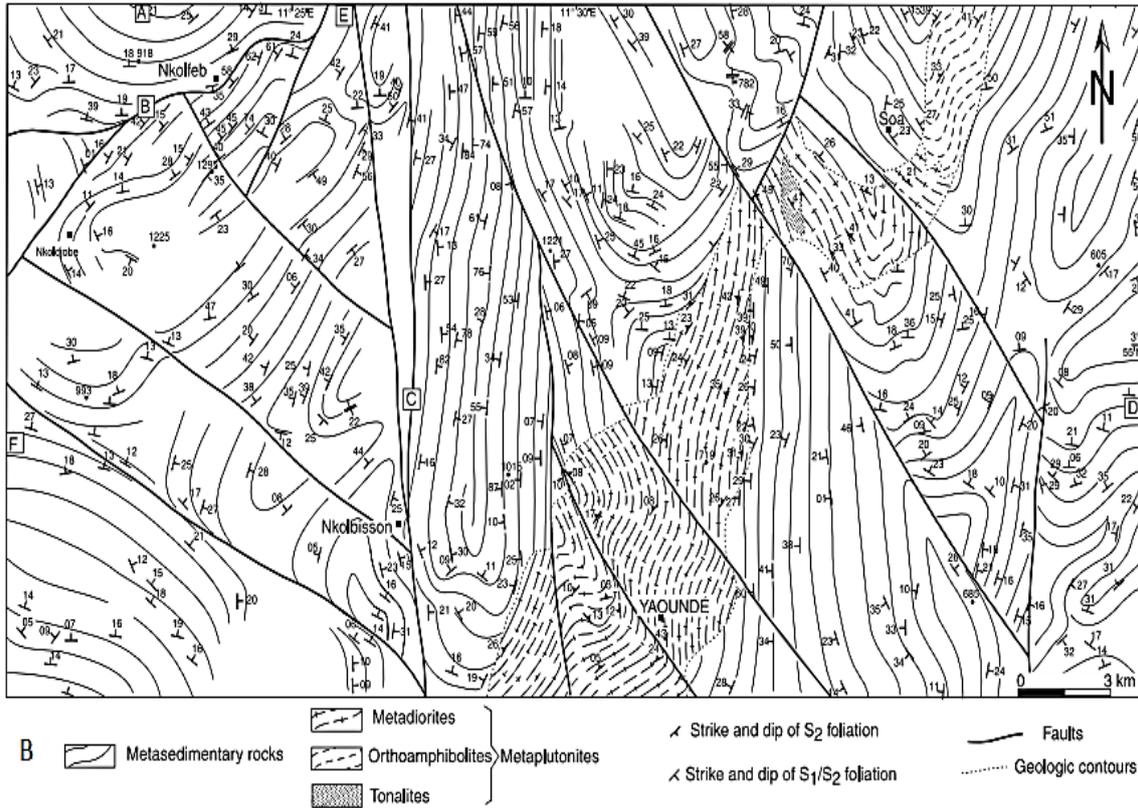


Figure 8 : Ensembles géologiques de la série de Yaoundé (Mvondo *et al.*, 2007)

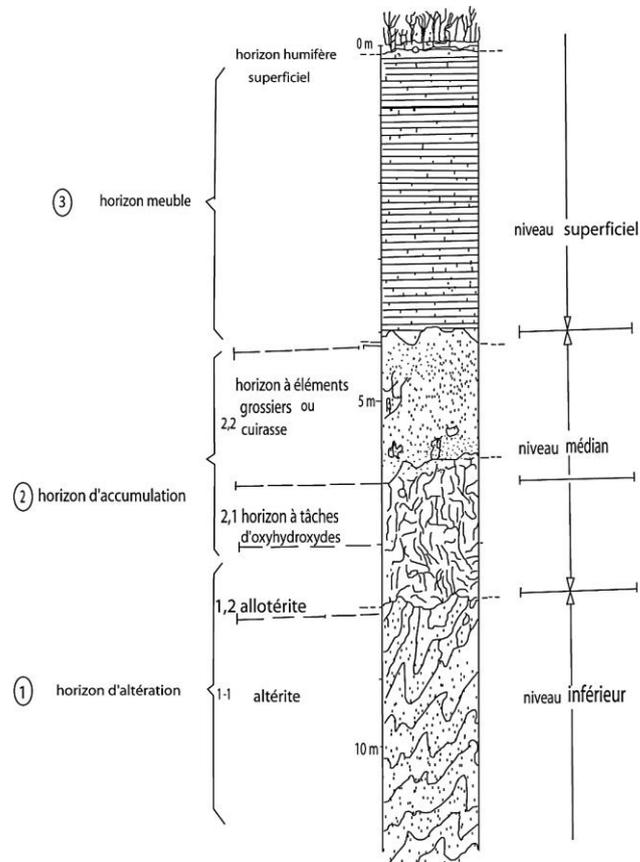


Figure 9 : Exemple type de profil d'altération différencié de la région de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang Kabayene Beyala, 2002)

- des sols ferrallitiques jaunes localisés en bas des versants et constitués de minéraux argileux, d'oxyde de fer et de quartz ; la redistribution est plus lente par rapport au sol rouge (Onguéné Mala, 1993). Ils présentent de haut en bas, trois niveaux (Bilong et *al.*, 1992) :
 - le niveau de transition, poreux (40 à 50%) et constitué d'argiles et d'oxyde de fer ;
 - le niveau médian poreux, également constitué d'argiles et d'oxyhydroxydes de fer ;
 - le niveau supérieur, bariolé et très argileux, poreux, riche en fer et pauvre en quartz.
- des sols hydromorphes présents dans les zones marécageuses et sur les lits des cours d'eau.

Ils sont caractérisés par l'occupation pérenne de la nappe phréatique à faible profondeur et aussi par une accumulation de matières organiques peu décomposées au-dessus de l'ensemble argilo-sableux gris (Bekoa, 1994) ; de texture argileuse et gorgés d'eau. De la surface vers la profondeur, la couleur passe du gris clair au brun jaune.

I.1.1.6.3. Hydrogéologie

La zone d'étude appartient au socle cristallin qui est constitué essentiellement de deux aquifères superposés (Djeuda Tchapgna et *al.*, 1999 ; 2001 ; Fouépé Takounjou et *al.*, 2010 ; Ewodo Mboudou et *al.*, 2012 ; Bon et *al.*, 2016a, 2016b ; Anaba Onana et *al.*, 2017 ; Ndam Ngoupayou et *al.*, 2019). Il s'agit de :

- un aquifère supérieur poreux d'altérites rencontré entre 8 et 20 m de profondeur ; c'est un aquifère plus ou moins continu et plus ou moins exploitable qui contient généralement une nappe libre. L'ensemble d'altération constitue la nappe permanente alors que l'ensemble glébulaire, lorsqu'il existe, peut représenter, par endroit, un aquifère perché, les altérites meubles jouant alors le rôle d'imperméable relatif (Lachassagne et *al.*, 2015). Deux processus de recharge ont été identifiés (Djeuga Tchapgna et *al.*, 1999) : une alimentation verticale directe par les eaux de précipitation efficace et une alimentation latérale depuis les berges des cours d'eau ;
- un aquifère inférieur de fissure/fracture dont les venues d'eau se localisent généralement au-delà de 20 m de profondeur. Il est hétérogène, anisotrope et accru dans la zone épidermique par la présence de nombreuses fractures ouvertes dues à la compression des versants de vallée et à l'altération. Il est alimenté par communication à travers les fractures et les fissures à l'aquifère d'altérite sus-jacent.

Les altérites qui surmontent l'aquifère fissuré présentent généralement une granulométrie très variée de la surface vers la profondeur (Figure 10). Ces altérites ont une texture argilo-sableuse et sont aussi très limoneuses (Ngon Ngon *et al.*, 2009 ; Bon *et al.*, 2016b).

Concernant les caractéristiques hydrodynamiques, les conductivités hydrauliques sont comprises entre 10^{-12} m/s et $8,5 \cdot 10^{-3}$ m/s traduisant ainsi des formations géologiques imperméables à peu perméables (Ewodo Mboudou *et al.*, 2012 ; Bon *et al.*, 2016a et 2016b). Les fluctuations des niveaux piézométriques suivent dans l'ensemble celles des régimes pluviométriques et sont beaucoup plus importants au niveau des sommets de versants par rapport aux bas-fonds (Ndam Ngoupayou *et al.*, 2019).

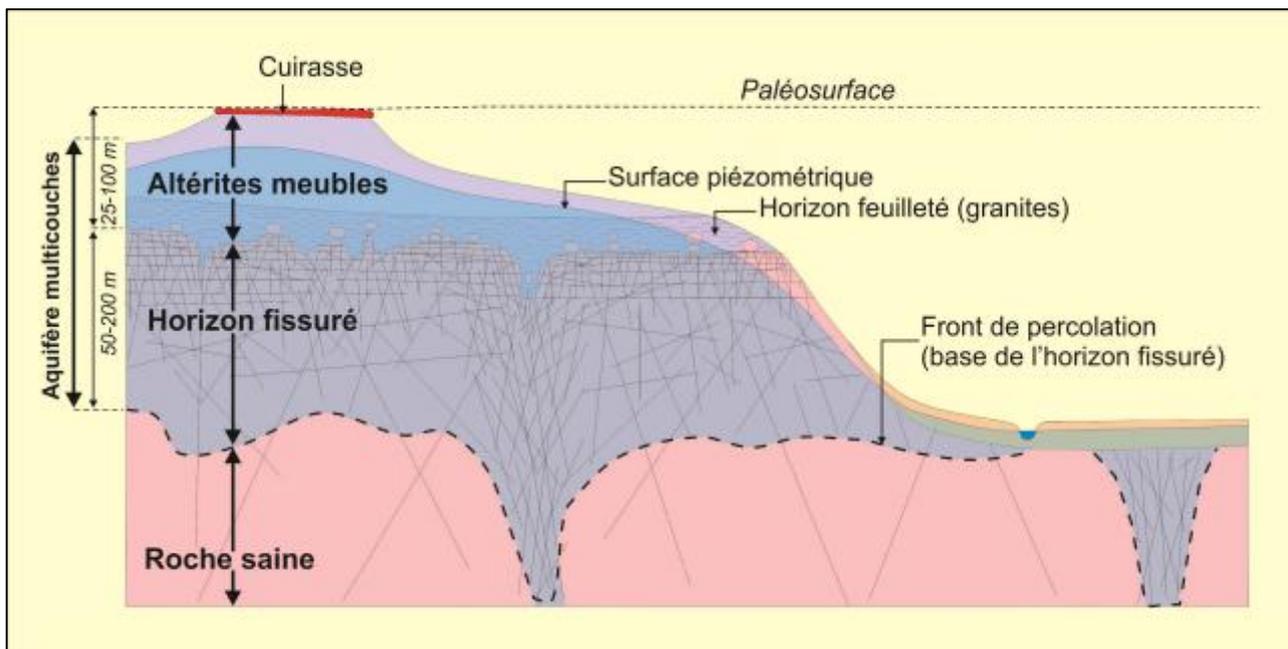


Figure 10 : Modèle conceptuel d'un paléo-profil d'altération de roche de socle (Lachassagne *et al.*, 2011 ; Bon *et al.*, 2016b)

I.1.2. Cadre humain et activités socioéconomiques

I.1.2.1. Population et urbanisation

La densité de la population active du Cameroun méridional forestier est faible excepté autour des pôles d'activité économique comme dans le bassin de la Mefou qui englobe la ville de Yaoundé et ses environs. La population de Yaoundé a connu une croissance accrue depuis les années 1950 (Tchindjang *et al.*, 2009). Cette croissance est due naturellement aux naissances qui excèdent les décès, mais aussi en grande partie à l'immigration et à l'exode rural après l'indépendance de 1960. La population qui était estimée à 60 000 habitants en 1960 (Franqueville, 1984) est passée à plus de 1 800 000 en 2005 selon le dernier recensement démographique avec un taux de croissance annuel

estimé à 5,7% entre 1987 et 2005 (BUCREP, 2010). Les estimations des Nations Unies (UNDESA, 2017) évaluait en 2017 la population à 3,65 millions d'habitants avec des projections à 6,7 millions en 2035. Cette croissance démographique exponentielle a pour conséquence une saturation de l'espace urbain d'un point de vue résidentiel, une augmentation de la densité de population (Tchindjang et *al.*, 2009) et la présence d'infrastructures inadaptées, notamment en termes de voiries et d'assainissement (Wethé et *al.*, 2003).

La densité moyenne de la population est d'environ 5 700 habitants/km² avec de fortes variations spatiales en fonction des quartiers et des types d'habitats considérés (Tchotsoua, 1994). Yaoundé est donc l'exemple même des métropoles africaines à croissance rapide et anarchique, constituant des opportunités, des services et des emplois pour les populations mais qui sont au cœur d'enjeux sociologiques, environnementaux et sanitaires (OMS et ONU-Habitat, 2010).

L'aménagement urbain et la répartition des densités de la population à Yaoundé ont entraîné une grande diversité de modes de vies et de types d'habitats. Trois types de quartiers sont identifiés à Yaoundé à savoir :

- les quartiers à habitat spontané où vivent surtout les ruraux attirés par la ville et dans lesquels les problèmes d'approvisionnement en eau et assainissement sont accrus. Ces quartiers occupent pour la plupart les bas-fonds marécageux. La densité des maisons et des habitants est très élevée et les toits se chevauchent. Les quartiers sont un enchevêtrement de maisons, ruelles et de drains mal desservis par les infrastructures ;
- les quartiers à habitat évolutif caractérisés par la juxtaposition d'un habitat très sommaire occupé par les citadins les moins aisés et d'habitat plus confortable ;
- les quartiers à habitat moderne occupés par les citadins les plus aisés et dans lesquels les services de voirie sont meilleurs.

L'absence d'un plan d'urbanisation rigoureux et l'incivisme des populations posent des problèmes d'assainissement très pertinents dont les conséquences sont multiples (envasement des caniveaux, inondations récurrentes, glissement de terrain, éboulements, pollutions diverses des eaux et des sols...).

I.1.2.2. Activités socioéconomiques

Les activités exercées dans ce bassin sont multiples ; on peut citer entre autres : les activités liées aux services administratifs, les activités champêtres, le commerce, etc. Celles développées dans les PME et PMI sont représentées par les ateliers de couture, les salons, les garages, les hôtels, les

centres de santé, les hôpitaux, les écoles, les marchés, les restaurants, les stations de stockage et/ou de commercialisation des produits pétroliers, les scieries, les industries agroalimentaires. Des espaces sont plus ou moins aménagés dans des concessions pour l'élevage des bovins, caprins et des volailles. Les bas-fonds sont le siège d'une intense activité agricole (cultures maraichers, aquaculture, pisciculture).

I.2. TRAVAUX ANTERIEURS

Cette partie prend en compte quelques termes conceptuels sur la réponse hydrologique, les techniques et outils généralement utilisés pour les modélisations dans les sciences hydrologiques et la cartographie des risques hydro-climatiques.

I.2.1. Réponse hydrologique et types d'écoulements

I.2.1.1. Définition

Après une averse, le débit d'un cours d'eau augmente, passe par un maximum ensuite décroît pour constituer une décrue ; cette réaction du cours d'eau après une sollicitation constitue la réponse hydrologique (Figure 11). La courbe de variation des débits en fonction du temps ($Q=f(t)$) est appelée hydrogramme.

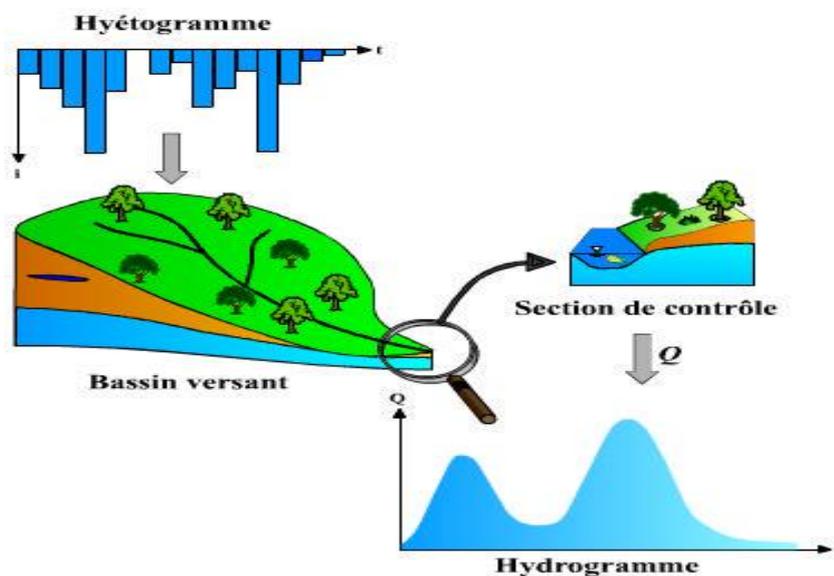


Figure 11 : Illustration du principe de la réponse hydrologique d'un bassin versant (Source : Musy, 2013)

I.2.1.2. Analyse des hydrogrammes et identification des types d'écoulement

I.2.1.2.1. Analyse des hydrogrammes dans un bassin versant

L'hydrogramme ($Q=f(t)$) obtenu après une pluie dans un bassin versant présente pour une même section du lit des variations d'amplitude, de forme et de période (Figure 12). Lorsque l'averse qui provoque la crue est suffisamment concentrée sur une courte période de temps, qu'elle est homogène dans l'espace et dans le temps, on dit que l'hydrogramme qui en résulte est pur.

On distingue alors sur la courbe $Q=f(t)$:

- une partie ascendante où le débit augmente jusqu'à atteindre un maximum, c'est la courbe de concentration ;
- la pointe qui correspond à la zone du maximum de débit ;
- une partie descendante qui correspond à la courbe de décrue. Celle-ci traduit l'écoulement de l'eau accumulée dans le bassin après l'arrêt de la pluie. Ce débit diminue et la courbe présente une rupture de pente (Figure 12) ;
- la courbe de tarissement qui est la courbe de décroissance du débit après un temps assez long consécutif à l'arrêt de tout ruissellement et de toute averse. Cette courbe est l'expression de l'écoulement souterrain sur toute la superficie du bassin versant. C'est la courbe d'étiage qui lorsqu'elle devient très longue correspond à la vidange des nappes. Son étude est très importante pour l'évaluation des réserves d'eau dans les aquifères souterrains ou capacité d'emménagement d'un bassin. La décroissance des débits pendant la période d'étiage suit une loi de tarissement exponentielle connue sous le nom de "loi de Maillet" ou "modèle de Maillet" qui est déterminé par la formule (Olivry, 1986 ; Tallaksen, 1995) : $Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$

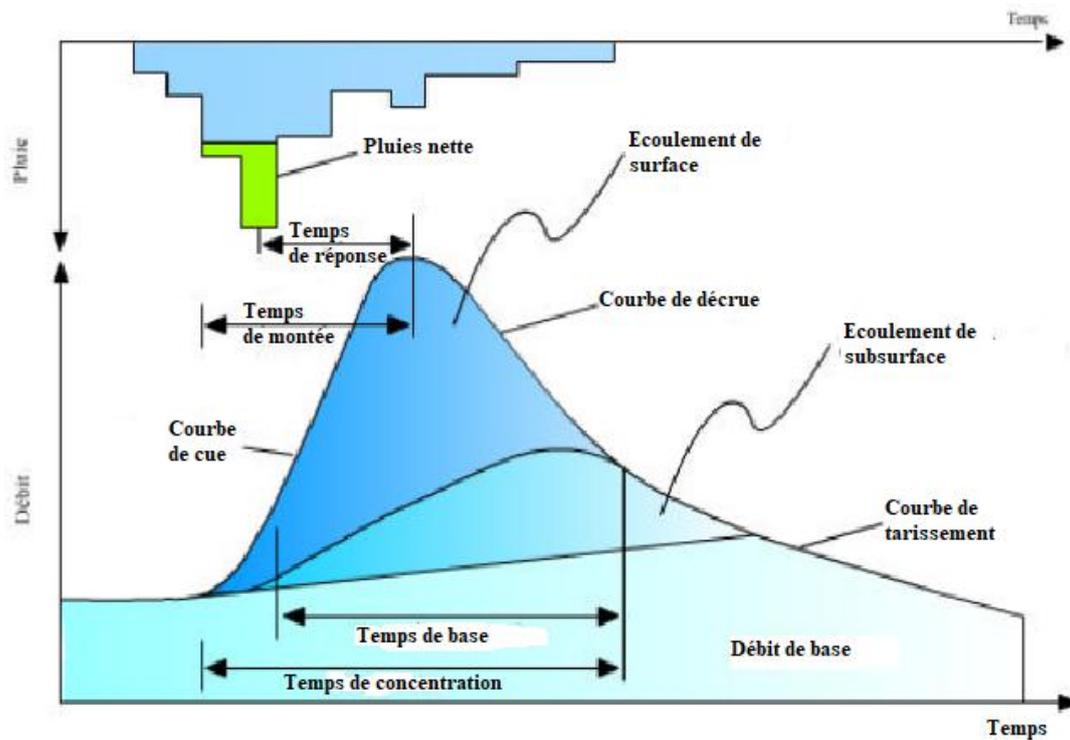


Figure 12 : Hydrogramme type résultant d'un événement pluie-débit (Source : Musy, 2013 modifié)

Où : Q_0 est le débit initial de la période de tarissement à l'instant t_0 ;
 Q_t est le débit au temps t et α le coefficient de tarissement de qui a pour unité l'inverse du temps ; $(t-t_0)$ est le temps exprimé en jours entre l'observation du débit Q_0 et celle du débit Q_t ; α est le coefficient de tarissement.

Les principaux temps caractéristiques qu'on peut déterminer sur l'hydrogramme sont : le temps de réponse du bassin (t_r) qui est l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette et l'arrivée du ruissellement à l'exutoire ; le temps de montée (t_m) qui correspond au temps compris entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement et le maximum de l'hydrogramme (Q_{max}) ; le temps de base (t_b) qui est la durée du ruissellement direct ; le temps de concentration (t_c) qui est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci (Figure 12).

I.2.1.2.2. Types d'écoulements

Sur l'hydrogramme de crue obtenu, on distingue d'une part les périodes de basses eaux (étiages) où les écoulements dans la rivière sont essentiellement dus à une alimentation par les eaux souterraines, et d'autre part les périodes de hautes eaux (crues) où les débits de la rivière proviennent des pluies directes et de trois types d'écoulements différents que sont (Figure 12) :

- le ruissellement superficiel ou écoulement hortonien qui est de l'eau libre qui s'écoule à la surface des sols après une pluie (Beven, 1988);
- le ruissellement hypodermique ou écoulement de subsurface qui est l'eau libre qui s'écoule par gravité dans les premiers centimètres du sol ou de la végétation. Le ruissellement superficiel et le ruissellement hypodermique constituent l'écoulement ou le ruissellement rapide de crue ;
- l'écoulement souterrain ou écoulement de base qui correspond aux eaux de la nappe ; cet écoulement constitue l'écoulement retardé.

Selon la thèse des aires participantes (Hewlett et Hibbert, 1967), le fonctionnement hydrologique dans les régions tropicales humides peut être caractérisé par une conjonction de plusieurs types d'écoulements parmi lesquels on peut citer :

- un écoulement sur surface saturée « saturation overland flow » (Dunne, 1978) ;
- un écoulement rapide interne « rapid internal runoff » qui, selon Beven (1988), peut comporter l'écoulement par effet piston « translatory flow », l'écoulement dans la macroporosité tubulaire « macropore flow ou pipe flow », l'écoulement par intumescence de la nappe « groundwater ridging », et l'écoulement de retour « return flow » (Figure 13).

I.2.1.3. Découpage de l'hydrogramme de crue et volumes écoulés par chaque réservoir

Il existe plusieurs méthodes de découpages des hydrogrammes de crue ; le choix d'une méthode par rapport à une autre dépend de l'expérience de l'hydrologue. Les plus utilisées sont les méthodes graphiques et géochimiques.

I.2.1.3.1. Méthode graphique

Cette technique classique qui est la plus courante consiste à étudier en coordonnées semi-logarithmique $\text{Log}(Q)=f(t)$, les ruptures de pente en décrue matérialisant un changement de cinétique de vidange du réservoir qui constitue l'ensemble eau de surface-eau souterraine du bassin versant. Les variations de $\text{Log}(Q)=f(t)$ traduisent la loi de vidange du réservoir ou de tarissement d'une nappe. On admet que les points de rupture de pente marquent la séparation entre le ruissellement superficiel, l'écoulement hypodermique et l'écoulement de base.

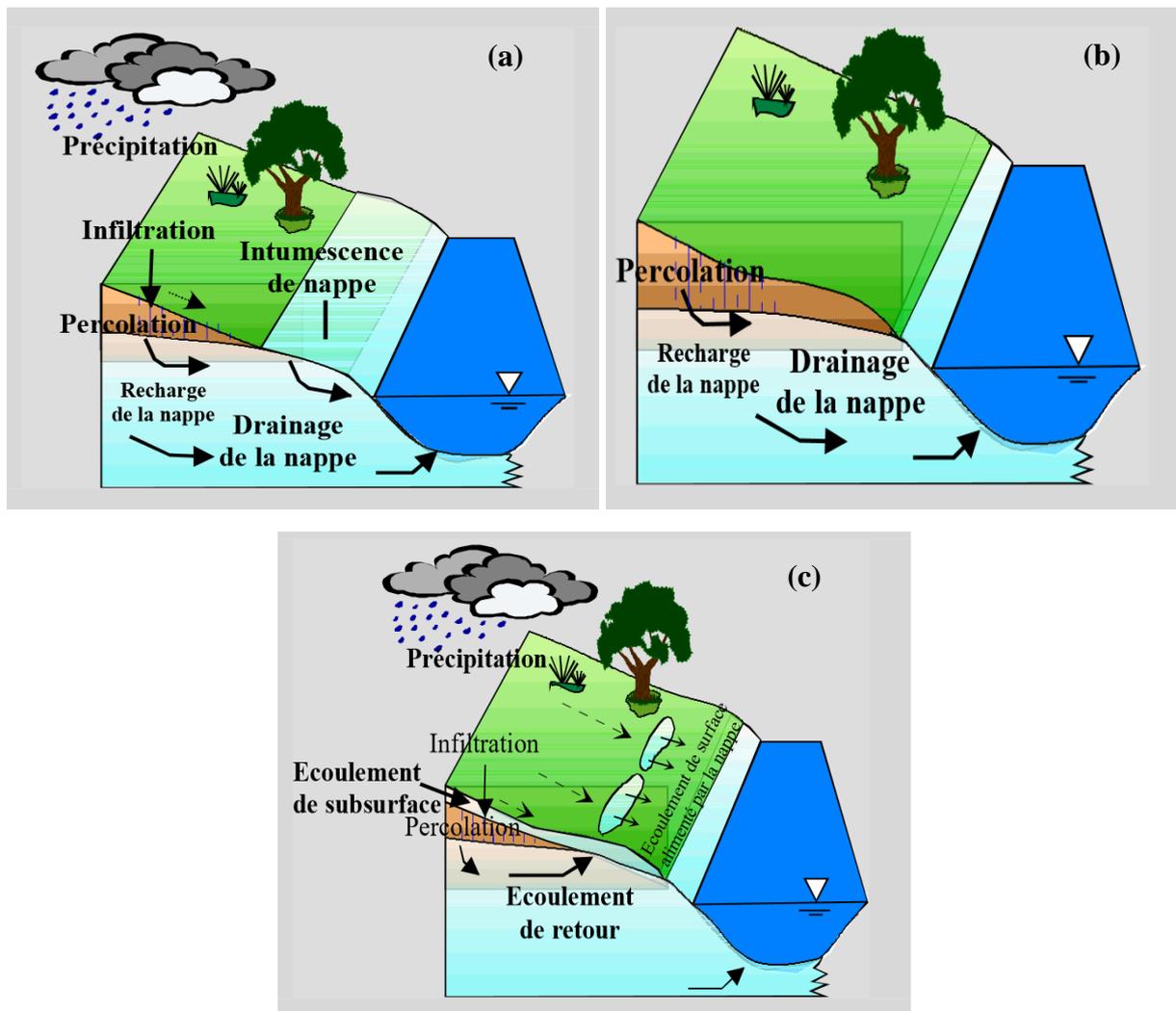


Figure 13 : Différents processus d'écoulement dans un bassin versant : (a) écoulement souterrain en milieu saturé ; (b) écoulement par intumescence de la nappe ; (c) écoulement de retour (Source : Ambroise, 1998)

Le calcul des volumes écoulés par chaque réservoir au cours d'une crue se fait par découpage horizontal de l'hydrogramme. Les volumes d'eau ainsi écoulés sont obtenus par planimétrie des surfaces correspondantes sur l'hydrogramme reporté en coordonnées normales $Q=f(t)$. Il est ensuite facile, après avoir dépouillé toutes les crues, de faire le bilan annuel de la contribution des différents réservoirs hydrologiques, les écoulements inter crues étant essentiellement dus à une alimentation par les eaux de nappes. Les techniques automatiques facilitent le travail, mais font toujours intervenir le jugement et l'expérience de l'auteur. Il existe d'autres méthodes hydrologiques pour calculer les volumes écoulés par chaque composante. Certaines sont basées sur : le découpage de l'hydrogramme annuel ; la courbe des débits classés ; les débits journaliers minimaux mensuels.

I.2.1.3.2. Méthode des traceurs géochimiques

L'utilisation combinée des informations hydrogéochimiques et isotopiques permet l'identification et la quantification de la contribution des différents réservoirs d'eau à l'écoulement des crues. Ces traceurs géochimiques peuvent être : i) conservatifs, à l'instar des isotopes stables et lourds de l'eau (^{18}O , ^2H) basés sur l'âge de l'eau des réservoirs ; ii) non conservatifs comme la plupart des traceurs chimiques basés sur l'existence dans le bassin, de plusieurs réservoirs caractérisés par des compositions chimiques homogènes, stables et distinctes.

I.2.1.4. Quelques travaux antérieurs effectués en hydrologie au Cameroun

Les travaux antérieurs effectués en hydrologie au Cameroun avaient pour but de comprendre le fonctionnement hydrologique des bassins versants à différentes échelles. En dehors des travaux effectués par Olivry (1986) et Sighomnou (2004) dans tous les bassins fluviaux du Cameroun, les autres études n'ont été menées qu'à l'échelle des grands bassins comme ceux du Congo (Boumba, Dja et Ngoko) par Sigha Nkamdjou (1994) ; du Nyong et de la Sanaga par Ndam Ngoupayou (1997) et Ndam Ngoupayou et *al.* (1998), du Mayo Tsanaga, du Ntem et du Nyong par Liéno (2007) ; du Nyong par Bineli Ambomo (2009) ; de la Bénoué par Dassou (2019) et Nonki et *al.* (2020) ; de la Sanaga par Kpoumié (2015) et Kpoumié et *al.* (2012 ; 2022) ; de la Kadey par Kouassy Kalédjé et *al.* (2016) et Kouassy Kalédjé (2021) ; du Ntem, de la Kienke et du Nyong par Ebodé (2022) et Ebodé et *al.* (2022). Par ailleurs, les travaux ont été effectués, dans les bassins de taille moyenne à petite comme ceux : de la Mefou à Nsimalen par Apouamoun Yiagnigni (2006), au CRH par Ndje Mbile (2013) et à Etoud par Tchamagang Touko (2014) ; du Mfoundi à Cami Toyota par Nguemou Tchado (2008), de Odza à Mvan Tropicana par Ngoumdoum Foumouo (2012) ; du Nkié à Mvan carrefour par Nteuga Njike (2012) ; de Olézoa à « trois statues » par Koé Miabe (2013). Ces travaux montrent que les activités anthropiques augmentent considérablement les écoulements dans les bassins versants urbains, contrairement aux bassins ruraux qui connaissent en majorités des baisses d'écoulement.

I.2.2. Modélisation en sciences hydrologiques

I.2.2.1. Généralités

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système physique donné et des processus explicatifs de son fonctionnement (Musy, 2013). Cette définition de modèle est un peu contrastée, car elle peut se faire en fonction de la discipline dans laquelle on se trouve. En mathématique par exemple, un modèle est utilisé pour mieux étudier un phénomène physique. De manière générale, les modèles sont conçus afin de pouvoir simuler tout ou une partie du comportement d'un système. La

représentation du système peut être physique et reposer sur un modèle réduit du système. Elle est plus souvent mathématique et alors formalisée par un ensemble d'équations exprimant les lois ou les concepts jugés utiles pour décrire de façon appropriée son comportement.

En raison de la diminution significative du nombre de stations hydro-pluviométriques observées à partir des années 1970 et des informations lacunaires observées dans les séries chronologiques, les modèles sont devenus un atout pour la maîtrise qualitative et quantitative de la ressource en eau (Paturel et *al.*, 2010a ; Blöschl, 2013).

Les modélisations sont également basées sur la combinaison des cartes de divers paramètres d'une région, en attribuant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre (Dixon, 2004). Les méthodes de modélisation comportent deux types d'approche que sont les modélisations numériques et les systèmes hiérarchisés ou encore les méthodes d'analyse et de prise de décision multicritères.

I.2.2.2. Historique de la modélisation

Avant le XVII^e siècle, la notion de modélisation était encore méconnue jusqu'à la publication de l'article "*Model*" où le modèle est défini comme une « représentation tangible, de taille égale, plus grande ou plus petite, d'un objet qui existe réellement ou qui doit être construit factuellement ou mentalement » (Boltzmann, 1902). Le concept "modèle" apparaît au XIX^e siècle dans le "cercle de Vienne" ; avant tout, ce sont les grands noms de l'électromagnétique tels que Maxwell, Helmholtz, Mach, Hertz et Kirchhoff qui vont commencer à utiliser ce concept.

En 1928 Balthazar Van der Pol, un physicien hollandais spécialiste des ondes électromagnétiques présente une analyse du "battement du cœur considéré comme une oscillation de relaxation et permet de faire un modèle électrique du cœur" (Van Der Pol, 1930). Dans les années 1930, les économistes et les statisticiens s'emparent de la notion de modèle. La 2^{ème} Guerre Mondiale voit une accélération des besoins en mathématiques appliquées, pour par exemple prévoir la logistique, analyser les options stratégiques et, malheureusement, le développement de systèmes d'armement.

Dès les années 1940, il est entendu que les modèles doivent fournir des résultats permettant d'identifier la meilleure décision sur la base de données parfois vague et incomplète. Par la suite, le développement des ordinateurs va accélérer le développement des modèles, comme ceux utilisés pour la modélisation des crues. Sous-jacent depuis la guerre, mais avec une formalisation depuis les années 1980, les modèles vont être utilisés pour l'aide à la décision. A la fin du XX^e siècle, les recherches

sur le climat vont faire progresser la théorie sur la modélisation des grands systèmes naturels et on aboutit maintenant à utiliser des ensembles de modèles.

I.2.2.3. Typologie des modèles

Dans le domaine des sciences de l'eau, plusieurs classifications des modèles existent et se font suivant différents critères et en fonction des auteurs.

Dingman, (2002) propose une classification en modèles : (i) physiques qui recourent à des maquettes de réalité paramétrée, de structure plus simple mais avec des propriétés qui combinent celles du prototype ; (ii) analogues qui étudient le comportement d'autres systèmes qui fonctionnent de manière similaire ou analogue au système qu'on souhaite étudier ; (iii) mathématiques qui font recours à une abstraction mathématique de la réalité à travers des équations et des formulations. Ces équations sont formulées en termes d'un groupe de variables et de paramètres du système et d'équations associées.

Chow *et al.* (1998) quant à eux divisent les modèles en deux classes : les modèles physiques décrits ci-dessus et les modèles abstraits. Dans cette classification, une nouvelle subdivision des modèles abstraits est proposée : (i) les modèles déterministes (MACRO) qui impliquent une relation de cause à effet entre les valeurs des paramètres choisis et les résultats obtenus à partir de l'application des équations ; (ii) les modèles stochastiques (AgriFlux-Pestiflux) qui incluent une composante aléatoire dans les entrées et / ou les paramètres.

Vuillemin (1998) propose une division des modèles mathématiques en : (i) modèles empiriques ou boîtes noires ; ils consistent généralement en une ou plusieurs équations avec un ou plusieurs paramètres calibrés par l'analyse des données ou une autre méthode. Les modèles basés sur des régressions, les algorithmes de séparation des hydrogrammes (Filtre digital à un paramètre (k), Boughton à deux paramètres (k et C), IHACRES à trois paramètres (k, C et αq), ...), l'approche par réseaux de neurones ou la méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark sont des exemples de modèles empiriques ; (ii) modèles conceptuels qui sont des représentations simplifiées de processus physiques, qui relèvent généralement de descriptions mathématiques. Les modèles GR4J (Perrin *et al.*, 2003), SWMM (Crawford et Linsley, 1966) ou certains modules de MHYDAS (Moussa et Chahinian, 2009) sont des modèles conceptuels ; (iii) modèles à bases physiques qui essaient de représenter les processus les plus pertinents d'un point de vue physique compte tenu de la signification des phases et des processus. Comme exemple de modèles à bases physiques, on a les modèles SHE (Abbott *et al.*, 1986) ; TOPMODEL. Parmi ces modèles mathématiques, on peut identifier ceux qui se concentrent

sur des événements de courte durée (heures / jours), et des modèles continus où l'échelle de temps peut atteindre plusieurs années.

Gosain *et al.*, (2009) reprennent la classification de Vuillemin (1998) et décomposent les modèles conceptuels en agrégés, semi-distribués et distribués (Figure 14). Dans les modèles agrégés, le bassin versant est modélisé comme une seule unité ; la réponse du bassin n'est évaluée qu'à la sortie, sans prendre explicitement en compte la réponse des sous-bassins individuels. Les modèles du Génie Rural (GR1A, GR2M) sont des exemples des modèles agrégés. Dans les modèles semi-distribués, un maillage divise le bassin versant en éléments. Les paramètres et les entrées du modèle varient spatialement entre ces éléments. C'est le cas du modèle RS MINERVE. Dans les modèles distribués (SWAT, TOPKAPI, Athis) enfin, le bassin est divisé en sous-éléments mais ils ne répondent pas nécessairement à un maillage prédéfini.

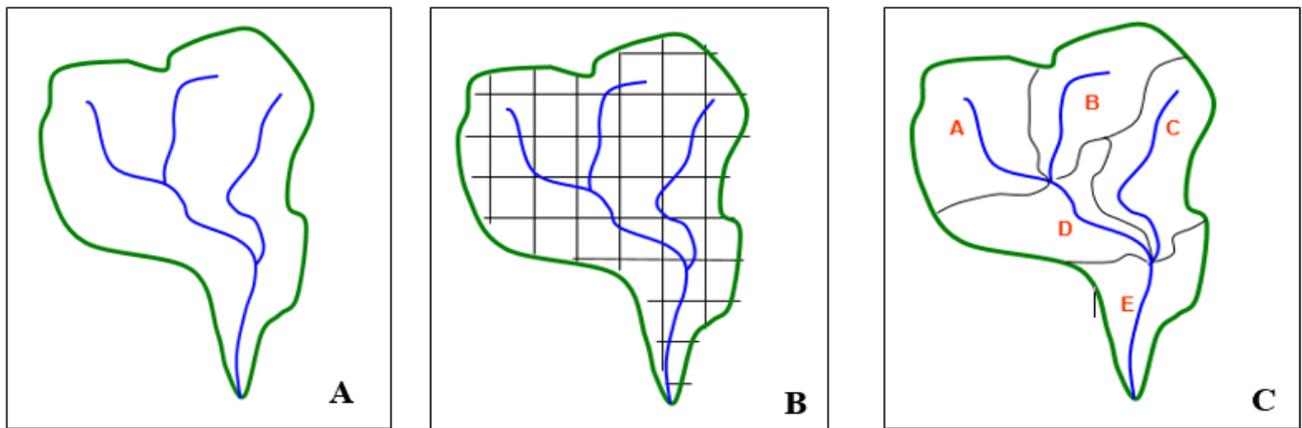


Figure 14 : Esquisse de : modèle agrégé (A) ; modèle distribué (B) ; modèle semi-distribué (C)
(Gosain *et al.*, 2009)

1.2.2.4. Données de base pour la modélisation

Les données sont la base de toute modélisation que ce soit en hydrologie ou dans n'importe quelle autre discipline. Les différentes données généralement utilisées pour la modélisation dans les sciences de l'eau sont :

- les données géographiques qui prennent généralement en compte les modèles numériques de terrain (MNT) et d'élévation (MNE). Ces modèles permettent de définir la géométrie, la topographie et la bathymétrie des zones d'études ;
- les données météorologiques qui sont des éléments fondamentaux qui alimentent les modèles et représentent les inputs (données d'entrée) pour le cas des modèles hydrologiques. Elles se composent principalement des précipitations, des températures et des évapotranspirations ;

- les données hydrologiques correspondent aux mesures des hauteurs d'eau et des débits des rivières ou autres infrastructures hydrauliques ;
- les autres données qui prennent en compte le type de sol (rétention, infiltration, humidité relative du sol...), l'occupation du sol, les caractéristiques hydrauliques des ouvrages et des réseaux de distribution (dimensions, profils en long et en travers...), les informations sur l'urbanisation, les campagnes d'enquêtes auprès des ménages ou révision des chroniques historiques des débits, des précipitations ou tous les autres évènements particuliers, etc. Les informations d'enquêtes auprès des ménages ou révision des chroniques historiques sont souvent utilisées comme moyen de validation des modèles.

I.2.2.5. Domaines d'application des modèles dans les sciences hydrologiques

L'utilisation des modèles en hydrologie a essentiellement pour rôle d'effectuer des prévisions en fonction des différents scénarii météorologiques, de simuler les débits des cours d'eau où les mesures sont insuffisantes, de dimensionner les ouvrages d'art, de délimiter les zones inondables et enfin de contribuer à la gestion durable de la ressource en eau. En général, les objectifs essentiels de la modélisation hydrologique sont : la prévision, la simulation, l'évaluation d'impact et le contrôle.

I.2.2.6. Quelques modèles appliqués au Cameroun

Plusieurs travaux ont été effectués ces dernières années sur la modélisation dans différents bassins versants camerounais. Ces différentes études ont généralement adopté l'approche de modélisation basée sur l'application des modèles numériques préconçus. On peut ainsi citer les travaux réalisés dans le bassin versant du Lac Tchad situé en zone sahélienne (2 500 000 km²) par Bader *et al.* (2011) ou ils mettent sur pied un modèle hydrologique conceptuel à base physique pour reproduire les volumes d'eau. Le modèle hydrologique conceptuel HBV-Light a permis de simuler efficacement le changement de débit dans le bassin versant de la Bénoué (Nonki *et al.*, 2020). Sans oublier l'application du modèle du Génie Rural GR2M par Dassou *et al.* (2019) pour reproduire les écoulements de la Bénoué. Plusieurs modèles ont été appliqués dans le bassin versant de la Sanaga, il s'agit : du modèle HEC-MS (utilisable en condition global, semi-distribué et distribué) utilisé pour la reproduction des écoulements de la Sanaga à Mbakaou et de son affluent le Djerem (Boyogueno *et al.*, 2012) ; du test des modèles hydrologiques globaux de la famille « Génie Rural » de types GR1A, GR2M, GR3M, et GR4J sur la Sanaga à Nachtigal par Messanga *et al.* (2019). Pour évaluer le potentiel hydroélectrique du fleuve Wouri-Nkam (8 192 km²) situé en zone côtière, Yevalla *et al.* (2018) a appliqué le modèle HEC-MS qui a donné des résultats très peu satisfaisants. On note également l'application du modèle SWAT par Ebode (2021) dans le bassin versant du Nyong situé

en zone équatoriale forestière. Les bassins versants de tailles moyenne à petite ont très peu été explorés. Seul les bassins versants de la Mefou et du So'o ont été des sites d'expérimentation de quelques types de modèles. On peut citer les travaux de Bakoh (2008) qui applique pour le modèle hydrologique conceptuel HBV-Light dans le bassin versant de la Mefou. L'étude de Jourdan (2019) quant à elle vient proposer une version améliorée du modèle MHYDAS au contexte tropical urbain peu jaugé propre au bassin versant de la Mefou. Sans oublier la mise en œuvre du modèle de pluie-débit de réseau de neurones artificiels pour une microcentrale hydroélectrique par Kengne Signe et *al.* (2017) dans ledit bassin. On a également les récents travaux de d'Ebodé et *al.* (2022) dans le bassin forestier du So'o. Dans l'ensemble, les résultats de ces modélisations obtenus montrent une bonne reproduction des débits dans l'ensemble des bassins versants camerounais étudiés exception faite des bassins versants situés en zone littorale (Wouri-Nkam). Ceci est probablement dû à l'influence marine et des eaux souterraines, mais aussi au volume des données d'entrées limitées dans le temps.

I.2.3. Risques hydro-climatiques

I.2.3.1. Généralités

Le monde entier fait actuellement face à plusieurs risques et catastrophes environnementaux naturels (hydrométéorologiques, géologiques, sanitaires, d'invasion par les acridiens et pachydermes) et technologiques (industriels, incendies/explosions, effondrement d'immeubles, transport de matières dangereuses, accidents liés au transport de personnes) (MINEPDED/CARFAD, 2019). De tous ces risques et catastrophes qui sévissent, les risques hydro-climatiques sont ceux qui causent le plus de dommages et, les plus connus sont la sécheresse, les inondations, les vents violents et les mouvements de masses (glissements de terrain et coulées boueuses).

I.2.3.2. Risques hydro-climatiques dans le monde

Les risques hydro-climatiques touchent toutes les régions du globe, depuis les régions désertiques jusqu'à la Sibérie, en passant par les zones tropicales où le nombre de victimes est de plus en plus élevé (UNESCO, 2007). Durant la décennie 2007-2017, les inondations ont représenté 43,71% des risques naturels survenus à l'échelle mondiale, affectant 2,5 millions d'âmes (CRED, 2018). Certaines révèlent qu'avec le changement climatique, la croissance démographique, l'urbanisation anarchique amplifiés par l'orohydrographie des différentes zones, les risques d'inondation devraient avoir un impact nettement plus important durant les prochaines décennies (UNISDR, 2015).

En ce qui concerne les risques d'inondation, plusieurs études ont été effectuées afin de ressortir les facteurs explicatifs de leurs générations (Kazakis *et al.*, 2015 ; Magdalena *et al.*, 2017 ; Samanta *et al.*, 2018 ; Das, 2019 et 2020 ; Seyed *et al.*, 2020 ; Das et Gupta, 2021 ; Rahman *et al.*, 2021 ; Iroume *et al.*, 2022). Ces travaux ont pu identifier, cartographier et évaluer les dégâts liés aux inondations à travers l'utilisation des SIG, la modélisation hydrologique et hydraulique et les études environnementales.

I.2.3.3. Typologie des inondations

La littérature scientifique portant sur la gestion des risques liés aux inondations montre que la typologie des inondations varie parfois de manière significative d'une étude à l'autre. Les inondations peuvent ainsi être classées selon leurs sources (Blöschl *et al.*, 2019) ; leur origine naturelle ou accidentelle (Magdalena *et al.*, 2017) ; leur vitesse d'écoulement (Colmet-Daage *et al.*, 2017) ; leurs impacts économiques et humains ou encore selon une combinaison de ces différents critères (Das et Gupta, 2021).

La typologie la plus couramment rencontrée dans la littérature combine les causes et les impacts économiques et humains des inondations. Elle différencie ainsi jusqu'à six (06) types d'inondations à savoir : les inondations fluviales, les inondations pluviales, les inondations côtières et estuariennes, les inondations par rupture d'ouvrages de retenue d'eau, les inondations par remontée de nappe et les inondations éclairées. Celles vécues dans le bassin versant de la Mefou et la ville de Yaoundé sont des inondations dites rapides et violentes ou encore les inondations pluviales urbaines (MINEPDED/CARFAD, 2019).

I.2.3.4. Risques d'inondation au Cameroun

Le Cameroun est confronté aux risques d'inondation qui sévissent chaque année, laissant variablement des dommages humains, économiques et environnementaux au cœur de nombreuses préoccupations (MINAT/DPC, 2017 ; MINEPDED/CARFAD, 2019).

Entre 2007 et 2015, les inondations ont affecté près de 367 276 personnes faisant ainsi d'elles, les risques les plus vécus dans le pays (CRED, 2018). Ces inondations sont surtout observées à de degrés divers dans les localités situées en zone soudano-sahélienne (Garoua, Kousseri, Maroua, ...), tropicales humides (Yaoundé, Bertoua, ...) et côtières (Douala, Yabassi, Limbé, Kribi, ...). Plusieurs investigations ont été effectuées pour la cartographie des risques d'inondation et l'inventaire des pertes et dégâts liés aux zones inondables à l'échelle du Cameroun à partir des données historiques et des SIG (Tchotsoua *et al.*, 2007 ; Leumbe Leumbe *et al.*, 2015 ; Bang *et al.*, 2017 ; Moffo Zogning,

2017 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2019). Ces études ont révélé que les premières traces d'inondation dateraient de l'époque coloniale, vers les années 1950 à Yaoundé. Elles ont également démontré que, le phénomène d'inondation prend de plus en plus d'ampleur et s'étend actuellement sur toutes les grandes agglomérations du pays avec une augmentation des fréquences d'apparition. Cette recrudescence des inondations aurait pour éléments « moteur » la variabilité et/ou le changement climatiques, les caractéristiques orohydrographiques, l'accroissement de la population et la pauvreté (MINEPDED/CARFAD, 2019).

I.2.3.5. Cartographie des risques d'inondation

La création de la carte des risques d'inondation nécessite des techniques et/ou des méthodes performantes. Trois catégories de méthodes permettent la cartographie des risques d'inondation quand celui-ci est en cours. Il s'agit :

- des relevés sur le terrain ;
- des Systèmes d'Information Géographique (SIG) ;
- des méthodes basées sur la modélisation.

Cependant, malgré leurs avantages respectifs, certains de ces outils présentent des limites importantes, qui réduisent leur intérêt pour la caractérisation des ces risques dans un contexte de gestion de crise.

I.2.3.5.1. Relevés sur le terrain

L'acquisition de données directement sur le terrain est une méthode largement utilisée pour l'étude des phénomènes spatiaux et environnementaux, mais n'est pas adaptée à la caractérisation des risques d'inondation en phase de gestion de crise (Lang et *al.*, 2008 ; Sado-Inamura et Fukushi, 2019). En effet, l'échantillonnage spatial réalisé sur le terrain est souvent peu élevé et mal distribué, ce qui ne permet pas d'obtenir des informations précises en tout point de ces zones. L'autre limite de cette méthode est liée au temps nécessaire à l'acquisition, au traitement et à la production de la carte de risque qui est souvent long.

I.2.3.5.2. Systèmes d'Information Géographique (SIG)

La cartographie et la télédétection font partie des outils indispensables des SIG utilisées pour l'analyse des risques d'inondation.

- **Cartographie**

La cartographie est l'étape la plus importante dans l'étude et l'analyse des risques. Elle est utilisée pour ressortir les différentes caractéristiques physiographiques et agropédologiques d'un bassin versant d'étude ainsi que de diverses cartes thématiques. A cette connaissance fondamentale, la cartographie facilite également le traitement et l'analyse spéciale des données, la visualisation, l'interprétation et l'évaluation des résultats.

- **Téledétection**

Différents outils de téledétection peuvent être utilisés pour caractériser les risques d'inondation à travers l'utilisation des MNT et des images satellites obtenus par photographie aérienne et satellitaire (Rahmati et *al.*, 2016 ; Samanta et *al.*, 2018 ; Sarkar et Mondal, 2020 ; Seyed et *al.*, 2020). La photographie aérienne, qui permet d'obtenir des images de haute résolution de la zone d'impact, est considérée comme une source de données de qualité pour la délimitation et l'analyse des zones à risque (Schumann et *al.*, 2009). L'utilisation des capteurs optiques satellitaires de très haute résolution spatiale de l'ordre du mètre permet d'identifier avec précision les cours d'eau et les infrastructures (bâti, ponts, ...). L'acquisition de ces outils est généralement limitée par le coût élevé des acquisitions aéroportées et par le temps nécessaire à l'acquisition des données, souvent trop long (Mallinis et *al.*, 2011). À cela peuvent s'ajouter des conditions météorologiques empêchant le survol de la zone à risque et enfin les difficultés de détection des zones inondées sous un couvert végétal dense ou à travers un épais couvert nuageux (Sarkar et Mondal, 2020).

I.2.3.5.3. Modélisation

- **Modélisation numérique**

La modélisation numérique permet de simuler numériquement et de prédire l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques des risques (L'Homme, 2006). Ces méthodes sont couramment employées dans le cadre de la gestion des risques, aussi bien pour la prévision que dans les volets de prévention et de gestion de crise. La modélisation repose sur la sélection des paramètres considérés comme représentatifs pour estimer la survenue d'un risque. Les modèles hydrologiques sont utilisés principalement pour prévoir les débits de crue correspondants aux différentes périodes de retour d'un territoire donné. Les modèles hydrauliques quant à eux ont pour principal attrait de simuler numériquement des crues hypothétiques ou réelles, ce qui permet de caractériser l'aléa dans l'espace et le temps (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement, débits, durées de submersion...). Sur cette base plusieurs modèles ont été développés pour la reproduction des événements pluvieux et la définition des zones d'emprise des inondations. Il s'agit par exemple des modèles HBV-Light, SCS, Athys, pour

la modélisation hydrologique ; les modèles HEC-RAS (USA Army) et Iber pour la modélisation hydraulique. L'inconvénient de l'utilisation de ces modèles est qu'ils nécessitent un volume important de données parfois coûteux et difficiles d'obtenir (Mason et *al.*, 2012).

- **Système hiérarchisé**

Ce système est basé sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de risque d'autres zones (autres bassins). Il est généralement utilisé pour évaluer le risque à moyenne ou à grande échelle (régionale ou nationale). Le système hiérarchisé le plus utilisé est la méthode de prise de décision d'analyse multicritère (MDAC), qui permet de concilier plusieurs aspects afin de produire un rendu qui reflète la réalité. Ici, chaque critère a une gamme de variation naturelle définie, qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés selon la réalité de chaque zone d'étude. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré d'influence sur le phénomène étudié. Les approches de MCDA peuvent être divisées en trois catégories (Schärting, 1985) :

- agrégation complète du haut en bas « top-down approach » ; ici on cherche à agréger les n-critères afin de les réduire en un critère unique. On suppose que les jugements sont transitifs. C'est le cas des méthodes WPM (Weight Product Method) de Bridgman (1922), l'AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty (1980), ... ;
- agrégation partielle du bas vers le haut « bottom-up approach » ; on cherche ici à comparer des actions potentielles ou les classements les uns aux autres et à établir entre ces éléments des relations de surclassement. On doit alors respecter l'incomparabilité. A titre d'exemple, on a la famille des méthodes Electre I, II, III, ... de Roy (1968) ; Prométhée I et II de Brans (1980) ; Melchior de Leclerc (1984) ; Qualitex de Paelinck (1976) ; Naiade (Munda, 1995) ... ;
- agrégation locale ; on cherche ici en premier lieu une solution de départ, par la suite, on procède à une recherche itérative pour trouver une meilleure solution. Il s'agit par exemple des méthodes des Cônes d'amélioration de Geoffrion (1972), STEM de Benayoun et Tergny (1969) pour ne citer que celles-ci.

Dans l'ensemble, les méthodes d'analyse et de prise de décision multicritère ainsi présentées sont largement décrites dans la littérature.

On peut noter que de nos jours, les travaux visant à cartographier les risques d'inondation font appel à la combinaison de plusieurs techniques et/ou méthodes afin de minimiser la marge d'erreur.

CONCLUSION

Le bassin versant de la Mefou (840 km²) est situé en Afrique Centrale, dans la région du centre au Cameroun. Le climat qui y règne est de type équatorial et tropical de transition avec quatre saisons inégalement réparties durant l'année. La végétation est constituée par une forêt fortement dégradée par les activités anthropiques. Le relief appartient à l'unité géomorphologique connue sous le nom du plateau sud camerounais caractérisé par une alternance des collines et de vallées lui donnant une structure en demi-orange. La Mefou est le cours d'eau principal qui le traverse avec comme principaux affluents le Mfoundi, l'Anga'a, l'Ezala, l'Abierdegue en rive gauche et le Nga, l'Avoua, l'Etoa, le Nsouo en rive droite. Le substratum géologique est constitué de roches métamorphiques (gneiss, migmatites) d'âge précambrien sur lequel se développent des sols ferrallitiques rouges et des sols ferrallitiques jaunes au niveau des versants et des sols hydromorphes au niveau des bas-fonds. Deux types d'aquifère sont identifiés dans la zone : un aquifère supérieur poreux rencontré au niveau des altérites et un aquifère inférieur fissuré/fracturé (gneiss et migmatites). La population du bassin est galopante et constituée de divers groupes ethniques, qui occupent les quartiers à habitat spontané, évolutif et moderne. L'extension horizontale des nouvelles terres est la pratique la plus courante. L'accroissement de la population cause de nombreux problèmes environnementaux dont les plus vécus sont les inondations. Ce chapitre se termine par les travaux antérieurs sur les processus hydrologiques, les techniques et outils généralement utilisés pour la modélisation dans les sciences hydrologiques et la cartographie des risques hydro-climatiques.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

INTRODUCTION

Ce chapitre présente successivement les principales étapes mises en œuvre pour la réalisation de ce travail. Il s'agit de la recherche documentaire et cartographique, des différentes investigations effectuées sur le terrain et en laboratoire.

II.1. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ET CHOIX DU SITE D'ETUDE

II.1.1. Recherche bibliographique

Cette étape a consisté à mener une recherche documentaire et cartographique dans la zone d'étude qui prend ici en compte le bassin versant de Mefou et la ville de Yaoundé et de ses environs. Il s'est agi d'effectuer une synthèse des travaux antérieurs déjà réalisés dans cette zone d'étude mais aussi ceux réalisés dans les autres sites ayant le même contexte géologique et géomorphologique. Les informations diverses concernant le milieu biophysique (climat, orohydrographie, lithologie, pédologie, végétation, hydrogéologie, ...) et humain (activités socioéconomiques, démographie et urbanisation) ont ainsi été inventoriées et présentées dans le chapitre 1 ci-dessus. Par ailleurs, cette étape a également permis d'identifier et de circonscrire la partie amont du bassin versant de la Mefou dont l'exutoire est situé à Nsimalen comme site d'étude.

II.1.2. Critères de choix du site d'étude : la partie amont du bassin versant de la Mefou à Nsimalen (BVAM)

Les critères de choix du site des études concilient en général les critères scientifiques relatifs à la pertinence de l'objet d'étude aux critères pratiques d'accessibilité et de représentativité. A ce titre, les critères qui ont orienté le choix de la partie amont du bassin versant de la Mefou (BVAM) à Nsimalen comme site d'étude reposent sur :

- la représentativité de ce bassin d'étude au niveau spatial qui prend en compte une partie rurale et une partie urbaine représentée ici par le sous bassin versant du Mfoundi qui couvre entièrement la ville de Yaoundé ;
- l'existence de quelques équipements hydro-climatiques encore fonctionnels dans ce site ;
- l'accès facile aux stations hydro-climatiques ;
- la disponibilité d'une longue chronique de données hydro-climatiques et hydrodynamiques dans ce sous bassin.

II.2. TRAVAUX DE TERRAIN

Les travaux de terrain ont consisté à la reconnaissance du site d'étude, à l'installation et à la réhabilitation des stations hydro-climatiques et, à la collecte des données primaires et secondaires.

II.2.1. Reconnaissance du site d'étude : le BVAM

Une campagne de reconnaissance du site d'étude a eu lieu en en janvier 2018 (début de ce travail de thèse). Cette mission exploratrice a ainsi permis de se familiariser avec le terrain, de se faire une idée sur l'étendue du travail à effectuer et de ses diverses contraintes et enfin de caler une méthodologie d'investigation efficace sur le terrain. Elle a également permis de recenser toutes les stations hydro-climatiques existantes dans la zone d'étude.

II.2.2. Description du site d'étude

Avec une superficie d'environ 425 km² à Nsimalen, le BVAM s'étend entre les latitudes 3° 30' et 3° 58' Nord et les longitudes 11°20' et 11°40' Est (Olivry, 1986) (Figure 15). Il est situé dans la région du Centre Cameroun et couvre partiellement la ville de Yaoundé (capitale politique du Cameroun). Le climat qui y règne est du type tropical et équatorial de transition à quatre (04) saisons inégalement réparties dans l'année. Son relief présente une succession de collines entrecoupées par des vastes vallées marécageuses avec des altitudes comprises entre 630 à 1292 m. Le cours d'eau Mefou d'ordre 5 qui le traverse (Tableau 2), prend sa source aux pieds des monts Mbam-Minkoum à plus de 1292 m d'altitude et s'écoule en suivant la direction NW-SE (Figure 15). Il présente un réseau hydrographique dense de type dendritique caractérisé par un écoulement permanent tout le long de l'année. Il est grossi par plusieurs affluents en rive gauche (Mfoundi, Anga'a, Ezala, Abierdegue, Mbeme, Ngou) et en rive droite (Nga, Nsa'a, Avoua, Etoa, Nsouo) (Figure 15). Ce réseau hydrographique est complété par un plan d'eau artificiel le lac de la Mefou (1,4 km²), au nord-ouest du bassin utilisé pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Yaoundé. Le BVAM peut être subdivisé en deux grandes entités en fonction de son degré d'urbanisation : une partie rurale et une partie urbaine représentée par le Mfoundi.

Le sous bassin versant du Mfoundi (96 km² environ) qui couvre la plus grande partie du bassin de la Mefou et la partie urbanisée de la ville de Yaoundé est localisé entre les latitudes 3° 45' et 3°55' Nord, et les longitudes 11° 27' et 11°34' Est (Figure 15). Il couvre six des sept arrondissements de la ville de Yaoundé (Yaoundé I, II, III, IV, V, VI). Sa partie sud est caractérisée par une vaste vallée marécageuse de plus en plus habitée du fait de la forte démographie. Le Mfoundi (ordre 4) prend sa source au NNW de la ville de Yaoundé, au sommet du mont Fébé à environ 950 m d'altitude. Il coule suivant la direction N-S et se jette dans la Mefou au niveau d'Afan-Oyoo. Ces principaux affluents

en rive gauche sont : Ntsomo, Nkie, Akée, Ewoué, Ebogo, Odza ; et en rive droite : Ntem, Ekozoa, Abiergeu, Mingoa, Biyemé, Olézoa. Ce réseau hydrographique est complété par quelques plans d'eau artificiels dont les principaux sont le lac municipal de Yaoundé (0,15 km²) et l'étang de Melen (0,01 km²) utilisés respectivement pour des usages récréatifs, l'aquaculture et la pêche. Le Mfoundi subit actuellement des modifications importantes de son cours naturel. Il traverse de nombreuses infrastructures hydrauliques (ponts, buses, etc.) et circule en souterrain au niveau du rond-point de la Poste Centrale. La majorité des aménagements hydrauliques est sous-dimensionnée et non entretenue (obstruction par les ordures, destruction lors des crues, etc.) provoquant des inondations régulières et ravageuses (Moffo Zogning *et al.*, 2011). De plus, à l'initiative de la Communauté Urbaine de Yaoundé (CUY) à travers le Projet d'Assainissement de Yaoundé (PADY), le cours d'eau Mfoundi et ses affluents principaux sont canalisés sur 6 km afin de limiter les inondations.

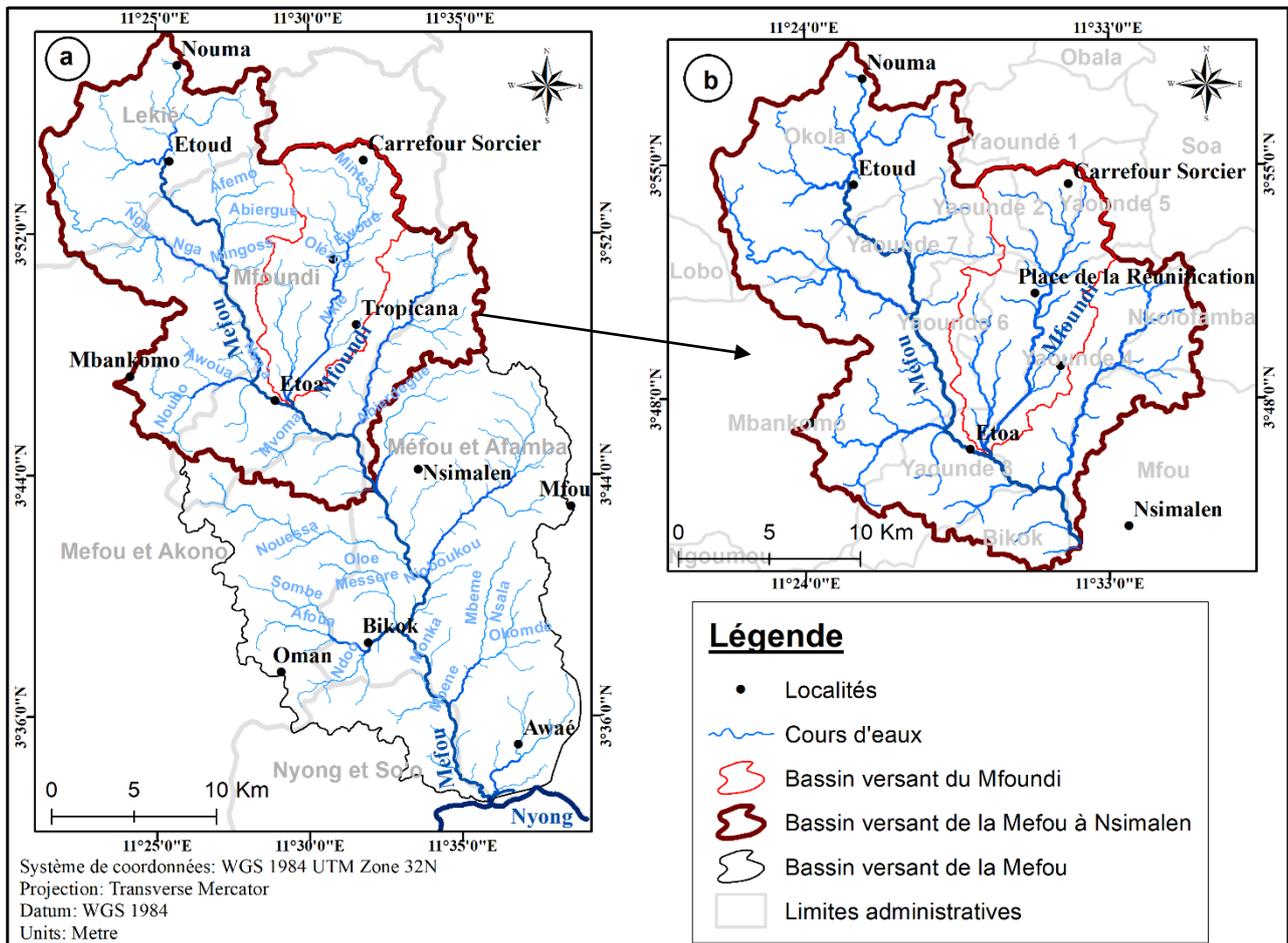


Figure 15 : Présentation du site d'étude : (a) bassin versant de la Mefou (BVM), (b) bassin versant de la Mefou à Nsimalen (BVAM)

Tableau 2 : Caractéristiques physiographiques du bassin versant de la Mefou à Nsimalen (BVAM), du sous bassin versant du Mfoundi et des affluents du Mfoundi (Rive droite et rive gauche)

Caractéristiques												
Bassin versant	X	Y	A (km ²)	P (km)	CG	Le (km)	le (km)	Z Min (m)	Z Max (m)	Z Médian (m)	O	
Mefou à Nsimalen	3° 30' et 3° 58'	11°20' et 11°40'	425	90	1,22	31,3	13,6	630	1 292	750	5	
Mfoundi	3° 45' et 3°55'	11° 27' et 11°34'	96	27	1,38	17,2	5,58	670	1 100	730	4	
Affluents en Rive Gauche du Mfoundi	Tongwala	3° 53' et 3° 55'	11° 31' et 11° 32'	3,42	9,2	1,4	3,52	0,97	715	770	739	2
	Ntem	3° 52' et 3° 55'	11° 31' et 11° 33'	5,8	15,0	1,8	6,92	0,83	713	777	745	3
	Ebogo	3°52' et 3° 53'	11° 32' et 11° 33'	3,38	10,0	1,6	3,07	1,1	700	757	724	2
	Ewoué	3°51' et 3° 52'	11° 31' et 11° 34'	3,64	10,0	1,5	4,25	0,85	687	770	741	2
	Akée	3°50' et 3° 51'	11°31' et 11° 33'	4,92	9,2	1,2	3,23	1,52	762	713	736	2
	Nkié	3° 48' et 3° 50'	11° 31' et 11°32'	5,17	14	1,8	6,16	0,84	660	760	720	2
	Odza	3° 46' et 3° 50'	11°30' et 11°32'	6,1	14	1,59	5,96	1,2	670	750	712	2
Affluents en Rive Droite du Mfoundi	Abiergueu	3° 52' et 3° 54'	11°29' et 11° 31'	6,25	15,0	1,5	5,58	1,12	715	840	732	2
	Ekozoa	3° 52' et 3° 54'	11°30' et 11° 31'	4,03	7,5	1,15	2,53	1,59	712	830	738	2
	Djougolo	3° 51' et 3° 53'	11°30' et 11° 32'	1,42	5,6	1,3	2,08	0,68	705	745	728	2
	Mingoa	3° 51' et 3° 53'	11°28' et 11° 31'	3,49	9,0	1,4	3,74	0,93	725	780	760	2
	Olézoa	3° 50' et 3° 51'	11° 29' et 11° 31'	3,62	8,44	1,21	3,10	1,12	700	795	740	2
	Ntsomo	3° 48' et 3° 51'	11°29' et 11° 30'	8,02	15	1,5	6,32	1,26	680	740	738	2
	Biyéme	3° 46' et 3° 51'	11°28' et 11° 30'	12,15	19,0	1,6	8,54	1,42	680	753	719	3

Légende : X=Latitude ; Y=Longitude ; A=Superficie du bassin ; P=Périmètre ; CG=Coefficient de compacité de Gravelius ; Le=Longueur équivalente du bassin ; le=Largeur équivalente du bassin ; Z=altitude ; Z. Max=Hauteur maximale du bassin ; Z. Min=Hauteur minimale du bassin ; Z. Médian=Hauteur moyenne du bassin ; O=Ordre des cours d'eau

II.2.3. Choix, réhabilitation/installation et description des stations hydro-climatiques

II.2.3.1. Stations climatiques

Deux (02) stations météorologiques ont été identifiées et cinq (05) stations pluviométriques ont été installées dans le BVAM à Nsimalen. Il s'agit des stations météorologiques situées à Mvan aéroport et Nsimalen aéroport et des stations pluviométriques disposant des pluviomètres à lecture directes installés à Etoud, Fustel, Biyem-Assi, Ecopark et Nsimalen (Figure 16). Les caractéristiques de ces différentes stations sont présentées dans le tableau 3 et la figure 17.



Figure 16 : Pluviomètres installés à : a) Nsimalen ; b) Etoud (*Cliché Nsangou, 2019*)

Parmi les sept stations présentées ci-dessus, seulement quatre ont été retenues pour le suivi sur la base des critères suivants : la répartition spatiale des stations à l'échelle du BVAM ; la disponibilité et la durée des observations ou la taille de l'échantillon ; la position de ces stations dans la partie urbaine (Mfoundi) et dans la partie rurale (Etoud) ; la qualité des données existantes (absence des lacunes). Il s'agit : i) de la station météorologique automatique de Mvan aéroport qui a été installée en 1964. Cette station est équipée d'une centrale qui relaie les informations des différents capteurs qui servent à enregistrer les paramètres climatiques (pluies, températures, humidité, ensoleillement, ...) vers un serveur en ligne ; ii) de trois (03) stations pluviométriques (Fustel, Biyem Assi et Ecopark) installées en février 2018 (Tableau 3 et Figure 17).

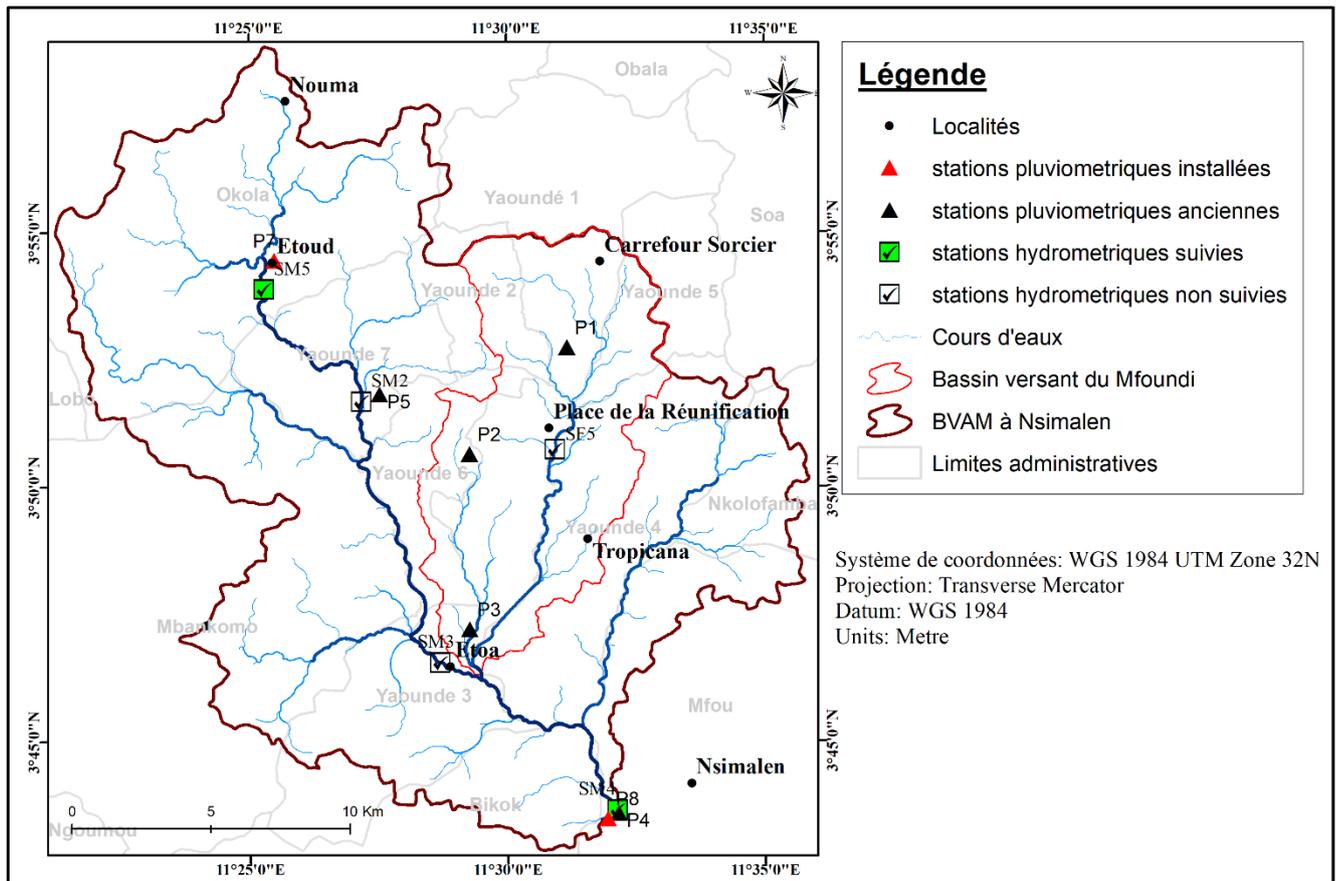


Figure 17 : Equipements hydropluviométriques identifiés, réhabilités et/ou installés dans le BVAM

Tableau 3 : Stations météorologiques et pluviométriques identifiées et/ou installées dans le BVAM

Type de stations	Code	Localité	X	Y	Z	Période d'observation	Source/ origine	n
Météorologiques	P1	Mvan aérienne	3°84'	11°52'	760	1964-2020	DMN/ MINTRANS	57
	P8	Nsimalen aéroport	3°43'	11°32'	680	1923-2006	DMN/ MINTRANS	//
Pluviométriques	P7	Etoud	3° 54'	11° 25'	728	Depuis 2018	*	//
	P1	Fustel	3° 52'	11° 30'	753	Depuis 2018	*	//
	P2	Biyem-Assi	3°50'	11° 30'	778	Depuis 2018	*	//
	P3	Ecopark	3° 47'	11°29'	677	Depuis 2018	*	//
	P4	Nsimalen	3° 43'	11° 31'	669	Depuis 2018	*	//

Légende : X=Latitude ; Y=Longitude ; Z=altitude ; n=nombre d'année d'observation ; *= installées durant la présente étude ; DMN=Direction de la Météorologie Nationale ; MINTRANS=Ministère de Transport.

II.2.3.2. Stations hydrométriques

Durant la campagne de reconnaissance, quatre (04) stations hydrométriques ont été identifiées sur le cours d'eau Méfou notamment à Etoud, à Nkolbisson au CRECC, à Etoa et à Nsimalen (Tableau

4). Seules les stations d'Etoud et de Nsimalen ont été réhabilitées par le remplacement des échelles limnimétriques jugées défectueuses et par la mise à niveau des échelles inclinées (Figure 17).

Les critères de choix des stations hydrométriques sont les mêmes que ceux des stations pluviométriques. Toutefois en plus de ces derniers, les critères suivants ont également été pris en comptes : la représentativité du BVAM par rapport au BVM qui prend en compte la partie rurale et la partie urbaine, la disponibilité et la qualité de paramètres hydrométriques sur une longue période de temps, la volonté d'actualiser les résultats sur les stations déjà suivies et, la localisation des stations hydrométriques à proximité des stations météorologiques et pluviométriques.

Sur la base de ces différents critères, la station hydrométrique retenue dans le cadre de cette étude est celle de la Mefou à Nsimalen. Toutefois, les débits journaliers de certaines stations ont été utilisés pour mieux analyser et illustrer les phénomènes d'inondation dans la zone. Les caractéristiques de ces différentes stations hydrométriques sont illustrées dans le tableau 4. La station d'Etoud a été remplacée par l'installation de deux échelles (0-1 m et 1-2 m) bien qu'elle ne soit pas utilisée dans cette étude, tandis que la station de Nsimalen a été réhabilitée en remplaçant l'échelle 0-1 m précédemment emportée par les eaux (Figure 18).



Figure 18 : Stations hydrométriques installées et/ou réhabilitées dans le BVAM : a) station de Nsimalen ; b) station d'Etoud. (Cliché Nsangou, 2019)

Tableau 4 : Stations hydrométriques inventoriées et réhabilitées dans le BVAM

Cours d'eau	Station	X	Y	Z (m)	S (km ²)	Période obs	n	Sources
Mefou	Etoud	03° 54'	11° 25'	739	69,94	2012-2013	1	Tchamagan (2013) ; *
Mefou	CRECC à Nkolbisson	03° 48'	11° 27'	706	107	2012-2013	1	Ndje Mbile (2013)
Mefou	Etoa	3° 47'	11° 29'	665	235	1964-1968	4	Olivry (1986)
Mefou	Nsimalen	3° 44'	11° 32'	650	425	1964-2019	32	Olivry (1986) ; CRECC ; *

Légende : X= Latitude ; Y= Longitude ; Z= Altitude ; S=surface ; CRECC= Centre de Recherche sur l'eau et le Changement Climatique ; obs.= observation ; n= nombre d'année d'observation ; *= réhabilitée durant la présente étude.

II.2.4. Collecte des données primaires

Les données primaires sont celles qui proviennent des observations faites directement sur le terrain à partir des équipements installés et suivis dans la présente étude. Elles prennent en compte les paramètres climatiques et hydrométriques.

II.2.4.1. Paramètres climatiques

Les paramètres climatiques primaires sont essentiellement constitués des hauteurs de pluies journalières. Elles sont obtenues à partir des lectures quotidiennes par des observateurs. Les lectures se font à 07 h et elles sont consignées par la suite sur des fiches initialement préconçues. Le suivi qui a débuté depuis février 2018 se poursuit jusqu'aujourd'hui.

II.2.4.2. Paramètres hydrométriques

Les paramètres hydrométriques obtenus dans cette étude sont constitués des hauteurs d'eau directement lues sur les échelles limnimétriques. Cette étape a consisté à recruter et à former des observateurs sur place pour la lecture directe des hauteurs d'eau deux fois par jour (6 h et 18 h) sur des fiches d'enregistrement des hauteurs d'eau préalablement conçues. Cette opération qui s'est déroulée durant l'année hydrologique 2018/2019 a permis de valider les données obtenues auprès du CRECC ex-CRH.

II.2.4.3. Inventaire des zones inondables dans la zone d'étude

Des observations directes ont été également effectuées à des endroits régulièrement sujets aux inondations. A cet effet, les coordonnées géographiques de ces endroits et les caractéristiques des zones inondables tels que les emprises et les laisses de crues, les types d'occupation du sol, le mode

d'entretien des drains des cours d'eau, la distances entre le cours d'eau et les habitations, etc. ont été inventoriés (Figure 19). Ces informations ont été par la suite, complétées par des enquêtes et des entretiens collectifs et individuels auprès des populations riveraines ; il s'agit ici de la « cartographie participative ».



Figure 19 : Exemples de quelques maisons présentant des laisses de crues dans le quartier Ahala II
(Cliché Nsangou, 2020)

II.2.5. Collecte des données secondaires

Les données secondaires sont celles qui existent déjà et qui sont accessibles et /ou téléchargeables en ligne. Elles proviennent : i) des travaux antérieurs (mémoires, thèses et articles scientifiques, ...) et ; ii) des structures spécialisées (CRECC, DMN, INC, ...).

II.2.5.1. Collecte de données satellitaires

Les données satellitaires utilisées dans cette étude sont les images aériennes de type Landsat et de type SRTM. Elles ont été téléchargées à partir du site Web de l'United States Geological Survey (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Les photographies aériennes extraites de la plateforme Google Earth ont également été utilisées. Il faut signaler que toutes ces images sont libres d'accès.

II.2.5.1.1. Acquisition des images Landsat

Le programme Landsat, lancé en 1972, est composé de 8 satellites qui offrent une large gamme de capteurs d'images. Pour analyser la dynamique de l'occupation du sol du BVAM, les images de différentes dates ont été téléchargées et utilisées. Il s'agit des images Landsat TM de juin 1988, Landsat 7 de juin 2000 et Landsat 8 du 3 juin 2020.

Les images de la même saison sans couverture nuageuse et les caractéristiques identifiables non affectées par la saisonnalité ont été prises en compte dans la sélection des images. Les données de la même saison avaient l'avantage de donner des caractéristiques spectrales et radiométriques homogènes et de minimiser la variation saisonnière, dans la réflectance spectrale des différents types de couverture terrestre (Ozcan et *al.*, 2019). La résolution spatiale modérée de Landsat est aussi suffisante pour la chronique des changements humains et naturels à l'échelle locale et mondiale (Gutman et *al.*, 2008). Les images Landsat ont démontré leur capacité à cartographier et à surveiller la couverture terrestre et les propriétés du paysage (Hansen et Loveland, 2012), ainsi que leur utilité potentielle pour les applications de prévision (Lewis et *al.*, 2012).

II.2.5.1.2. Acquisition des images SRTM

L'image SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) a été utilisée pour extraire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de 30×30 m de résolution utile pour la réalisation de différentes cartes thématiques. Cette mission présente plusieurs types d'images, dont celles ayant les plus fines résolutions ne sont pas gratuites. Le choix du SRTM pour la présente étude est lié au fait qu'il est gratuit et s'adapte au mieux au relief camerounais par rapport aux autres modèles globaux (ALOS PALSAR, RASTER, ...) (Yap et *al.*, 2018).

II.2.5.1.3. Acquisition des images Google Earth

Les images aériennes de la plateforme Google Earth permettent de mieux apprécier l'occupation du sol et d'identifier les objets (bâti, végétations, ...) présents dans une zone de manière visuelle. Pour ce cas d'étude, des images du BVAM à Nsimalen ont été téléchargées à des dates différentes (1988, 2000 et 2020). Ceci pour mieux visualiser le forçage des activités humaines sur l'environnement de la zone et encore mieux valider les informations fournis par traitement des images Landsat par calcul du coefficient de Kappa.

II.2.5.2. Collecte de paramètres climatiques

Ceux-ci sont constitués de pluies journalières et de températures mensuelles. Ils ont été obtenus auprès de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) du Ministère des Transports

(MINTRANS). Les hauteurs de pluies journalières couvrent la période allant de l'année 1964 jusqu'à 2020, alors que les températures mensuelles vont de 1970 jusqu'à 2020.

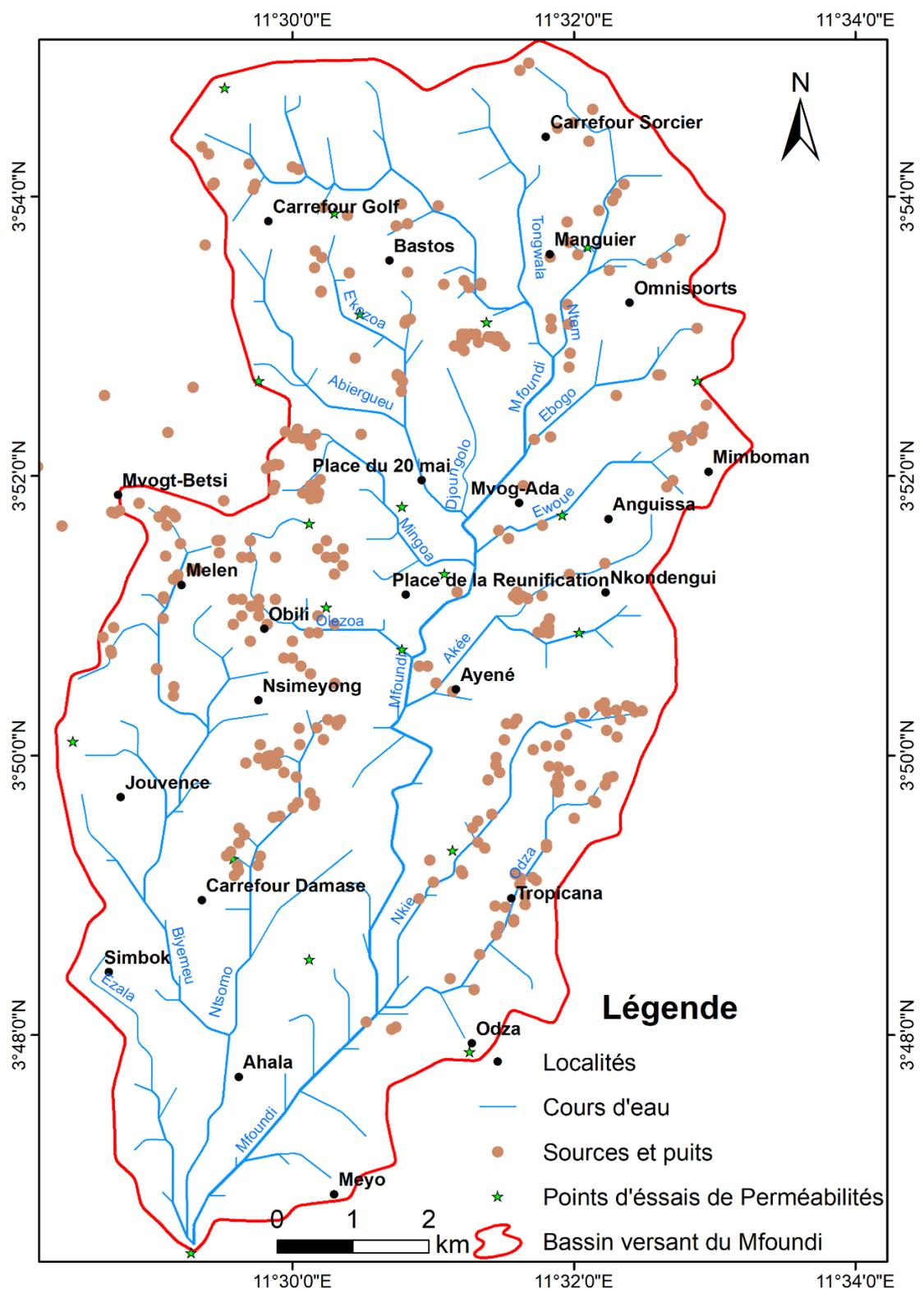


Figure 20 : Répartition spatiale des ouvrages hydrauliques et des points d'essai de perméabilité à l'échelle de la partie urbaine du BVAM (bassin versant du Mfoundi)

II.2.5.3. Acquisition de paramètres hydrométriques

Les informations hydrométriques secondaires sont constituées ici par les hauteurs d'eau journalières, les débits liquides journaliers et les débits ponctuels pour la station sur la Mefou à Nsimalen. Elles proviennent en majorité des travaux d'Olivry (1986) et complétées par celles du CRECC ex CRH. Dans l'ensemble, les hauteurs d'eau et les débits liquides journaliers couvrent respectivement les périodes comprises entre 2015-2018 (04 ans) pour les plus récents et la période 1964-2013 (28 ans) pour les plus anciens. Il faut noter ici que les débits ponctuels sont assez dispersés dans le temps et présentent des multiples lacunes.

II.2.5.4. Collecte de paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques tels que la conductivité hydraulique/perméabilité et les niveaux de la nappe phréatique proviennent des travaux des différents mémoires de thèses, de DEA et Master rédigés dans la zone d'étude. Ils ont été obtenus à partir de 48 points de mesures pour la conductivité hydraulique et de 326 ouvrages hydrauliques (267 puits et 59 sources) pour le suivi des niveaux statiques mensuels des eaux souterraines. Ces différents points sont répartis de manière homogène dans la partie urbaine du BVAM (BV Mfoundi) et sont illustrés sur la Figure 20.

Il faut signaler que tous ces données sont le fruit d'un vaste programme de recherche scientifique initié dans le Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie (LGIA) du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I pour l'évaluation des ressources en eau à l'échelle de la ville de Yaoundé et ses environs (Bon, 2008 ; Ndam Ngoupayou et *al.*, 2019) (Figure 20).

II.3. TRAVAUX EN LABORATOIRE

Les travaux en laboratoire prennent en compte le dépouillement, le traitement et l'analyse des données hydro-climatiques. Ils seront complétés par les analyses statistiques et la modélisation.

II.3.1. Dépouillement des paramètres hydrométriques

Le dépouillement des paramètres hydrométriques a consisté à transformer les hauteurs d'eaux en débits (hydrométrie). La technique utilisée dans la présente étude est celle dite manuelle. Les débits obtenus à l'issue de plusieurs campagnes de jaugeages ponctuels effectués sur le Mefou à Nsimalen par Olivry (1986) et le CRECC ont été utilisés pour l'établissement de la courbe d'étalonnage (hauteur-débit ; $Q = f(H)$) (Figure 21). Une fois élaborée, les anciens et les nouveaux enregistrements quotidiens des hauteurs d'eau collectés sur le terrain ont été transformés en débits liquides à partir de cette courbe d'étalonnage.

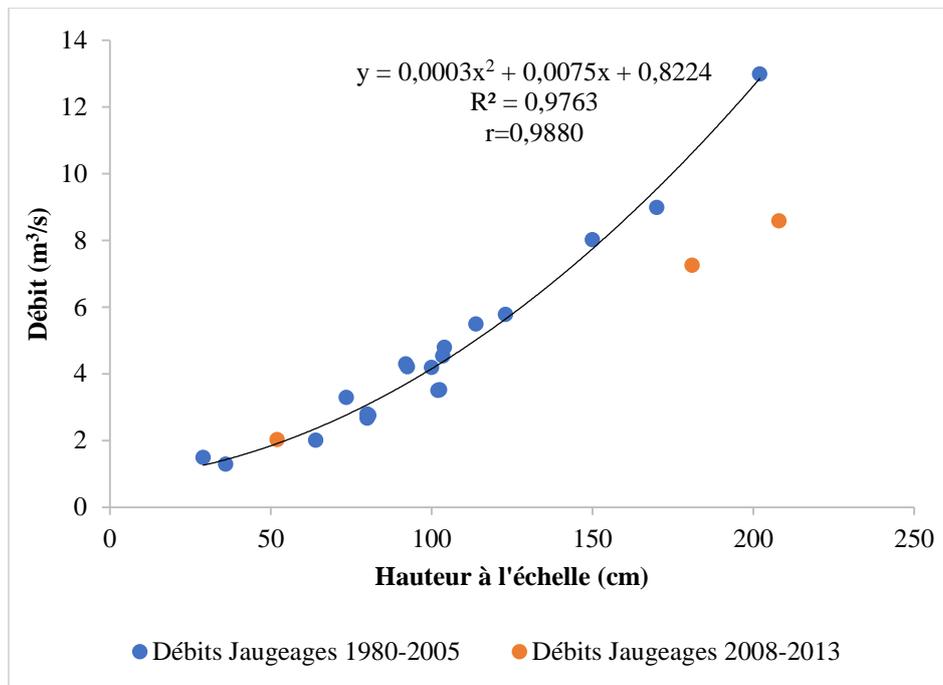


Figure 21 : Courbe d'étalonnage ou de tarage de la Mefou à Nsimalen

II.3.2. Critique et validité des données hydro-pluviométriques

Pour tester et valider les données hydropluviométriques de la station de Mvan aéroport retenue dans le cadre de cette étude, la méthode de « simple cumul » a été utilisée. Cette technique a pour but de vérifier la cohérence d'une série temporelle (Vakkilainen et Varis, 1989 ; Noufé et *al.*, 2011).

Dans le cas des hauteurs de pluies annuelles et du nombre de jours pluies par an, cette méthode montre que les données sont cohérentes dans l'ensemble ; ce qui se traduit par un alignement suivant une droite avec des coefficients de corrélation très significatifs ($r = 0,9996$ et $r = 0,9995$). Par conséquent, ces données sont exploitables du fait qu'elles présentent des droites ne présentant aucune cassure encore moins de flexure significatives (Figure 22a et 22b).

En ce qui concerne les données hydrométriques, elles n'ont pas été contrôlées et validées par ce test à cause des nombreuses lacunes enregistrées dans les séries. Toutefois, on remarque que sur la courbe de tarage (Figure 21), les débits observés pendant les hautes eaux sont sous-estimés et doivent être corrigés pour être prise en compte dans cette étude.

II.3.3. Extraction des séries chronologiques à analyser

Pour une meilleure caractérisation du fonctionnement hydro-pluviométrique, les pluies journalières de la station de Mvan aéroport et les débits journaliers de la Mefou à Nsimalen ont été synthétisés en plusieurs entités.

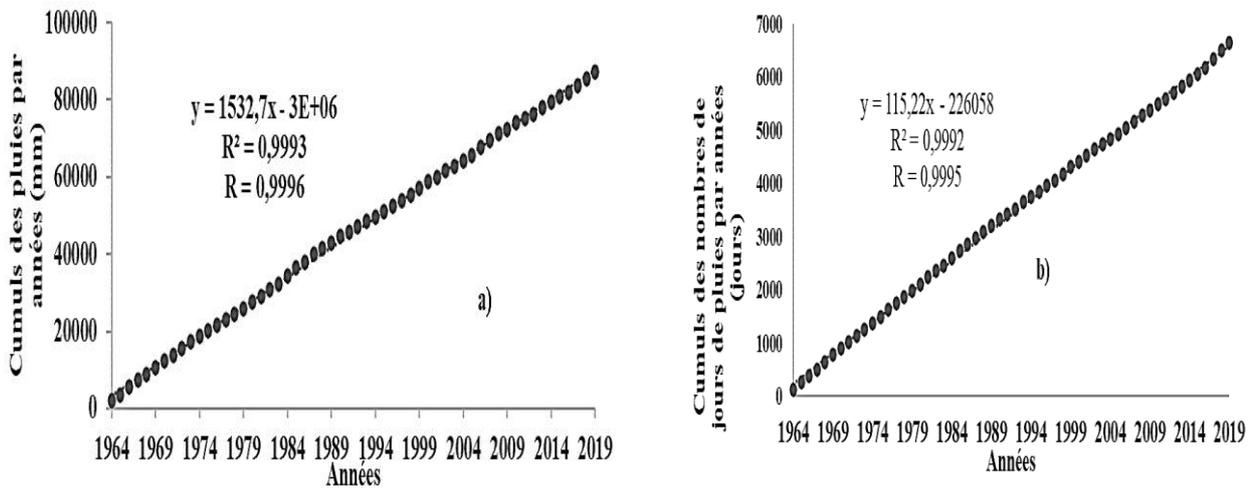


Figure 22 : Critique et validation des données pluviométriques par la méthode de simple cumul : a) hauteurs de pluies annuelles, b) nombres de jours de pluies annuelles

II.3.3.1. Pluies journalières

Les hauteurs de pluies journalières ont été synthétisées par cumuls aux pas de temps mensuel, saisonnier et annuel. Par la suite, elles ont été subdivisées en quatre tranches avec des hauteurs comprises successivement entre :

- R [1-5,1 mm [(R1) ;
- R [5,1 - 15 mm [(R2) ;
- R [15,1 - 30 mm [(R3) et ;
- R > 30 mm (R4).

Cette typologie des précipitations proposée ci-dessus correspond au seuil de troncature qui s'adapte le mieux aux hauteurs de pluies journalières en zone tropicale défini par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 1990). On considère comme étant jour de pluie, toute journée qui reçoit une quantité de pluie supérieure ou égale à 1 mm. Ceci en se référant aux indices définis par l'équipe d'experts sur la détection et les indices du changement climatique (ETCCDI).

II.3.3.2. Débits journaliers

Les débits journaliers, ont été synthétisés en moyenne arithmétique par mois, par saison et par années. Ils ont également été subdivisés en débits journaliers et débits caractéristiques que sont :

- DCmax : c'est le débit moyen journalier le plus élevé de l'année hydrologique ;
- DCC : c'est le débit caractéristique journalier dépassé pendant 10 jours consécutifs dans l'année ;

- DC1, DC3, DC6 : ce sont les débits caractéristiques non dépassés pendant 1, 3 et 6 mois de l'année ;
- DC9, DC11 : débits respectivement atteints dépassés pendant 1 mois et 3 mois de l'année ;
- DCE : c'est le débit caractéristique de l'étiage ou débit non dépassé pendant 355 jours ;
- DCmin : c'est le débit moyen minimum de l'année.

Ces différents paramètres sont calculés sur l'année hydrologique ; le passage d'une année hydrologique à l'autre se faisant en fin de la grande saison sèche (mars).

II.3.4. Traitements statistiques des paramètres hydro-climatiques

Les paramètres hydro-climatiques ont fait l'objet des tests statistiques à partir des logiciels Excel du pack Microsoft Office 2016, XLSTAT 2021 et HyfranPlus. Ces traitements statistiques prennent successivement en comptes l'analyse de la variabilité des séries, la détection et l'évaluation des changements dans les séries et l'analyse fréquentielle de ces dernières.

II.3.4.1. Méthodes d'étude de la variabilité des séries

De nos jours plusieurs méthodes et techniques efficaces sont déployées dans la littérature pour l'étude des variabilités des séries chronologiques. On peut citer dans le cas de cette étude : les tests statistiques classiques et la méthode de calcul du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2.

II.3.4.1.1. Tests statistiques classiques

Ils ont été utilisés afin de déterminer les paramètres tels que les minimums (Min), les maximums (Max), les moyennes arithmétiques (Moy), les écarts types (ET), les médianes (Med), les coefficients de variations (CV), d'asymétries (Cs) et d'aplatissements (Ck).

II.3.4.1.2. Principe de calcul du Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2

La méthode du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 ou méthode des moyennes mobiles pondérées a été utilisée pour pondérer les totaux pluviométriques. En effet, le filtre non récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 permet de filtrer les variations saisonnières par le calcul des totaux pluviométriques pondérés. Son principe de calcul englobe différentes formules en fonction de la position de l'année pour laquelle on calcule la moyenne mobile pondérée dans la série. Il est présenté par la formule de l'équation 1 suivante :

$$P_t = 0,06X_{t-2} + 0,25X_{t-1} + 0,38X_t + 0,25X_{t+1} + 0,06X_{t+2} \quad (1)$$

Où : $3 \leq t \leq (n-2)$;

X_{t-2} , X_{t-1} : totaux pluviométriques observés des deux premiers termes qui précèdent le terme X_t ;

X_{t+2} , X_{t+1} : totaux pluviométriques observés des deux premiers termes qui suivent le terme X_t .

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers (P_1 , P_2) et des deux derniers (P_{n-1} , P_n) termes de la série sont calculés au moyen des expressions des équations 2, 3, 4 et 5 suivantes (n : taille de la série) :

$$P_1 = 0,54 X_1 + 0,46X_2 ; \quad (2)$$

$$P_2 = 0,25 X_1 + 0,5 X_2 + 0,25 X_3 ; \quad (3)$$

$$P_{n-1} = 0,25 X_{n-2} + 0,5 X_{n-1} + 0,25 X_n ; \quad (4)$$

$$P_n = 0,54 X_n + 0,46 X_{n-1} \quad (5)$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et/ou d'excédent hydro pluviométrique, les moyennes mobiles ont été centrées et réduites selon le calcul des indices hydropluviométriques.

II.3.4.2. Méthodes de détection de changement dans les séries

Celle-ci prend en compte : (i) le calcul des indices hydro-pluviométriques ; (ii) les tests d'homogénéité et ; (iii) la quantification des différents changements dans les séries étudiées.

II.3.4.2.1. Calcul des indices hydro-pluviométriques

Les indices étudiés ici mesurent les écarts entre les variables étudiées par rapport à une moyenne établie sur une longue durée. Ils permettent de différencier les années ou les décennies sèches / déficitaires et humides / excédentaires. Les indices pluviométriques ou des débits annuels sont calculés suivant les formules (eq. 6) proposées par Nicholson (1983) in Savané (2001) :

$$X_{ij} = (P_i - Moy_i) / ET \quad (6)$$

où P_i est la hauteur annuelle de pluie (ou débit moyen) de la station i ;

Moy_i est la moyenne interannuelle de pluie (ou des débits) à la station i sur la période de référence;

ET est l'écart type de la pluviométrie annuelle (ou des débits annuels) ;

X_{ij} est l'indice moyen annuel de la pluviométrie ou des débits dans la station i de l'année.

Afin de conserver à l'indice une homogénéité statique, les indices sont calculés pour l'ensemble des variables étudiées sur une période référence homogène.

II.3.4.2.2. Tests d'homogénéité

Les tests d'homogénéité des séries chronologiques utilisés sont de plusieurs types. On peut citer : les tests de SNHT (Alexandersson, 1986), de Buishand (Buishand, 1982), de Pettitt (Pettitt, 1979) et de Von Neumann (Von Neumann, 1941). Ces tests permettent de mettre en évidence la présence d'un changement brusque de la moyenne d'une série temporelle (X_i) à une date donnée,

exception faite du test de Von Neumann qui ne présente pas de date. La valeur significative des p-value pour ces tests est de 0,05 soit 5%.

- **Test Standard Normale d'Homogénéité (SNHT)** (Alexandersson, 1986)

Le Test ‘Standard Normale d'Homogénéité (SNHT)’ est généralement appliqué à une série de rapports qui comparent les observations à une valeur moyenne. Ce test est basé sur le calcul d’une statistique T_y qui est utilisé pour comparer la moyenne de la première année Y_i avec celle de la dernière année $(n - Y_i)$. Elle est calculée à partir de l’équation 7 suivante :

$$T_y = y\bar{Z}_1 + (n - y)\bar{Z}_2, y = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\text{Où : } \bar{Z}_1 = \frac{1}{y} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \bar{y}}{S} \quad \text{et} \quad \bar{Z}_2 = \frac{1}{n-y} \sum_{i=y+1}^n \frac{y_i - \bar{y}}{S} \quad (8)$$

L'année Y représente l'année de rupture, si la valeur de T est maximale. Pour rejeter l'hypothèse nulle (H_0), la statistique de test (eq. 9), est supérieure à la valeur critique, qui dépend de la taille de l'échantillon.

$$T_0 = \max_{1 \leq y \leq n} T_y \quad (9)$$

- **Test de Buishand (BT)** (Buishand, 1982)

La statistique de Buishand est dérivée d’une formulation générale donnée par Gardner (1969). Elle repose sur l’hypothèse de normalité de la série. La statistique de Gardner utilisée pour un test bilatéral de rupture en moyenne à un instant inconnu s’écrit selon l’équation 10 :

$$G = \sum_{K=1}^{N-1} P_K \left(\frac{S_k}{\sigma_X} \right)^2 \quad (10)$$

Où : P_k désigne la probabilité a priori que la rupture survienne juste après la $k^{\text{ième}}$ observation. Cette formulation suppose que la variance σ_X^2 est connue. Si elle est inconnue, elle peut être remplacée par la variance de l’échantillon D_X^2 et si P_k est choisie uniforme, on obtient finalement la statistique U définie par les équations 11 et 12 :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_X} \right)^2}{N(N+1)} \quad (11)$$

$$\text{Avec : } D_X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (12)$$

Des valeurs critiques de la statistique U ont été d’abord données par Buishand (1982) à partir d’une procédure de Monté Carlo.

- **Test de Pettitt** (Pettitt, 1979)

Le test de Pettitt est un test non paramétrique qui ne nécessite aucune hypothèse sur la distribution des données. Il s'agit d'une adaptation du test de Mann-Whitney basé sur les rangs qui permet d'identifier l'année à laquelle le décalage se produit (Pettitt, 1979). La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t variant de 1 à N , les séries (X_i) , $i = 1, t$ et (x_i) , $i = t+1, N$ appartiennent à la même population. Ce test est résumé par l'équation 13 suivante.

$$D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (13)$$

Avec : $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$, 0 si $x = 0$, -1 si $x < 0$.

La série est divisée en deux sous-échantillons respectivement de taille m , n . Les valeurs des deux échantillons sont regroupées et classées par ordre croissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous échantillons dans l'échantillon total. L'hypothèse nulle du test est l'absence de rupture dans la série. On considère la variable $U_{t,N}$ (eq. 14) telle que :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (14)$$

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$ (Paturel et al., 2010a ; 2010b). Si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur K est donnée approximativement par l'équation 15 :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6k^2 / (N^2 + N^3)) \quad (15)$$

Pour un risque α de première espèce donnée, si la $\text{Prob}(K_N > k) < \alpha$, l'hypothèse nulle est rejetée.

- **Test de rapport de Von Neumann** (Von Neumann, 1941)

Ce test utilise le rapport entre la différence quadratique moyenne (année sur année) et la variance. A partir d'une série ordonnée (chronologique ou analogue) de n observations d'une variable continue X_i , on définit le coefficient de Von Neumann (η). Ce coefficient se caractérise par le rapport de la moyenne des carrés des différences successives à la variance de l'échantillon (équations 16 et 17). On peut encore écrire :

$$\eta = \frac{n}{n-1} \times \frac{\sum_{t=1}^{n-1} (x_{t-1} - x_t)^2}{\sum (x_t - \bar{x})^2} \quad (16)$$

$$\text{Avec : } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t \quad (17)$$

Lorsque la série est homogène, alors la valeur attendue $\eta = 2$. Lorsque l'échantillon a une rupture, alors la valeur de η doit être inférieure à 2, sinon on peut impliquer que l'échantillon présente une variation rapide de la moyenne (Von Neumann, 1941).

Pour l'ensemble de ces tests, l'hypothèse nulle (H_0) est acceptée si la p-value $< 5\%$, les valeurs des séries étudiées (X_i) sont indépendantes et distribuées de manière identique et considérées comme homogènes. L'hypothèse alternative (H_a) suppose que la série présente une rupture dans la moyenne et est considérée comme inhomogène.

II.3.4.2.3. Quantification des différents changements dans les séries

Le calcul des variations moyennes permet de quantifier des différents changements effectués sur l'ensemble des séries chronologiques présentant des ruptures. Celui-ci consiste à comparer les moyennes des séries avant et après les périodes de ruptures (Yoli-Baudet et *al.*, 2017 ; Kpoumié et *al.*, 2022). Ce taux de changement (C) est évalué à partir de l'équation 18 :

$$C = \left(\frac{X_b}{X_a} - 1 \right) \times 100 \quad (18)$$

Où : X_a : moyenne de la série temporelle de la période après la rupture et,

X_b : moyenne de la série chronologique de la période avant la rupture.

II.3.4.3. Méthodes d'analyse fréquentielle des séries

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction qui consiste à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (pluviométrie, hydrométrie ou autre), afin de définir la probabilité d'occurrence future. Cette prédiction est basée sur la définition et la mise en œuvre d'une loi fréquentielle, qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus, ainsi ces lois décrivent la probabilité d'occurrence d'un événement de valeur donnée (Meylan et *al.*, 2008).

La loi fréquentielle utilisée dans cette étude est celle de Gumbel (Bois et *al.*, 2007) qui appartient à la famille des lois extrêmes généralisées à trois paramètres. Cette loi a fait l'objet de plusieurs études dans le monde en général et en Afrique (Benaini et *al.*, 2018 ; Koungbanane et *al.*, 2020) en particulier pour estimer les quantiles hydro-climatiques associés aux périodes de retour de 2 ans, 5, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans. Elle est déterminée par la formule de l'équation 19 :

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(\frac{x-\alpha}{\beta} \right) \right] \quad (19)$$

Où α est un paramètre de position et β un paramètre d'échelle.

Le test d'adéquation du khi-deux est utilisé pour vérifier la validité du modèle fréquentiel choisit.

Pour faciliter ce type d'analyse, le logiciel HyfranPlus a été mis à contribution.

II.3.5. Méthodes d'étude des basses eaux (étiages) et des hautes eaux (crues)

Pour l'analyse et la compréhension des basses eaux (étiages) et des hautes eaux (crues) dans le BVAM, cette étude s'est basée sur : i) l'analyse statistique des débits d'étiages et des hautes eaux ; ii) la détermination des coefficients de tarissement pour le cas particulier des étiages.

Les périodes de basses eaux ou étiages sont les périodes de l'année où les écoulements sont les plus faibles. Elles sont essentiellement dues à une alimentation des cours d'eau par les nappes d'eaux souterraines. Dans le BVAM, on observe deux (02) périodes d'étiages correspondant aux différents tarissements : i) une phase allant de mi-juin à août caractérisée par quelques épisodes de pluies qui de ce fait, ne montre pas un tarissement proprement dit ; c'est la moins sévère ; ii) une phase allant de fin novembre à février pendant laquelle on observe un tarissement plus sévère.

Pour la présente étude, la période d'étiage prise en compte est celle allant de fin novembre à février (Olivry, 1986) ; elle correspond à la grande saison sèche.

Durant cette période d'étiage, la décroissance des débits suit une loi de tarissement exponentielle connue sous le nom de "loi de Maillet" ou "modèle de Maillet" (Olivry, 1986 ; Tallaksen, 1995) qui est déterminée par l'équation (eq. 20) :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (20)$$

Où : Q_0 est le débit initial de la période de tarissement ;

Q_t est le débit après un temps t et α le coefficient angulaire de la droite de tarissement ;

$(t-t_0)$ est le temps exprimé en jours entre l'observation du débit Q_0 et celle du débit Q_t ;

α est le coefficient de tarissement.

$$Q_t = Q_0 e^{\alpha(t-t_0)} \leftrightarrow \ln Q_t = \ln Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \leftrightarrow \ln Q_t = \ln Q_0 - \alpha(t - t_0)$$

$$\text{Or, } \ln x = \log x / 0,432 \longrightarrow \log Q_t / 0,432 = (\log Q_0 / 0,432) - \alpha(t - t_0)$$

$$\longrightarrow \alpha = \log (Q_0 / Q_t) / 0,43 \times 1 / (t - t_0)$$

$$\longrightarrow \alpha = 2,326 \log (Q_0 / Q_t) / (t - t_0) \text{ en } s^{-1}$$

L'identification des paramètres Q_0 , Q_t et $t-t_0$ de la loi de tarissement est exactement définie en introduisant un temps de ressuyage minimum entre la fin de l'épisode pluvieux et le début de la séquence de tarissement. Cette durée du temps de ressuyage (T_r exprimée en jour) peut être déterminée en relation avec la taille du bassin hydrographique par la formule (eq. 21) suivante :

$$T_r = A^{0,2} \quad (21)$$

Où : A est exprimé en km^2

Cette formule qui est souvent utilisée dans la littérature est la plus adaptée pour les bassins versants de taille supérieure à 20 km² (Lang et Gille, 2007).

L'intégration du 'modèle de Maillet' sur l'intervalle [0, +∞[donne une estimation du volume d'eau mobilisé par les aquifères du BVAM en début d'étiage :

$$V_{\text{mobilisé}} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} dt = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (22)$$

II.3.6. Séparation des hydrogrammes annuels

La méthode de séparation des hydrogrammes annuels utilisée dans cette étude est basée sur l'algorithme de séparation des débits de base (écoulements souterrains) de Boughton (1993) ou modèle de 'Boughton'. Cet algorithme qui fait partie des modèles de type 'boîte noire' ou 'empirique' est principalement basé sur le modèle de réservoir non linéaire (eq. 23), démontrant ainsi que le volume de drainage des eaux souterraines (débit de base) et le volume de stockage satisfont à la relation de type loi de puissance.

$$S = kQ_b^k \quad (23)$$

L'algorithme à deux paramètres de Boughton (1993) découle de l'amélioration du filtre digital à un paramètre (k), écrite par Chapman et Maxwell (1996) (eq. 24).

$$Q_b(i) = \frac{k}{2-k} \cdot Q_b(i-1) + \frac{(1-k)}{(2-k)} \cdot Q_d(i) \quad (24)$$

L'introduction d'un second coefficient de récession (C) par remplacement de (1-k) dans l'équation 25 donne l'algorithme de Boughton plus flexible et plus fiable (Chapman, 1999 ; Jourdan, 2019). Ce dernier devient alors :

$$Q_b(i) = \frac{k}{1+C} \cdot Q_b(i-1) + \frac{C}{(1+C)} \cdot Q(i) \quad (25)$$

Dans les équations (23) à (25), S est le stockage des eaux souterraines exprimé en m, Q_b (i) est le débit de base au pas de temps i (m³/s), Q_d est le débit d'écoulement direct (m³/s), Q(i) débit totale au pas de temps i et C et k sont les coefficients de récession.

Les coefficients de récession (k et C) utilisés dans cette étude sont ceux obtenus dans le bassin versant de Tooma par Chapman (1999) (Tableau 5). Leur utilisation est liée au fait que le BV de Tooma et la Mefou à Nsimalen présentent des caractéristiques morphométriques et climatiques proches (Tableau 5).

Tableau 5 : Paramètres et résultats des modèles de séparation du débit de base pour les BV de Tooma et de la Mefou (Chapman, 1999 ; Jourdan, 2019)

N°	Bassin	Superficies (km ²)	Pluies (mm)	K	C	BFI
1	Tooma ¹	114	1700	0,970	0,085	0,67
2	Mefou à Nsimalen ²	351	1600	0,970	0,085	0,69

Légende : ¹Chapman, 1999 ; ²Jourdan, 2019

Les résultats de séparation des hydrogrammes vont permettre de calculer les indices de débit de base ‘‘Base Flow Index (BFI) en anglais’’ qui est la part estimée de l’écoulement de base dans l’écoulement totale.

II.3.7. Cartographie de l’occupation du sol

Une analyse diachronique de l’occupation du sol a été réalisée dans le BVAM à partir des images satellites multi dates afin de suivre les différents changements dans le BVAM. Elle implique le traitement des images précédemment acquis. Les logiciels ENVI 5.3 (ENvironment for Visualizing Images) et ArcGis 10.4.1 ont été respectivement utilisés pour le traitement des images et la reclassification des bandes. Les différentes étapes mises en contributions sont : (a) le prétraitement des images ; (b) l’affinage spectral ; (c) la suppression des bruits ; (d) l’analyse en composante principale (ACP) ; (e) la classification ; (f) l’évaluation de la précision et enfin ; (g) la détection des changements des types d’occupation des sols (Figure 23).

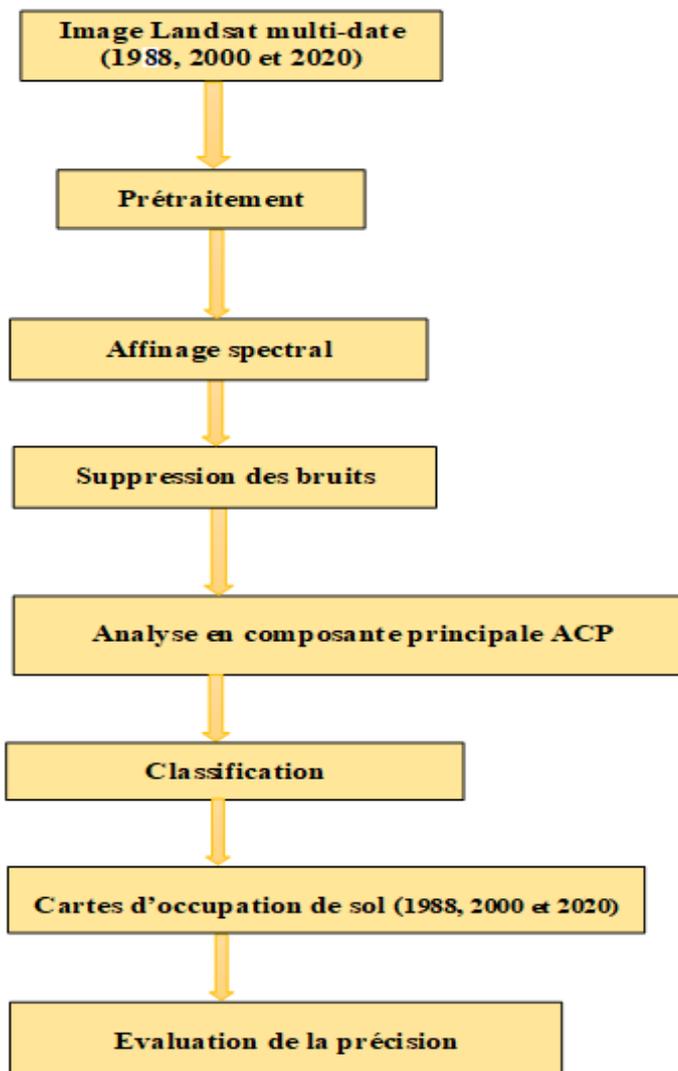


Figure 23 : Procédure de cartographie d'occupation du sol à partir des images Landsat

II.3.7.1. Prétraitement des images

La présence de particules atmosphériques solides, liquides et gazeuses pourrait affecter le signal mesuré par le satellite (Islam et *al.*, 2018). À ce titre, les images ont subi un prétraitement afin d'effectuer une correction atmosphérique conformément à López-Serrano et *al.* (2016). Les données Landsat obtenues sur le site de l'USGS étaient déjà géoréférencées au système de projection de la zone d'étude.

II.3.7.2. Affinage spectral

L'affinage spectral a consisté à affiner l'image à résolution spatiale basse en utilisant une bande panchromatique à résolution spatiale élevée du modèle « Sharpening spectral PC ». L'algorithme suppose que les bandes spectrales de faible résolution spatiale correspondent à la bande

panchromatique à résolution spatiale élevée. Par la suite, les deux ensembles de données ont été co-enregistrées à la volée dans ENVI 5.3.

II.3.7.3. Suppression des bruits

Il s'agit de supprimer les rayures ou les effets de détecteur des images téléchargées, qui peuvent être nettoyées sur ENVI 5.3 (Fotso Kamga et *al.*, 2021). Ceux-ci supposent normalement que les rayures sont régulières et se basent sur l'identification de la fréquence des bandes. Ces rayures peuvent donc être masquées si elles ont une signature distincte, comme 0 ou -9999, de sorte que le masquage exclut ces pixels de l'analyse. Une autre option qui s'est avérée utile est la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP).

II.3.7.4. Analyse en composante principale (ACP)

Cette dernière consiste à transformer les données d'image en un ensemble de variables non corrélées à l'aide de méthodes statistiques. Le résultat de l'ACP est un jeu d'images dans lequel chaque bande est non corrélée avec les autres bandes (Ewane Ewane, 2021). Dans les données d'image, les bandes spectrales voisines sont fortement corrélées et contiennent donc des informations redondantes. L'ACP permet de réduire cette redondance et de mettre en évidence les variables non corrélées qui sont « cachées » sous les données corrélées. Ainsi, cette méthode révèle souvent un bruit systématique dans les données qui peuvent être éliminées. Cette analyse est utilisée en télédétection hyper-spectrale pour diminuer le nombre de bandes dans l'analyse de l'image sans réduire le contenu de l'information en réduisant la redondance.

II.3.7.5. Classification

Pour identifier les différents types d'occupation de sol dans la présente étude, on a pris en compte les images satellites Landsat pour les périodes de 1988, 2000 et 2020 ; une classification supervisée a également été employée. En se basant donc sur les travaux antérieurs et les observations faites sur le terrain, cinq (05) classes d'occupation du sol ont été identifiées. Il s'agit : 1) des zones de bâtis ; 2) des végétations secondaires ; 3) des végétations primaires ; 4) des zones marécageuses et, 5) des zones agricoles et sols nus. Cette étape a donc consisté à identifier les différents éléments constitutifs de la zone d'étude en fonction de leurs signatures spectrales. Par la suite, l'utilisation de l'algorithme Maximum « Likelihood » a permis de maximiser la fonction de vraisemblance. La classification du maximum de vraisemblance est basée sur la fonction de densité de probabilité associée à une signature de parcelle d'entraînement particulière. Les pixels sont attribués à la classe

la plus probable sur la base d'une comparaison de la probabilité a posteriori d'appartenir à chacune des signatures considérées. Les étapes de cette classification sont :

- l'élaboration et la mise en place des compositions colorées qui permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets ;
- la création des zones d'intérêt qui sont ici des polygones dessinés pour assigner un groupe de pixel à une classe donnée. En effet, à partir des données de référence (carte, données terrain, photographie Aérienne), on sera en mesure de sélectionner, sur l'image, des sites d'échantillonnage correspondant à chacune des classes.

II.3.7.6. Évaluation de la précision

Dans cette étude, la précision de la classification a été évaluée par une matrice d'erreur utilisant le coefficient de Kappa (Foody, 2002). Le coefficient de Kappa (k), développé par Cohen (1960), est une mesure statistique forte et largement utilisée pour évaluer la concordance inter-raster entre les variables (Alam et *al.*, 2020). Ce coefficient est largement utilisé car tous les éléments de la matrice d'erreur de classification contribuent à son calcul, et compense la concordance des changements (Foody, 2002). Le coefficient de Kappa se situe entre 0 et 1 ; ce dernier indique une concordance complète, et est souvent multiplié par 100 pour donner une mesure en pourcentage de la précision de la classification. Les valeurs de Kappa sont également caractérisées en 3 groupes : Accord fort ($Kappa > 80\%$) ; Accord modéré ($40\% \leq Kappa \leq 80\%$) ; et Accord faible ($Kappa < 40\%$) (Foody, 2002).

La précision de toutes les images classées (1988, 2000 et 2020) a été évaluée au moyen d'une matrice de confusion obtenue dans le logiciel Arcgis 10.4.1 (Hexagon, 2014). Un plan d'échantillonnage aléatoire stratifié a été utilisé pour l'évaluation de la précision sur la base des données de vérité au sol et de l'interprétation visuelle. Cinq cent (500) points ont été générés pour chacune des images classées. Chaque point avait une tonalité de couleur spécifique et la valeur du pixel qui a été reconnue par le logiciel lorsque les ensembles de données ont été formés pendant la classification. Ces valeurs ont été considérées comme des valeurs de référence. Tous les points générés aléatoirement ont ensuite été identifiés et affectés à différentes classes d'occupation des sols. Les points correctement identifiés par le billet des images « Google Earth » ont été considérés comme des valeurs classifiées. Dans cette étude, on a adopté le seuil d'exactitude de 75% utilisé par Serra et *al.* (2003) pour le produit final des trois classifications superposées.

II.3.7.7. Détection des changements

Les cartes classées de 1988 à 2020 ont été comparées quantitativement par une matrice de changement à travers une analyse de tabulation croisée sur une base pixel par pixel dans le logiciel

Excel afin d'obtenir les changements des différentes classes au cours de la période d'étude (Tiamgne et *al.*, 2021). Les résultats de la distribution des zones de l'occupation des sols ont été utilisés pour calculer les tendances d'occupation des sols, le changement net, le pourcentage de changement et le taux de changement d'OS entre les années 1988-2000, 2000-2020 et 1988-2020. Les changements de magnitude (M) pour chaque classe de l'OS ont été calculés en soustrayant la couverture de surface de la deuxième année (CS_i) de l'année initiale (CS_{i-1}), comme indiqué dans l'équation (26).

$$M = CS_i - CS_{i-1} \quad (26)$$

Pour calculer le pourcentage de changement (C), les couvertures surfaciques initiales (CS actuelle) et finales d'utilisation (CS précédente) et de couverture des terres ont été comparés à l'aide de l'équation suivante :

$$C = \frac{(CS \text{ actuelle} - CS \text{ précédente})}{CS \text{ précédente}} \times 100 \quad (27)$$

Pour obtenir le taux annuel de changement (TC) pour chaque type d'utilisation des terres, l'année finale (CS année finale) est soustraite de l'année initiale (CS année initiale) et divisée par le nombre d'années d'étude en utilisant l'équation (28).

$$TC \text{ annuel} = \frac{(CS \text{ année finale} - CS \text{ année initiale})}{n} \quad (28)$$

II.3.8. Méthode de modélisation des interactions ‘‘eaux de surface-eaux souterraines’’

De toutes les techniques de modélisation généralement utilisés dans les sciences de l'eau, celle qui sera mise en profit pour mettre en relation les eaux de surface et les eaux souterraines dans la présente étude, est la modélisation de type conceptuel. Le choix de cette technique a été orienté par l'objectif à atteindre, la disponibilité et la réparation spatiotemporelle des informations disponibles dans le BVAM. Ainsi, l'analyse du fonctionnement hydro pluviométrique en relation avec la variation des niveaux statiques et piézométriques, la dynamique de l'occupation du sol, l'étude des tarissements et le rapport entre les volumes d'eau de surface et d'eau souterraine vont permettre d'identifier les processus hydrologiques et les facteurs environnementaux explicatifs des inter-échanges eaux de surface - eaux souterraines. A la fin, un schéma conceptuel explicatif représentant ces inter-échanges sera proposé.

II.3.9. Modélisation des risques d'inondation

II.3.9.1. Justification et choix de l'approche de modélisation

La modélisation envisagée dans le cadre de ce travail est une approche conceptuelle limitée dans l'espace et dans le temps. En effet, compte tenu de l'état actuel des données disponibles (occupation du sol, pluies et débits journaliers), il serait vain de vouloir mettre en œuvre une

modélisation à l'échelle de tout le grand bassin versant de la Mefou. Pour cela, l'application de cette approche de modélisation conceptuelle se fera à l'échelle du petit bassin versant du Mfoundi (96 km²) qui est le sous bassin de la Mefou à Nsimalen (425 km²). Ce petit bassin dispose non seulement d'une bonne base de données climatique, physiographiques, hydrauliques/hydrodynamiques et géologiques, mais il est aussi situé entièrement en zone urbaine. Le modèle élaboré sera donc une représentation des différents paramètres du milieu naturel pouvant influencer les risques d'inondation dans le BVAM en général et dans la ville de Yaoundé en particulier.

II.3.9.2. Procédure de modélisation

L'approche proposée dans cette étude consiste à : 1) identifier les paramètres qui ont plus ou moins d'impact sur le phénomène d'inondation. Ceci a été fait sur la base d'une intense revue bibliographique sur la thématique des inondations associée à plusieurs campagnes d'observation sur le terrain ; 2) calculer des indices de risque d'inondation (FHI) en utilisant l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) et les Systèmes d'Information Géographique (SIG), ceci pour générer une carte de susceptibilité aux inondations. Cette méthodologie a été complétée par une phase de validation, en adoptant les méthodes dites « visuelle » et de l'aire sous la courbe (AUC) basées sur la vérification de la susceptibilité aux inondations par les données de terrain (c'est-à-dire les différents épisodes d'inondation qui se sont produites dans la zone d'étude) (Figure 24).

L'AHP est établi en utilisant les conditions existantes comme référence et les connaissances issues d'expertises pour évaluer l'importance des paramètres sur la définition des zones inondables. Le SIG facilite le traitement et l'analyse des données spatiales, la visualisation, l'interprétation et l'évaluation des résultats de l'AHP (Hammami et *al.*, 2019). L'approche qui est ainsi proposée pour la première fois dans cette zone d'étude permet de comparer les paramètres, de les tester et de les classer en fonction de leur intervention dans la production des inondations.

II.3.9.3. Identification des paramètres d'inondation

Suite aux observations réalisées sur le terrain et de la revue de la littérature, dix (10) paramètres ont été identifiés dans le BVAM et plus spécifiquement dans sa partie urbanisée (bassin versant du Mfoundi) comme facteurs favorisant les phénomènes d'inondation. Il s'agit : i) des facteurs géoenvironnementaux dits naturels tels que : la morphologie avec l'altimétrie et la pente du bassin, la structuration du réseau hydrographie avec l'extension et la densité de drainage, la pluviosité sur le bassin (répartition spatiale, intensité - durée - fréquence), la distance par rapport aux cours d'eau, l'humidité topographique, la conductivité hydraulique (perméabilité du sol), le niveau de la nappe phréatique (niveau statique), les propriétés physiques du bassin (nature des roches et des sols,

couverture végétale), les états antécédents d'humidité des sols, la présence ou non de zones marécageuses ; ii) des facteurs anthropiques constitués de l'état d'occupations des sols (OS) caractérisés par la croissance démographique galopante, l'urbanisation anarchique, la défaillance des systèmes d'assainissement avec les rejets de déchets solides qui bouchent les drains, etc.

II.3.9.4. Cartographie et reclassification des paramètres du modèle

II.3.9.4.1. Présentation des paramètres d'inondation et méthodes de cartographie

Les images satellites (Landsat 8 OLI et SRTM), les pluies moyennes annuelles et les paramètres hydrodynamiques (conductivité et perméabilité hydrauliques) ont été utilisés pour cartographier les facteurs qui influencent les inondations. Le logiciel ArcGIS 10.4.1 a été utilisé par la suite pour produire les différentes cartes thématiques.

Les méthodes d'interpolations utilisées dans cette étude sont le krigeage sphérique et d'Interpolation par Inverse de distance (IDW). Leurs applications dans chaque cas de figure sont conditionnées par le volume de données à interpoler, la répartition spatiale de celles-ci, mais aussi par la qualité du rendu qui doit être proche des observations faites sur le terrain.

Les dix (10) facteurs retenus pour la cartographie de la susceptibilité aux inondations dans la partie urbanisée du BVAM qui est ici le bassin du Mfoundi ainsi que les méthodes qui permettent de les cartographier sont présentés dans les lignes qui suivent.

a) Altitude

L'altitude est le principal facteur qui contrôle les inondations (Poussin, 2014). L'eau s'écoule continuellement des zones hautes du relief vers les zones plus basses, et les zones plates des plaines peuvent être inondées plus rapidement que les endroits situés à des altitudes plus élevées (Degiorgis, 2012 ; Ozkan et Tarhan, 2016).

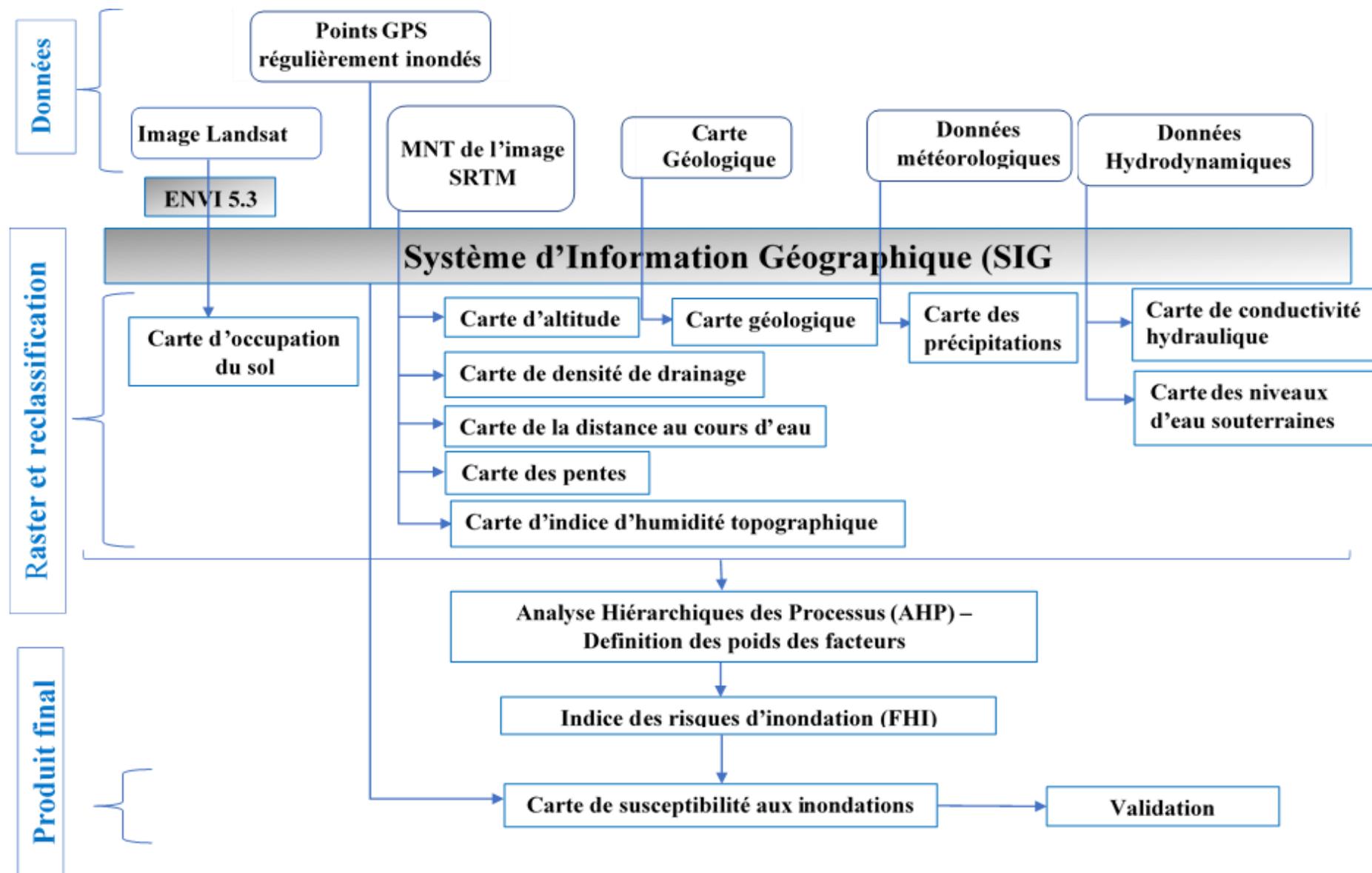


Figure 24 : Modèle conceptuel de cartographie de susceptibilité aux inondations à partir de l'AHP et des SIG

b) Pente

La pente joue un rôle fondamental dans la régulation du ruissellement de surface. Dans les études hydrologiques, elle constitue un facteur topographique très important (Das, 2019). Les zones à faible pente sont plus rapidement inondées en raison de la faible vitesse d'écoulement de surface. En revanche, les zones à forte pente ont une vitesse de ruissellement élevée. Ce dernier cas est incompatible avec les inondations (Blöschl, 2013).

Les cartes d'élévation (a) et de pente (b) ont été obtenues à partir du modèle numérique de terrain (MNT) extrait de l'image globale SRTM avec une précision de 30×30 m.

c) Densité de drainage

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur totale des cours d'eau d'un bassin versant et la superficie de ce dernier (Degiorgis, 2012). Plus la densité de drainage est élevée, plus la probabilité d'une zone d'être inondée est élevée, ce qui justifie son impact significatif sur l'occurrence des inondations.

La carte de densité de drainage du bassin versant du Mfoundi a été créée à l'aide de l'outil d'analyse de densité de lignes.

d) Pluviométrie

La pluie est le principal facteur ou élément moteur d'apparition des inondations, quelles que soient les conditions environnementales. Après une pluie d'orage ou une succession de pluies d'orage, les cours d'eau peuvent déborder de leur lit. Cependant, la quantité de la pluie qui tombe dans une localité n'est pas homogène en tout point de la zone (Colmet-Daage et *al.*, 2017). Par conséquent, les zones où les quantités de pluie sont les plus élevées seront considérées comme susceptibles d'être inondées.

Pour cette étude, la carte des pluies moyennes annuelles dans le bassin a été obtenue à partir de quatre stations pluviométriques situées dans la zone d'étude que sont Mvan aéroport, Biyem-Assi, Eco-Park et Fustel (Figure 16).

e) Distance euclidienne

L'expansion d'un événement de crue dépend de la distance d'un emplacement par rapport au système de drainage (Elkhrachy, 2015). Les zones proches du système de drainage, subissent généralement une plus grande inondation que les zones plus éloignées, car les emplacements proches se trouvent dans le chemin d'écoulement (Samanta et *al.*, 2018).

La carte de la distance euclidienne dérive directement de la carte du réseau hydrographique du bassin.

f) Humidité topographique

L'indice d'humidité topographique (TWI) est une représentation physique des zones inondables, qui est une composante importante d'un bassin versant (Soulsby et *al.*, 2010). L'indice de propension aux inondations d'un bassin versant reflète deux types de métriques, les terrains plats et les positions hydrographiques (Das, 2019). Il existe une forte relation entre la géomorphologie et l'indice de propension aux inondations. Les valeurs du TWI sont généralement plus élevées dans les environnements de plaine inondable (Adam et David, 2011).

Dans la présente étude, la carte TWI a été construite à partir du MNT grâce à l'équation 29 (eq. 29), calculée sur une calculatrice Raster (Jaafari et *al.*, 2014 ; Ali et *al.*, 2019 ; Sarkar et Mondal, 2020) :

$$TWI = [\text{Ln}(\text{FLOWACC} \times 900^{\tan(\beta)})] \quad (29)$$

où FLOWACC est l'accumulation de débit dérivée de DEM dans l'environnement ArcGIS et β est la pente (en °).

g) Conductivité hydraulique/perméabilité du sol

La conductivité hydraulique fournit une estimation du taux d'infiltration de l'eau dans un sol (Ushiyama et *al.*, 2017 ; Recep et Veysel, 2020). Ce taux d'infiltration varie d'un type de sol à l'autre, les valeurs de perméabilité étant faibles dans un sol argileux et plus élevées dans un sol sableux.

Les cartes de conductivité hydraulique ont été établies à partir des données d'infiltration qui ont été obtenues à partir des tests de perméabilité réalisés dans la région selon la méthode de Porchet (1931). Les tests de perméabilité ont été réalisés en plusieurs points répartis de manière homogène sur le site. Les valeurs de pluviométrie et de conductivité hydraulique ont été ensuite interpolées à l'aide de la méthode d'IDW.

h) Niveau statique de la nappe phréatique

Pendant la période d'inondation, on peut observer un changement rapide de l'écoulement des eaux souterraines en raison des eaux infiltrées pendant les fortes pluies (Rushton et *al.*, 2006 ; Zuberi et *al.*, 2019). Ce flux d'eau arrivant en un court laps de temps peut augmenter le niveau des eaux souterraines et affecter la capacité d'infiltration du sol. De cette façon, il augmente la pression hydraulique dans l'aquifère et dans les zones où les eaux souterraines sont très proches de la surface (Castany, 1998 ; Recep et Veysel, 2020).

La carte de la nappe phréatique a été établie à partir des niveaux d'eau de 267 puits (niveau statique moyen annuel et mensuel), de 59 sources (élévation du point de résurgence) et de rivières

(élévation de la surface de certains cours d'eau). La méthode d'interpolation utilisée pour ces derniers était le krigeage sphérique.

i) Géologie

La formation géologique (type de roche) est l'un des paramètres qui influencent le plus la susceptibilité aux inondations (Holman et *al.*, 2003 ; Dzana et *al.*, 2004). Ce facteur est étroitement lié à la perméabilité qui varie d'un type de roche à l'autre. L'infiltration des eaux de pluie est moins importante pour une roche imperméable, ce qui favorise la stagnation des eaux et l'extension des surfaces de ruissellement qui vont amplifier les risques d'inondation (Kazakis et *al.*, 2015).

La carte géologique a été obtenue à partir de la feuille Douala Est extraite de la base de données de l'Institut national de cartographie de Yaoundé, au Cameroun, puis numérisée.

j) Occupation du sol (OS)

La fréquence des inondations d'une zone peut être fortement influencée par les types d'occupation du sol (Magdalena et *al.*, 2017). Cette dernière influence au premier niveau la réponse hydrologique à différentes périodes (Generino et *al.*, 2014). Les changements des types d'OS peuvent amplifier la probabilité d'inondation d'une zone (Magdalena et *al.*, 2017).

La carte d'OS a été produite à partir de l'image satellite du capteur Landsat 8 OLI de Juin 2020. La description des étapes de mise en place de cette dernière est décrite dans la section II.3.8.

II.3.9.4.2. Reclassification des paramètres

Les différentes cartes thématiques élaborées ont été par la suite subdivisées en classes. L'évaluation de ces classes a permis de leur attribuer des cotes en fonction de leur degré d'influence sur la susceptibilité aux inondations. Pour estimer les cotes des différents paramètres de façon homogène, une échelle de valeur a été élaborée en s'appuyant sur les travaux de Shaban et *al.* (2006), Ozkan et Tarhan (2016) et Hammami et *al.* (2019) et en tenant compte des conditions locales du milieu. Cette échelle de valeurs de cotes varie aussi de 1 (très faible) à 10 (très élevée) (Tableau 6). La discrétisation des paramètres suivant cette échelle permet alors d'obtenir les cotes de chaque classe.

Tableau 6 : Échelle d'évaluation des différentes classes de paramètres relatifs à la susceptibilité aux risques d'inondation

Classe	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible
Cote	10	8	5	2	1

II.3.9.5. Analyse par paire des critères d'appréciation

Pour apprécier l'influence de chaque facteur sur la susceptibilité aux inondations, ces derniers ont été étudiés/corrélés deux à deux. A cet effet, l'esquisse schématique de Shaban et *al.*, (2001) a été utilisé. En règle générale, un (1) point est affecté à un facteur lorsqu'il est dominant (majeur) et 0,5 point quand il est mineur (Shaban et *al.*, 2006 ; Ozkan et Tarhan, 2016 ; Hammani et *al.*, 2019). La somme des nombres de points obtenus est utilisée pour classer les paramètres en fonction de leur importance sur la susceptibilité aux inondations. Cette classification est ensuite utilisée pour l'analyse hiérarchique des processus (AHP) de Saaty (1980).

II.3.9.6. Analyse Hiérarchique des Processus (AHP)

L'AHP de Saaty (1980) permet de déterminer de manière objective les poids ou coefficients de pondération par comparaison des facteurs pris deux à deux à l'aide d'une matrice (Bouroushaki et Malczewski, 2007). Quatre étapes permettent de guider cette analyse.

La première étape consiste à définir le problème de décision. La deuxième étape permet de juger l'importance relative des facteurs fondés sur l'échelle de Saaty (Saaty, 1980) (Table 7) et l'élaboration de la matrice de comparaison. Elle permet aussi de déterminer le coefficient de pondération à partir des vecteurs propres de ces facteurs. Chaque facteur s'est vu affecter une valeur numérique comprise entre 1 et 9, selon son importance (Ake et *al.*, 2018). La valeur numérique 1 signifie que les deux facteurs comparés ont une égale importance. Toutefois, la valeur numérique 9 signifie que le facteur de la ligne est beaucoup plus important que celui de la colonne (Tableau 7). Cette comparaison constitue, à la fin, en une matrice carrée (eq. 30) où chaque valeur d'élément va de $1/r_{ij}$ à r_{ij} . Les éléments de la diagonale de la matrice sont toujours égaux à 1 alors que les éléments non diagonaux indiquent la perception relative de l'importance d'une caractéristique par rapport à une autre.

$$A=[r_{ij}]=\begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & r_{1j} \\ 1/r_{12} & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & r_{2j} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1/r_{1j} & 1/r_{2j} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Une fois la matrice réalisée, on passe à la troisième étape qui est la normalisation des valeurs des vecteurs propres (Razandi et *al.*, 2015). Enfin, la dernière étape a consisté à la vérification de la logique dans les jugements à travers l'établissement des propriétés (Elkhrachy, 2015 ; Kazaski et *al.*, 2015). Cette dernière a permis de synthétiser mathématiquement les appréciations afin de vérifier leur cohérence, ceci à partir du calcul du rapport de cohérence (CR) (Yashon et Ryutaro, 2014).

Le RC est le rapport de CI et de RI d'une matrice ayant la même dimension. Ce rapport est donné par l'équation (31) ci-dessous :

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (31)$$

Où : CI est Indice de Cohérence et RI est l'Indice d'incohérence Aléatoire ;

Si $RC \leq 0,1$ ou $RC \leq 10\%$, la matrice est considérée comme suffisamment cohérente, dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions.

IC est le rapport entre la différence du vecteur de consistance λ_{max} et le nombre de facteurs sur ce dernier moins un. Son expression mathématique est également donnée par l'équation (32) suivante :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)} \quad (32)$$

Les différentes valeurs de RI sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 7 : Échelle d'importance relative de Saaty (Saaty, 1980)

Échelle	Cote numérique	Réciproque
Importance extrême	9	1/9
Importance très forte à extrêmement	8	1/8
Importance très forte	7	1/7
Importance forte à très forte	6	1/6
Importance forte	5	1/5
Importance modérée à forte	4	1/4
Importance modérée	3	1/3
Importance égale à modérée	2	1/2
Importance égale	1	1

Tableau 8 : Valeur de l'indice d'incohérence aléatoire (RI) (Saaty, 1980)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

II.3.9.7. Cartographie de la susceptibilité aux inondations

La base de données utilisée pour la cartographie des zones susceptibles aux risques d'inondation a été préalablement traitée dans le logiciel Arc-Gis 10.4.1. Chaque carte paramétrique est élaborée en format Raster de taille 30 × 30 m. A partir des cotes affectées à chaque classe de paramètre, le module « Reclassify » a été mis à contribution pour réaliser les couches (Elkhrachy, 2015). L'agrégation des différentes couches grâce au module « Mapcalculator » a permis d'établir la carte finale de susceptibilité aux risques d'inondation du bassin versant du Mfoundi.

Le calcul par itération de l'indice de risque aux inondations (FHI) s'est fait selon les équations (33) et (34) suivantes :

$$FHI = \sum_{i=1}^n W_i F_i \quad (33)$$

Où : W_i correspond au poids de chaque facteur ;

F_i la cote du facteur et n le nombre de paramètres ;

Cette équation (33) peut également s'écrire sous une forme plus développée présentée par l'équation (34) suivante :

$$FHI = W_{OS}F_{OS} + W_{AL}F_{AL} + W_{GEO}F_{GEO} + W_{PL}F_{PL} + W_{DD}F_{DD} + W_{DE}F_{DE} + W_{PE}F_{PE} + W_{CH}F_{CH} + W_{TWI}F_{TWI} + W_{NES}F_{NES} \quad (34)$$

Où W_{OS} , F_{OS} , W_{AL} , F_{AL} , représentent respectivement le poids et la cote de l'OS et de l'altitude.

II.3.9.8. Validation de la carte de susceptibilité aux inondations

La validation de la carte de susceptibilité aux inondations est basée sur la vérification des occurrences passées bien enregistrées. Pour le bassin versant du Mfoundi, les coordonnées géographiques de cinquante (50) points clairement identifiés et leur nombre d'occurrences ont été enregistrés. Ces points sont répartis de façon homogène dans la zone d'étude. Après la conception du modèle, deux méthodes de validation basées sur ces points d'occurrence de crue ont été utilisées.

La première technique de validation est dite visuelle. Elle consiste à projeter les points d'occurrence des inondations sur la carte obtenue. Les différentes positions de ces points par rapport aux classes d'inondation ont permis de juger de la fiabilité (ou non) de la carte obtenue.

La deuxième technique de validation utilisée dans cette étude, qui est la plus courante, est la méthode statistique de l'aire sous la courbe "Area Under the Curve (AUC) en anglais". Cette méthode, basée sur la vérification d'occurrences passées et scientifiquement justifiées, a permis de vérifier la précision du modèle obtenu. Elle a déjà été utilisée dans plusieurs études et est considérée comme la méthode la plus appropriée pour valider les modèles couplés AHP et SIG (Rahman et *al.*, 2021).

Pour la présente étude, la carte de susceptibilité aux inondations a été subdivisée en 100 classes (sur la base de l'algorithme de rupture naturelle présent dans Arcgis) et le nombre de pixels appartenant à chaque classe a été déterminé. Les points d'occurrence des inondations ont ensuite été superposés sur la carte résultante, et le nombre d'occurrences d'inondations pour chaque classe a été répertorié. Sur cette base, la surface cumulée des différentes classes (représentée sur l'axe "X") et le nombre cumulé d'occurrences d'inondation (représenté sur l'axe "Y") ont été calculés sur une

échelle standardisée de 0 à 1. Ensuite, on a calculé l'aire sous la courbe ‘‘AUC’’ en utilisant l'équation (35) (Das, 2019) :

$$AUC = \sum_{i=1}^{n=100} \frac{(X_1+X_2)}{2(Y_2+Y_1)} \quad (35)$$

Où :

X désigne le pourcentage cumulé de la zone (du plus élevé au plus bas) ;

Y désigne le pourcentage cumulé des occurrences d'inondation ;

1 et 2 sont deux classes séquentielles de données et n est le nombre de classes (pour cette étude, n = 100).

La valeur de l'AUC varie de 0,00 à 1,00 où : 0,50-0,60 indique une faible précision ; 0,61-0,70 indique une précision modérée ; 0,71-0,80 indique une bonne précision ; 0,81-0,90 indique une très bonne précision et ; 0,91-1,00 indique une excellente précision (Yesilnacar et Topal, 2005 ; Rahman et *al.*, 2021).

CONCLUSION

Le bassin versant amont de la Mefou (BVAM) dont l'exutoire est situé à Nsimalen a été retenu comme site d'étude dans le cadre de la présente étude : à cause de sa représentativité au niveau spatial, de la présence d'une zone urbaine (bassin du Mfoundi et la ville de Yaoundé) et d'une zone périurbaine majoritairement rurale ; de la disponibilité de données hydroclimatiques et hydrodynamiques, etc. Les travaux de terrain effectués durant ce travail ont consisté : i) à la réhabilitation et/ou à l'installation des stations hydro-climatiques ; (ii) à la collecte des données primaires constituées des pluies et de hauteurs d'eau, des caractéristiques des zones inondables (localisation des points inondables) et ; (iii) à l'acquisition des données secondaires qui prend en compte ici les images satellites (Landsat, SRTM, Google Earth), les paramètres climatiques (pluies et températures), hydrométriques (hauteurs d'eau et débits liquides) et hydrodynamiques (conductivités hydrauliques et niveaux statiques). Ces données ont été dépouillées et traitées par la suite en laboratoire à l'aide des logiciels Excel, HyfranPlus et XLSTAT 2021 pour les paramètres hydro-climatiques, ENVI 5.3 et ArcGis 10.4.1 pour la cartographie des informations géospatiales et la modélisation des risques d'inondation.

CHAPITRE III : RESULTATS

INTRODUCTION

Les résultats pris en compte dans le présent chapitre sont : les variations des paramètres hydro-pluviométriques (pluies et débits) aux pas de temps journaliers, mensuels, saisonniers et annuels ; le bilan hydrologique et enfin ; la dynamique de l'état de l'occupation du sol dans la partie amont du bassin versant de la Mefou (BVAM) à Nsimalen.

III.1. DOMAINES DE VARIATIONS DES PLUIES DANS LE BVAM A NSIMALEN

Il est question ici d'examiner et de réactualiser les variations de pluies aux pas de temps journaliers, mensuels, saisonniers et annuels.

III.1.1. Pluies journalières

III.1.1.1. Nombre de jours de pluies par an

III.1.1.1.1. Domaine de variations du nombre de jours de pluies par an

Durant la période comprise entre 1964 et 2020 (57 ans), le nombre de jours de pluies par an varie entre 95 jours enregistré durant l'année 2009 et 177 jours (2017) pour un nombre moyen de jours de pluies par an de 118 ± 15 jrs (Tableau 9 et Figure 25).

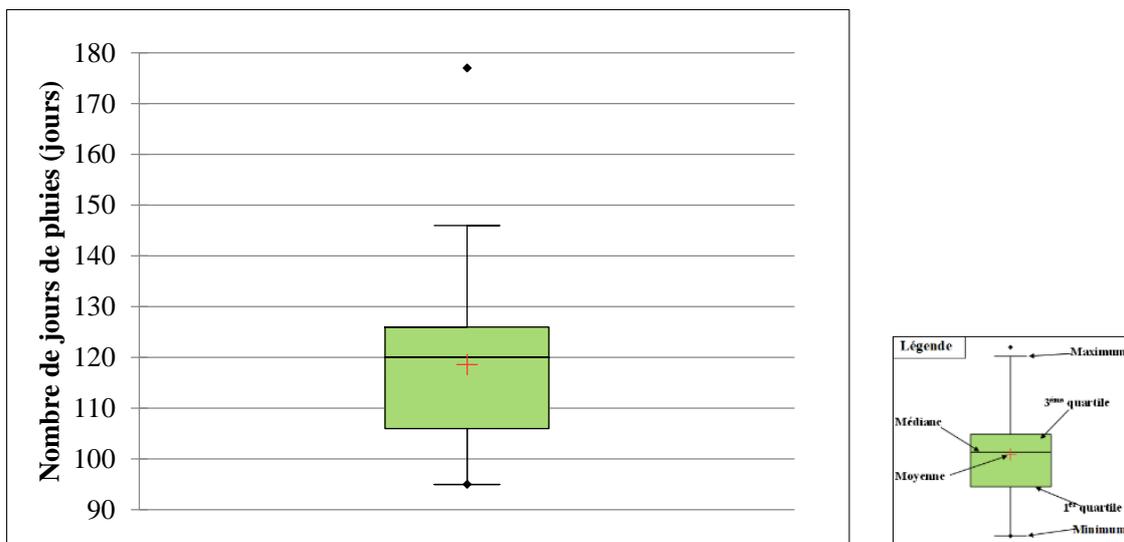


Figure 25 : Variation du nombre de jours de pluies par an dans le BVAM de 1964 à 2020

III.1.1.1.2 Occurrences d'apparitions de jours de pluies par an en années sèches et en années humides

Les cumuls annuels de jours de pluies par an susceptibles de se produire pour les périodes de retours de 5 ans, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans sont respectivement de 130 jours, 139, 147, 158, 167 et 195 jours en années humides. Ils sont successivement de 106 jours, 102, 99, 95, 93 et 89 jours en années sèches (Tableau 10).

III.1.1.2. Fréquences des classes de hauteurs de pluies journalières

III.1.1.2.1. Domaine de variations des classes de hauteurs de pluies journalières par an dans le BVAM

En considérant les quatre (04) classes de hauteurs de pluies journalières retenues dans la présente étude, on remarque que durant la période comprise entre 1964 et 2020, les classes de pluies journalières comprises entre 1 et 5 mm représentent environ 35,92% des hauteurs de pluies enregistrées dans le BVAM ; celles comprises entre 5,1 et 15 mm représentent 35,07% contre 18,66% pour les classes de hauteurs comprises entre 15,1 et 30 mm et 10,34% pour les hauteurs de pluies supérieures à 30 mm (Tableau 9 et Figure 26). Les classes comprises entre 1 et 15 mm sont les plus représentées avec 71% de pluies enregistrées dans le BVAM contre seulement 29 % pour les pluies supérieures à 15mm.

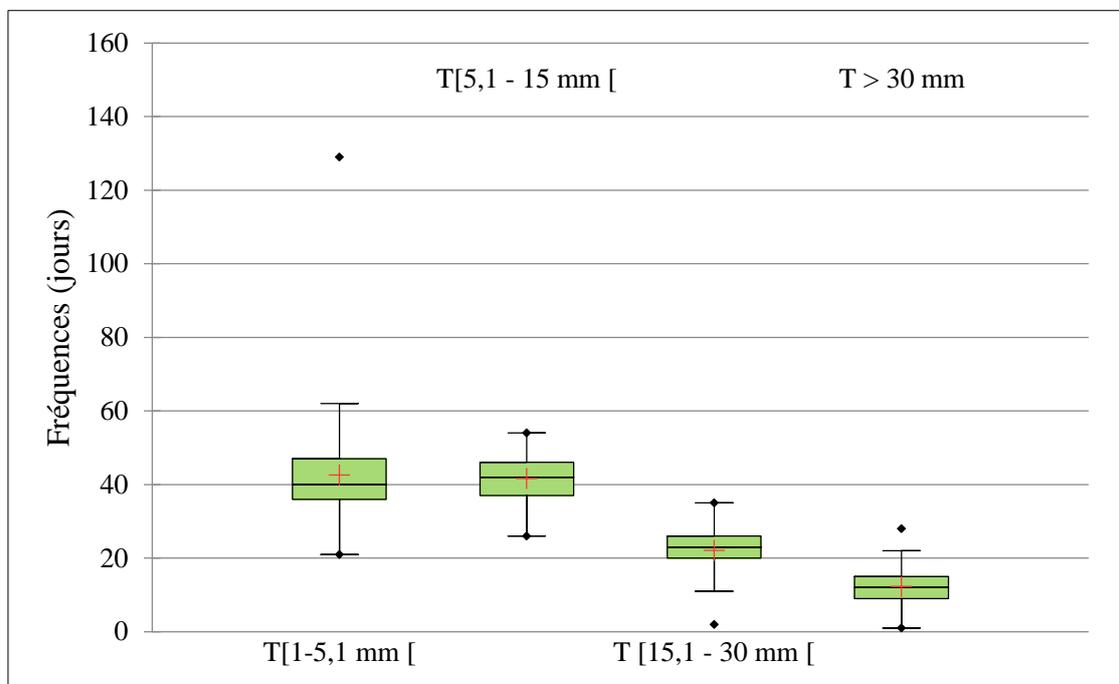


Figure 26 : Variations des classes d'hauteurs de pluies journalières entre 1964 et 2020 dans le BVAM à Nsimalen

III.1.1.2.2. Occurrences d'apparitions des jours de pluies par classes de hauteurs de pluies journalières

Les occurrences d'apparition des jours de pluies par classes de hauteurs de pluies journalières associées aux périodes de retour sont illustrées dans le tableau 10. Dans l'ensemble, les différentes classes de jours de pluies augmentent avec les périodes de retour (5 ans, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans) en années humides et diminuent par contre en années sèches.

III.1.1.3. Pluies journalières maximales

III.1.1.3.1 Domaine de variations des pluies journalières maximales par an

Durant les 57 années d'étude, les hauteurs de pluies journalières les plus élevées (pluies maximales) par an sont comprises entre 50 mm obtenu le 1 mai 1994 et 107 mm (8 mai 1980) pour une moyenne de $70,15 \pm 13$ mm (Tableau 9 et Figure 27).

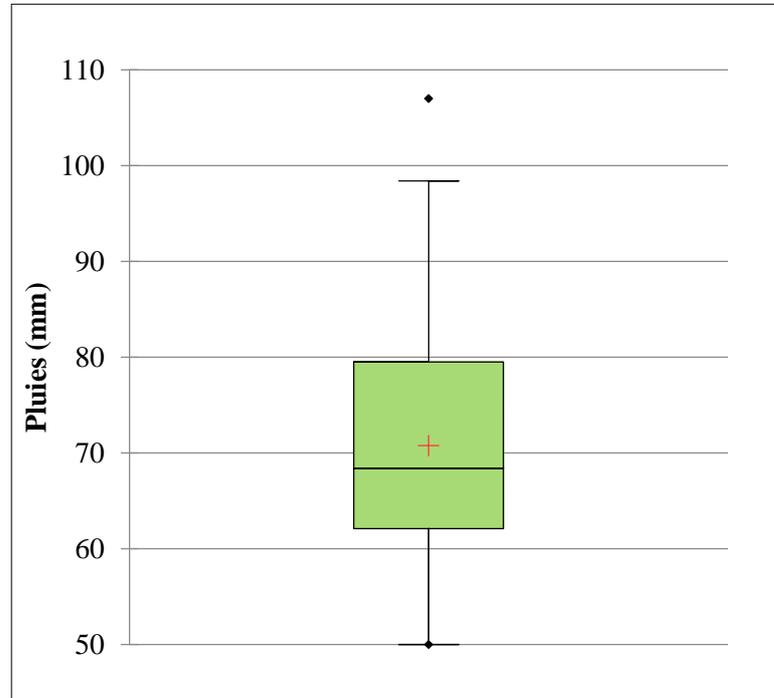


Figure 27 : Variation des pluies journalières maximales dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020

III.1.1.3.2. Occurrences d'apparitions des pluies journalières maximales

L'ajustement de la loi de distribution de Gumbel qui est une loi des valeurs extrêmes aux pluies journalières maximales dans le BVAM montre que les pluies journalières maximales susceptibles de se produire après des périodes de retour de 5 ans, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans en années humides sont de 70,8 mm, 87,3 mm, 94,4 mm, 104 mm, 110 mm et 133 mm respectivement. Quant aux années sèches, l'ajustement de la même loi des extrêmes à ces pluies journalières montre que les pluies journalières maximales des durées de retour 5 ans, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans sont respectivement de 60,4 mm, 56,8 mm, 54,2 mm, 51,6 mm, 50,46 mm en années sèches (Tableau 10).

Tableau 9 : Domaine de variations de hauteurs de pluies journalières maximales par an, du nombre de jours de pluies par an et des classes de hauteurs de pluies journalières de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen

Variable	Séries chronologiques	Minimum		Maximum		Moyenne		ET	Med	CV	CS	CK
		mm/jrs	AO	mm	AO	mm/jrs	Contribution (%)					
Nombre de jours de pluies par an (jrs)		95	2009	177	2017	118,58	/	15,39	120	0,13	0,84	4,79
Classes de hauteur de pluies	[1-5 mm [	21	2000	129	2017	42,58	35,92	14,61	40	0,34	3,76	21,8
	[5,1 - 15 mm [	26	1989	54	2018	41,58	35,07	6,11	42	0,15	-0,16	3,03
	[15,1 - 30 mm [	2	2017	35	2018	22,12	18,66	5,77	23	0,26	-0,80	4,34
	> 30 mm	1	2017	28	1966	12,26	10,34	5,21	12	0,43	0,35	3,21
Pluies journalières max (mm)		50	1994	107	1980	70,15	/	12,7	68,4	0,18	0,71	2,94

Légende : PSP (Petite Saison Pluvieuse); PSS (Petite Saison Sèche); GSP (Grande Saison Pluvieuse); (Grande Saison Sèche); Moy (Moyenne); ET (Ecart-type); Med (Mediane); CV (Coefficient de Variation); CS (Coefficient d'asymétrie); CK (Coefficient d'aplatissement); AO (Année d'Observation).

Tableau 10 : Quantile des hauteurs de pluies journalières maximales par an, du nombre de jours de pluies par an, des classes de hauteurs de pluies journalières et des pluies maximales dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020

Quantiles	Période de retour														
	Périodes Humides							Moy	Périodes sèches						
	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	5 ans		10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans		
Nombre de jours de pluies par an	130	139	147	158	167	195	118,6	106	102	99	95,3	93,3	88,5		
T[1-5,1 mm [(jrs)	53,1	61,6	69,8	80,5	88,4	115	42,58	30,6	26,5	24	20,5	18,6	14		
T[5,1 - 15 mm [(jrs)	46	49,5	53	57,4	60,7	71,4	41,58	36,6	34,9	34	32,3	31,6	29,6		
T [15,1 - 30 mm [(jrs)	26,3	29,6	32,9	37,1	40,2	50,6	22,12	17,4	15,8	15	13,4	12,7	10,8		
T > 30 mm (jrs)	16	19,1	22	25,8	28,6	38	12,26	7,99	6,53	5,5	4,38	3,72	2,07		
Hauteurs de pluies jrs max (mm)	70,8	87,3	94,4	104	110	133	70,15	60,4	56,8	54,2	51,6	50	46		

III.1.2. Pluies mensuelles et saisonnières

III.1.2.1. Domaine de variations des pluies mensuelles et de pluies saisonnières

Durant la période d'étude (1964 et 2020), les hauteurs de pluies mensuelles fluctuent différemment d'un mois à un autre. Le regroupement de hauteurs de pluies mensuelles en saisons montrent quatre saisons (04) inégalement réparties (Figures 28, 29 et 30) :

- une grande saison sèche allant de décembre à février durant laquelle les mois les plus secs sont décembre avec 19 mm de pluies et janvier avec 18 mm de pluies (Tableau 11) ;
- une grande saison de pluie qui s'étale des mois d'août à novembre avec le mois d'octobre comme le plus humide (286 mm) ;
- une petite saison sèche en juillet avec une pluie de 75 mm ;
- une petite saison de pluie qui couvre les mois de mars à juin. La hauteur des pluies la plus importante est enregistrée au mois de mai (213 mm).

Cette variation mensuelle et/ou saisonnière est typique du climat équatorial et tropical de transition (Figure 29) (Olivry, 1986 ; Suchel, 1987).

Les pluies moyennes saisonnières enregistrées durant ces différentes saisons sont de 660 ± 150 mm pour la petite saison des pluies, 75 ± 39 mm pour la petite saison sèche, 81 ± 47 mm pour la grande saison sèche et 745 ± 177 mm pour la grande saison des pluies (Tableau 12).

Durant la période d'observation (1964-2020), les pluies saisonnières indiquent que 41,77 % des pluies sont apportées pendant la petite saison des pluies ; 4,78 % pendant la petite saison sèche ; 47,69 % pendant la grande saison de pluie et 5,20 % pendant la grande saison sèche (Figure 30).

III.1.2.2. Occurrences d'apparitions des hauteurs de pluies mensuelles et saisonnières

Les quantiles des pluies mensuelles et saisonnières du BVAM correspondant aux durées de retour des années humides et sèches sont présentés dans les tableaux 13 et 14.

On remarque que la répartition des quantiles de pluies mensuelles ne montre aucune pluie en années sèches au cours de certains mois des deux saisons sèches (août, décembre, janvier et février) pour les périodes de retour 10 ans, 20, 50, 100 et 1000 ans (Tableau 13). Il pleut par contre tous les mois en années humides.

Les deux saisons sèches (GSS et PSS) n'enregistrent aucune pluie pour les périodes de retour 1000 ans en années sèches (Tableau 14).

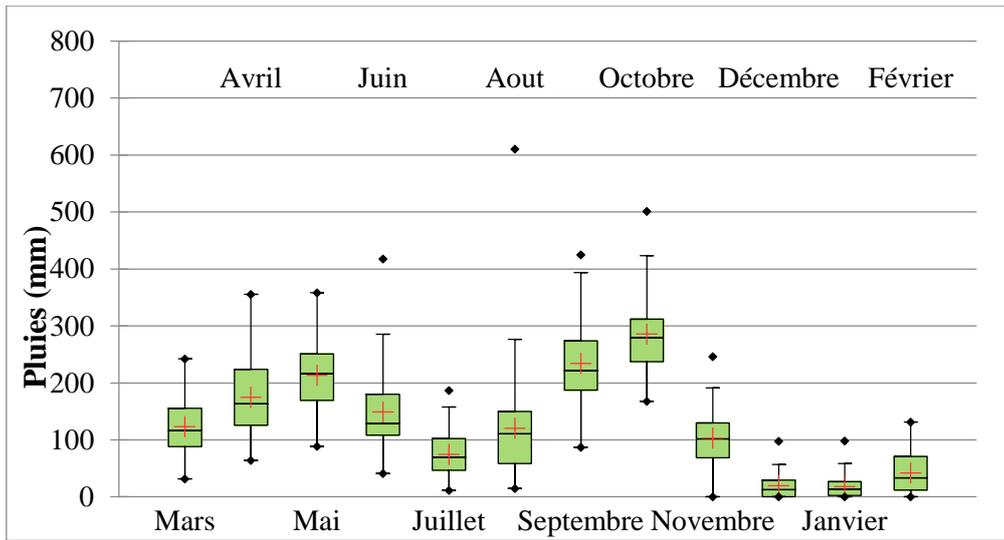


Figure 28 : Domaine de variations des pluies mensuelles de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen

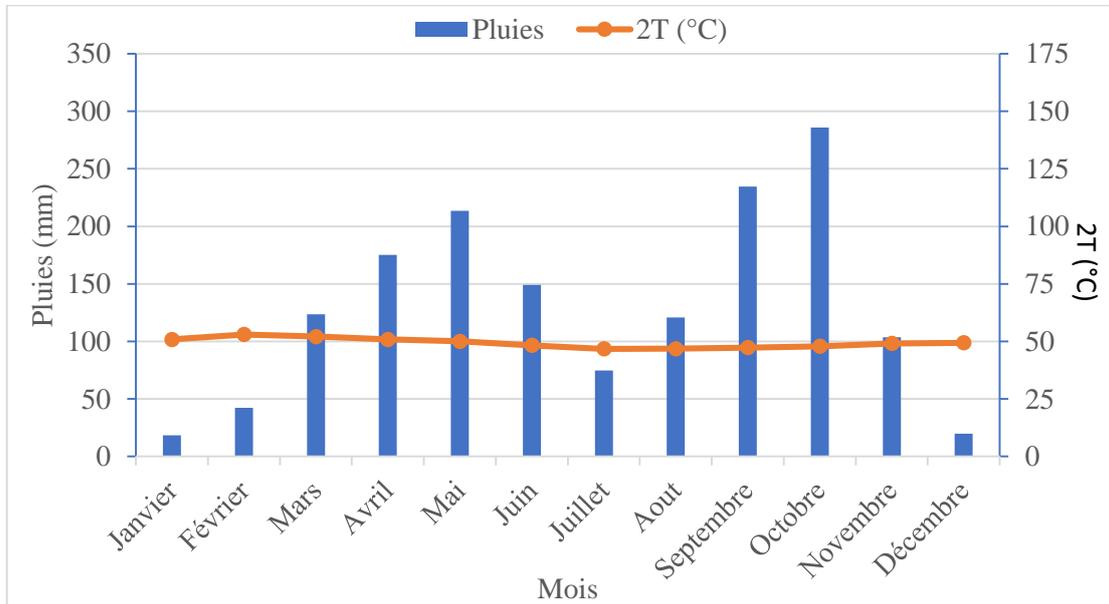


Figure 29 : Diagramme ombrothermique à la station de Mvan aéroport (1964 - 2020)

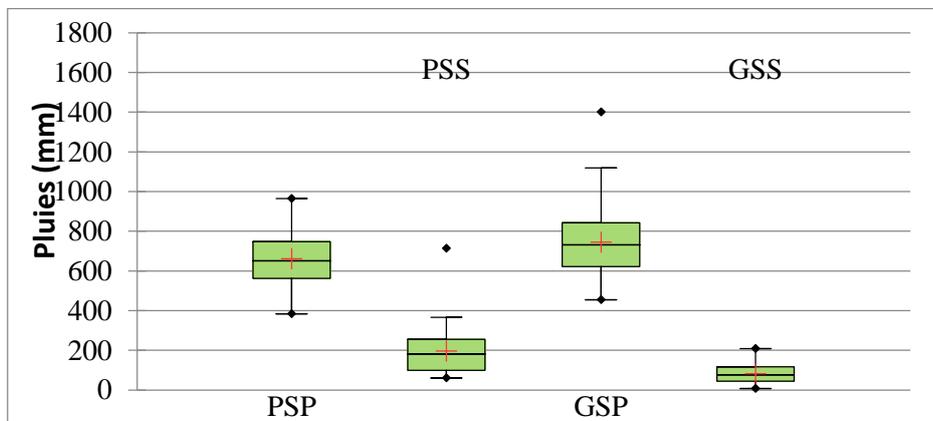


Figure 30 : Variations des hauteurs de pluies saisonnières de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen

Tableau 11 : Distributions des pluies mensuelles dans le bassin versant amont de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2020

Mois	Paramètre	Minimum		Maximum		Moyenne		ET	CV	Med	CS	CK
	Saison /Unité	mm	AO	mm	AO	mm	Contribution (%)					
Mars	PSP	31,8	1983	242,3	2019	123,70	7,92	53,40	0,43	116	0,53	2,61
Avril		64,1	2010	355,4	1987	175,12	11,21	68,68	0,39	163,1	0,73	2,97
Mai		88,9	1992/2012	358,6	2014	213,12	13,65	66,57	0,31	216,5	0,14	2,51
Juin		41,2	1969	417,6	2002	149,18	9,56	70,71	0,47	128,4	1,51	5,55
Juillet	PSS	11,5	1977	186,8	1984	74,76	4,79	39,27	0,53	69,5	0,65	2,94
Aout	GSP	14,6	1983	610,5	2006	120,82	7,74	94,15	0,78	110,7	2,68	13,5
Septembre		87	1995	425	1980	234,65	15,02	76,8	0,33	221,8	0,41	2,88
Octobre		168	2016	501	1972	285,87	18,31	66,66	0,23	279,6	1,03	4,22
Novembre		0	2002	246,5	2018	103,64	6,64	54,25	0,52	101,7	0,19	2,51
Décembre	GSS	0	1975/1980/1986/1992/1994/2000/ 2002/2008/2012/2015/2018	97,5	1964	19,85	1,27	22,21	1,12	12,8	1,59	5,41
Janvier		0	1971/1983/1991/2002/ 2011/2014/2015/2017/2018	98,4	1975	18,45	1,18	20,26	1,10	13,4	1,89	6,9
Février		0	1989/1992/2001/2012/2016	131,5	2018	42,29	2,70	36,34	0,86	33,3	0,74	2,4

Légende : PSP (Petite Saison Pluvieuse); PSS (Petite Saison Sèche); GSP (Grande Saison Pluvieuse); (Grande Saison Sèche); Moy (Moyenne); ET (Ecart-type); Med (Médiane); CV (Coefficient de Variation); CS (Coefficient d'asymétrie); CK (Coefficient d'aplatissement); AO (Année d'Observation).

Tableau 12 : Distributions des hauteurs de pluies annuelles et saisonnières dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020

Séries chronologiques	Minimum		Maximum		Moyenne		ET	Med	CV	CS	CK
	mm	AO	mm	AO	mm	Contribution (%)					
PSP	384,2	2005	964,70	1987	660,31	42,27%	150,13	651,5	0,23	0,31	0,31
PSS	11,5	1977	186,8	1984	74,76	4,78%	39,27	69,5	0,53	0,65	2,94
GSP	454,2	2016	1400,4	1985	744,98	47,69%	177,06	731,5	0,20	1,00	2,59
GSS	7	1989	209,20	1969	81,27	5,20%	46,72	76,6	0,58	0,77	2,95
Annuelles	1083,1	2003	2196,70	2006	1562,05	100%	271,44	1573,8	0,17	0,42	2,72

Légende : PSP (Petite Saison Pluvieuse); PSS (Petite Saison Sèche); GSP (Grande Saison Pluvieuse); (Grande Saison Sèche); Moy (Moyenne); ET (Ecart-type); Med (Mediane); CV (Coefficient de Variation); CS (Coefficient d'asymétrie); CK (Coefficient d'aplatissement); AO (Année d'Observation).

Tableau 13 : Quantiles des pluies mensuelles du bassin versant amont de la Mefou à Nsimalen

Périodes de retours													
Quantiles	Périodes Humides						Moy	Périodes sèches					
	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans		5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
Mars	162	193	223	262	291	387	123,7	79,9	64,9	54	42,9	36,1	19,2
Avril	225	265	303	353	391	514	175,12	119	99,6	85,5	71,2	62,4	40,7
Mai	261	300	338	386	422	542	213,52	159	140	127	113	104	83,2
Juin	200	241	281	332	371	498	149,18	91,1	71,4	56,9	42,2	33,2	10,8
Juillet	108	126	148	177	198	269	74,76	42,5	31,6	23,5	15,3	10,3	0
Aout	189	244	296	365	416	585	120,82	43,5	17,2	0	0	0	0
Septembre	290	335	378	434	476	614	234,65	172	150	134	118	109	84,3
Octobre	334	373	410	459	495	615	285,87	231	213	199	185	176	155
Novembre	143	174	205	244	274	371	103,64	59,1	43,9	32,8	21,5	14,6	0
Décembre	35,8	49	61,3	77,4	89,5	129	19,85	1,61	0	0	0	0	0
Janvier	33	45	56,3	71	82	118	18,45	1,81	0	0	0	0	0
Février	68,4	90	110	136	156	222	36,34	12,5	2,31	0	0	0	0

Légende : Moy (Moyenne) ; PSP (Petite Saison Pluvieuse) ; PSS (Petite Saison Sèche) ; GSP (Grande Saison Pluvieuse) ; (Grande Saison Sèche).

Tableau 14 : Quantiles des pluies annuelles et saisonnières du BVAM à Nsimalen

Périodes de retours													
Quantiles	Périodes Humides						Moy	Périodes sèches					
	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans		5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
PSP	768	856	940	1050	1130	1400	660,31	537	495	464	433	433	367
PSS	103	126	148	177	198	269	74,76	42,5	31,6	23,5	15,3	10,3	0
GSP	872	976	1080	1200	1300	1620	744,98	600	550	514	477	454	398
GSS	115	142	168	202	228	312	81,27	42,9	29,9	20,3	10,5	4,6	0
Annuelles	1770	1930	2090	2290	2440	2940	1562,05	1340	1270	1210	1150	1120	1030

Légende : Moy (Moyenne) ; PSP (Petite Saison Pluvieuse) ; PSS (Petite Saison Sèche) ; GSP (Grande Saison Pluvieuse) ; (Grande Saison Sèche).

III.1.3. Pluies annuelles

III.1.3.1. Domaine de variations des pluies annuelles

Durant la période comprise entre 1964 et 2020 (57 ans), les pluies annuelles varient entre 1083 mm enregistrée en 2003 et 2196,7 mm (2006) dans le BVAM. La pluie moyenne interannuelle est de $1562,05 \pm 271$ mm pour une médiane de 1573,8 mm (Figure 31 ; Tableau 12).

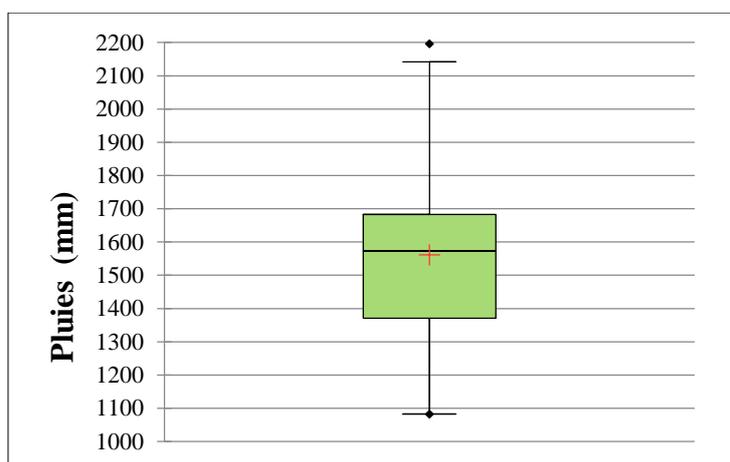


Figure 31 : Domaine de variations des pluies annuelles dans le BVAM de 1964 à 2020

III.1.3.2. Occurrences d'apparitions des hauteurs de pluies annuelles en années sèches et humides

Les quantiles associés aux pluies annuelles sont respectivement de 1770 mm, 1930 mm, 2090 mm, 2290 mm, 2440 mm et 2940 mm pour les périodes de retour de 5 ans, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans en années humides, et de, 1340 mm, 1270 mm, 1210 mm, 1150 mm, 1120 mm et 1030 mm en années sèches (Tableau 14).

III.2. FLUCTUATIONS DES CARACTERISTIQUES HYDROMETRIQUES DANS LE BVAM À NSIMALEN

Cette partie présente les domaines de variation des débits liquides aux pas de temps journaliers, mensuels, saisonniers et annuels.

III.2.1. Débits journaliers et débits caractéristiques

Durant la période comprise entre 1964 et 2019 sans prendre en compte les années disposant de lacunes dans leur série, les débits journaliers de la Mefou à Nsimalen varient différemment d'une année à une autre.

Les plus petits débits journaliers ou débits caractéristiques minima (DCmin) varient de 1,08 m³/s enregistré durant l'année hydrologique 1964-1965 à 4,49 m³/s (1985-86) pour une moyenne de $2,26 \pm 0,82$ m³/s. Celle-ci correspond à un débit spécifique de 5,32 l/s/km².

Les plus grands débits journaliers ou DCmax sont situés entre 14,64 m³/s (1974-75) et 29,05 m³/s (2011-12) avec une moyenne de $20,84 \pm 3,34$ m³/s correspondant à un débit spécifique de 9 l/s/km².

Les débits caractéristiques de Crue (DCC) oscillent entre 10,82 et 20,41 m³/s pour une moyenne $16,69 \pm 2,34$ m³/s et un débit spécifique de 39,27 l/s/km².

Les débits caractéristiques d'étiages (DCE) varient entre 1,17 et 4,49 m³/s pour une moyenne de $2,59 \pm 0,91$ m³/s (6,1 l/s/km²).

En ce qui concerne les autres débits caractéristiques, les DC1 (1 mois), DC3 (3mois), DC16 (6mois), DC9 (9mois) et DC11 (11 mois) sont illustrés sur la figure 32 et le tableau 15.

Tableau 15 : Domaine de variations des débits caractéristiques de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

	DCmax	DCC	DC1	DC3	DC6	DC9	DC11	DCE	DCmin
Nombre de jours	1	10	30	90	183	275	335	355	365
Min	14,64	10,82	8,18	5,12	3,23	2,06	1,44	1,17	1,08
Max	29,05	20,41	18,99	15,34	11,35	7,92	6,08	4,81	4,49
Moy	20,84	16,69	14,04	9,86	6,30	4,11	3,11	2,59	2,26
ET	3,34	2,34	2,65	2,75	2,04	1,33	1,16	0,91	0,82
CV	0,16	0,14	0,19	0,28	0,32	0,33	0,37	0,35	0,36
Med	20,49	17,24	14,38	9,99	6,08	3,86	2,87	2,55	2,18
CS	0,44	0,64	0,35	0,01	0,62	0,79	0,77	0,69	0,94
CK	2,69	2,97	2,42	2,07	2,80	3,35	2,88	2,68	3,12

Légende : Moy (Moyenne) ; ET (Ecart-type) ; Med (Mediane) ; CV (Coefficient de Variation) ; CS (Coefficient d'asymétrie) ; CK (Coefficient d'aplatissement).

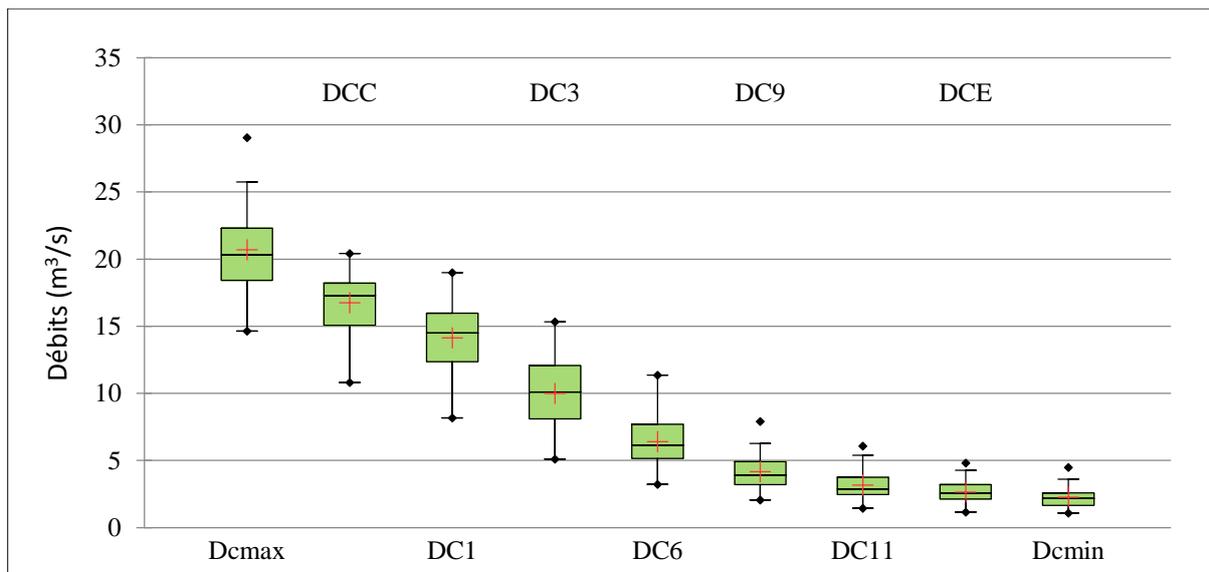


Figure 32 : Variations des débits caractéristiques et journaliers de la Mefou à Nsimalen

III.2.2. Débits mensuels et saisonniers

Durant la période comprise entre 1964 et 2019, l'examen des variations des débits moyens mensuels et saisonniers de la Mefou à Nsimalen montre une évolution en dos de chameau caractéristique du régime équatorial de transition (Olivry, 1986 ; Suchel, 1987) (Figure 33). Le débit mensuel minimum est observé en février ($3,85 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $3,06 \text{ l/s/km}^2$) pour la grande saison sèche et le maximum, durant le mois d'octobre ($13,18 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $31,02 \text{ l/s/km}^2$) pour la grande saison de pluie (Figure 34, Tableaux 16 et 17).

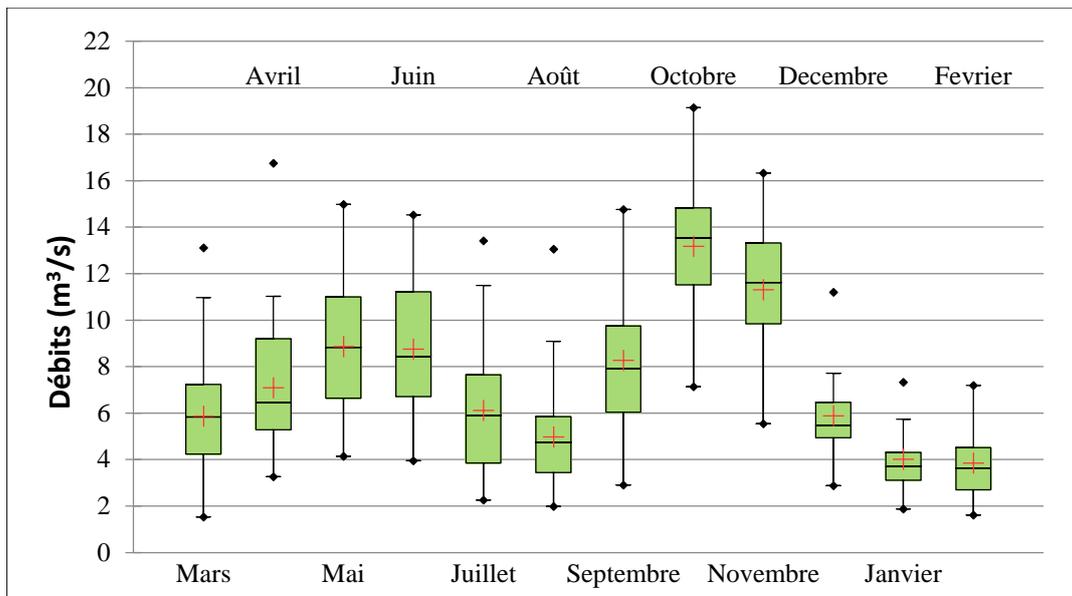


Figure 33 : Variations des débits moyens mensuels de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

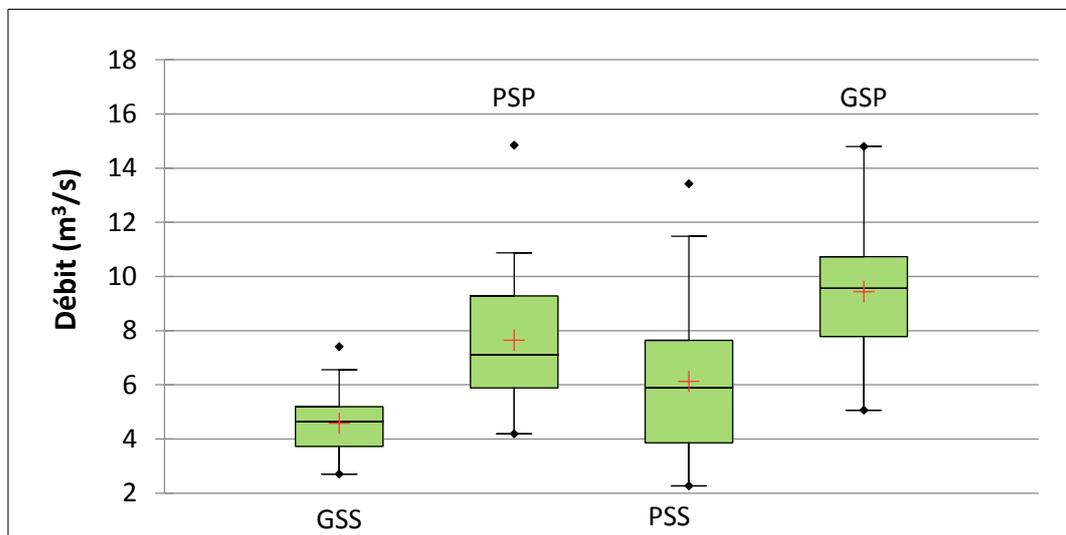


Figure 34 : Variations des débits moyens saisonniers de la Mefou à Nsimalen (1964-2019)

III.2.3. Débits annuels

Durant la période d'observation comprise entre 1964 et 2019 (32 ans en excluant les longues années de lacune), les débits annuels de la Mefou à Nsimalen varient entre 4,35 m³/s, observé au courant de l'année hydrologique 1976-77 et, 13,64 m³/s (2008-2009). Le module moyen interannuel obtenu pour cette station est de 7,56 ± 1,92 m³/s correspondant à un débit spécifique de 17,80 l/s/km² (Tableau 17).

Tableau 16 : Domaine de variations mensuelles des débits liquides de la Mefou à Nsimalen entre 1964 à 2019

Mois	Paramètres	Minimum			Maximum			Moyenne			ET	Med	CV	CS	CK
	Saisons	Q (m ³ /s)	AO	Qs (l/s/km ²)	Q (m ³)	AO	Qs (l/s/km ²)	Q (m ³)	Contribution (%)	Qs (l/s/km ²)	/	/	/	/	/
Mars	PSP	1,53	1965-66	3,60	13,12	2007-08	30,86	5,88	6,66	13,82	2,29	6,45	0,38	0,27	2,45
Avril		3,27	1976-77	7,69	16,75	2007-08	39,42	7,10	8,04	16,70	2,67	7,30	0,36	0,52	2,58
Mai		4,14	1975-76	9,73	14,99	2007-08	35,26	8,87	10,05	20,86	3,10	9,13	0,34	0,19	2,21
Juin		3,94	1974-75	9,28	14,53	2007-08	34,19	8,76	9,92	20,60	2,97	8,69	0,33	0,06	1,77
Juillet	PSS	2,27	1973-74	5,34	13,42	1983-84	31,58	6,12	6,94	14,40	3,07	6,94	0,48	1,09	4,33
Août	GSP	1,98	1974-75	4,66	13,05	1983-84	30,71	4,98	5,65	11,72	2,27	4,82	0,45	1,31	5,30
Septembre		2,90	1975-76	6,83	14,77	1983-84	34,74	8,28	9,39	19,48	3,01	8,18	0,35	0,16	2,28
Octobre		7,14	1974-76	16,80	19,15	1984-85	45,05	13,18	14,94	31,02	2,82	13,64	0,21	0,42	2,46
Novembre		5,55	1976-77	13,06	16,33	1965-66	38,43	11,32	12,83	26,63	3,04	11,78	0,26	0,08	2,19
Decembre	GSS	2,88	1974-76	6,78	11,21	1984-85	26,38	5,89	6,68	13,86	2,22	5,53	0,36	1,06	3,02
Janvier		1,88	1975-76	4,42	7,33	1985-86	17,25	4,02	4,55	9,45	1,52	3,71	0,37	0,83	2,51
Fevrier		1,62	1984-85	3,81	7,19	2004-05	16,92	3,85	4,36	9,06	1,86	3,64	0,45	0,54	1,69

Légende : PSP (Petite Saison Pluvieuse); PSS (Petite Saison Sèche); GSP (Grande Saison Pluvieuse); (Grande Saison Sèche); Q (Débit liquide) ; Qs (Débit spécifique) ; Moy (Moyenne); ET (Ecart-type); Med (Mediane); CV (Coefficient de Variation); CS (Coefficient d'asymétrie); CK (Coefficient d'aplatissement); AO (Année d'Observation).

Tableau 17 : Distributions annuelle et saisonnière des débits liquides de la Mefou à Nsimalen (1964-2019)

Séries chronologiques	Minimum			Maximum			Moyenne			ET	Med	CV	CS	CK
	Q (m ³ /s)	AO	Qs (l/s/km ²)	Q (m ³ /s)	AO	Qs (l/s/km ²)	Q (m ³ /s)	Contribution (%)	Qs (l/s/km ²)	/	/	/	/	/
PSP	3,22	1976-1977	7,57	13,84	2008-2009	32,58	7,65	27,52	18,00	2,76	7,89	0,35	0,26	2,25
PSS	2,27	1974-1975	5,34	16,04	1984-1985	37,73	6,12	22,02	14,40	3,07	6,94	0,48	1,09	4,33
GSP	4,39	1975-1976	10,34	16,02	1984-1985	37,70	9,44	33,97	22,21	2,79	9,61	0,31	0,49	3,06
GSS	2,13	1976-1977	5,00	8,65	1985-1986	20,36	4,59	16,50	10,79	1,87	4,29	0,39	0,81	2,41
Annuels	4,35	1976-1977	10,22	13,64	2008-2009	32,09	7,56	100%	17,80	1,92	7,92	0,25	0,12	1,97

Légende : PSP (Petite Saison Pluvieuse); PSS (Petite Saison Sèche); GSP (Grande Saison Pluvieuse); (Grande Saison Sèche); Q (Débit liquide); Qs (Débit spécifique); Moy (Moyenne); ET (Ecart-type); Med (Médiane); CV (Coefficient de Variation); CS (Coefficient d'asymétrie); CK (Coefficient d'aplatissement); AO (Année d'Observation).

III.3. BILAN HYDROLOGIQUE DU BVAM À NSIMALEN

Le bilan hydrologique est établi pour comparer les entrées (pluies) et les sorties (écoulements) dans un bassin versant (Tableau 18 et Figure 35).

Durant la période allant de 1964 jusqu'à 2019, la lame d'eau moyenne interannuelle précipitée dans la partie amont du bassin versant de la Mefou dont l'exutoire est à Nsimalen est de 1602,91 mm ; le débit moyen interannuel enregistré est de 7,56 m³/s, soit un débit spécifique de 17,8 l/s/km² ; celui-ci correspond à une lame d'eau écoulée de 563,81 mm pour une coefficient d'écoulement (Ke) de 36,10 % et un déficit d'écoulement (De) de 1039,1 mm. Cet écoulement prend en compte les eaux de ruissellement, l'écoulement de subsurface ou hypodermique et l'écoulement de base. Le déficit d'écoulement quant à lui prend en compte l'évapotranspiration et l'infiltration (Tableau 18).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR) obtenues à partir de la méthode de Thornthwaite (1964) (Annexe 1) sont de 1186,61 mm et de 950,70 mm respectivement. La quantité de pluie qui a échappée à l'évapotranspiration et à l'écoulement et qui arrive dans la nappe souterraine est de 88,4 mm. Elle correspond à un coefficient d'infiltration de 5,51%.

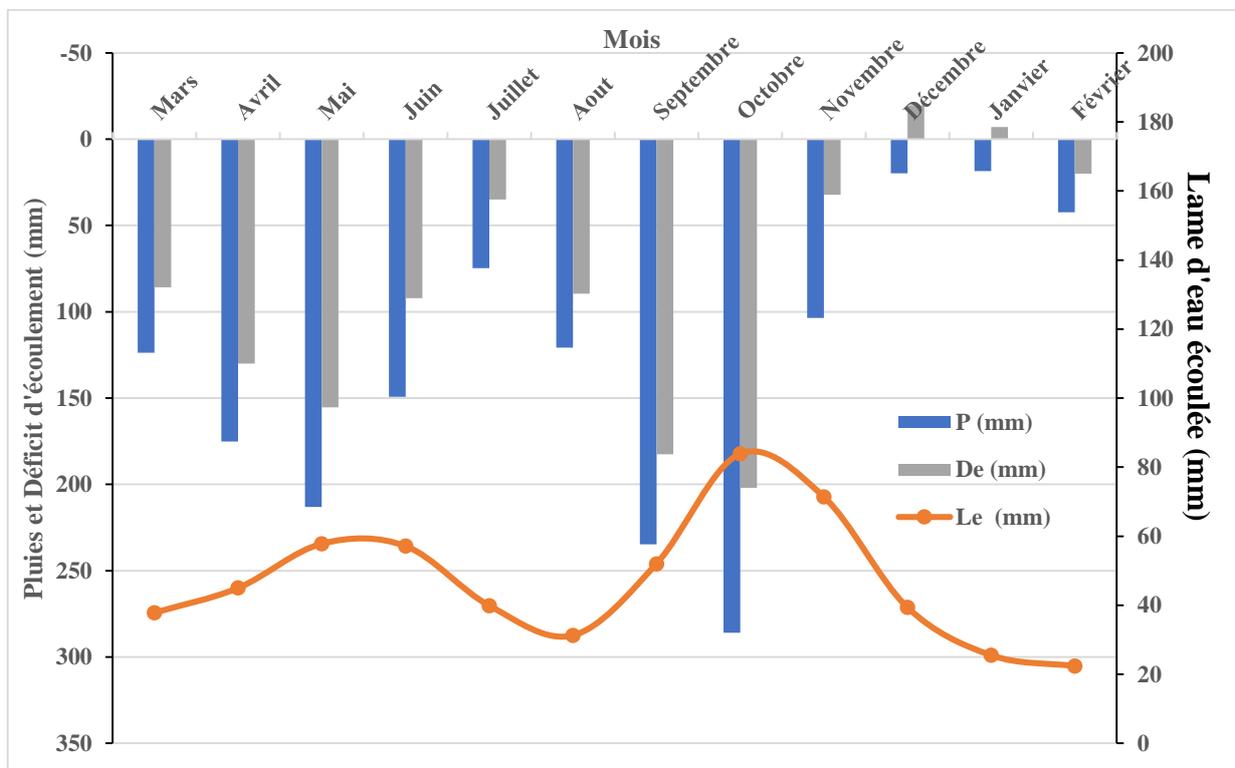


Figure 35 : Bilan hydrologique de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

Tableau 18 : Termes du bilan hydrologique du BVAM à Nsimalen de 1964 à 2019

	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Total
P (mm)	123,7	175,12	213,12	149,18	74,76	120,82	234,65	285,87	103,64	19,85	18,45	42,29	1602,91
Q (m³/s)	6,01	7,38	9,18	9,07	6,33	5,13	8,53	13,31	11,71	6,25	4,05	3,80	7,56
Qs(l/s/km²)	14,13	17,37	21,60	21,34	14,90	12,07	20,08	31,32	27,56	14,72	9,54	8,93	17,80
Le (mm)	37,85	45,03	57,85	57,16	39,92	31,29	52,04	83,89	71,44	39,42	25,55	22,39	563,81
De(mm)	85,85	130,09	155,27	92,02	34,84	89,53	182,61	201,98	32,20	-19,57	-7,10	19,90	1039,1
Ke (%)	30,59	25,71	27,14	38,32	53,40	25,90	22,18	29,34	68,93	198,59	138,49	52,94	36,11

Légende : P (pluies) ; Q (Débits liquide) ; Qs (Débit spécifique) ; Le (Lame d'eau écoulé) ; De (Déficit d'écoulement) ; Ke (Coefficient d'écoulement).

III.4. DYNAMIQUES DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BVAM À NSIMALEN

Cette partie prend en compte trois étapes que sont la validation des types d'occupation du sol, la distribution spatiale des types d'occupation du sol et le changement des types d'occupation des sols. Cinq (05) principales classes d'occupations du sol (OS) ont été prises en compte dans le présent travail pour les années 1988, 2000 et 2020 : i) végétations primaires, ii) végétations secondaires, iii) zones bâties, iv) zones agricoles et sols nus et, v) zones marécageuses (Tableaux 19 à 21 et Figure 36).

III.4.1. Validation des types d'occupation du sol

L'évaluation de la précision des cinq classes d'occupation de sol suscitée présente des valeurs de coefficient de Kappa de 84,79 et 76% pour les cartes d'OS des années 1988, 2000 et 2020 respectivement (Tableaux 19, 20 et 21). Ces valeurs sont supérieures à la valeur seuil d'exactitude de 75% adoptée pour la présente étude. On peut donc dire que les cartes obtenues sont « d'accord fort à modéré » par rapport à la réalité du terrain.

Tableau 19 : Matrice de confusion des classes d'occupation du sol du BVAM à Nsimalen en 1988

Classe d'OS en 1988	Végétations primaires	Végétations secondaires	Zones bâties	Zones agricoles/ sols nus	Zones marécageuses	Total	Précision utilisateur
Végétations primaires	100	00	00	00	00	100	1
Végétations secondaires	00	100	00	00	00	100	1
Zones bâties	00	5	75	5	15	100	0,75
Zones agricoles et sols nus	0	0	20	70	10	100	0,70
Zones marécageuses	5	5	0	00	90	100	0,90
Total/Moyenne	105	110	95	75	115	500	0,87
Précision producteur	0,95	0,91	0,79	0,83	0,78		
Coefficient de Kappa : 0,84 (84%)				Précision Global : 0,87			

Tableau 20 : Matrice de confusion des classes d'occupation du sol du BVAM à Nsimalen en 2000

Classe d'OS en 2000	Végétations primaires	Végétations secondaires	Zones bâties	Zones agricoles/sols nus	Zones marécageuses	Total	Précision utilisateur
Végétations primaires	95	5	00	00	0	100	0,95
Végétations secondaires	10	85	5	0	0	100	0,85
Zones bâties	15	5	75	0	5	100	0,75
Zones agricoles et sols nus	0	0	10	80	10	100	0,80
Zones marécageuses	10	10	0	0	80	100	0,80
Total/Moyenne	130	105	90	80	95	500	0,83
Précision producteur	0,73	0,81	0,83	1	0,84		
Coefficient de Kappa : 0,79 (79%)				Précision Global : 0,83			

Tableau 21 : Matrice de confusion des classes d'occupation du sol du BVAM à Nsimalen en 2020

Classe d'OS en 2020	Végétations primaires	Végétations secondaires	Zones bâties	Zones agricoles/sols nus	Zone marécageuse	Total	Précision utilisateur
Végétations primaires	60	0	20	20	0	100	0,60
Végétations secondaires	0	80	20	0	0	100	0,80
Zones bâties	0	0	95	0	5	100	0,95
Zones agricoles et sols nus	0	0	10	80	10	100	0,8
Zones marécageuses	0	0	0	10	90	100	0,9
Total/Moyenne	60	80	145	110	105	500	0,81
Précision producteur	1	1	0,66	0,73	0,86		
Coefficient de Kappa : 0,76 (76%)				Précision Global : 0,81			

III.4.2. Distribution spatiale des types d'occupation du sol

III.4.2.1. Etat de l'occupation du sol en 1988

La répartition spatiale des différents types d'occupation du sol de l'année 1988 montre que :

- les zones bâties représentent environ 7,28% de la surface du BVAM à Nsimalen. Celle-ci correspond à une surface de de 31 km² ;
- les zones agricoles et sols nus représentent 2,87% pour 12,22 km² du BVAM ;
- les végétations secondaires 42% (178,79 km²) ;
- les végétations primaires représentent environ 47.3% pour 201,57 km² du BVAM ;
- les zones marécageuses enfin représentent 0,56% pour 2,40 km² de la surface totale du bassin (Tableau 22 ; Figure 36a).

III.4.2.2. Etat de l'occupation du sol en 2000

L'occupation du sol de l'année 2000 révèle que les végétations secondaires et primaires représentent respectivement environ 33,38 et 47,91% du BVAM soit 142,22 et 204,18 km² de la surface totale du BVAM. Les zones marécageuses quant à elles occupent 1,21 km² (0,28%) mais sont

plus concentrées dans la partie sud de la zone d'étude Les zones bâties et les zones agricoles et sols nus couvrent respectivement 11,75% (50,09 km²) et 6,67% (28,44 km²) du BVAM (Tableau 22 et Figure 36b).

III.4.2.3. Etat de l'occupation du sol en 2020

La carte d'occupation du sol de l'année 2020 montre que, les zones marécageuses et les zones agricoles et sols nus représentent respectivement 0,23% (0,99 km²) et 11,71% (49,89 km²) de la zone d'étude. Les végétations secondaires et primaires occupent respectivement 31,24% (133,51 km²) et 19,12% (81,27 km²). Les zones bâties enfin couvrent 37,65% soit environ 160,40 km² de la surface du BVAM (Figure 36c et Tableau 22).

Tableau 22 : Distribution spatiale des types d'occupation du sol (OS) durant les années 1988, 2000 et 2020 dans le BVAM à Nsimalen

Classes d'occupation du sol	Etat en 1988		Etat en 2000		Etat en 2020	
	(km ²)	%	(km ²)	%	(km ²)	%
Zones bâties	31,02	7,28	50,09	11,75	160,40	37,65
Zone marécageuse	2,40	0,56	1,21	0,28	0,99	0,23
Zone agricole et sol nu	12,22	2,87	28,44	6,67	49,89	11,71
Végétations secondaires	178,79	41,97	142,22	33,38	133,51	31,34
Végétations primaires	201,57	47,32	204,18	47,91	81,27	19,12
Superficie et pourcentage totaux (km² et %)	425	100	425	100	425	100

III.4.3. Changement des types d'occupation de sol

III.4.3.1. Changement de l'occupation du sol entre 1988-2000

De 1988 à 2000 (12 ans), l'état d'occupation du sol a subi des multiples changements. Les zones agricoles et sols nus, les zones bâties et les végétations primaires ont connu des augmentations respectives d'environ 61,48%, 132,73% et 1,29% pour des surfaces respectives de 16,22, 19,07 et 2,61 km². Celles-ci correspondent à des taux d'augmentations annuels de 1,35, 1,59 et 0,22 km²/an respectivement. Les surfaces occupées par les zones marécageuses et les végétations secondaires ont connu quant à elles des diminutions de l'ordre de -49,58% (-1,19 km²) et -20,45% (-36,57 km²) correspondant aux taux de réduction de l'ordre de -0,099 et -23,05 km²/an respectivement (Tableau 23).

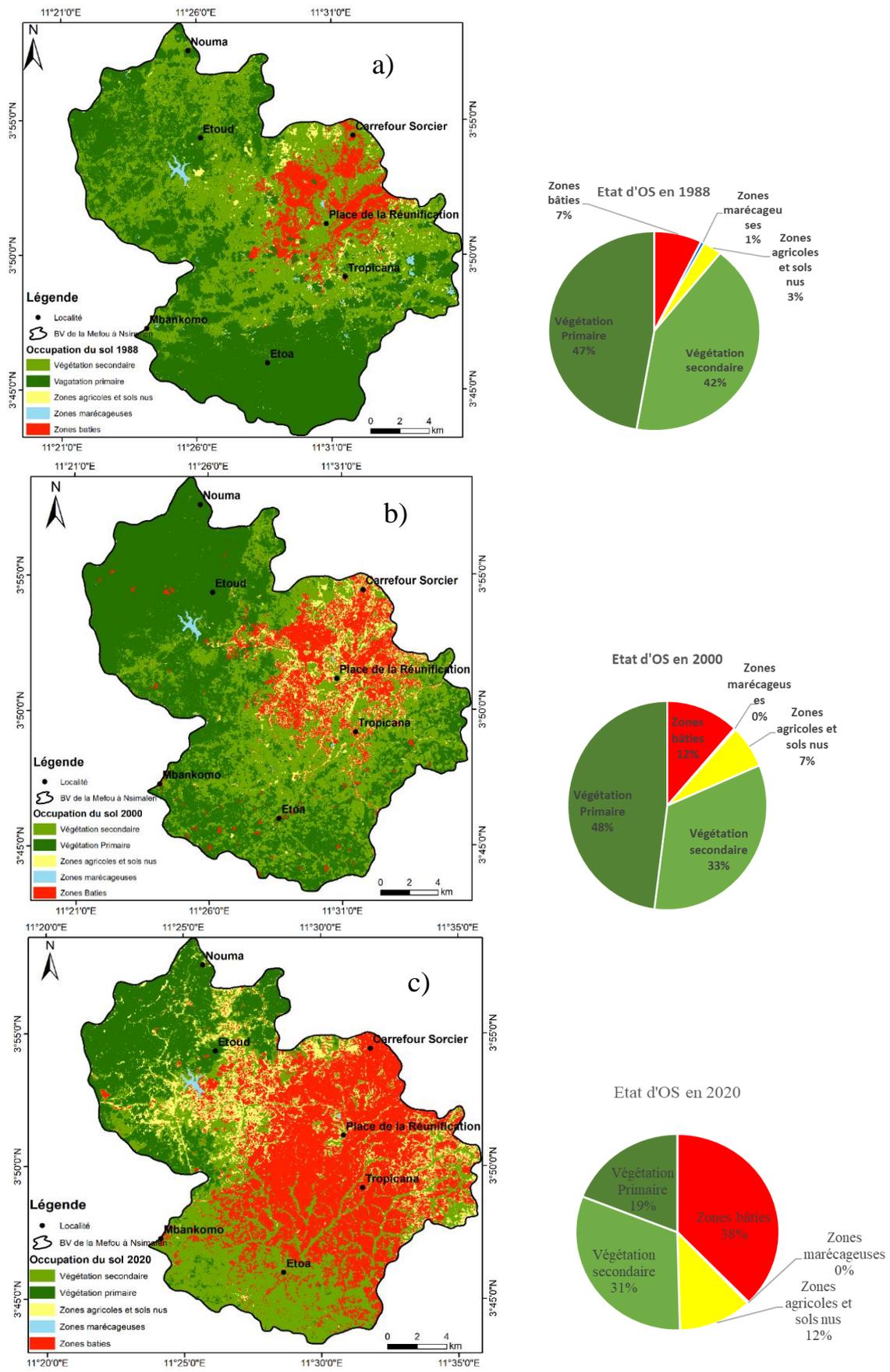


Figure 36 : Etats de l'occupation du sol du bassin versant amont de la Mefou à Nsimalen : a) 1988 ; b) 2000 ; c) 2020

III.4.3.2. Changement de l'occupation du sol entre 2000-2020

Les changements des classes d'occupation du sol enregistrés de 2000 jusqu'à 2020 (20 ans) montrent que, les surfaces bâties et les zones agricoles et sols nus ont subi respectivement des augmentations de l'ordre de 220,22% (110 km²) et 75,42% (21,45 km²) pour des taux d'augmentation de 5,52 et 1,07 km²/an. Les surfaces occupées par les végétations primaires, secondaires et les zones marécageuses quant à elles ont plutôt subi des réductions de l'ordre (-60,19%) (-122,91 km²) (-6,71%) (-8,71 km²) et (-17,85%) (-0,5 km²). Celles-ci correspondent à des taux de réductions annuels de -6,15, -0,44 et -0,03 km²/an respectives (Tableau 23).

III.4.3.3. Changement de l'occupation du sol entre 1988-2020

Durant les 32 années (1988-2020) retenues pour quantifier l'évolution des différents types d'occupation du sol dans le BVAM les zones bâties et les zones agricoles et sols nus ont respectivement augmentées de +678,45% et +308,26% (129,38 et 37,67 km² respectivement) pour des taux de changements annuels de 4,04 et 1,17 km²/an. Les surfaces occupées par les végétations primaires et secondaires ont quant à elles subies des reculs respectifs de -120,3 km² (-59,68%) et -45,28 km² (-25,33%) pour des taux de pertes de -3,76 km²/an et -1,42 km²/an. Les zones marécageuses ont subi une baisse de -90,42% (2,17 km²) pour un taux de changement annuels de 0,07 km²/an (Tableau 23).

Tableau 23 : Evaluation du changement de l'occupation du sol durant les périodes 1988-2000, 2000-2020 et 1988-2020 dans le BVAM à Nsimalen

Classes d'OS	1988-2000		2000-2020		Changement net 1988-2020	
	Amplitude (km ²)	TC annuel (km ² /an)	Amplitude (km ²)	TC annuel (km ² /an)	Amplitude (km ²)	TC annuel (km ² /an)
Zones bâties	19,07 (61,48%)	1,59	110,31 (220,22%)	5,52	129,38 (678,45%)	4,04
Zone marécageuse	-1,19 (-49,58%)	-0,099	-0,5 (-17,85%)	-0,03	-2,17 (-90,42%)	-0,07
Zone agricole et sol nu	16,22 (132,73%)	1,35	21,45 (75,42%)	1,07	37,67 (308,26%)	1,17
Végétations secondaires	-36,57 (-20,45%)	-23,50	-8,71 (-6,12%)	-0,44	-45,28 (-25,33%)	-1,42
Végétations primaires	2,61 (1,29%)	0,22	-122,91 (-60,19%)	-6,15	-120,3 (-59,68%)	-3,76

Légende : OS (Occupation de Sol) ; TC (Taux de Changement).

CONCLUSION

Il ressort de ce chapitre que durant la période comprise entre 1964 et 2020 (57 ans), le nombre de jours de pluies /an varie entre 95 jours et 177 jours pour une moyenne interannuelle de 118 ± 15

jours. En ce qui concerne les quatre classes des hauteurs de pluies mises en place dans le BVAM, on remarque que celles comprises entre 1 et 5 mm représentent environ 35,92% des hauteurs de pluies enregistrées dans le bassin ; 5,1 - 15 mm (35,07%) ; 15,1 et 30 mm (18,66%) et la classe supérieure à 30 mm (12,26%). Les pluies journalières maximales enregistrées chaque année dans le BVAM varient entre 50 mm et 107 mm pour une moyenne interannuelle de 70 ± 13 mm. Les variations des hauteurs de pluies mensuelles et saisonnières sont caractéristiques du régime équatorial de transition à quatre saisons inégalement réparties. La pluie annuelle varie entre 1083 mm et 2196,7 mm pour une moyenne interannuelle de 1562 ± 271 mm.

Pour ce qui est de l'hydrométrie, on remarque que durant la période comprise entre 1964 et 2019 (32 ans) sans prendre en compte les lacunes, les débits journaliers et caractéristiques de la Mefou à Nsimalen fluctuent entre $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$ ($2,54 \text{ l/s/km}^2$) et $29,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ($68,4 \text{ l/s/km}^2$). Les débits moyens mensuels et saisonniers montrent une évolution en dos de chameau caractéristique du régime équatorial de transition. Les débits moyens annuels quant à eux fluctuent entre $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$ ($10,22 \text{ l/s/km}^2$) et $13,64 \text{ m}^3/\text{s}$ ($32,09 \text{ l/s/km}^2$) pour un module moyen interannuel de $7,56 \pm 1,92 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce dernier correspond à un débit spécifique de $17,80 \text{ l/s/km}^2$, une lame d'eau écoulée de 564 mm représentant un coefficient d'écoulement de 36%.

L'analyse de l'état de l'occupation du sol met en évidence cinq types d'OS que sont : les zones bâties, les végétations secondaires et primaires, les zones marécageuses, et les zones agricoles et sols nus. La quantification du changement des types d'OS durant la période allant de 1988 à 2020 montre que les zones bâties et les zones agricoles et sols nus ont respectivement augmentées de $129,38 \text{ km}^2$ (+678,45%) et de $37,67 \text{ km}^2$ (+308,26%) respectivement. Ces variations d'OS correspondent à des taux d'augmentation d'environ $4 \text{ km}^2/\text{an}$ pour les zones bâties et de $1,17 \text{ km}^2/\text{an}$ pour les zones agricoles et sols nus. Les végétations primaires et secondaires ainsi que les zones marécageuses ont quant à elles subi des reculs de l'ordre de $-120,3 \text{ km}^2$ (-59,68%), de $-45,28 \text{ km}^2$ (-25,33%) et de $-2,17 \text{ km}^2$ (-90,42%) respectivement. Elles correspondent à des taux de diminution respectifs de $-3,76 \text{ km}^2/\text{an}$, $-1,42 \text{ km}^2/\text{an}$ et $-0,07 \text{ km}^2/\text{an}$.

CHAPITRE IV : INTERPRETATIONS ET DISCUSSION

INTRODUCTION

Ce chapitre interprète et discute les résultats relatifs à la variabilité et à l'évolution des paramètres hydropluviométriques dans la partie amont du bassin versant de la Mefou dont l'exutoire est situé à Nsimalen. Par la suite, les processus hydrologiques et les paramètres environnementaux qui contrôlent les interactions eaux de surface-eaux souterraines en se basant sur les variations quantitatives des types d'eau rencontrés sur ce bassin sont identifiés. Enfin, un modèle conceptuel de susceptibilité aux inondations dans la partie urbanisée (bassin du Mfoundi) du BVAM à Nsimalen est proposé.

IV.1. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE DANS LE BVAM À NSIMALEN A DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS

Cette analyse sera effectuée aux échelles journalières, mensuelles, saisonnières et annuelles.

IV.1.1. Echelle journalière

IV.1.1.1. Nombre de jours de pluies

On a vu précédemment que, durant la période d'étude (1964- 2020), le nombre de jours de pluies par an varie entre 95 jours et 177 jours pour une moyenne de 118 ± 15 jours. Cette moyenne est inférieure à celle présentée par Sighomnou (2004) dans la ville Yaoundé (134 jours/an). Elle est également inférieure aux moyennes enregistrées par Bineli Ambomo (2009) à Sangmélina (126 jours/an) et à Abong-Mbang (148 jours/an).

L'analyse de l'évolution du nombre de jours de pluies par an pour cette période de référence permet de déceler une oscillation autour de la normale avec une tendance à la baisse (Figure 37). L'application des tests d'homogénéité de Pettitt, SNH, Buishand et Von Neuman à cette variable révèle l'existence d'une rupture significative en 1988-89 accompagnée d'une baisse de -7,68% (Figure 37 ; Tableau 24). Cette diminution est semblable à celle obtenue par Kpoumié et *al.*, (2012) à Edéa entre 1984 et 2007, et sur l'ensemble des stations situés au sud du Cameroun entre 1965 et 1975 où on enregistre des taux de baisses compris entre -5 et -10% (Sighomnou, 2004 ; Kengni et *al.*, 2019). Cette baisse est par contre inférieure à celle de -20% enregistrée dans l'extrême Nord du pays au cours de la même période (Sighomnou, 2004 ; Dassou, 2019). Les résultats publiés par Samba et *al.* (2011) au Congo-Brazzaville présentent quant à eux des variations non uniformes du nord vers le sud. En effet, ces auteurs observent plutôt des hausses de l'ordre de +34% durant la décennie 1950-1960 dans le Nord du Congo, et également une augmentation de +97% au sud durant les années 1990 contrairement aux différents résultats publiés jusqu'à ce jour au Cameroun (Cheo et *al.*, 2013 ; Dassou et *al.*, 2016).

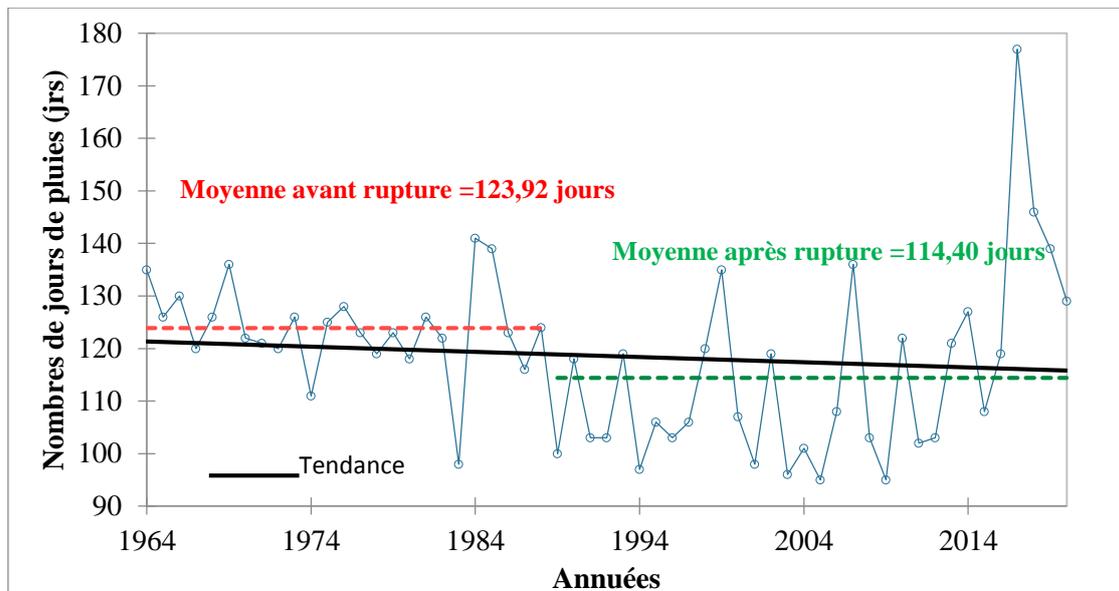


Figure 37 : Evolution de nombre de jours de pluies par an dans le bassin versant amont de la Mefou de 1964 à 2020

IV.1.1.2. Classes de hauteurs de pluies journalières

Parmi les quatre (04) classes (1 et 5 mm ; 5,1 - 15 mm ; 15,1 - 30 mm et pluies supérieures à 30 mm) de hauteurs de pluies journalières retenues dans la présente étude, on remarque que les classes de pluies inférieures à 15 mm représentent 71% des pluies enregistrées dans le BVAM contre 29% pour les classes supérieures à 15 mm. Cette fluctuation des classes de hauteurs de pluies est identique à celle présentée par Bineli Ambomo (2009) aux niveaux des stations d'Abong-Mbang et de Sangmélina tous situées dans le plateau sud camerounais forestier.

L'analyse de ces différentes classes de hauteurs de pluies présente dans l'ensemble une évolution vers une baisse généralisée des fréquences de pluies excepté la classe des pluies comprise entre 5,1 - 15 mm qui indique une légère hausse. Seule la classe des pluies $R > 30$ mm présente une rupture en 1987-88 accompagnée d'une baisse de -27,89% (Figure 38 et Tableau 24). Ces résultats sont en accord avec les observations faites à l'échelle du Cameroun à partir de la décennie 1970 (Sighomnou, 2004), mais aussi à ceux trouvés au Burkina-Faso par Carbonnel (1983) et Albergel (1986), sur le bassin de la Casamance par Dacosta (1989) et dans le bassin versant du Sénégal par Bodian et *al.* (2014). Cette tendance généralisée à la baisse est contraire aux résultats de certaines études menées : en zone sahélienne d'Afrique par Bodian et *al.*, (2012), aux USA et au Royaume Uni (McCarthy et *al.*, 2001), qui montrent plutôt une augmentation de la fréquence et des volumes précipités des événements majeurs au cours de la période récente.

Tableau 24 : Tests d'homogénéités (à un niveau significatif de 5%) obtenus sur le nombre de jours de pluies par an, les pluies max par an et les classes de hauteurs de pluies journalières de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen

Variable	Séries chronologiques	Test de Pettitt					Test de SNH				Test de Buishand				Test de Von Neumann		
		K	T	p-V	C (%)	T0	t	p-V	C (%)	Q	t	p-V	C (%)	η	p-V	R	
Nombre de jours de pluies par an		381	1988-89	0,018	-7,68	15,45	2016-17	0,001	+26,96	8,753	1988-88	0,089	H0	1,27	0,002	Ha	
Classes de hauteur de pluies	R [1-5 mm [	289	1989-90	0,185	H0	13,28	2016-17	0,081	H0	7,809	2015-16	0,117	H0	1,64	0,068	H0
	R [5,1 - 15 mm [	199	2006-07	0,876	H0	8,198	1969-70	0,052	H0	6,69	1969-70	0,320	H0	1,73	0,147	H0
	R [15,1 - 30 mm [	243	1985-86	0,439	H0	6,413	2017-18	0,164	H0	6,87	1985-86	0,292	H0	2,46	0,963	H0
	R > 30 mm	361	1987-88	0,035	-27,89	8,525	1987-89	0,079	H0	10,98	1987-88	0,015	-27,89	1,68	0,108	H0	
Pluies jrs max (mm)		249	1987-88	0,392	H0	7,080	2008-09	0,136	H0	8,946	1987-88	0,074	H0	2,04	0,560	H0	

Légende : Ha (rupture); H0 (Série homogène); p-V (p-value); R (résultat); C (Taux de Changement); K (Variable de Pettitt); T0 (Statistique); U (Statistique de Buishand) ; η (Coefficient de Von Neumann) ; t (Potentielle période de rupture).

Tableau 25 : Tests d'homogénéité (à un niveau significatif de 5%) sur les pluies mensuelles du BVAM à Nsimalen (Période : 1964 - 2020)

Mois	Test de Pettitt					Test de SNH				Test de Buishand				Test de Von Neumann		
	K	t	p-V	C (%)	T0	t	p-V	C (%)	Q	t	p-V	C (%)	η	p-V	R	
Mars	333	1980-81	0,076	H0	5,79	1980-81	0,189	H0	8,38	1980-81	0,117	H0	1,72	0,143	H0	
Avril	168	2013-14	0,711	H0	6,19	1966-67	0,202	H0	5,23	1988-87	0,612	H0	2,05	0,585	H0	
Mai	199	1991-92	0,886	H0	4,21	1973-74	0,431	H0	6,13	1991-92	0,425	H0	1,936	0,405	H0	
Juin	267	1978-79	0,297	H0	5,18	2017-18	0,262	H0	7,630	1978-79	0,191	H0	1,817	0,240	H0	
Juillet	267	1978-79	0,297	H0	5,18	2017-18	0,262	H0	7,63	1978-79	0,191	H0	9,430	0,272	H0	
Août	237	1983-84	0,526	H0	3,91	1983-84	0,407	H0	7,187	1983-84	0,228	H0	1,674	0,102	H0	
Septembre	193	1971-72	0,970	H0	3,40	1970-71	0,625	H0	5,59	1990-91	0,524	H0	2,137	0,695	H0	
Octobre	232	1988-89	0,527	H0	6,87	1972-73	0,139	H0	9,49	1988-89	0,052	H0	1,98	0,471	H0	
Novembre	158	2005-06	0,583	H0	5,86	2017-18	0,203	H0	5,05	2005-06	0,656	H0	1,61	0,068	H0	
Décembre	301	1973-74	0,141	H0	12,44	1964-65	0,068	H0	8,99	1984-85	0,077	H0	1,39	0,074	H0	
Janvier	233	2010-11	0,519	H0	5,668	1982-83	0,242	H0	8,55	1982-83	0,099	H0	2,18	0,742	H0	
Février	361	1980-81	0,033	-49,63	9,37	1980-81	0,036	-49,63	10,67	1980-81	0,022	-49,63	1,762	0,179	H0	

Légende : Ha (rupture); H0 (Série homogène); p-V (p-value); R (résultat); C (Taux de Changement); K (Variable de Pettitt); T0 (Statistique); U (Statistique de Buishand) ; η (Coefficient de Von Neumann) ; t (Potentielle Période de Rupture)

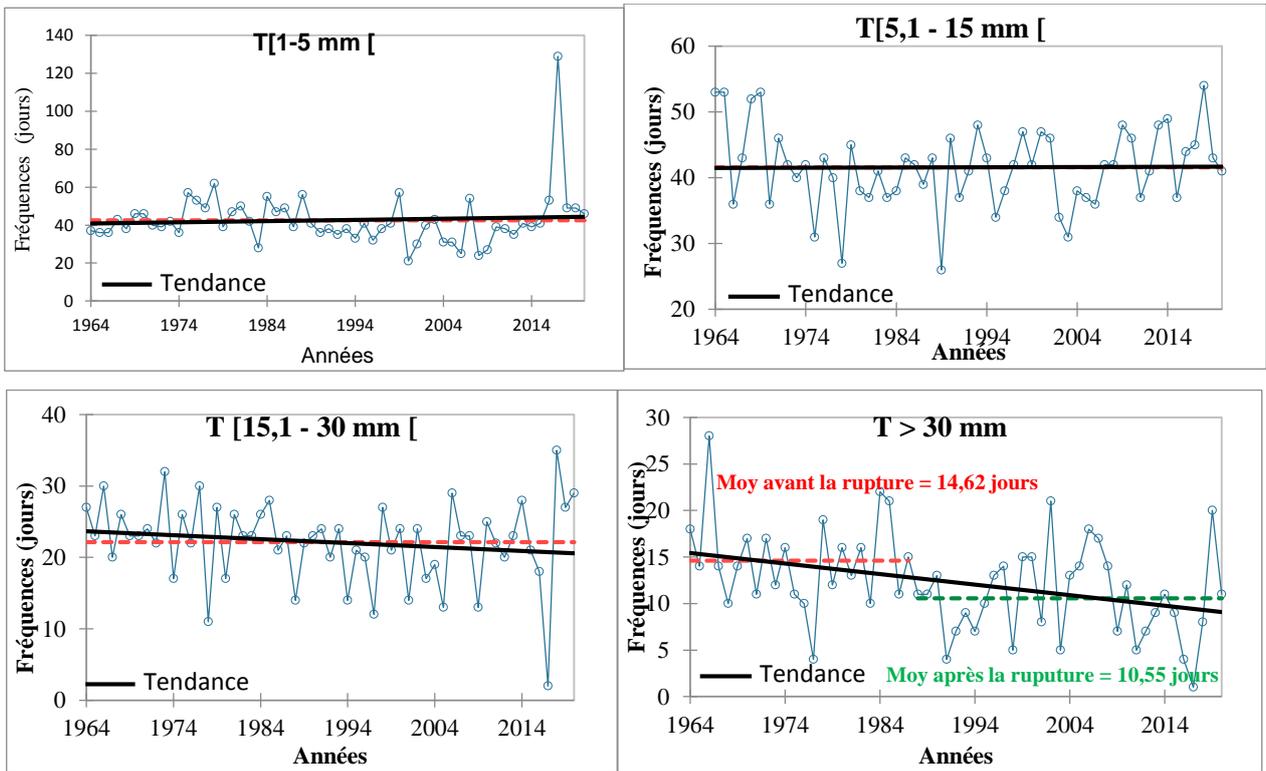


Figure 38 : Evolution des fréquences des classes de pluies de 1964 à 2020 dans le BVAM à Nsimalen

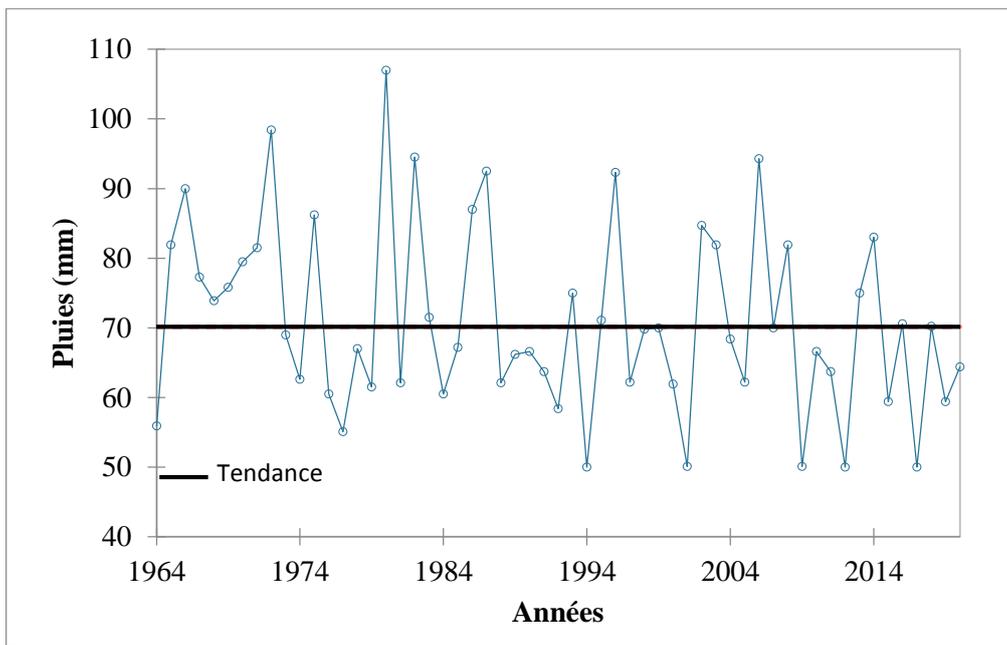


Figure 39 : Evolution des pluies journalières maximales par an dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020

IV.1.1.3. Pluies journalières maximales (pluies extrêmes)

On a vu que durant les 57 années d'étude (1964 - 2020), les hauteurs de pluies journalières les plus élevées (pluies maximales) étaient comprises entre 50 mm et 107 mm pour une moyenne de $70,15 \pm 13$ mm. Celles-ci sont largement supérieures aux valeurs seuils des pluies extrêmes comprises

entre 32 et 55 mm définies par Kouassy Kalédjé et *al.* (2022) dans le bassin de la Kadey (plateau Sud Cameroun forestier). Elles sont par contre inférieures à celles présentées dans la ville de Douala (131 et 187 mm/jours) située en zone côtière (Ndongo et *al.*, 2015).

L'évolution des pluies journalières maximales annuelles durant cette période présente une forte variation dans le temps avec une légère tendance à la baisse sans rupture significative (Figure 39 ; Tableau 24). Cette fluctuation peut être attribuée à la variabilité climatique observée à l'échelle du Cameroun (Sighomnou, 2004 ; Liéno, 2007). Les pics de pluies extrêmes supérieurs à la moyenne de 70 mm/jours et qui représentent environ 61% se situent majoritairement avant les années 2000. Après cette période, les pluies maximales ne représentent plus que 20% traduisant ainsi une baisse des pluies extrêmes supérieures à 70 mm durant la période actuelle dans la zone d'étude.

IV.1.2. Echelle mensuelle

Durant la période d'étude (1964- 2020), on remarque que le mois de janvier est le moins pluvieux avec 18 mm et celui d'octobre le plus pluvieux (286 mm). Ce résultat est conforme à ceux présentés par Sighomnou (2004) et Kpoumié (2015) dans la même zone. On note cependant une différence avec celles du district de Vellore situé en zone semi-aride au sud de l'Inde qui montre que le minimum des précipitations est atteint en juin et le maximum en novembre (Venkatesan et *al.*, 2021).

L'évolution des hauteurs de pluies mensuelles du BVAM montre des tendances à la baisse dans l'ensemble, ceci à l'exception des mois de juillet et août qui enregistrent des légères tendances à la hausse (Figure 40). Ces fluctuations peuvent être attribuées aux changements/variabilités climatiques observés à l'échelle globale et plus particulièrement en zone tropicale humide (Ngounou Ngatcha et *al.*, 2005 ; Liéno, 2007 ; Kengni et *al.*, 2019 ; Israel et *al.*, 2020). L'application des tests d'homogénéités à ces pluies montre que seul le mois de février présente une rupture significative en 1980-81 accompagnée d'une baisse de l'ordre de -49,63% (Tableau 25 ; Figure 40). Cette baisse n'est pas synchrone avec la vague d'augmentation des pluies connue durant la décennie 1981-90 dans la zone. Elle peut être prise comme un signe annonciateur de la décennie 1991-00 qui marque le début d'une période sèche qui prévaut jusqu'en 2020. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans la plupart des travaux sur le régime pluviométrique au Cameroun (Sighomnou et *al.*, 2007 ; Kpoumié et *al.*, 2022). Il s'agit à titre d'exemple, des déficits de l'ordre de -43% dans le bassin du Ntem, - 48% dans le Nyong, -42% dans la Kienké (Ebodé, 2022) ; -54% dans le Mayo Tsanaga (Liéno, 2007) ; entre -10% et -67% dans la Kadey (Kouassy Kaledje, 2021).

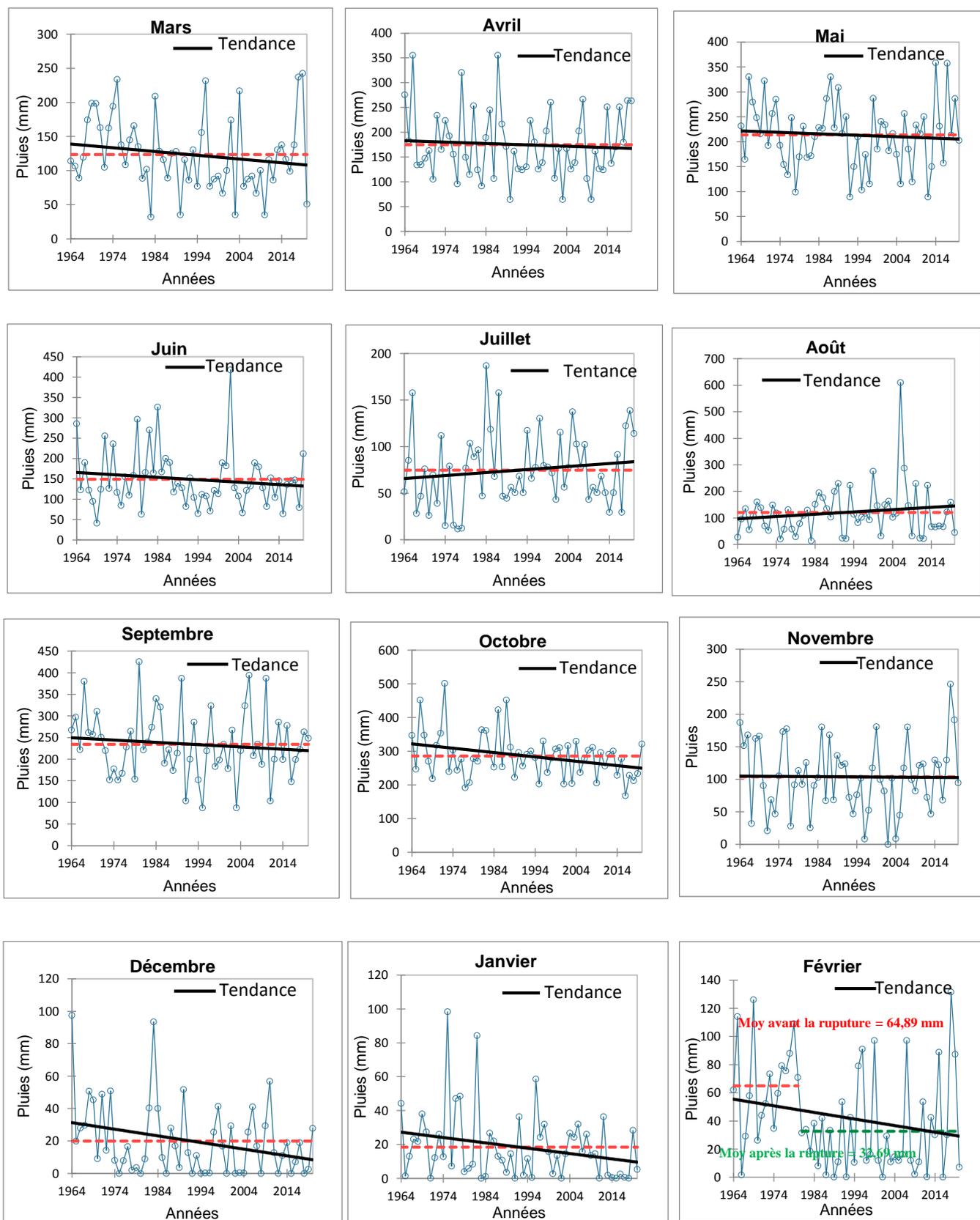


Figure 40 : Evolution des pluies Mensuelles dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020

IV.1.3. Echelle saisonnière

Durant la période de référence (1964-2020), les hauteurs de pluies moyennes saisonnières enregistrées sont de 660 ± 150 mm pour la petite saison des pluies, 75 ± 39 mm pour la petite saison sèche, 81 ± 47 mm pour la grande saison sèche et 745 ± 177 mm pour la grande saison des pluies (Tableau 13). Ainsi, l'ordre de grandeur croissant de ces pluies saisonnières observées dans le BVAM (Petite saison sèche < Grande saison sèche < Petite saison pluvieuse < Grande saison pluvieuse) restent plus ou moins conformes à ceux obtenus par Suchel (1987), Liéno et *al.* (2007) et Kpoumié et *al.* (2012). On note toutefois quelques variations non moins significatives au niveau des quantités de pluie précipitées. Les valeurs des pluies saisonnières maximales sont observées jusqu'en 1985 alors que les valeurs minimales sont obtenues après l'année 1989 et exceptionnellement pour la saison PSP obtenue en 1977. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Kpoumié et *al.* (2022) sur le bassin versant de la Sanaga situé juste au Nord de la zone d'étude.

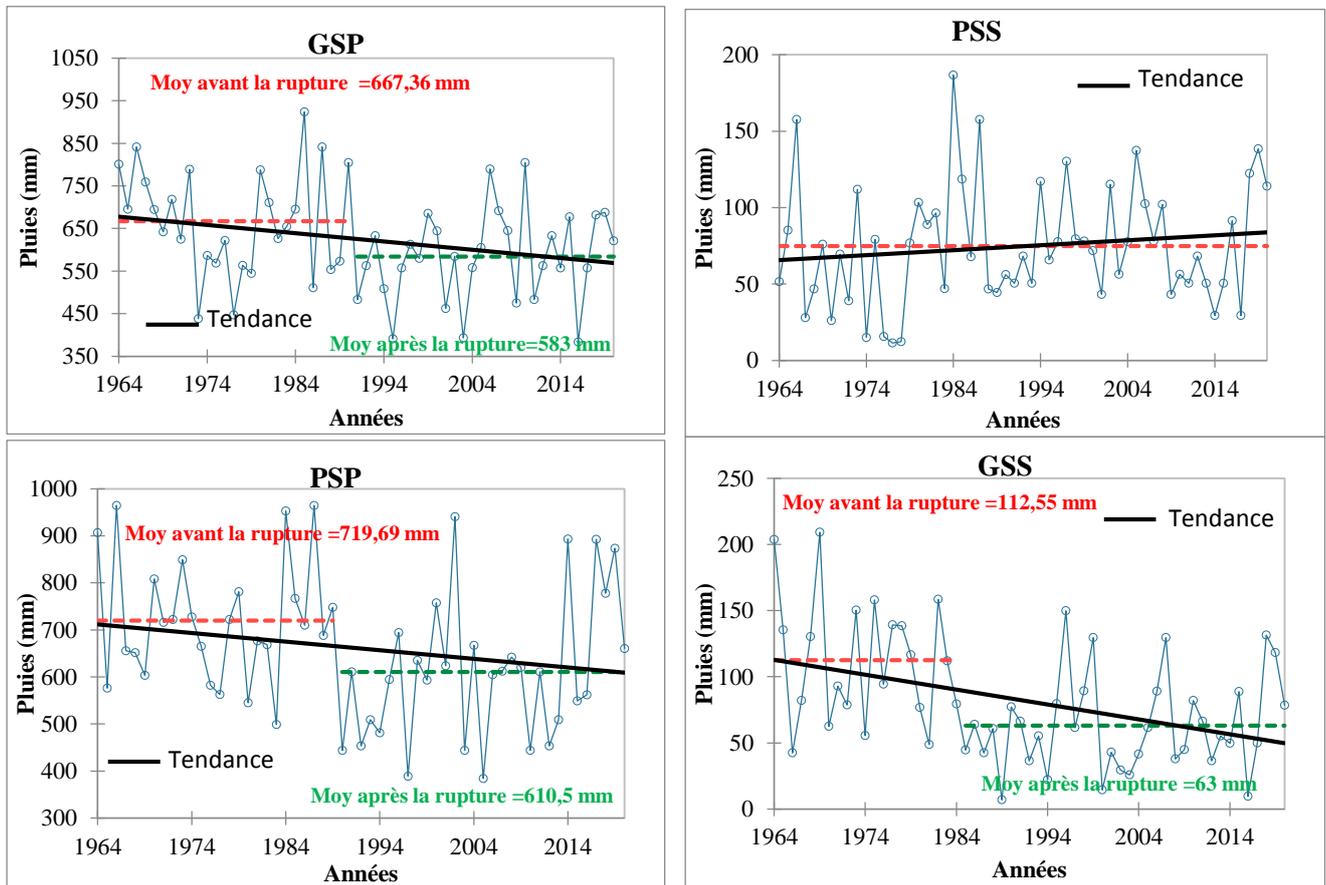


Figure 41 : Evolutions des pluies saisonnières dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020

L'analyse de l'évolution des pluies moyennes saisonnières montre une variation en dents de scie avec des tendances à la baisse excepté la petite saison sèche qui enregistrent plutôt une légère hausse (Figure 41). Cette augmentation statistiquement significative des pluies en petite saison sèche

traduit un possible changement dans le régime pluviométrique de la zone. Ce dernier qui était bimodale avec deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches (climat équatorial de transition du sud) semble passer à un régime à deux saisons (une saison pluvieuse et une saison sèche) typique au climat tropical de transition au nord de la zone d'étude. Ce même constat a été fait par Liéno et *al.* (2008), Kouassy Kalédjé (2021) et Ebodé (2022) sur certains bassins (Kadey, Nyong, Ntem et Kienké) situés dans le Plateau Sud du Cameroun qui prend en compte la zone forestière du centre, du sud et de l'est Cameroun. Ces résultats corroborent également ceux de Mahé (2006) et de Tsalefac et *al.* (2015) dans la zone sahélienne. Les résultats des différents tests d'homogénéités sur ces séries montrent des ruptures significatives pour la petite saison des pluies, la grande saison de pluies et la grande saison sèche avec des baisses de -15,17% (109 mm) en 1989-90, -12,52% (89 mm) en 1990-91 et -44,01% (51 mm) en 1983-84 respectivement (Tableau 26 ; Figure 41). Ces résultats sont en conformité avec les récentes études effectuées dans la station de Yaoundé (Sighomnou, 2004 ; Kpoumié et *al.*, 2012). Toutefois, ces différentes baisses se situent après la baisse généralisée des précipitations qu'a connu l'Afrique centrale et de l'Ouest entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 (Samba et Nganga, 2011 ; Israel et *al.*, 2020). Elles sont donc concordantes à la vague des baisses significatives connues à partir des années 1980 dans les bassins versants situés dans le Plateau Sud-Cameroun (Liéno et *al.*, 2008 ; Ebodé et *al.*, 2020).

IV.1.4. Echelle annuelle

Les hauteurs de pluies annuelles dans le BVAM varient de 1083 mm à 2196,7 mm pour une moyenne de 1562 mm durant la période comprise entre 1964 et 2020. On remarque que, cette moyenne a connu une légèrement baisse de -2,37% (37,95 mm) par rapport à la valeur de la pluie régionale (1600 mm) définie par Olivry (1986) et Suchel (1987). Cette pluie est légèrement supérieure à celle obtenue à Bertoua (1506 mm) et inférieure à celles connues à Batouri (1761 mm), Yokadouma (1870 mm) et Abon-Mbang (1627 mm) tous situées à l'est de la zone d'étude (Kpoumié et *al.*, 2012 ; Kouassy Kalédjé, 2021). Elle est aussi inférieure à celles enregistrées sur les bassins versants du Ntem (1809 mm), de la Kienké (2055 mm) et de la Lokoundjé (1807 mm) tous situés sur le Plateau Sud camerounais forestiers (Bineli Ambomo, 2009 ; Ebodé, 2022) et celles des localités d'Ezéka (2132 mm), d'Edéa (2566,14 mm) et de Kribi (2987 mm) en allant vers la zone côtière (Kpoumié, 2015 ; Mena et *al.*, 2016). Cette pluie annuelle est largement supérieure aux pluies annuelles enregistrées dans certaines stations situées dans le grand nord (1006,62 mm pour Mogodé ; 981,59 mm pour Mokolo ; 885,01 mm pour Guétalé ; 895,60 mm pour Mayo-Ouldémé, ...) (Dassou et *al.*, 2016 ; Dassou, 2019 ; Wassile et *al.*, 2019).

L'évolution des pluies moyennes interannuelles durant cette période de référence montre une alternance d'années humides et d'années sèches avec une légère tendance à la baisse (Figure 43). L'examen des indices pluviométriques met en évidence six périodes climatiques distinctes (Figure 42) : i) 1964-1973 : période humide caractérisée par une fréquence élevée des anomalies positives et deux années (1966, 1964) extrêmement humides ; ii) 1974-1979 : période sèche ; iii) 1980-1990 : période relativement humide marquée par la présence de trois années sèches (1983, 1986 et 1988) ; iv) 1991-1998 : période relativement sèche avec une année humide (1996) ; v) 1999-2016 : période caractérisée par une alternance des années sèches (9 années) et humides (8 années) ; vi) 2017-2020 : période actuelle relativement humide.

L'application des tests d'homogénéités à la variable pluies annuelles sur la longue chronique de pluies ne révèle aucune rupture (Figure 42 ; Tableau 26). Ce même constat qui avait déjà été faite par Sighomnou (2004) est différent de celui présenté par Kpoumié et *al.* (2012) qui enregistre quant à lui une baisse de -9,32 % de pluie dans la même zone. Ce résultat n'est pas en conformité avec les résultats enregistrés dans la plupart des grands bassins camerounais qui présentent des ruptures entre les années hydrologiques 1962-63 et 1987-88 accompagnées des baisses comprises en moyennes entre -2 à -20% (-36% pour le bassin du Lac Tchad ; entre -6% et -12% pour le bassin du Niger ; environ -12 % pour le bassin de la Sanaga ; de -20 à -2 % pour les bassins des fleuves côtiers) (Sighomnou, 2004 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016 ; Wassile et *al.*, 2019 ; Kpoumié et *al.*, 2022). Cette absence de rupture n'est également pas en accord avec la vague de baisse des pluies (-15 et -35%) connue entre 1968 et 1972 avec 1970 comme année charnière (Niasse et *al.*, 2004 ; Soro et *al.*, 2014) en Afrique de l'Ouest, Centrale et du Nord (Lodoun et *al.*, 2013 ; Faty et *al.*, 2019).

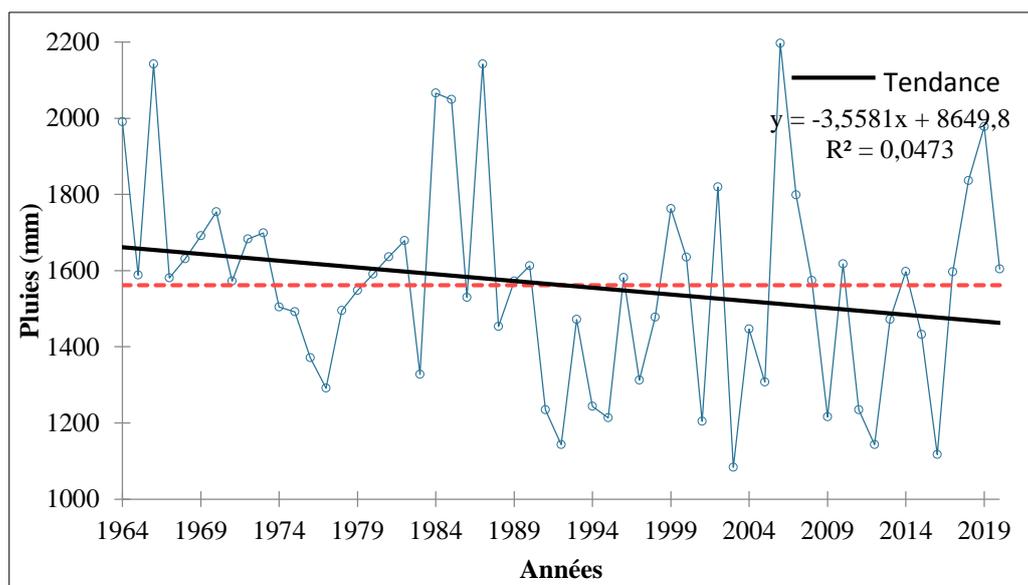


Figure 42 : Evolution des pluies annuelles dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2020

Tableau 26 : Tests d'homogénéités (à un niveau significatif de 5%) obtenus sur les pluies annuelles et saisonnières de 1964 à 202 dans BVAM à Nsimalen

Séries chronologiques	Test de Pettitt				Test de SNH				Test de Buishand				Test de Von Neumann		
	K	T	p-V	C (%)	T0	t	p-V	C (%)	Q	t	p-V	C (%)	η	p-V	R
PSP	368	1989-90	0,030	-15,17	7,480	1989-90	0,080	H0	10,38	1989-90	0,028	-15,17	1,90	0,343	H0
PSS	267	1978-79	0,297	H0	5,18	2017-18	0,262	H0	7,63	1978-79	0,191	H0	9,43	0,272	H0
GSP	313	1990-91	0,118	H0	8,13	1972-73	0,055	H0	9,841	1990-91	0,041	-12,52	1,90	0,360	H0
GSS	463	1984-85	0,003	-44,01	15,32	1983-84	0,001	-44,01	14,23	1983-84	0,001	-44,01	1,41	0,012	Ha
Annelle	312	1987-88	0,115	H0	6,41	1987-88	0,140	H0	9,52	1987-88	0,052	H0	1,65	0,089	H0

Légende : Ha (rupture); H0 (Série homogène); p-V (p-value); R (résultat); C (Taux de Changement); K (Variable de Pettitt); T0 (Statistique); U (Statistique de Buishand) ; η (Coefficient de Von Neumann) ; t (Potentielle période de rupture).

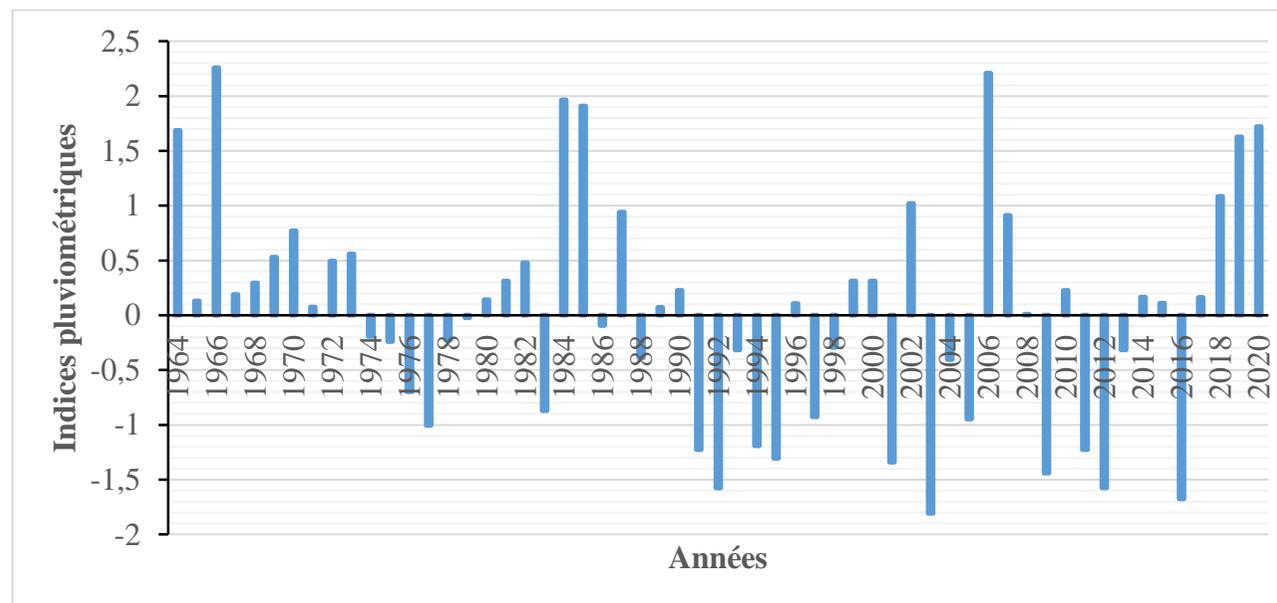


Figure 43 : Variations des indices pluviométriques annuels de 1964 à 2020 dans BVAM à Nsimalen

Tableau 27 : Tests d'homogénéités (à un niveau significatif de 5%) des débits journaliers et caractéristiques de la Mefou à Nsimalen

Tests	Pettitt's				SNH				Buishand				Von Neumann's		
	K	T	p-V	C (%)	T0	t	p-V	C (%)	Q	t	p-V	C (%)	η	p-V	R
Séries chronologiques															
DCmax	166	1976-77	0,001	19,35	18,82	2009-10	< 0,0001	24,57	10,17	2009-10	0,001	24,57	0,80	0,000	Ha
DCC	172	1976-77	0,000	17,24	13,22	1976-77	0,000	17,24	9,96	1976-77	0,000	17,24	1,35	0,038	Ha
DC1	178	1976-77	0,000	23,91	14,85	1976-77	0,000	23,91	10,55	1976-77	0,000	23,91	1,09	0,005	Ha
DC3	186	1976-77	< 0,0001	34,91	16,31	1976-77	0,000	34,91	11,06	1976-77	0,000	34,91	1,04	0,004	Ha
DC6	188	1976-77	< 0,0001	38,29	15,12	1976-77	0,000	38,29	10,65	1976-77	0,000	38,29	1,09	0,006	Ha
DC9	190	1976-77	< 0,0001	39,52	16,06	1976-77	< 0,0001	39,52	10,97	1976-77	< 0,0001	39,52	0,74	< 0,0001	Ha
DC11	188	1983-84	< 0,0001	42,6	15,36	1983-84	0,000	42,6	10,74	1983-84	< 0,0001	42,6	0,75	< 0,0001	Ha
DCE	173	1983-84	0,000	39,05	13,66	1983-84	0,001	39,05	10,12	1983-84	0,000	39,05	0,73	< 0,0001	Ha
DCmin	188	1983-84	< 0,0001	40,34	14,57	1983-84	0,000	40,34	10,45	1983-84	0,000	40,34	0,78	0,000	Ha

Légende : Ha (rupture) ; H0 (Homogène) ; p-V (p-value) ; R (résultat) ; C (Taux de Changement) ; K (Variable de Pettitt) ; T0 (Statistique) ; U (Statistique de Buishand) ; η (Coefficient de Von Neumann) ; t (Potentielle Période de Rupture).

Tableau 28 : Résultats des tests d'homogénéité (à un niveau significatif de 5%) sur les débits liquides mensuels de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

Tests	Pettitt's				SNH				Buishand				Von Neumann's		
	K	T	p-V	C (%)	T0	t	p-V	C (%)	Q	t	p-V	C (%)	η	p-V	R
Séries chronologiques															
Mars	172	1983-84	0,001	43,73	12,109	1983-84	0,007	43,73	9,53	1983-84	0,000	43,73	9,53	0,004	Ha
Avril	202	1976-77	< 0,0001	45,92	15,351	1976-77	< 0,0001	45,92	10,73	1976-77	< 0,0001	45,92	1,07	0,004	Ha
Mai	192	1983-84	< 0,0001	40,63	16,618	1983-84	0,000	40,63	11,16	1983-84	0,000	40,63	0,75	0,000	Ha
Juin	188	1976-77	< 0,0001	40,46	15,948	1976-77	0,000	40,46	10,94	1976-77	< 0,0001	40,46	1,20	0,013	Ha
Juillet	178	1976-77	0,000	50,37	14,795	1976-77	0,000	50,37	10,53	1976-77	< 0,0001	50,37	1,37	0,043	Ha
Août	158	1976-77	0,001	44,15	9,872	1976-77	0,091	44,15	8,60	1976-77	0,002	44,15	1,19	0,013	Ha
Septembre	142	1976-77	0,012	32,32	8,916	1976-77	0,018	32,32	8,18	1976-77	0,006	32,32	1,17	0,010	Ha
Octobre	138	1976-77	0,015	21,34	9,091	1976-77	0,015	21,34	8,26	1976-77	0,006	21,34	1,32	0,030	Ha
Novembre	102	1976-77	0,192	/	4,269	1976-77	0,342	/	5,66	1976-77	0,146	/	2,21	0,710	H0
Décembre	68	1976-77	0,930	/	1,759	1976-77	0,860	/	3,63	1976-77	0,612	/	5,76	0,430	H0
Janvier	76	1983-84	0,690	/	3,669	1983-84	0,442	/	5,25	1983-84	0,205	/	1,47	0,079	H0
Fevrier	158	1983-84	0,002	42,04	11,99	1983-84	0,003	42,04	9,48	1983-84	0,001	42,04	1,36	0,038	Ha

Légende : Ha (rupture) ; H0 (Homogène) ; p-V (p-value) ; R (résultat) ; C (Taux de Changement) ; K (Variable de Pettitt) ; T0 (Statistique) ; U (Statistique de Buishand) ; η (Coefficient de Von Neumann) ; t (Potentielle Période de Rupture).

IV.2. ANALYSE DE LA FLUCTUATION DES DEBITS DE LA MEFOU À NSIMALEN A DIFFERENTES ECHELLES TEMPORELLES

IV.2.1. Echelle journalière

Durant la période comprise entre 1964 et 2019 (sans prendre en compte les différentes années de lacunes), les débits journaliers et caractéristiques de la Mefou à Nsimalen varient de 1,08 m³/s (2,54 l/s/km²) à 29,05 m³/s (68,35 l/s/km²). On remarque que, les débits caractéristiques actuels sont tous supérieurs à ceux obtenus par Olivry (1986) qui proposent des valeurs comprises entre 0,610 m³/s (1,4 l/s/km²) et 21,2 m³/s (49,9 l/s/km²).

L'analyse de l'évolution des débits journaliers et de débits caractéristiques de la Mefou à Nsimalen montre des variations différentes d'une année à l'autre avec une tendance à la hausse (Figures 44 ; Tableau 27). L'application des tests d'homogénéités de Pettitt, SNH, Buishand et Von Neuman à la variable débit journalier et caractéristique indiquent qu'il existe des ruptures significatives pour les DCC, DC1, DC3, DC6 et DC9 en 1976-77 et, en 1983-84 pour les DC11, DCE et Dmin (Figure 44). Ces derniers présentent dans l'ensemble des taux d'augmentation compris entre +17,24% (3,2 m³/s) et 42,6% (1,73 m³/s). Seul le DCmax enregistre deux ruptures, soit une première en 1976-77 (4,42 m³/s) accompagnée d'une hausse de +19,35% et une seconde pour +24,57% (6,43 m³/s) d'augmentation en 2009-10 (Tableau 28). Ces résultats ne sont pas en conformité avec ceux des travaux effectués dans le Plateau Sud camerounais forestier qui enregistrent une baisse généralisée des débits caractéristiques sur le Nyong à Mbalmayo et à Olama, l'Ogooué à Lambaréné, le Ntem à Ngoazik, la Kienké à Kribi, la Lokoundjé à Lolodorf et la Kadey à Pana (Kouassy Kalédjé, 2021 ; Ebodé, 2022). Cette différence de comportement entre les bassins situés dans la même zone agroécologique pourrait s'expliquer par la pluviométrie et le degré d'urbanisation.

IV.2.2. Echelle mensuelle

Durant la période comprise entre 1964 et 2019, le débit moyen mensuel le plus faible est observé en février (3,85 m³/s pour 9,05 l/s/km²) et le plus élevé est enregistré en octobre (13,18 m³/s pour 31,02 l/s/km²) sur la Mefou à Nsimalen. Ces débits sont supérieurs à ceux présentés par Olivry (1986) sur la même station.

L'étude des débits mensuels pour cette période de référence montre dans l'ensemble des tendances à la hausse. Seuls les mois de décembre et janvier présentent des légères tendances à la baisse (Figures 45). L'application des tests d'homogénéités à cette série montre deux principales périodes de rupture que sont : sur l'année hydrologique 1976-77 pour les mois d'avril, juin, juillet, août, septembre et octobre et ; celle de 1983-84 pour ceux de mars, mai et février (Figure 45). Ces

multiples ruptures sont toutes accompagnées par des hausses d'écoulement comprises entre +21,4% (3,14 m³/s en octobre) et +50,37% (4,1 m³/s en juillet) (Tableau 28). Ces augmentations de débits mensuels sont en accord avec celles enregistrées sur la Lokoundjé à Lolodorf qui présentent une hausse d'environ +113% au mois d'Août (1963-64) (Ebodé, 2022). Ils sont différents de ceux présentés sur la plupart des cours d'eau situés en zone tropicale humide forestière comme le Ntem à Ngoazik, le Nyong à Mbalmayo et l'Ogooué à Lambaréné qui enregistrent des baisses comprises entre -16 et -39,7% (Liéno et *al.*, 2008).

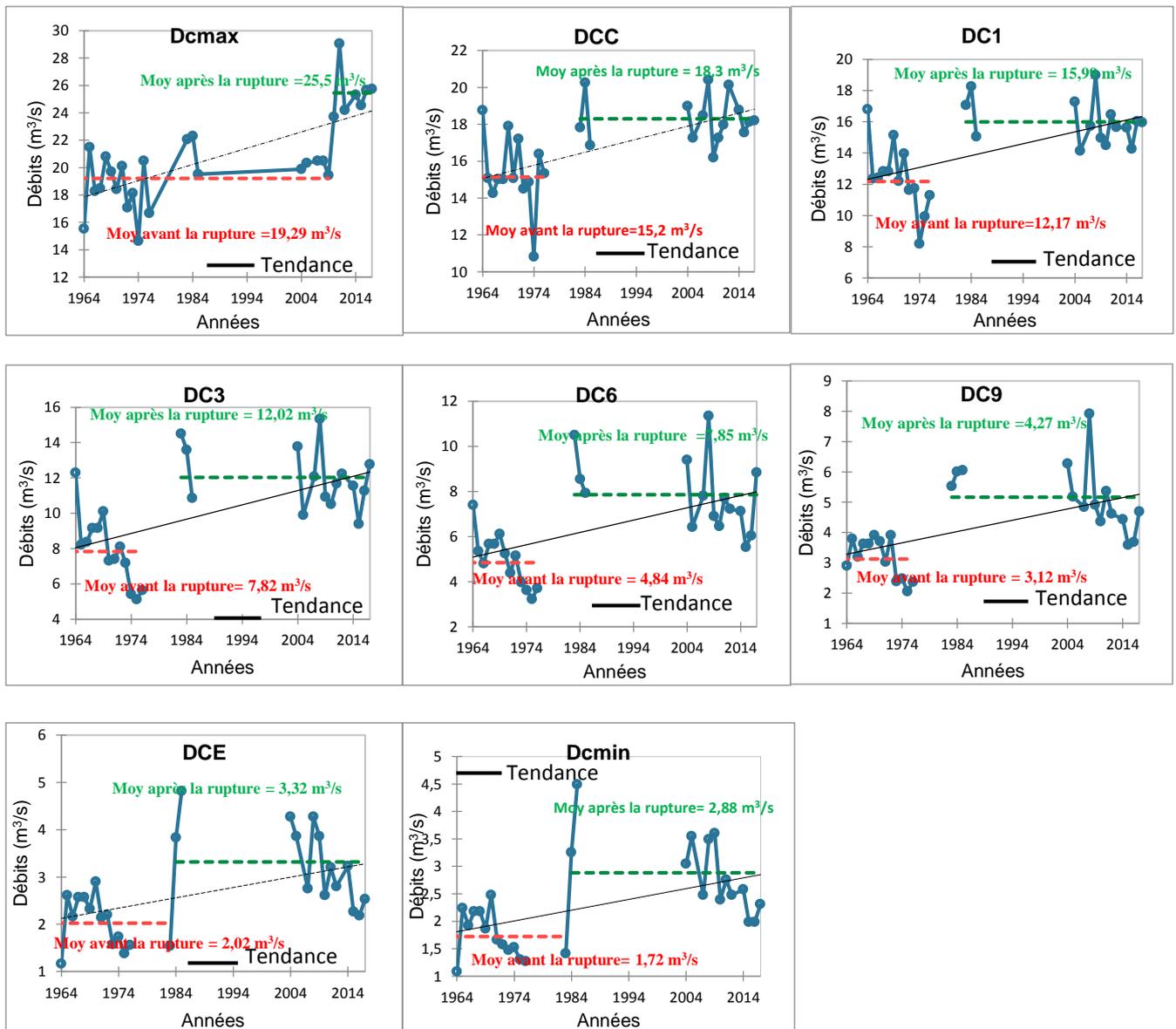


Figure 44 : Evolutions des débits caractéristiques et journaliers de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

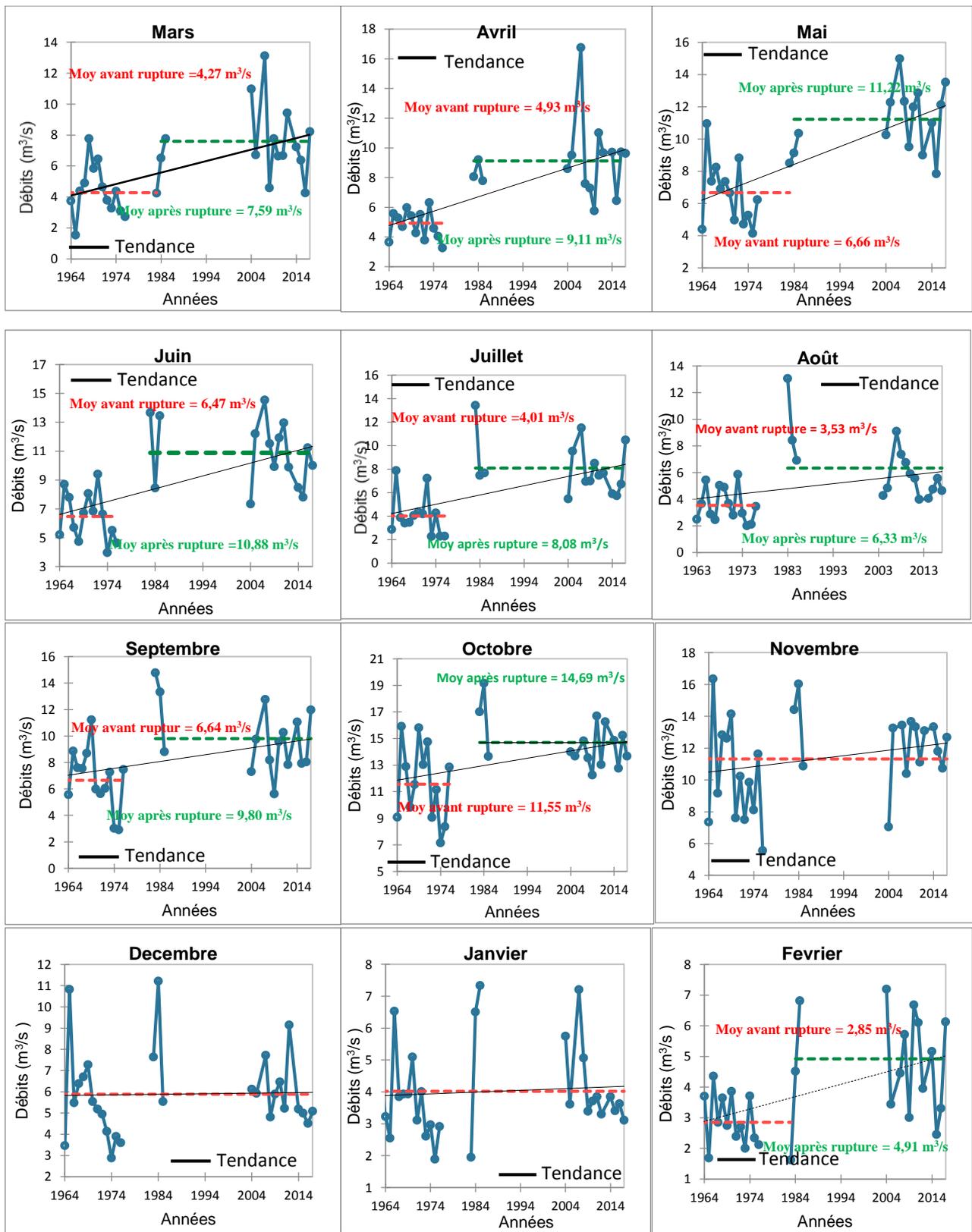


Figure 45 : Evolution des débits moyens mensuels de la Mefou à Nsimalen (1964 à 2019)

Tableau 29 : Tests d'homogénéités (à un niveau significatif de 5%) obtenus sur les débits liquides annuels et saisonniers de la Mefou à Nsimalen (1964-2019)

Tests	Pettitt's				SNH				Buishand			Von Neumann's			
	K	T	p-V	C (%)	T0	T	p-V	C (%)	Q	t	p-V	C (%)	η	p-V	R
Séries chronologiques															
PSP	210	1976-77	< 0,0001	57,83	19,49	1976-77	< 0,0001	57,83	12,09	1976-77	< 0,0001	57,83	0,62	< 0,0001	Ha
PSS	178	1976-77	0,00	50,37	14,79	1976-77	0,00	50,37	10,53	1976-77	< 0,0001	50,37	1,37	0,04	Ha
GSP	154	1976-77	0,00	26,71	10,88	1976-77	0,00	26,71	9,03	1976-77	0,00	26,71	1,21	0,01	Ha
GSS	132	1983-84	0,02	24,29	8,48	1983-84	0,03	24,29	7,98	1983-84	0,01	24,29	1,02	0,00	Ha
Annuels	200	1976-77	< 0,0001	33,25	17,91	1976-77	< 0,0001	33,25	11,59	1976-77	< 0,0001	33,25	0,79	0,00	Ha

Légende : PSP (Petite Saison Pluvieuse) ; PSS (Petite Saison Sèche) ; GSP (Grande Saison Pluvieuse) ; (Grande Saison Sèche) ; Ha (rupture) ; p-V (p-value) ; R (résultat) ; C (Taux de Changement) ; K (Variable de Pettitt) ; T0 (Statistique) ; U (Statistique de Buishand) ; η (Coefficient de Von Neumann) ; t (Potentielle Période de Rupture).

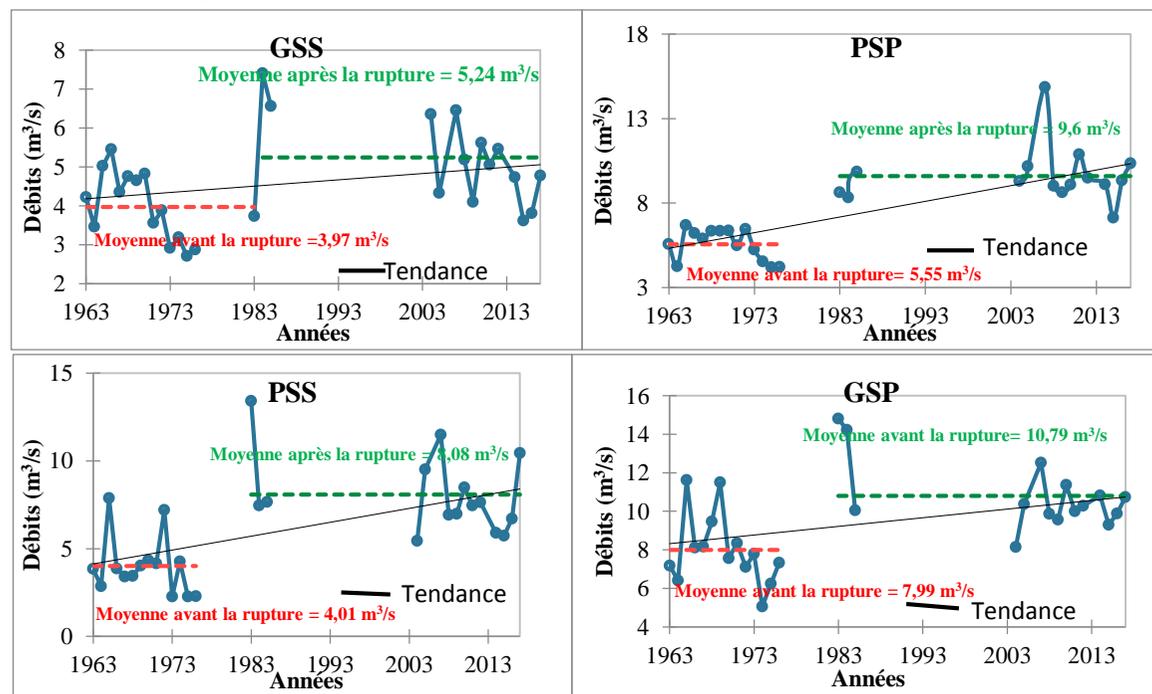


Figure 46 : Fluctuations des débits moyens saisonniers de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

IV.2.3. Echelle saisonnière

On observe que les débits moyens saisonniers de la Mefou à Nsimalen durant la période comprise entre 1964 et 2019 présente un minimum de $4,59 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $10,79 \text{ l/s/km}^2$ observés en grande saison sèche et un maximum de $9,44 \text{ m}^3/\text{s}$ ($22,21 \text{ l/s/km}^2$) enregistré en grande saison pluvieuse. On remarque qu'au courant d'une année hydrologique, les débits moyens saisonniers présentent une allure en dos de chameau caractéristique du régime équatorial de transition. Ce constat est semblable à celui présenté par Olivry (1986) sur la même station même si les débits actuels sont un peu plus élevés que ceux précédemment obtenus. Ces résultats sont également conformes ceux présentés par Bineli Ambomo (2009) sur le Nyong à Olama.

L'étude des débits saisonniers de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019 montre dans l'ensemble des tendances à la hausse (Figure 46). L'application des tests d'homogénéités à ces variables laissent observer des ruptures au cours de la petite saison pluvieuse durant l'année hydrologique 1976-1977, la petite saison sèche (1976-77), la grande saison pluvieuse (1976-77) et la grande saison sèche (1983-84) (Figure 46). Ces différentes ruptures sont caractérisées des hausses des débits saisonniers de l'ordre de $+57,83\%$ ($4,05 \text{ m}^3/\text{s}$), $+50,37\%$ ($4,1 \text{ m}^3/\text{s}$), $+26,71\%$ ($2,8 \text{ m}^3/\text{s}$) et $+24,29\%$ ($1,25 \text{ m}^3/\text{s}$) respectivement (Tableau 29). Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux présentés sur un grand nombre de travaux effectués sur les rivières du sud Cameroun. Ceux de Liéno et *al.* (2008) portant sur le Nyong à Mbalmayo, le Ntem à Ngoazik et la Kienké à Kribi montrent une augmentation des débits durant la GSP et une baisse en PSP pour la période comprise entre 1950 et 1990. Les plus récentes études effectuées dans cette zone montrent une légère diminution généralisée sur une période d'observation qui intègre les données des deux dernières décennies (Ebodé et *al.*, 2020). Les ruptures mises en évidence dans cette étude sont différentes de celles présentées par Dzana et *al.* (2011) et Kpoumié et *al.* (2012 ; 2022) sur la Sanaga. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus en Afrique de l'ouest (Di-Baldassare et *al.*, 2010 ; Mounirou et *al.*, 2012). Cette liste peut être complétée par les travaux d'Ardoin Bardin (2004) sur les bassins versants du Sénégal, de la Gambie et du Chari, qui présentent dans la majeure partie de leurs stations des dates de rupture en 1975 et 1978.

IV.2.4. Echelle annuelle

La distribution statistique des débits moyens annuels de la Mefou à Nsimalen (32 ans, 1964 à 2019) montre qu'ils fluctuent entre $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$ ($10,22 \text{ l/s/km}^2$) et $13,64 \text{ m}^3/\text{s}$ ($32,09 \text{ l/s/km}^2$) pour un module moyen interannuel de $7,56 \pm 1,92 \text{ m}^3/\text{s}$ ($17,80 \text{ l/s/km}^2$). Ce module moyen a connu une augmentation de 25% par rapport à celui proposé par Olivry (1986) ($6,08 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $14,4 \text{ l/s/km}^2$) sur la même station. Ceci traduit la hausse généralisée de ces derniers durant la période actuelle. Ce résultat n'est pas en conformité avec ceux présentés par certaines études sur les cours d'eau situés en zone tropicale humique forestière comme le Nyong à Mbalmayo, à Ayos et à Olama, le So'o à pont

So'o (Kohoum Nfockgo, 2005 ; Sighomnou et *al.*, 2007), la Kadey à Batouri et à Pana (Sigha Nkamdjou, 1994 ; Kouassy Kaledje, 2021), la Kienké à Kribi, le Ntem à Ngoazik et à Nyabessan, l'Ongououé à Lambaréné (Liéno et *al.*, 2008) et le Congo à Brazzaville, l'Oubangui à Bangui et la Sangha à Ouesso (Laraque et *al.*, 2013) qui enregistrent des déficits compris entre -25 et -5 % dans des environnements très peu anthropisés. Ces baisses de débits peuvent être attribuées à la baisse généralisée des précipitations connue par la zone depuis les années 1960.

L'analyse de l'évolution des débits moyens annuels durant la période de référence montre une alternance d'années humides et d'années sèches avec une tendance à la hausse (Figure 47). L'analyse des variations des indices des débits interannuels (Figure 48) montre deux principales périodes climatiques :

- 1964 à 1977 : période relativement sèche marquée par la présence de deux années humides (1966 et 1970) ;
- 1984 à 2019 : période très humide avec néanmoins une année sèche (2016).

L'application des tests d'homogénéités de Pettitt, SNHT, Buishand et Von Neumann à cette variable révèle l'existence d'une rupture significative durant l'année hydrologique 1976-77 montrant une tendance à la hausse d'environ 33% (Figure 47 ; Tableau 29). Cette augmentation des débits se trouve dans la gamme des hausses des débits comprises entre + 25,51 et + 39,65 % que propose Sighomnou (2004) et Kpoumié et *al.* (2022) pour certains cours d'eau du bassin des fleuves côtiers (Lokoundjé à Lolodorf et Munaya à Akwem) et le bassin de la Sanaga (Mapé à Magba, Sanaga s.s. à Goyoum et Mbam à Goura). Ce résultat est par contre moins accentué par rapport aux augmentations de débits de l'ordre de 108% qu'ont connues certains cours d'eau de la zone sahélienne, c'est le cas des 27 stations du bassin versant amont de la Volta Blanche au Burkina Faso qui ont connues des augmentations de débits en dépit des baisses des pluies et la multiplication des barrages (Mahé et Paturel, 2009 ; Mounirou et *al.*, 2012 ; Descroix et *al.*, 2013).

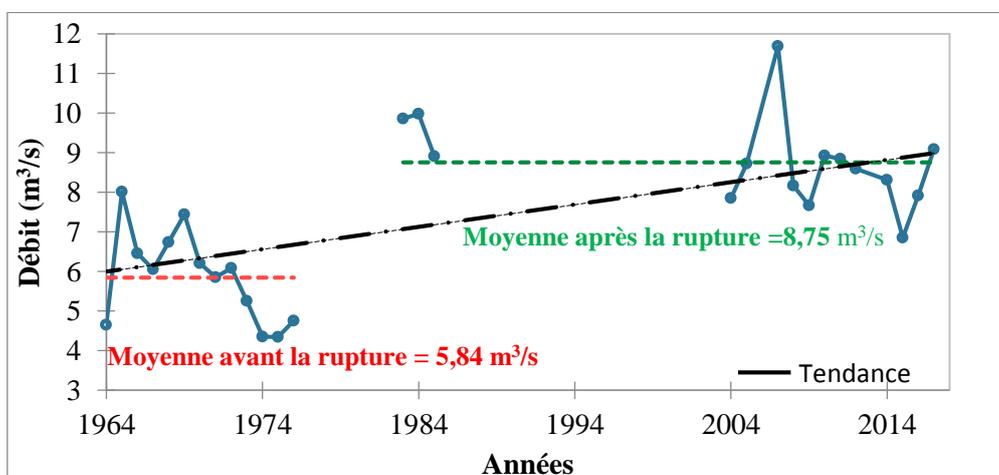


Figure 47 : Evolution des débits annuels de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

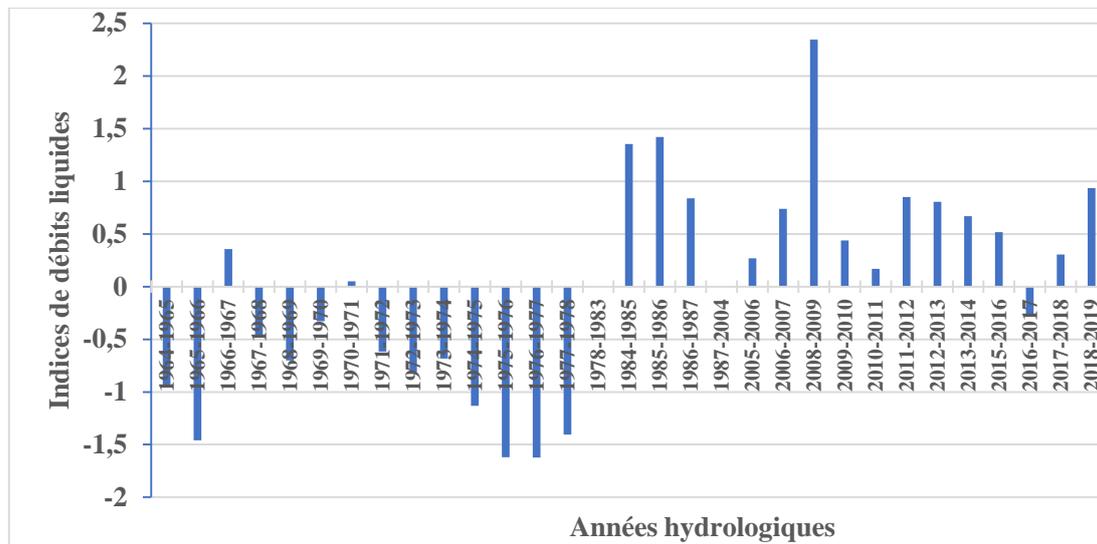


Figure 48 : Variations des indices de débits interannuels de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

IV.3. RELATIONS PLUIES-DÉBITS DANS LE BVAM

IV.3.1. Pluies journalières-débits journaliers

L'analyse comparée des relations pluie/débit à l'échelle journalière (Annexe 2) montre que les pics des débits journaliers observés correspondent dans l'ensemble aux événements pluvieux. De même, on constate qu'après un événement pluvieux (quelle que soit la période sèche ou humide de l'année), l'hydrogramme de crue montre généralement une réponse quasi instantanée des débits face aux pluies, ce qui montre que le temps de concentration est assez rapide. Ceci serait lié à la morphologie de la zone d'étude qui présente des pentes fortes représentatives du plateau sud Camerounais, mais aussi les activités anthropiques qui imperméabilisent les sols. Toutefois, les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par Nteuga Njike (2012), Koé Miabe (2013), Ngoundoum Fomouo (2012), Nguemou Tchado (2008), Kouassy Kalédjé et *al.* (2019) respectivement dans les bassins de Nkié à Nvan, d'Olézoa à trois statut, d'Odza à Tropicana, du Mfounfi à Cami-Toyota de la Kadey à Batouri.

IV.3.2. Pluies mensuelles-débits mensuels

Les fluctuations de débits moyens mensuels suivent dans l'ensemble celles des pluies mensuelles (Figure 49). Ceci se justifie par l'existence des corrélations (0,73 en moyenne) très significatives entre ces variables hydro-pluviométriques à l'échelle mensuelle (Figure 50). La configuration générale des courbes obtenues présente deux pics (forme bimodale) qui correspondent aux deux périodes humides confirmant le régime équatorial (Liéno et *al.*, 2008). Les maxima des débits observés en mai et en octobre sont proportionnels aux maxima des précipitations observées. On relève néanmoins un décalage d'environ un mois entre la reprise des pluies du mois d'août et celle

des débits moyens mensuels qui ne se fait ressentir qu'en septembre. Ce phénomène est probablement dû à la recharge de la nappe de subsurface (nappe libre) et aussi au temps qu'il faut à l'eau de pluie provenant de l'ensemble des affluents inférieurs de la Mefou pour arriver dans la station d'étude (Yira et al., 2017).

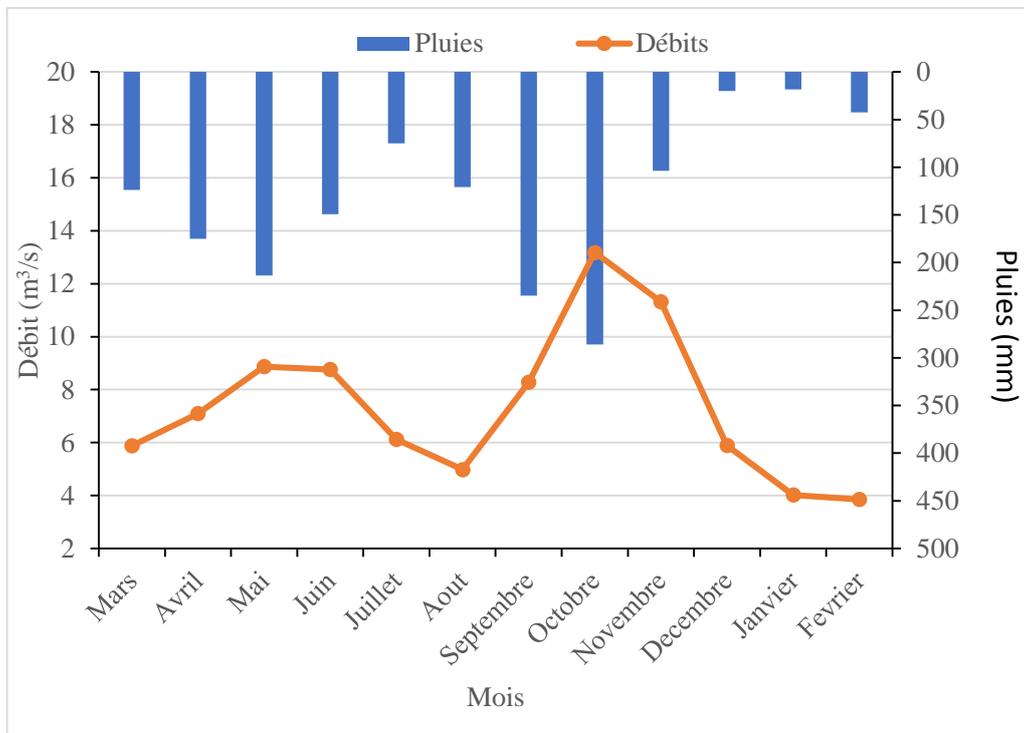


Figure 49 : Relations pluies mensuelles - débits mensuels

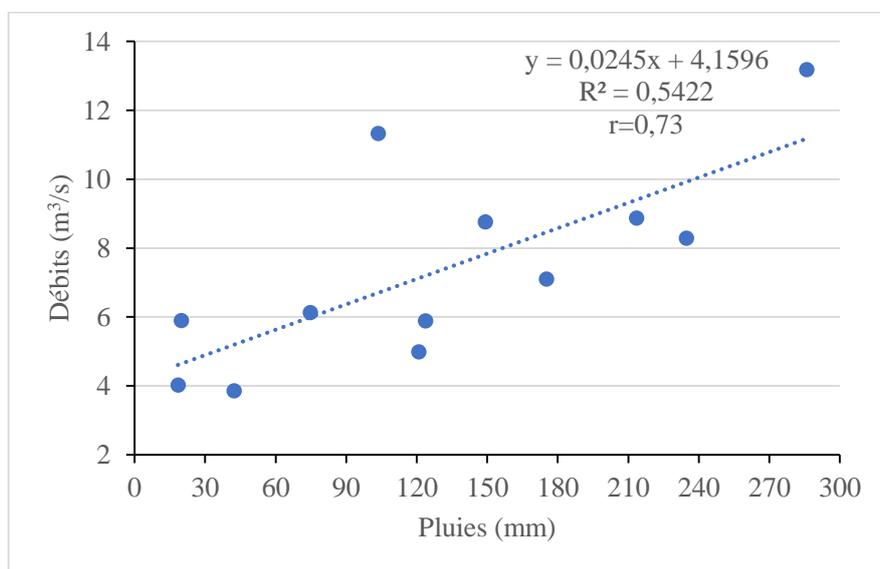


Figure 50 : Corrélations pluies mensuelles - débits mensuels

Bien que l'ensemble des pluies mensuelles ne présente aucun changement à l'exception de celui du mois de février qui montre une baisse (-49,63%), les débits correspondants présentent plutôt des hausses (+21,4 et +50,37%). Ceci peut être dû : aux changements opérés sur l'occupation du sol

dans la zone ; à l'état d'humidité (saturation en eau) du sol ; à la forte contribution des eaux souterraines dans l'alimentation des cours d'eau en périodes sèches et à la présence des zones marécageuses. Tous ces facteurs contribuent à une augmentation du coefficient de ruissellement sur le bassin. Les mêmes constats ont été effectués par Nguemou Tchado (2008), Ngoumdoum Fomouou (2012) et Nteuga Njike (2012) dans les bassins versants respectifs du Mfoundi, d'Odza et du Nkié où ils obtiennent respectivement des coefficients d'écoulement de 72%, 88% et 112% traduisant ainsi l'apport important des eaux souterraines dans l'écoulement de surface. Des résultats similaires à ces derniers ont également été obtenus en Afrique de l'Ouest (Descroix *et al.*, 2009 ; Amogu *et al.*, 2010).

IV.3.3. Pluies annuelles-débits annuels

Les relations entre les débits moyens annuels de la Mefou à Nsimalen et les pluies des années hydrologiques correspondantes sont illustrées par les figures 51 et 52. On enregistre un coefficient de corrélation très faible ($r < 0,70$), ce qui laisse croire que les relations entre les pluies annuelles et débits annuels ne sont pas très significatives. En effet, un simple examen de ce coefficient de corrélations montre qu'il n'y aurait pas de rapport étroit entre les débits moyens annuels et les pluies annuelles. Ceci peut probablement s'expliquer par la répartition des pluies à l'échelle du bassin versant (évapotranspiration, infiltration et ruissellement) et au cours de l'année qui varie considérablement d'une année à l'autre et suscitant au niveau des débits des réactions différentes (Kouassy Kalédjé *et al.*, 2016 ; Kpoumié *et al.*, 2022). Il est également probable que la faible densité du réseau pluviométrique ne donne pas toujours une image très exacte des précipitations reçues par le bassin (Soro *et al.*, 2013 ; Kpoumié, 2015).

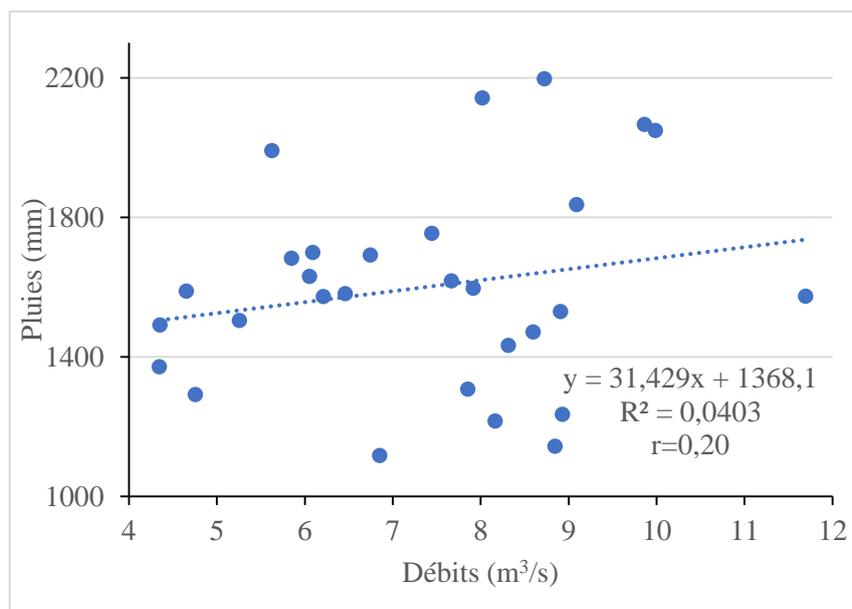


Figure 51 : Corrélations pluies annuelles-débits annuels

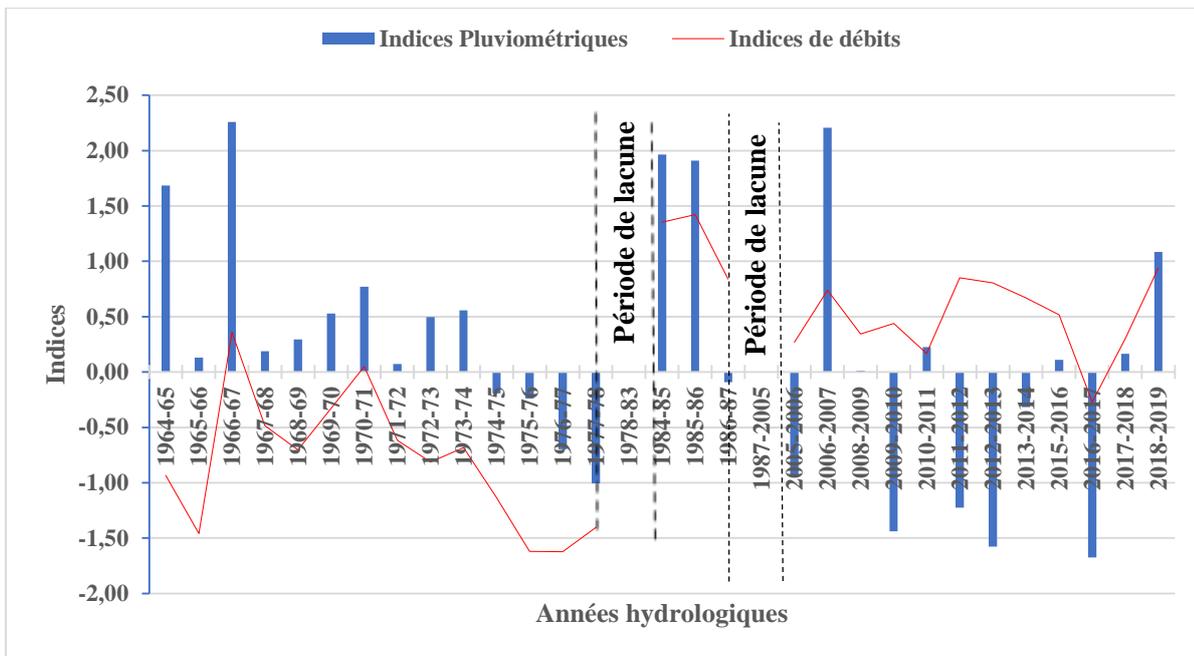


Figure 52 : Relation entre indices pluviométriques et indices de débits interannuels

L'augmentation des débits annuels (+33%) en dépit des pluies qui n'ont présenté aucun changement significatif durant la période d'étude peut s'expliquer par les changements intervenus sur l'état de l'occupation du sol dans la zone d'étude. A ceci, s'ajoute plusieurs autres paramètres tels que les activités humaines comme la dégradation du couvert végétal et du sol, l'urbanisation accélérée et anarchique, et les rejets de diverses natures. Toutes ces actions limitent l'infiltration de l'eau dans le sol au profit du ruissellement avec pour corollaire les phénomènes d'inondation. Ce constat corrobore avec les résultats obtenus dans la zone sahélienne par Mahé et *al.* (2010).

IV.3.4. Analyse des hydrogrammes annuels et estimation des écoulements

IV.3.4.1. Etude des étiages et des volumes d'eau emmagasinés par l'aquifère

L'étiage se définit comme la période d'absence totale de pluies dans un bassin versant et le tarissement comme l'écoulement en période d'étiage. Sur le BVAM à Nsimalen, la grande saison sèche est reconnue comme la principale période d'étiage (Olivry, 1986). Durant cette période les débits observés correspondent à des débits de vidange des nappes auxquels s'ajoutent les rejets industriels et humains. Pendant la période comprise entre 1964 et 2019 (32 années hydrologiques, sans prendre en compte les différentes lacunes), la durée des étiages varie entre 40 jours obtenue durant l'année hydrologique 2011-12 à 130 jours (1965-66) pour une moyenne de 79 jours. Les coefficients de tarissement de la Mefou à Nsimalen varient quant à eux de 0,011 obtenu durant l'année hydrologique 1968-69 à 0,046 (2011-12) pour une moyenne interannuelle de 0,028 et une médiane

de 0,030. Les volumes d'eau moyen mobilisés par l'aquifère du BVAM à Nsimalen varient de 43,99 m³ (1975-76) à 209,18 m³ (2005-06) pour une moyenne de 103,74 m³ et une médiane de 81 m³.

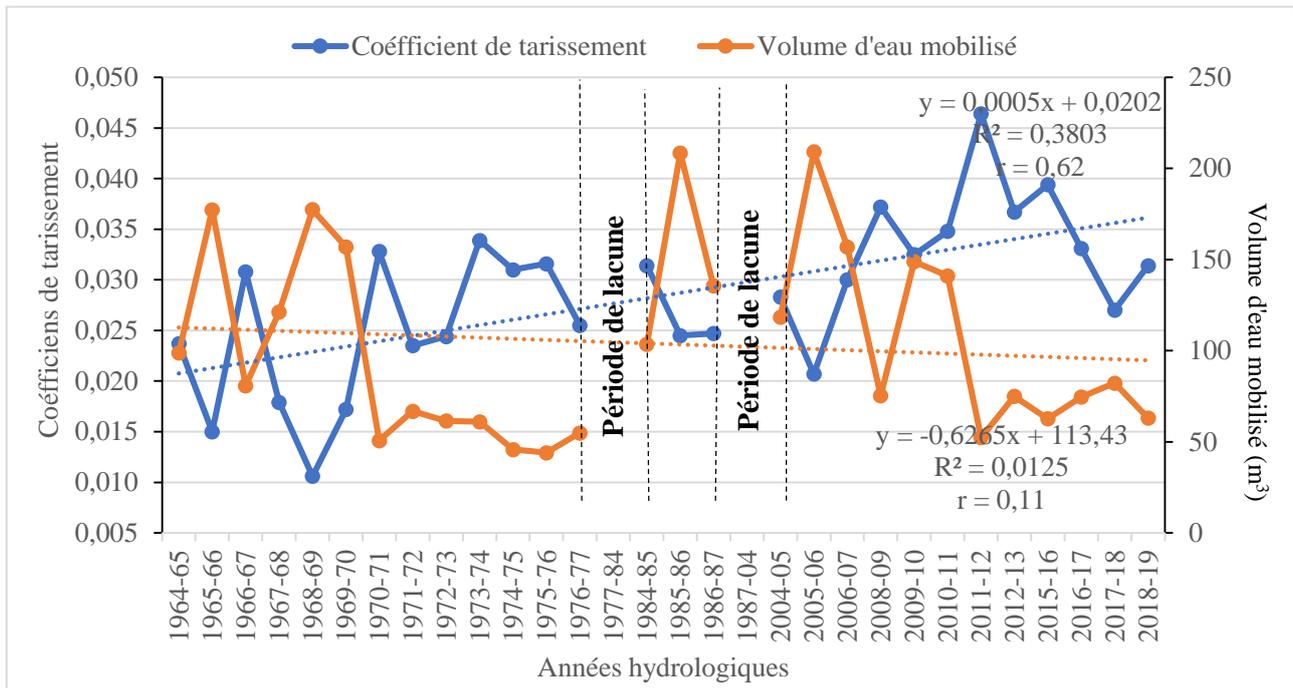


Figure 53 : Evolution interannuelle du coefficient de tarissement de la Mefou à Nsimalen et du volume d'eau mobilisé par l'aquifère du BVAM entre 1964 et 2019

Le coefficient de tarissement a augmenté au cours de la période d'observation (1964 à 2019) avec une évolution annuelle en dents de scie, caractéristique de la courbe d'évolution des débits moyens annuels (Figure 53). Cette augmentation peut être attribuée à la forte imperméabilisation du BVAM qui ralentit la recharge de la nappe et favorise la diminution des volumes d'eau souterraine. Les coefficients obtenus dans la présente étude sont plus élevés que ceux établis par Olivry (1986) (0,0157) et Apouamoun (2006) (0,0169) dans ladite zone. Ces résultats sont du même ordre que ceux mises en évidence sur certains cours d'eau du Plateau Sud camerounais par Olivry (1986) sur le Ntem à Ngoazik ($\alpha = 0,025$ pour la petite saison sèche et $\alpha = 0,035$ pour la grande saison sèche), par Kouassy Kalédjé (2021) sur la Kadey à Batouri ($\alpha = 0,042$), par Ndemtsoa (2009) sur le So'ò à pont So'ò ($\alpha = 0,035$). Ces valeurs sont supérieures à ceux obtenus par Olivry (1986) sur le Nyong ($\alpha = 0,023$ à Kaya, $\alpha = 0,024$ à Mbalmayo, $\alpha = 0,026$ à Ayos) et Nguemou Tchado (2008) sur le Mfoundi à Cami ($\alpha = 0,007$).

IV.3.4.2. Etude des hautes eaux

Les périodes de crues dans le BVAM correspondent aux saisons de fortes pluies. Il s'agit des périodes de l'année où le débit du cours d'eau résulte simultanément des écoulements rapides de crues

(écoulements de surface et de subsurface ou hypodermique) et des écoulements souterrains. Les hydrogrammes annuels de l'annexe 3 montrent deux périodes de hautes eaux par an qui se différencient d'une année hydrologique à l'autre. Ainsi, en se basant sur les saisons d'occurrence des pics de débits journaliers observés sur la Mefou à Nsimalen, ces hydrogrammes annuels peuvent être regroupés en trois grandes périodes :

- la première période allant de 1964 jusqu'à 1977. Ici les hydrogrammes de crues présentent les pics les plus importants en GSP par rapport à la PSP. Il s'agit par exemple des crues maximales observées le 05 novembre 1964 avec un débit de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ et ceux du 14 novembre 1966, du 07 octobre 1970, du 11 octobre 1972 et 05 novembre 1976 pour des débits d'environ $20 \text{ m}^3/\text{s}$;
- la deuxième période qui prend en compte les hydrogrammes présentant des pics semblables bien en GSP qu'en PSP. Elle est considérée ici comme une période de transition (1984/86, 1985/86 et 1986/87) entre les pics enregistrés en GSP et la PSP ;
- la troisième période (2006-2019) qui présente des hydrogrammes montrant les pics les plus élevés en PSP intercalés par des séquences sèches. C'est le cas des crues du 29 mai 2010, 30 mai 2011, 20 juin 2016 et 07 avril 2017 ayant enregistré les débits respectifs de $24 \text{ m}^3/\text{s}$, $29,05 \text{ m}^3/\text{s}$, $24,55 \text{ m}^3/\text{s}$ et $25,66 \text{ m}^3/\text{s}$.

On peut remarquer que, la succession des pics de crues enregistrés en GSP se font de manière continue et rapprochée dans le temps. Toutefois, quelques pics de crues sont observés en saison sèche. L'existence de ces derniers montre l'extrême réactivité de la Mefou et ses affluents suite à un événement pluvieux. Ce qui se justifie par la hausse des débits maxima journaliers et des débits caractéristiques de crues durant la période actuelle.

La confrontation entre les pics de crues et les dates d'occurrences d'inondation dans la zone d'étude montre qu'au courant de l'année hydrologique 2018-2019, l'hydrogramme de crue présente une succession de pics très importants, précisément au mois septembre 2018 (Figure 54). Il s'agit des crues du 19 avec un débit de $15,76 \text{ m}^3/\text{s}$, du 20 septembre ($16,43 \text{ m}^3/\text{s}$), du 23 ($23,46 \text{ m}^3/\text{s}$), du 24 ($17,91 \text{ m}^3/\text{s}$). La crue maximale pour cette période a été observée le 23 septembre avec un débit de $23,46 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette succession de crues rapprochées dans le temps et combinée à d'autres facteurs tels que les rejets domestiques, l'état de saturation du sol, le couvert végétal dégradé au profit de l'urbanisation galopante et l'agriculture qui imperméabilisent les sols, l'intensité et le type de pluie sont à l'origine des inondations qui ont affecté plusieurs quartiers de la cité capitale (Figure 55).

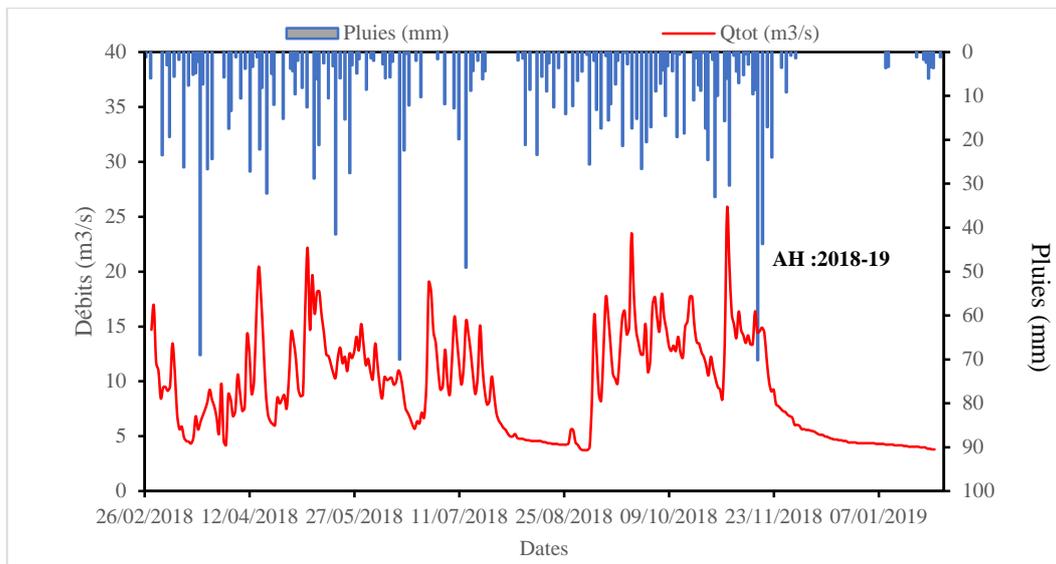


Figure 54 : Hydrogramme de crue de la Mefou à Nsimalen (mars 2018 - janvier 2019)

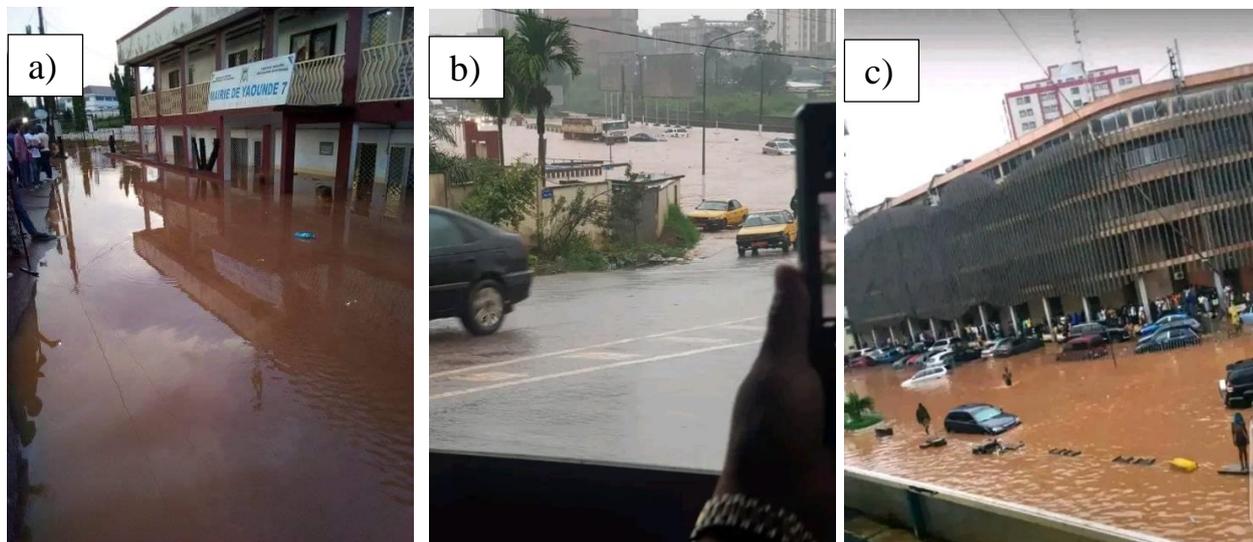


Figure 55 : Inondation du 23 septembre 2018 : a) à la mairie de Yaoundé 7 (Nkolbisson) ; b) à la Voirie municipale ; c) à l'Avenue Kennedy (Cliché Nsangou, 2018)

IV.3.4.3. Estimation des écoulements

Les différentes composantes des écoulements mises en évidence dans cette étude sont l'écoulement de base et l'écoulement rapide de crues. L'estimation de l'écoulement de base a été réalisée à partir de l'algorithme de séparation des débits de Boughton (1993).

Les différents types d'écoulements obtenus aux échelles de temps journaliers, mensuels, saisonniers et annuels sont présentés par les figures 56 et 57, le tableau 30 et l'annexe 4. Durant la période de référence (1964 et 2019, sans prendre en compte les années hydrologiques manquantes), les valeurs des indices de débit de base (BFI) obtenues sur la Mefou à Nsimalen varient entre 0,69 et

0,83 pour une moyenne de 0,72 (Annexe 4). L'examen de ces BFI et des différents hydrogrammes annuels de l'annexe 3 montrent que les séparations du débit de base sont réalistes, avec des apports souterrains importants caractéristiques des régions tropicales (Olivry, 1986).

La lame d'eau d'écoulement de base (Le0) journalière varie entre 0,19 mm (2,54 l/s/km²) et 2,94 mm (34 l/s/km²) (Annexe 3). La lame d'eau d'écoulement rapide de crues (Ker) oscille quant à elle entre 00 mm enregistré en période d'étiages et 4,02 mm soit un débit spécifique (Qs) de 46 l/s/km².

En ce qui concerne la Le0 moyenne mensuelle, elle varie entre 16,95 mm (6,77 l/s/km²) observée en février durant la GSS et 57,47 mm (22,16 l/s/km²) obtenue en novembre (GSP) (Figure 56). La Ler varie de 4,42 mm (1,64 l/s/km²) en janvier (GSS) à 27,22 mm (10,16 l/s/km²) en octobre (GSP) (Tableau 30).

Tableau 30 : Valeurs numériques moyennes des différents types d'écoulements mensuels dans le BVAM à Nsimalen (période : 1964 à 2019)

	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Janv.	Fév.
Pluies (mm)	123,7	175,12	213,12	149,18	74,76	120,82	234,65	285,87	103,64	19,85	18,45	42,29
Q (m³/s)	6,01	7,38	9,18	9,07	6,33	5,13	8,53	13,31	11,71	6,25	4,05	3,80
Ke (mm)	37,85	45,03	57,85	57,16	39,92	31,29	52,04	83,89	71,44	39,42	25,55	22,39
Le (%)	30,59	25,71	27,14	38,32	53,40	25,90	22,18	29,34	68,93	198,59	138,49	52,94
Q0 (m³/s)	3,92	5,11	6,35	6,86	5,42	3,83	5,44	8,99	9,42	5,48	3,35	2,88
Le0 (mm)	24,73	31,18	39,99	43,25	34,18	23,33	33,18	56,67	57,47	34,53	21,13	16,95
Ke0 (%)	19,99	17,81	18,76	28,99	45,73	19,31	14,14	19,82	55,45	173,95	114,55	40,09
Qr (m³/s)	2,08	2,27	2,83	2,21	0,91	1,31	3,09	4,32	2,29	0,78	0,70	0,92
Ler (mm)	13,12	13,84	17,86	13,92	5,73	7,97	18,86	27,22	13,97	4,89	4,42	5,43
Ker (%)	10,60	7,90	8,38	9,33	7,67	6,59	8,04	9,52	13,47	24,64	23,94	12,85

Légende : Qtot (Débit total) ; Letot (Lame d'eau d'écoulement total) ; ke (Coefficient d'Écoulement Total) ; Q0(Débit de base) ; Le0(Lame d'eau d'écoulement de base) ; Ke0 (Coefficient d'Écoulement de base) ; Qr (Débit d'écoulement direct) ; Ler (Lame d'eau d'écoulement rapide de crue) ; Ker (Coefficient d'écoulement rapide de crue).

A l'échelle annuelle, la Le0 moyenne varie entre 218,73 mm (6,94 l/s/km²) et 632,73 mm (20,1 l/s/km²) pour une moyenne interannuelle de 403,87 mm (12,8 l/s/km²) correspondant à un coefficient d'écoulement de base (Ke0) de 25,84% (Figure 57 ; Annexe 4). La Ler quant à elle oscille entre 89,62 mm (2,84 l/s/km²) et 230,91 mm (7,32 l/s/km²) pour une moyenne interannuelle de 152,96 mm (4,85 l/s/km²) soit un coefficient d'écoulement rapide de crues (Ker) moyen interannuel de 9,84%. Ces différentes contributions confirment la forte influence des eaux souterraines dans la réponse hydrologique dans le BVAM.

L'analyse de l'évolution dans le temps des différents types d'écoulement montre que le comportement des écoulements de base et des écoulements rapides de crues est semblable à celui des débits totaux de la Mefou à Nsimalen à différents pas de temps. Ces résultats sont similaires à ceux présentés par Jourdan (2019) dans la même zone d'étude qui montrent une forte influence des écoulements de base sur l'hydraulicité de la zone (BFI = 0,69). De même, ce constat est semblable à celui observé sur plusieurs cours d'eau du Plateau Sud camerounais forestier par Ebodé (2022). Il s'agit du Ntem à Ngoazik, la Kienké à Kribi et le Nyong à Mbalmayo. Cette forte influence de l'écoulement de base sur l'écoulement totale à l'exutoire est également démontrée par Yang et *al.* (2021) sur la rivière Tao'er dans le Nord-est de la Chine.

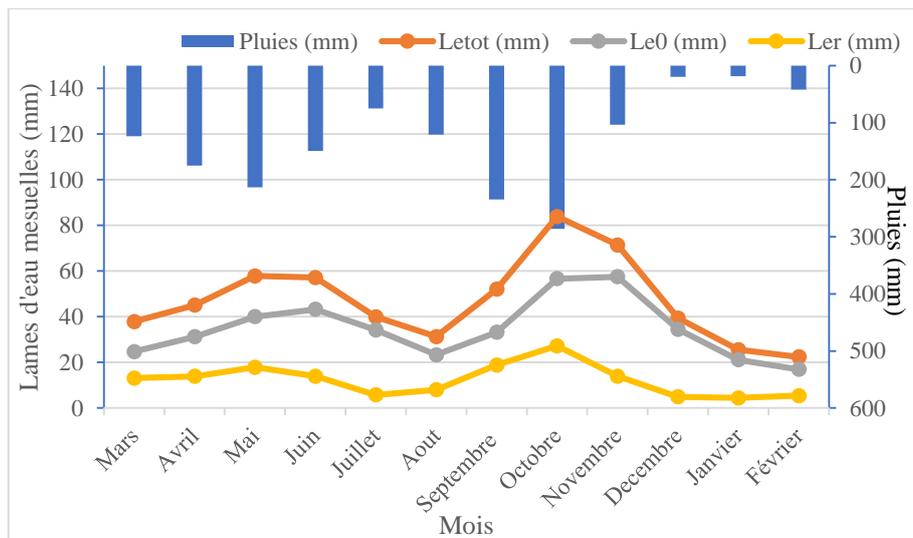


Figure 56 : Evolution mensuelles des différents types d'écoulements dans le BVAM à Nsimalen de 1964 à 2019

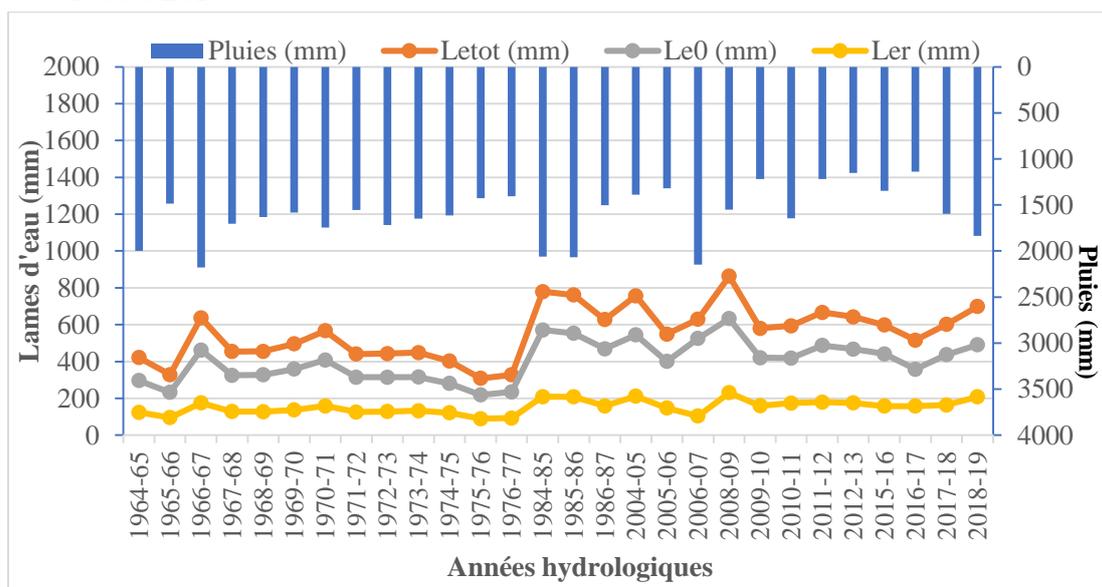


Figure 57 : Evolution des différents types d'écoulement par année dans le BVAM à Nsimalen de la période allant de 1964 à 2019

IV.4. RELATION ENTRE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL ET LES ÉCOULEMENTS

Les multiples changements intervenus sur l'occupation du sol du BVAM à Nsimalen semblent avoir des liens plus ou moins importants sur l'augmentation des écoulements à l'exutoire de la Mefou à Nsimalen, ceci au regard des hauteurs de pluies qui n'ont présenté aucun changement significatif durant la période d'étude. Mais aussi, face à l'implantation du barrage de retenue sur la Mefou à Nkolbisson en 1970 qui était supposé faire baisser les écoulements de la Mefou à Nsimalen.

En confrontant les résultats de l'évolution des types d'OS des années 1988, 2000 et 2020, on note une augmentation des surfaces ruisselantes comme les zones bâties (+678,45 %), les zones agricoles et sols nus (+308,26%) et à l'inverse une diminution des forêts primaires (-59,68%), des forêts secondaires (-25,33%) et des zones marécageuses (-90,42%) due aux activités anthropiques (urbanisation anarchique, déforestations, agriculture, ...). Cette augmentation des surfaces ruisselantes est plus accentuée vers le sud de la zone d'étude, ceci à cause du relief moins accidenté et propice aux constructions. De telles modifications limitent l'infiltration et la percolation des eaux au bénéfice des écoulements rapides de crues avec pour conséquence les phénomènes d'inondation dans la zone. Cet aspect se justifie par l'augmentation des coefficients d'écoulement de la Mefou à Nsimalen depuis la fin de la décennie 1970-1980 (Figure 58 et Annexe 3).

Des années 1980 jusqu'à la période actuelle (2020) les surfaces ruisselantes du BVAM à Nsimalen sont passées d'environ 10% à 50% avec le passage des coefficients d'écoulement (K_e) de 25% (Olivry, 1986) à des K_e actuels pouvant atteindre 40% voire 55% en fonction des années d'observation. Ceci est d'autant plus vrai lorsqu'on se projette sur le Mfoundi, principal affluent et de la Mefou qui draine la partie urbanisée du BVAM. Les travaux d'Ikounga (1978) sur l'amont du Mfoundi (24 km²) enregistrent en moyenne un K_e de 25% entre 1974 et 1977 et les récents travaux de Nguemou Tchado (2008) sur le Mfoundi à Cami Toyota (45 km²) montrent un K_e d'environ 78%. Cette augmentation des écoulements du Mfoundi avec le temps peut être liée à la diminution du couvert végétal au profit des surfaces ruisselantes connues par ce dernier. Ces K_e sont encore plus élevés pour certaines études effectuées à l'échelle des sous bassins du Mfoundi. Il s'agit entre autres des travaux de Nteuga Njike (2012) dans le bassin de Nkie à Mvan (3,75 km²) qui présente un K_e de 112% et celui de Ngoumdoum Foumouo (2012) sur le bassin d'Odza à Tropicana (2,53 km²) pour un K_e de 88%. Ces différents résultats confirment l'assertion selon laquelle l'augmentation des espaces imperméabilisés dans les bassins de certains cours d'eau serait à l'origine d'une hausse des écoulements (Li et al., 2007 ; Mahé et al., 2013). Ces résultats sont également en accord avec plusieurs études effectuées en Afrique centrale (Ebodé et al., 2022) et de l'ouest (Soro et al., 2013 ; Adja et al., 2019).

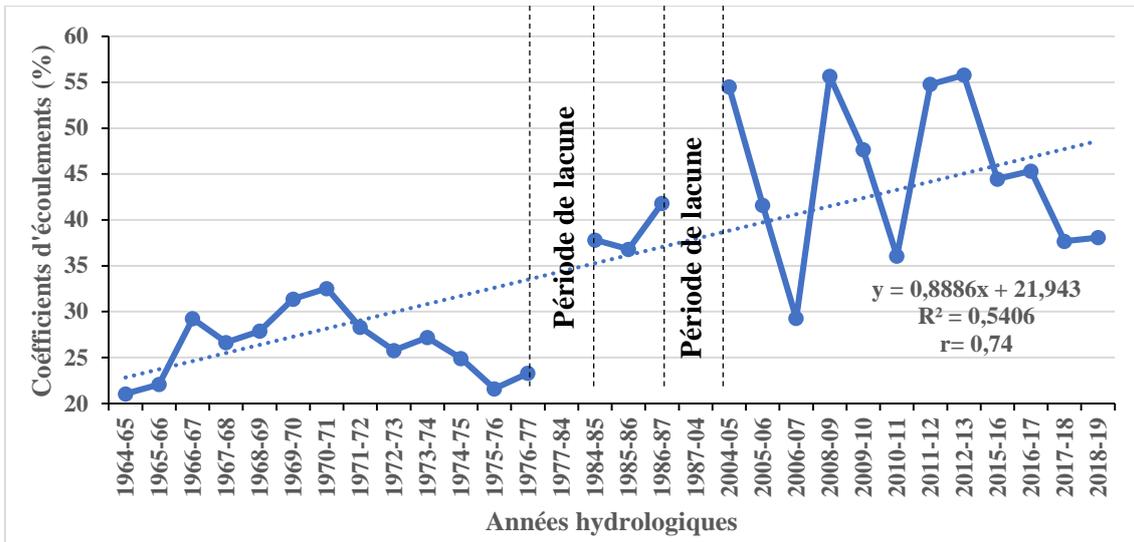


Figure 58: Evolution des coefficients d'écoulements (Ke) de la Mefou à Nsimalen de 1964 à 2019

IV.5. PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX INFLUENÇANT LES INTERACTIONS EAUX DE SURFACE-EAUX SOUTERRAINES ET LES RISQUES D'INONDATION DANS LE BVAN

Les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines se font à travers les volumes d'eau et les constituants chimiques (Johnstone et *al.*, 2022). La nature et le degré de ces échanges dépendent du climat, de la topographie, de la géologie et peuvent varier avec le temps (année, mois, saison et jours) (Sophocleous, 2002 ; Safeeq et Fares, 2012). La présente étude se focalise uniquement sur les échanges de quantité d'eau entre les hydrosystèmes de surface (pluies et écoulements rapides de crues) et les hydrosystèmes souterrains (écoulements de base, niveaux piézométriques et statiques).

IV.5.1. Relations pluies-niveaux statiques

Durant l'année hydrologique, les fluctuations des niveaux d'eau dans les piézomètres suivent celles des saisonnalités pluviométriques (Figure 59). On remarque toutefois, que la réponse des piézométriques n'est pas synchrone ou encore homogène pour tous les ouvrages hydrauliques suivis de la zone d'étude. Le début de la hausse piézométrique est généralement observé au mois de mars avec des pics enregistrés aux mois d'octobre et novembre. Ce décalage serait dû au long temps mis par les pluies efficaces pour parvenir à la nappe souterraine. Elle peut également être dû à la forte imperméabilisation du bassin par l'urbanisation qui demande un temps beaucoup plus important pour que la réponse hydrogéologique puisse être perçue après un épisode pluvieux.

On note également des cas de retards et d'anticipations dans la recharge des nappes. Cependant, les puits situés dans les zones basses du relief à l'instar des puits P5, P26, P48, P52, P78, P100, P120, P57, P157 et P254 par exemple, sont plus sensibles aux pluies, contrairement à ceux

situés au niveau des altitudes hautes du relief comme P3, P34 et P173 par exemple. Ces phénomènes peuvent être liés aux caractéristiques physiques et hydrodynamiques des formations aquifères et de la nappe identifiée dans la zone d'étude (Kamagaté, 2006 ; Charlier et *al.*, 2011 ; Bon et *al.*, 2016a ; Mfonka et *al.*, 2019 ; Kouassy Kalédjé, 2021) que sont : la perméabilité de la zone située au-dessus de la zone saturée (milieu semi perméable à imperméable) ; la profondeur de la surface libre de la nappe ; la capacité de stockage des piézomètres ; la structure locale de l'aquifère qui joue un rôle très important dans l'écoulement souterrain ; l'état initial de la nappe et la topographie. En effet, entre le moment où l'eau s'infiltré dans le sol et le moment où elle parvient à la nappe, il existe un certain retard dont l'importance est nécessairement liée aux paramètres ci-dessus cités.

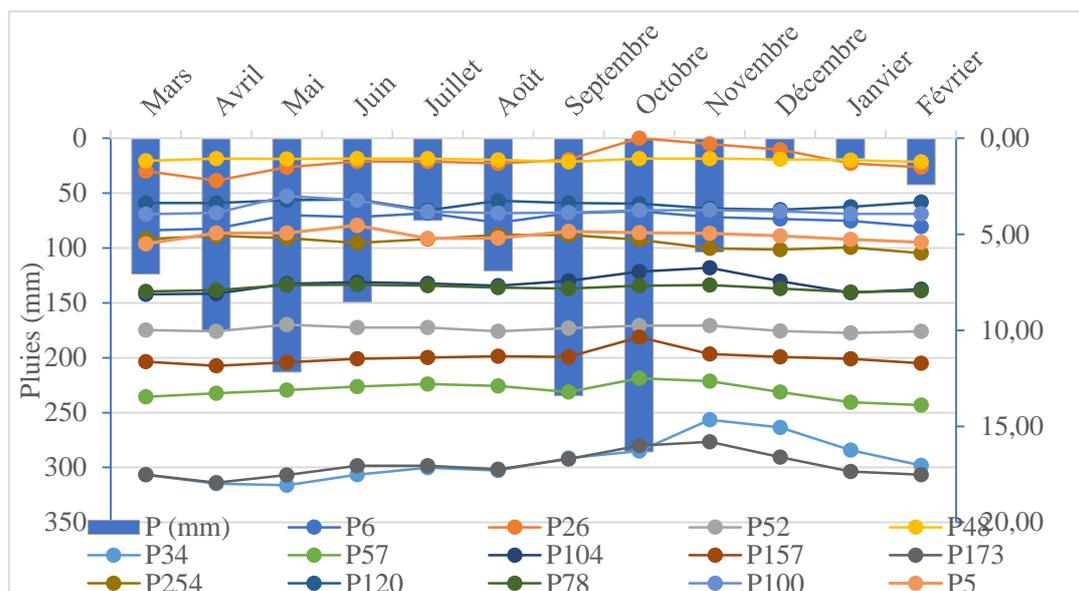


Figure 59 : Variations des niveaux statiques dans quelques ouvrages témoins (représentatifs) dans le BVAM

IV.5.2. Relations cours d'eau-niveaux piézométriques

L'analyse des relations entre les débits des cours d'eau (Mefou et Mfoundi) et les niveaux piézométriques montre une évolution synchrone dans le temps et dans l'espace de ces deux paramètres. Toutefois, on remarque un décalage d'un mois en grande saison de pluie entre les pics des débits mensuels obtenus en octobre et les pics des niveaux statiques de la nappe de subsurface enregistrés en novembre (Figure 60). Ce décalage signifie que le temps de la réponse hydrogéologique est généralement plus long que celui du cours d'eau (réponse hydrologique). Le décalage enregistré peut être attribué à la nature argileuse des altérites présente dans la zone et la forte proportion des zones dites imperméables (aires compactes, routes, habitats) qui ne sont pas propices à une augmentation rapide des niveaux d'eau souterraine, mais qui sont favorable à la réaction assez rapide des cours d'eau. Durant la grande saison sèche (période d'étiage), le débit du cours d'eau est

essentiellement le produit du drainage des aquifères : il s'agit de la vidange de la nappe. En saison de crue par contre, les cours d'eau alimentent les aquifères. Durant la même période (période de crue), l'écoulement de base ou souterraine renforce l'écoulement rapide des crues avec pour conséquence l'augmentation des débits totaux à l'origine des inondations.

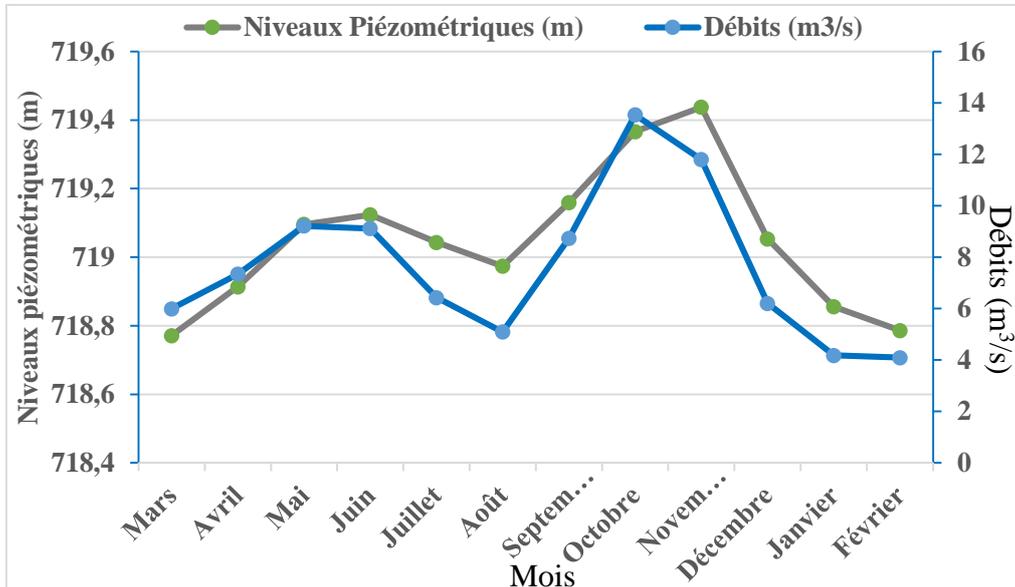


Figure 60 : Comparaison entre les débits mensuels et les niveaux piézométriques dans le BVAM

IV.5.3. Relation entre les systèmes pluies-cours d'eau et puits

L'analyse des fluctuations des niveaux piézométriques dans le BVAM montre que la variation n'est pas synchrone aux régimes pluviométrique et hydrométrique. Les différents niveaux piézométriques atteignent tous leurs maxima durant la saison sèche et leurs minima pendant la saison des pluies. On pense à l'existence de deux mécanismes de transfert d'eau dans la zone que sont : a) la recharge verticale par l'infiltration et/ou la percolation (Liéno et *al.*, 1999a) et ; b) les transferts latéraux qui se font soit des cours d'eaux vers la nappe en saison de pluies, soit de la nappe vers le cours d'eau en saison sèche.

Ces différents types de recharge ont également été mise en évidence dans le bassin de l'Anga'a par Djeuda Tchpnga et *al.* (1999). Par contre, ils sont différents de ceux présentés en Afrique de l'ouest (Liéno et *al.*, 1999b) et du nord (Belhassan et *al.*, 2010) qui mettent en évidence les transferts hydriques essentiellement verticaux.

On remarque toutefois une augmentation assez rapide des eaux de surface après une averse dans le BVAM, mais par contre il faut observer environ 1 mois pour constater la réponse de la nappe dans certains ouvrages. Ce décalage est lié à un drainage retardé entre les zones de recharge et de drainage (Bon et *al.*, 2016a) et à l'évapotranspiration d'une partie de la pluie. Elle peut également

être attribué à la morphologie du bassin qui est très accidenté et à la baisse du taux d'infiltration à cause de l'augmentation des surfaces bâties, des zones agricoles et des sols nus dans la zone d'étude. Ces résultats sont en accord avec ceux de Johnstone et *al.* (2022) sur la rivière Great Miami située au nord de la ville de Miami (USA) qui montrent des échanges très influencés par l'état de l'OS et les activités humains. La réponse des nappes souterraines est plus rapide dans les zones basses du relief. L'augmentation des niveaux statiques dans ces zones est étroitement liée à l'impulsion pluviométriques.

Après l'arrivée du signal pluviométrique dans le BVAM, la réponse des cours d'eau tiens généralement compte des écoulements rapides de crues (ruissellement et écoulement hypodermique) et des écoulements de base qui évoluent différemment d'une année à l'autre. Les variations journalières des écoulements de base et des écoulements rapides de crue suivent dans l'ensemble celle de la pluviométrie (Annexe 3). Ce qui confirme la réactivité rapide des écoulements rapides de crues suite à une averse. Par contre, l'analyse des hydrogrammes annuels montre un léger décalage de 2 à 4 jours entre le début des pluies et la réaction des écoulements de base ou souterraine. Ceci confirme l'existence d'une certaine relation entre les eaux de surface (pluie et écoulement rapide de crue) et les eaux de souterraine (écoulement de base et niveau piézométrique). Cette remarque justifie d'avantage la relation qui existe entre les eaux de surface et les eaux souterraines avec pour conséquence la génération des crues subites et violentes à l'origine des inondations dans le BVAM. Ces différentes relations peuvent être attribuées à la texture du sol de la zone qui est argilo-sableuse et très limoneuses (Ngon Ngon et *al.*, 2009 ; Bon et *al.*, 2016a), l'état de saturation du sol, la morphologie du bassin qui est dominée par un relief très accidenté, aux types d'occupation du sol qui ne sont pas favorables à l'infiltration de l'eau et aussi à la nature des pluies.

Les fluctuations mensuelles et saisonnières des eaux écoulements de surface et souterraines dans le BVAM présentées par la figure 56 montrent que l'écoulement de base augmente en saisons des pluies puis diminue en saisons sèches. Cette baisse de débit de base durant cette période de l'année est concomitante à la baisse des niveaux piézométriques, traduisant ainsi la période de vidange de la nappe. Durant cette période de l'année (saison sèche), les cours d'eau sont drainés par les eaux souterraines. Ces multiples variations montrent davantage l'influence de la distribution saisonnière des paramètres climatiques (pluies et températures) et l'état de saturation du sol sur la recharge de la nappe et les interactions eaux de surface-eaux souterraines. Ces résultats sont similaires à ceux présentés par Liéno et *al.* (1999b) dans le bassin de la Nema au Sénégal.

La variation des écoulements souterraines (écoulement de base) sur une année hydrologique montre une évolution non uniforme à celle de la pluviométrie (Annexe 3). On note que, le minimum d'écoulement souterrain est atteint durant l'année hydrologique 1975-1976. Cette année n'est pas la

plus déficitaire en pluie, mais elle se trouve à la fin de la période hydrologiquement sèche connue par la zone. Ceci reste une preuve que la recharge de la nappe est lente dans le BVAM. L'analyse de l'évolution des coefficients de tarissement de la Mefou entre 1964 et 2019, montre quant à elle une variation en dents de scie avec une valeur moyenne plus faible durant la période comprise entre 1983 et 2006 (0,024) par rapport à la période d'après (2006 à 2019 ; 0,032) avec un taux d'augmentation de l'ordre de +33%. L'évolution en dents de scie souligne l'exceptionnelle réactivité des écoulements de la Mefou à la dynamique pluviométrique de son bassin versant (Nguimalet et Orange, 2019). La hausse des coefficients de tarissement durant la période actuelle peut être attribuée à la diminution du couvert végétal de la zone au profit des surfaces bâties et agricoles qui imperméabilisent le sol et ralentissent l'infiltration et la recharge de la nappe souterraine en saison des pluies. Ceci se justifie par la baisse des volumes d'eau mobilisés par l'aquifère observée depuis les années 2006 dans le BVAM jusqu'à présent au profit des ruissellements et des écoulements hypodermiques. C'est là encore, un élément qui met en relation l'influence des interactions eaux de surface-eaux souterraines et la recrudescence des inondations dans la zone d'étude.

IV.5.4. Modèle conceptuel des interactions eaux de surface-eaux souterraines dans le BVAM

L'analyse des interactions eaux de surface eaux souterraines montrent que les paramètres environnementaux majeurs qui influenceraient ces interactions dans la zone sont : les conditions climatiques (quantité des pluies, types de pluies, distribution saisonnière des pluies, évaporation et/ou évapotranspiration) ; l'infiltration et/ou la percolation ; les caractéristiques morphologiques du bassin versant ; la densité du réseau hydrographique ; la géologie (structure de la roche mère et les types de sols) ; l'état d'humidité du sol ; et les activités anthropiques (imperméabilisation des sols par les changements d'occupation du sol, rejets domestiques, etc.). Le modèle conceptuel (3D) des interactions eaux de surface-eaux souterraines du BVAM à Nsimalen est présenté par la figure 61. Cette caractérisation des interactions eaux de surface-eaux souterraines permet d'apprécier la contribution des eaux de surface et souterraines dans la réponse hydrologique avec pour corollaire les risques d'inondation. Cependant les informations obtenues sont essentielles pour créer des plans généralisés de gestion des ressources en eau dans le BVAM à Nsimalen.

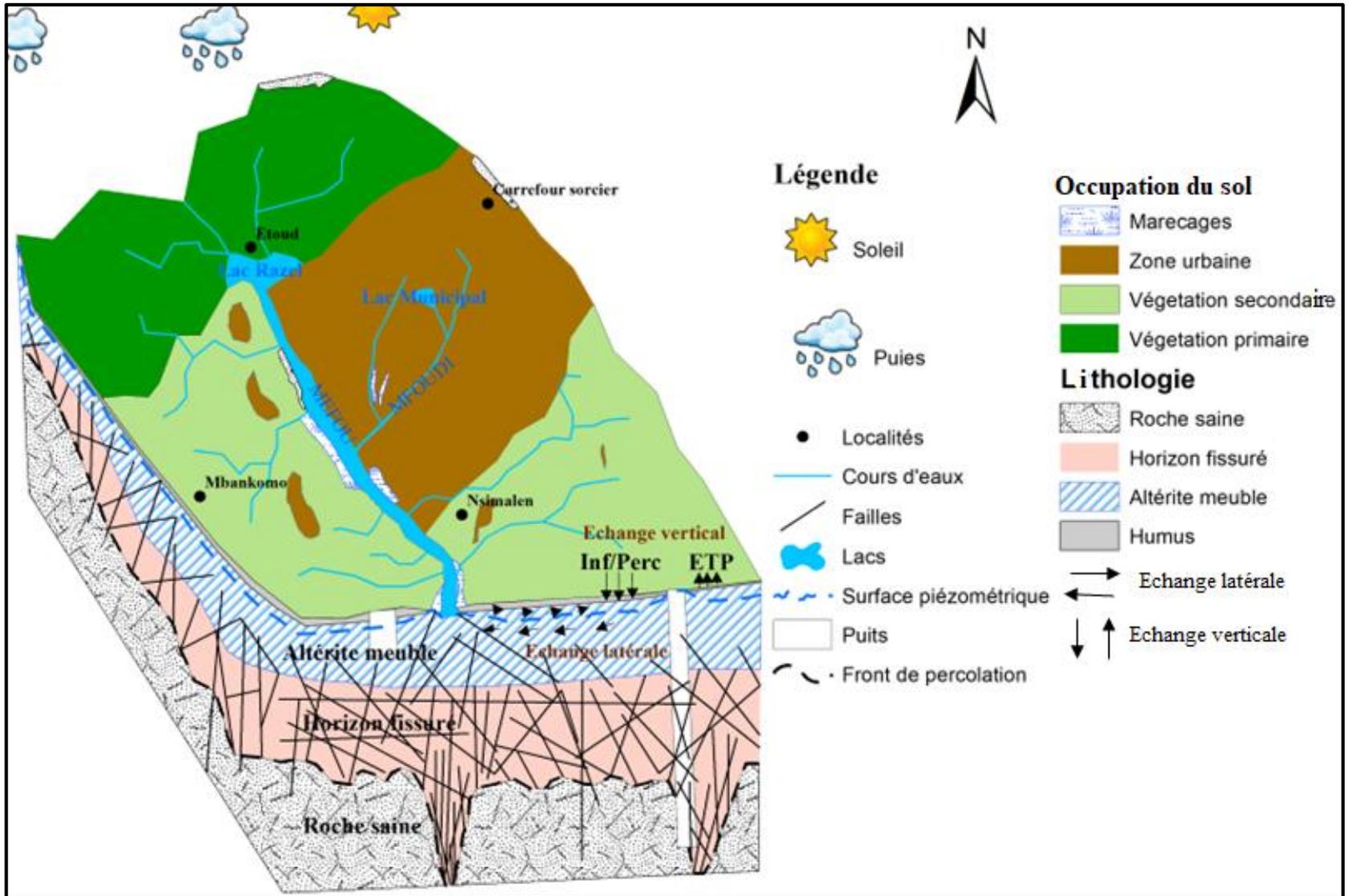


Figure 61 : Modèle conceptuel (3D) des interactions eaux de surface-eaux souterrains du bassin versant de la Mefou à Nsimalen

IV.6. MODÈLE CONCEPTUEL DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX INONDATIONS DANS LA PARTIE URBANISÉE DU BASSIN VERSANT DE LA MEFOU

Le modèle conceptuel de susceptibilité aux inondations est présenté dans la partie urbanisée (bassin du Mfoundi) du BVAM à Nsimalen.

IV.6.1. Multi-influences des facteurs sur la susceptibilité aux inondations

Les dix (10) facteurs retenus pour la modélisation de la susceptibilité aux inondations du bassin du Mfoundi interviennent à des degrés divers et de manière indépendante. Ainsi chaque facteur est subdivisé en classes auxquelles sont attribuées les cotes dont les valeurs sont proportionnelles au degré d'influence de la classe sur la génération des inondations (Tableau 31). Les cartes thématiques des paramètres de susceptibilités aux inondations (altitude, densité de drainage, pluviométrie, pente, distance au cours d'eau, Indice d'humidité topographique, conductivité hydraulique ou perméabilité du sol, niveau de la nappe phréatique ou niveau statique, géologie, occupation du sol) sont présentées sur les figures 62 à 64.

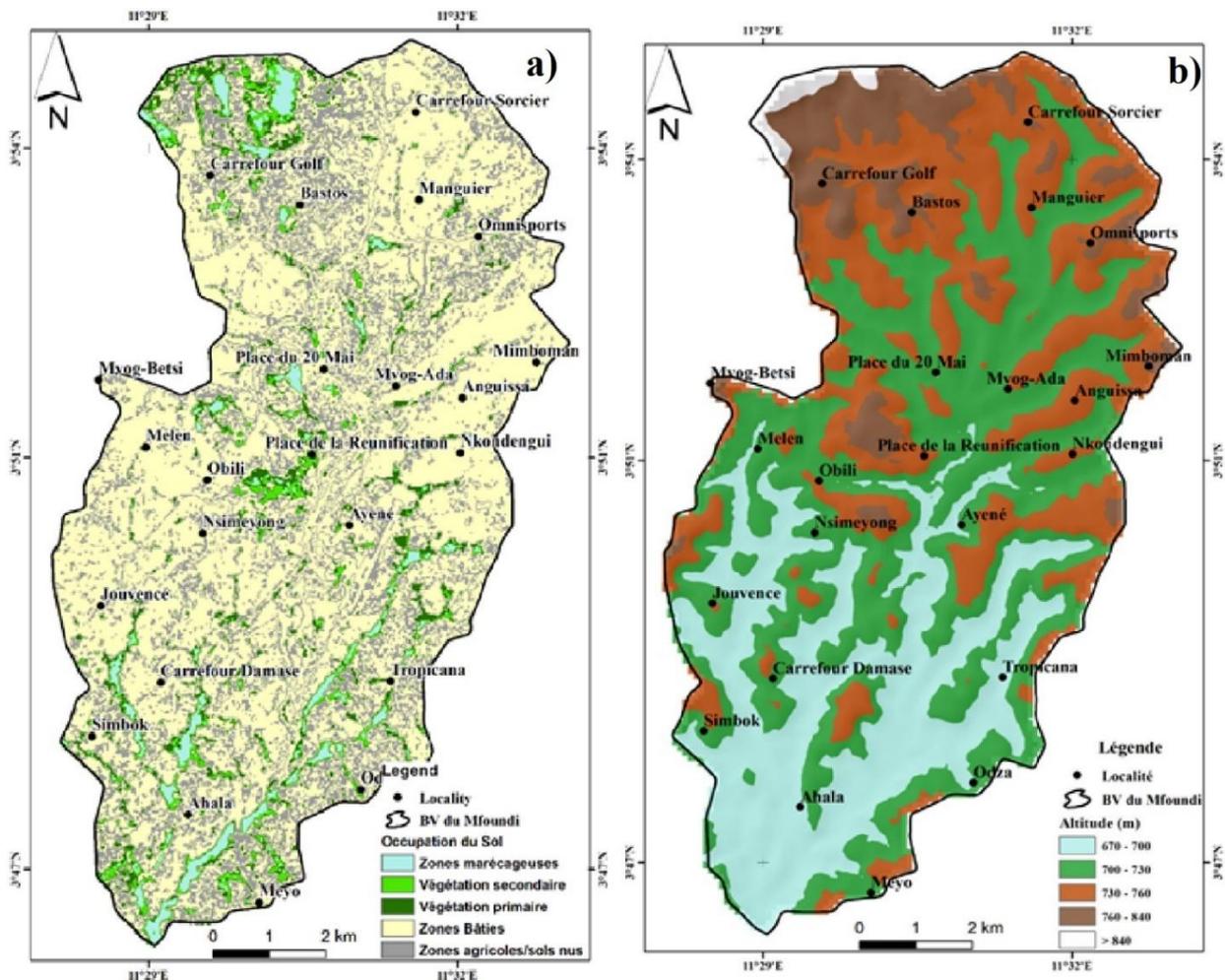


Figure 62 : Cartes thématiques : a) Occupation du sol ; b) Altitude

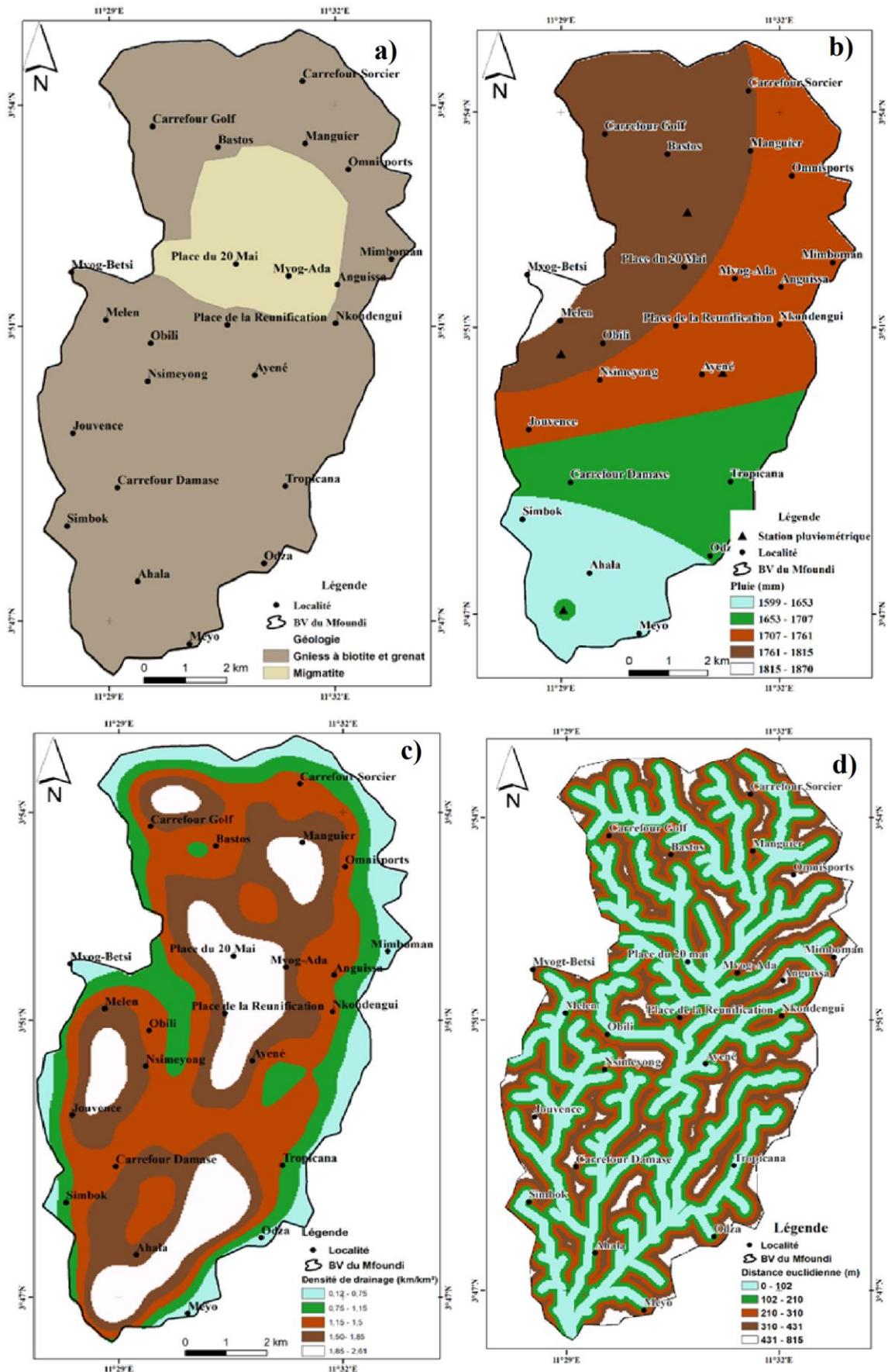


Figure 63 : Cartes thématiques : a) Géologie ; b) Pluie ; c) Densité de drainage ; d) Distance euclidienne

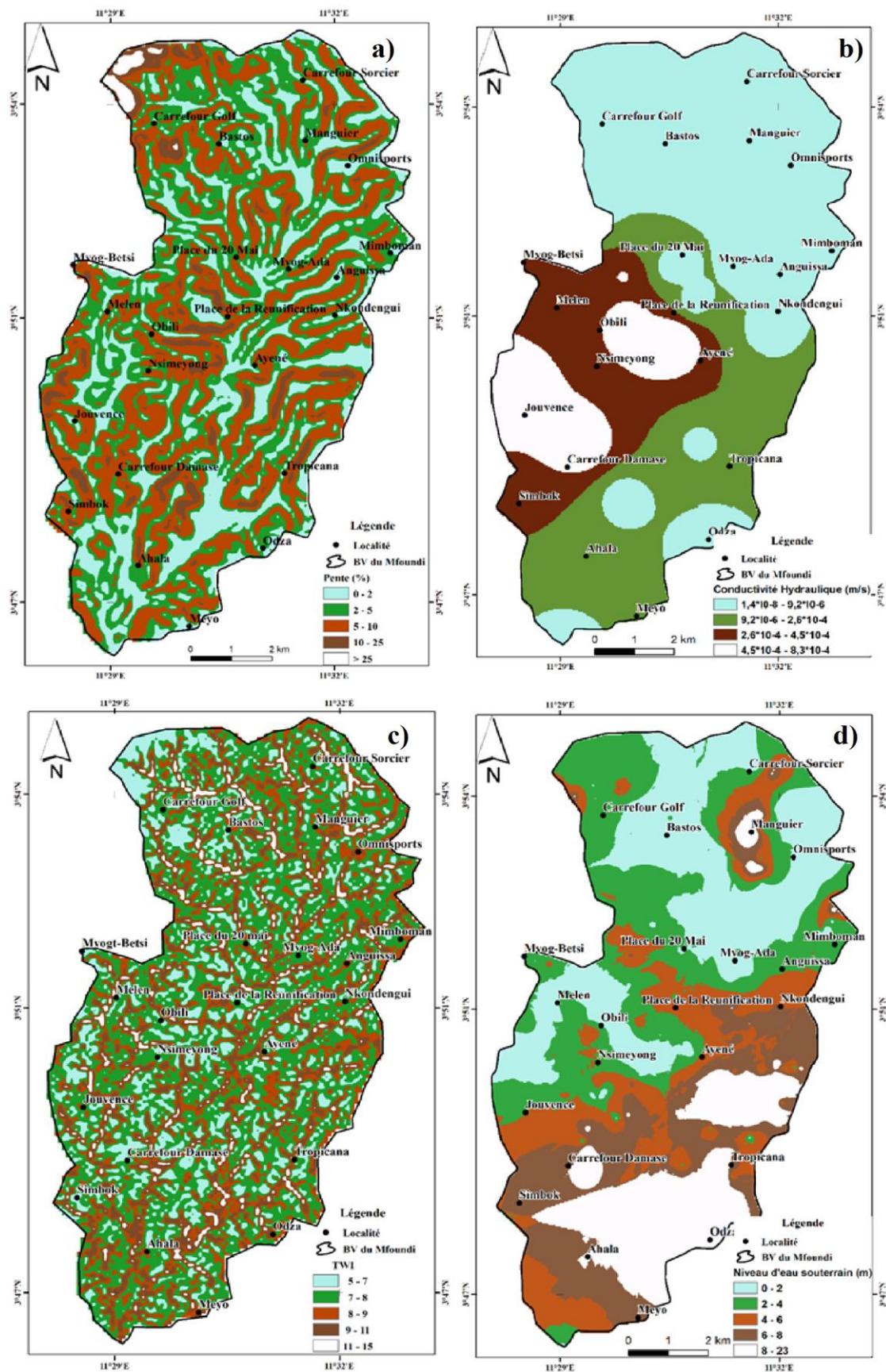
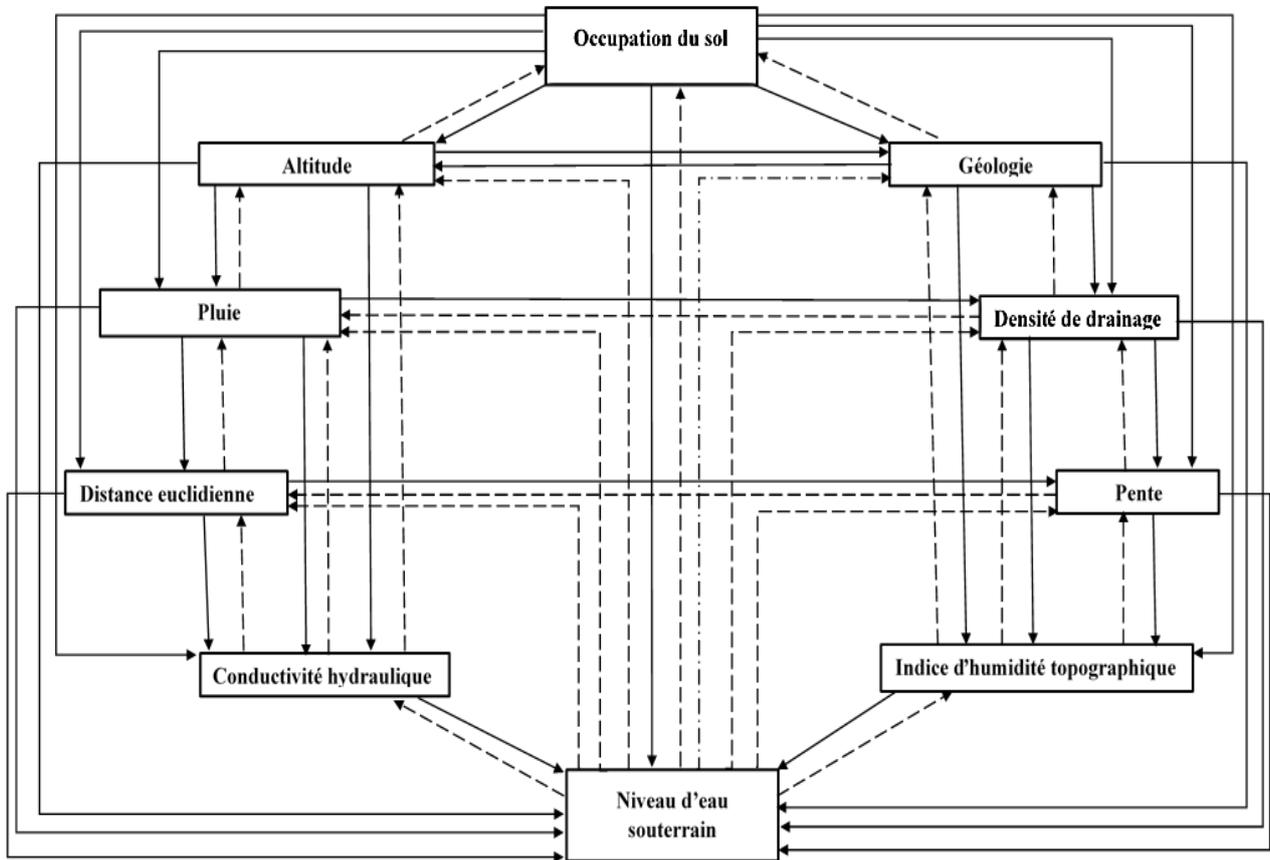


Figure 64 : Cartes thématiques : a) Densité de drainage ; b) Distance euclidienne ; c) TWI ; d) Niveau d'eau souterrain

Tableau 31 : Agrégation des classes de facteurs avec les poids

N°	Facteurs	Classe	Descriptif des classes	Cote	Poids des Facteurs	Poids des classes	Poids des classes en %
1	Occupation du sol	Zones Bâties	Très élevé	10	0,2	2	38
		Zones marécageuses	Elevé	8		1,6	31
		Zones agricoles et sols nus	Moyen	5		1	19
		Végétation primaire	Faible	2		0,4	8
		Végétation secondaire	Très faible	1		0,2	4
2	Altitude (m)	670 – 700	Très élevé	10	0,17	1,7	38
		700 – 730	Elevé	8		1,36	31
		730 – 760	Moyen	5		0,85	19
		760 – 840	Faible	2		0,34	8
		> 840	Très faible	1		0,17	4
3	Géologie	Migmatite/Gneiss à biotite et grenat	Très élevé	10	0,17	1,7	100
4	Pluie (mm)	1599 – 1653	Très faible	1	0,13	0,13	4
		1653 – 1707	Faible	2		0,26	8
		1707 – 1761	Moyen	5		0,65	19
		1761 – 1815	Elevé	8		1,04	31
		1815 – 1870	Très élevé	10		1,3	38
5	Densité de drainage (km/km ²)	0,12 – 0,75	Très faible	1	0,11	0,11	4
		0,75 – 1,15	Faible	2		0,22	8
		1,15 – 1,50	Moyen	5		0,55	19
		1,5 – 1,85	Elevé	8		0,88	31
		1,85 – 2,61	Très élevé	10		1,1	38
6	Distance euclidienne (m)	0 – 102	Très élevé	10	0,07	0,7	38
		102 – 210	Elevé	8		0,56	31
		210 – 310	Moyen	5		0,35	19
		310 – 431	Faible	2		0,14	8
		431 – 815	Très faible	1		0,07	4
7	Pente (%)	0 – 2	Très élevé	10	0,06	0,6	38
		2 – 5	Elevé	8		0,48	31
		5 – 10	Moyen	5		0,3	19
		10 – 25	Faible	2		0,12	8
		>25	Très faible	1		0,06	4
8	Conductivité hydraulique (m/s)	$1,4*10^{-8} - 9,2*10^{-6}$	Très élevé	10	0,04	0,4	42
		$9,2*10^{-6} - 2,6*10^{-4}$	Elevé	8		0,32	33
		$2,6*10^{-4} - 4,5*10^{-4}$	Moyen	5		0,20	21
		$4,5*10^{-4} - 8,3*10^{-4}$	Faible	2		0,08	4
9	Indice d'humidité topographique (TWI)	5 – 7	Très faible	1	0,03	0,03	4
		7 – 8	Faible	2		0,06	8
		8 – 9	Moyen	5		0,15	19
		9 – 11	Elevé	8		0,24	31
		11 – 15	Très élevé	10		0,3	38
10	Niveau d'eau souterrain (m)	0 – 2	Très élevé	1	0,02	0,02	4
		2 – 4	Elevé	2		0,04	8
		4 – 6	Moyen	5		0,15	19
		6 – 8	Faible	8		0,16	31
		8 – 23	Très faible	10		0,2	38

La relation de Shaban et *al.*, (2001) appliquée aux facteurs dans le but d'apprécier l'influence de chacun d'eux sur la susceptibilité aux inondations est résumée par figure 65. Il en ressort que : pour deux paramètres séparés par une flèche discontinue, celui vers lequel la flèche est pointée est dominant par rapport à l'autre ; inversement, lorsque la ligne est continue entre deux paramètres, celui vers lequel la flèche est pointée est moins dominant, on parle dans ce cas d'élément mineur. La somme des nombres de points de chaque facteur de risque est consignée dans le tableau 32. L'ordre décroissant de l'ensemble de ces paramètres en fonction de leur sensibilité au phénomène étudié est le suivant : l'occupation du sol qui totalise 9 points, suivi de l'altitude et de la géologie qui totalisent le même nombre de points (8 points), de la pluviosité (7,5 points), de la densité de drainage (7 points), de la distance euclidienne (6,5 points), de la pente (6 points), de la perméabilité (5,5 points), du TWI (5 points) et du niveau d'eau souterraine (4,5 points).



—————> Effet majeur

- - - - -> Effet mineur

Figure 65 : Esquisse schématique montrant l'influence interactive des facteurs concernant la susceptibilité aux inondations (Shaban et *al.*, 2001 modifié)

IV.6.2. Analyse hiérarchique des processus (AHP)

La matrice de comparaison des paires de paramètres du tableau 33 a été réalisée pour déterminer le poids de chaque facteur. Sur cette base, la première ligne de cette matrice montre l'importance de l'occupation du sol sur les autres paramètres. On note que l'OS est considéré comme plus important que le niveau d'eau souterrain, et donc il s'est vu attribué la côte 8. Le calcul des coefficients des pondérations (Cp) à partir des vecteurs propres de la matrice de hiérarchisation révèle que la valeur minimale de 0,02 correspond au poids des niveaux d'eau souterrain et la valeur maximale de 0,20 correspond au poids de l'OS (Tableau 33). Ainsi, le niveau d'eau souterrain est considéré comme le facteur le moins important dans le processus de génération des inondations et le land use-land cover est la plus importante pour ce phénomène.

Tableau 32 : Interdépendances entre facteurs de susceptibilité aux inondations

N°	Paramètre	Effet (majeurs ou mineur)	Résultat
1	DD	5 majeurs + 4 mineurs = 5 (1) + 4 (0,5)	7
2	OS	9 majeurs + 0 mineur = 9 (1) + 0 (0,5)	9
3	AL	7 majeurs + 2 mineurs = 7 (1) + 2 (0,5)	8
4	GEO	7 majeurs + 2 mineurs = 7 (1) + 2 (0,5)	8
5	PL	6 majeurs + 3 mineurs = 6 (1) + 3 (0,5)	7,5
6	PE	3 majeurs + 6 mineurs = 3 (1) + 6 (0,5)	6
7	CH	2 majeurs + 7 mineurs = 2 (1) + 7 (0,5)	5,5
8	DE	4 majeurs + 5 mineurs = 4 (1) + 5 (0,5)	6,5
9	TWI	1 majeur + 8 mineurs = 1 (1) + 8 (0,5)	5
10	NES	0 majeur + 9 mineurs = 0 (1) + 9 (0,5)	4,5

Légende : OS (Occupation du sol) ; AL (Altitude) ; GEO (Géologie) ; PL (Pluie) ; DD (Densité de drainage) ; DE (Distance euclidienne) ; PE (Pente) ; CH (Conductivité hydraulique) ; TWI (Indice d'humidité topographique) ; NES (Niveau des eaux souterraines).

Tableau 33 : Matrice de comparaisons des paires de facteurs

Paramètres	OS	AL	GEO	PL	DD	DE	PE	CH	TWI	NES	Som	W
OS	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	2,75	3,00	4,50	5,00	8,00	31,75	0,20
AL	0,67	1,00	1,00	1,50	2,00	3,00	3,25	3,50	8,00	7,00	30,92	0,17
GEO	0,67	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	8,00	7,00	30,17	0,17
PL	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	2,00	3,00	3,00	6,00	6,00	24,33	0,13
DD	0,40	0,50	0,50	0,67	1,00	3,00	3,00	3,50	4,00	4,00	20,57	0,11
DE	0,36	0,33	0,40	0,50	0,33	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	11,93	0,07
PE	0,31	0,40	0,33	0,33	0,33	0,67	1,00	1,50	2,75	3,00	10,62	0,06
CH	0,22	0,29	0,29	0,33	0,29	0,50	0,67	1,00	3,00	2,00	8,58	0,04
TWI	0,20	0,13	0,13	0,17	0,25	0,40	0,36	0,33	1,00	3,00	5,96	0,03
NES	0,13	0,14	0,14	0,17	0,25	0,33	0,33	0,50	0,33	1,00	3,33	0,02

Légende : OS (Occupation du sol) ; AL (Altitude) ; GEO (Géologie) ; PL (Pluie) ; DD (Densité de drainage) ; DE (Distance Euclidienne) ; PE (Pente) ; CH (Conductivité Hydraulique) ; TWI (Indice d'humidité topographique) ; NES (Niveau d'eau souterrain) ; Som (Somme) ; W (Poids).

Le rapport de cohérence est utilisé pour vérifier la cohérence des jugements. Dans cette étude, les valeurs de l'IR et de l'indice de cohérence (IC) pour les dix (10) paramètres utilisés sont

respectivement de 1,49 et 0,062, pour un rapport de cohérence de l'ordre de 0,05 ou 5% (Tableau 34). Cette dernière valeur est inférieure à 10%, ce qui prouve que la matrice hiérarchique est acceptable (Saaty, 1980). Cette valeur de RC est supérieure à celle obtenue par Hammami et *al.* (2019) (0,013 ou 1,3%) et inférieure à celles de Kazakis et *al.* (2015) et Ake et *al.* (2018), avec des valeurs de 0,08 (8%) et 0,07 (7%), respectivement, obtenues dans le cadre de la cartographie des zones inondables d'une part et de celle des zones potentielles de recharge des eaux souterraines d'autre part. Cependant, ces valeurs varient en fonction du nombre de paramètres utilisés et des valeurs de cote attribuées à chaque paramètre de décision.

Tableau 34 : Matrice de comparaison par paire des facteurs normalisées

Paramètres	OS	AL	GEO	PL	DD	DE	PE	CH	TWI	NES	Som	VRP	PV	λ_{max}	CI	RC
OS	0,20	0,31	0,25	0,26	0,28	0,18	0,17	0,20	0,14	0,17	2,16	10,58	0,22	/	/	/
AL	0,14	0,20	0,17	0,19	0,22	0,20	0,18	0,15	0,23	0,15	1,83	10,63	0,18	/	/	/
GEO	0,14	0,20	0,17	0,19	0,22	0,16	0,17	0,15	0,23	0,15	1,78	10,63	0,18	/	/	/
PL	0,10	0,14	0,11	0,13	0,17	0,13	0,17	0,13	0,17	0,13	1,37	10,60	0,14	/	/	/
DD	0,08	0,10	0,08	0,09	0,11	0,20	0,17	0,15	0,11	0,08	1,18	10,57	0,12	/	/	/
DE	0,07	0,07	0,07	0,06	0,04	0,07	0,08	0,09	0,07	0,06	0,68	10,44	0,07	/	/	/
PE	0,06	0,08	0,06	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,08	0,06	0,59	10,51	0,06	/	/	/
CH	0,05	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,08	0,04	0,47	10,26	0,05	/	/	/
TWI	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,06	0,29	10,49	0,03	/	/	/
NES	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,22	11,59	0,02	/	/	/
Som	0,91	1,21	1,00	1,06	1,17	1,06	1,07	1,03	1,15	0,93	10,57	106,30	1,06	10,63	0,06	0,05

Légende : OS (Occupation du sol) ; AL (Altitude) ; GEO (Géologie) ; PL (Pluie) ; DD (Densité Drainage) ; DE (Distance Euclidienne) ; PE (Pente) ; CH (Conductivité Hydraulique) ; TWI (Indice d'humidité topographique) ; NES (Niveau d'eau souterrain) ; Som (Somme) ; VRP (Vecteur Rationnel Propre) ; PV (Vecteur de priorité) ; λ_{max} (Valeur du Vecteur de consistance) ; CI (Indice de consistance) ; RC (Rapport de cohérence).

La contribution des classes des facteurs utilisées pour la réalisation de la carte de susceptibilité aux inondations sont consignées dans le tableau 31. Elle est le rapport du poids de chaque classe par la somme des poids des classes du facteur considéré. Les résultats sont exprimés en pourcentage. Ainsi, pour le facteur altitude, on remarque que la zone comprise entre 670 et 700 m est beaucoup plus significative par rapport aux autres classes (700 – 730 m, 730 – 760 m, 760 – 780 m et > 840 m). Le facteur pluviosité montre que la classe de forte pluviosité (1815 – 1870 mm) est beaucoup plus importante vis-à-vis des autres classes (1761 – 1815 mm, 1707 – 1761 mm, 1653 – 1707 mm, 1599 – 1653 mm). Pour le facteur OS, la zone bâtie a plus d'influence sur le phénomène par rapport aux autres classes (zones marécageuses, agricole/sols nus, végétations primaire et secondaire).

IV.6.3. Carte de susceptibilité aux inondations

La carte de susceptibilité aux inondations a été établie par cartographie thématique couplée au calcul des indices de risque d'inondation (FHI) basé sur l'AHP. Le "FHI" est lié aux valeurs des poids des facteurs associés aux cotes respectifs des différentes couches (Generino et *al.*, 2014 ;

Hammami et *al.*, 2019). Son calcul s'est effectué dans un SIG suivant l'équation (38). Les valeurs des indices de risques d'inondation "FHI" obtenues varient de 4,16 à 9,16. Plus cette valeur est élevée plus la zone est sensible aux risques d'inondation.

$$\mathbf{FHI} = 0,20F_{OS}+0,17F_{AL}+0,17F_{GEO}+0,13F_{PL}+0,11F_{DD}+0,07F_{DE}+0,06F_{PE}+0,04F_{CH}+0,03F_{TWI}+0,02F_{NES} \quad (38)$$

La classification de ces indices à base de l'algorithme de rupture naturel présent sur ArcGIS met en évidence cinq grandes classes de susceptibilité aux inondations, allant de la classe très faible à la classe très forte (Tableau 35 et Figure 66). Ainsi, il s'agit de :

- la classe de risque d'inondation très faible représente 9,50% du BV du Mfoundi ;
- la classe faible qui couvre 26% de la zone modélisée se rencontre un peu partout dans le bassin ;
- la classe modérée qui s'étend sur 23% de la superficie du secteur modélisée est répartie du Nord au Sud ;
- la classe élevée qui couvre 22% du site modélisée est plus représentée dans la partie centrale, mais légèrement disséminée dans les parties Nord et Sud ;
- la classe très élevée qui s'étale sur 19,5% de la superficie du bassin du Mfoundi. Cette classe est disséminée partout dans la zone d'étude en îlots parfois isolés avec des extensions au Nord et au Sud de la zone.

Les tests de Shaban et *al.* (2001) et Saaty (1980) appliqués au présent travail révèlent que les facteurs qui influencent considérablement le phénomène des inondations sont l'occupation du sol, l'altitude et la géologie. Ces mêmes facteurs ont été mis en évidence par Hammami et *al.* (2019) dans la région de Tunis où il a utilisé huit (8) facteurs de pondération sur une superficie d'environ 524,4 km² pour cartographier les zones inondables. D'autre part, les travaux de Kazaski et *al.* (2015) réalisés dans la région de Rhodope-Evros en Grèce (5 004 km²) en utilisant sept (7) facteurs montrent que les facteurs influençant la susceptibilité aux inondations sont, par ordre d'importance, l'accumulation du débit, la distance au réseau de drainage et l'élévation. Ceux de Das et Gupta (2021) dans le bassin de Subarnarekha (Inde) appliqués à douze (12) facteurs révèlent que les facteurs qui influencent le plus la susceptibilité aux inondations dans cette zone sont l'élévation, la pente, le TWI et la densité de drainage. Contrairement aux résultats obtenus dans la présente étude, Das et Gupta (2021) affirment que la géologie est le facteur le moins influent sur les inondations dans le bassin de Subarnarekha. Cette différence serait liée à la présence d'affleurements de roches imperméables dispersés dans tout le bassin versant du Mfoundi et plus particulièrement sur les flancs des collines, les berges des rivières et leurs lits qui favorisent le ruissellement rapide des crues et la stagnation des eaux avec des phénomènes d'inondation consécutifs (Hammami et *al.*, 2019 ; Das, 2020).

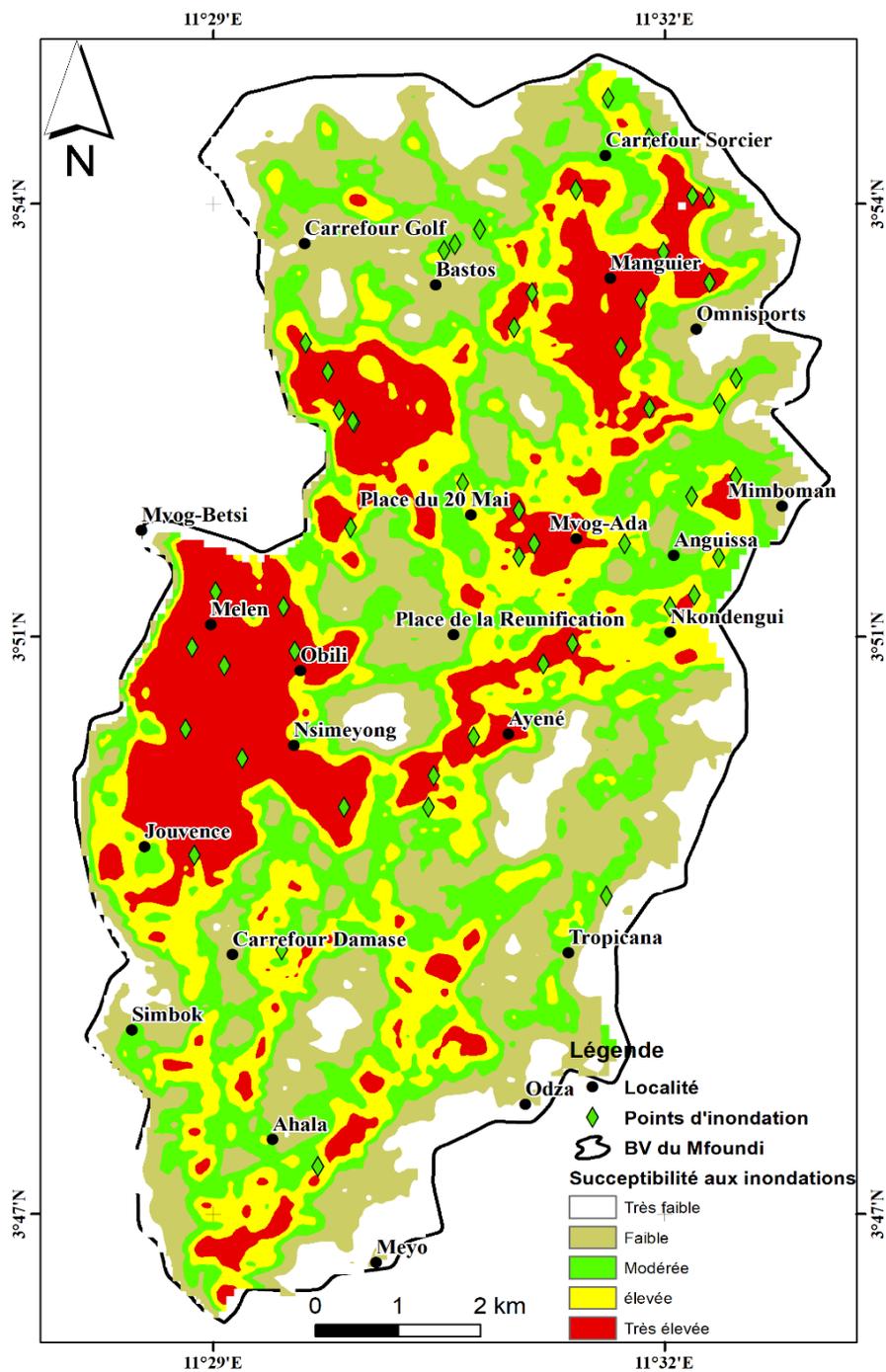


Figure 66 : Carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant du Mfoundi

Tableau 35 : Classe d'inondation et points régulièrement inondés dans le BV du Mfoundi

Classes	Descriptif des classes	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Nombre de points d'inondation	Points d'inondation (%)
I	Très faible	9,27	9,70	0	0
II	Faible	24,63	25,77	1	2
III	Modérée	22,04	23,05	2	4
IV	Elevée	21,01	21,98	11	22
V	Très élevée	18,65	19,51	36	72

Parmi ces trois facteurs qui influencent le plus les phénomènes d'inondation dans la région, l'OS a subi un changement exponentiel au cours des dernières années. A cet égard, les zones bâties qui occupaient 30 % du bassin du Mfoundi en 2010 (Moffo Zongning, 2017) sont passées à 62 % en 2020, ce qui traduirait une forte imperméabilisation des sols entraînant la réaction rapide du Mfoundi à la fin de chaque averse pouvant causer des inondations (Jourdan, 2019). A ces facteurs d'influences on pourrait ajouter la variabilité et le changement climatique, désignés ici par l'augmentation de l'intensité des pluies journalières favorables aux événements de crue violente à l'origine des inondations.

IV.6.4. Validation

La carte de susceptibilité aux inondations générée par l'approche AHP couplée au SIG a été validée sur la base des informations historiques sur les inondations dans la zone d'étude (Figure 67). Ces informations ont été recueillies auprès de la population locale, des autorités locales décentralisées et des observations directes sur le terrain (par exemple, les laisses de crues sur les murs des maisons, les drains et les cours d'eau).

La technique de validation visuelle montre que, en superposant les cinquante (50) points régulièrement inondés sur la carte finale, trente-six (36) points (72%) et onze (11) points (22%) sont situés sur les zones de susceptibilité très élevée (18,65 km²) et élevée (21,98 km²) respectivement (Tableau 35). En fusionnant ces dernières, on obtient une superficie des zones potentiellement inondables de 39,66 km², soit 41,49% de la superficie du bassin versant du Mfoundi. Seuls 2% et 4% des points régulièrement inondés sont situés dans les zones de susceptibilité faible et modérée avec des superficies respectives de 23,05 km² et 21,98 km² (Tableau 35). La récurrence des phénomènes d'inondation dans ces zones s'explique par le sous-dimensionnement des ouvrages d'assainissement (canalisation et évacuation des eaux pluviales) (Figure 68a, 68b, 68c), le manque de civisme de la population dans la pratique des mesures d'assainissement (rejet des déchets solides et liquides dans les égouts), et le défaut d'entretien des ouvrages hydrauliques (Figure 68b, 68d).

La validation basée sur la méthode statistique révèle une valeur d'air sous la courbe élevée (0,84 ou 84%). Ceci démontre une très bonne précision de la carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant du Mfoundi (Figure 69). Cette valeur est similaire à celle obtenue par Das (2019 et 2020) respectivement pour la cartographie de susceptibilité aux inondations de la ceinture côtière de Western Ghat (appliquée à 12 facteurs) et du bassin d'Ulhas (appliquée à 11 facteurs), tous situés en Inde. Les travaux de Das et Gupta (2021) dans le bassin de Subarnarekha (Inde) et de Rahman et *al.* (2021) dans le bassin de la rivière Surma (nord-est du Bangladesh), tous appliqués à 12 facteurs, révèlent des valeurs d'air sous la courbe supérieure à 0,90 (90%), ce qui indique que les cartes de susceptibilité aux inondations obtenues dans ces études sont excellentes. La valeur d'air sous la

courbe obtenue dans la présente étude se situe dans la large fourchette des valeurs présentées dans les autres cas d'étude. Cependant, la carte finale obtenue dans cette étude vérifie avec exactitude la méthodologie adoptée. Cette dernière fournit donc une information de base, qui devrait être prise en compte dans le plan d'urbanisation, mais aussi dans les mesures de gestion des inondations par les décideurs.

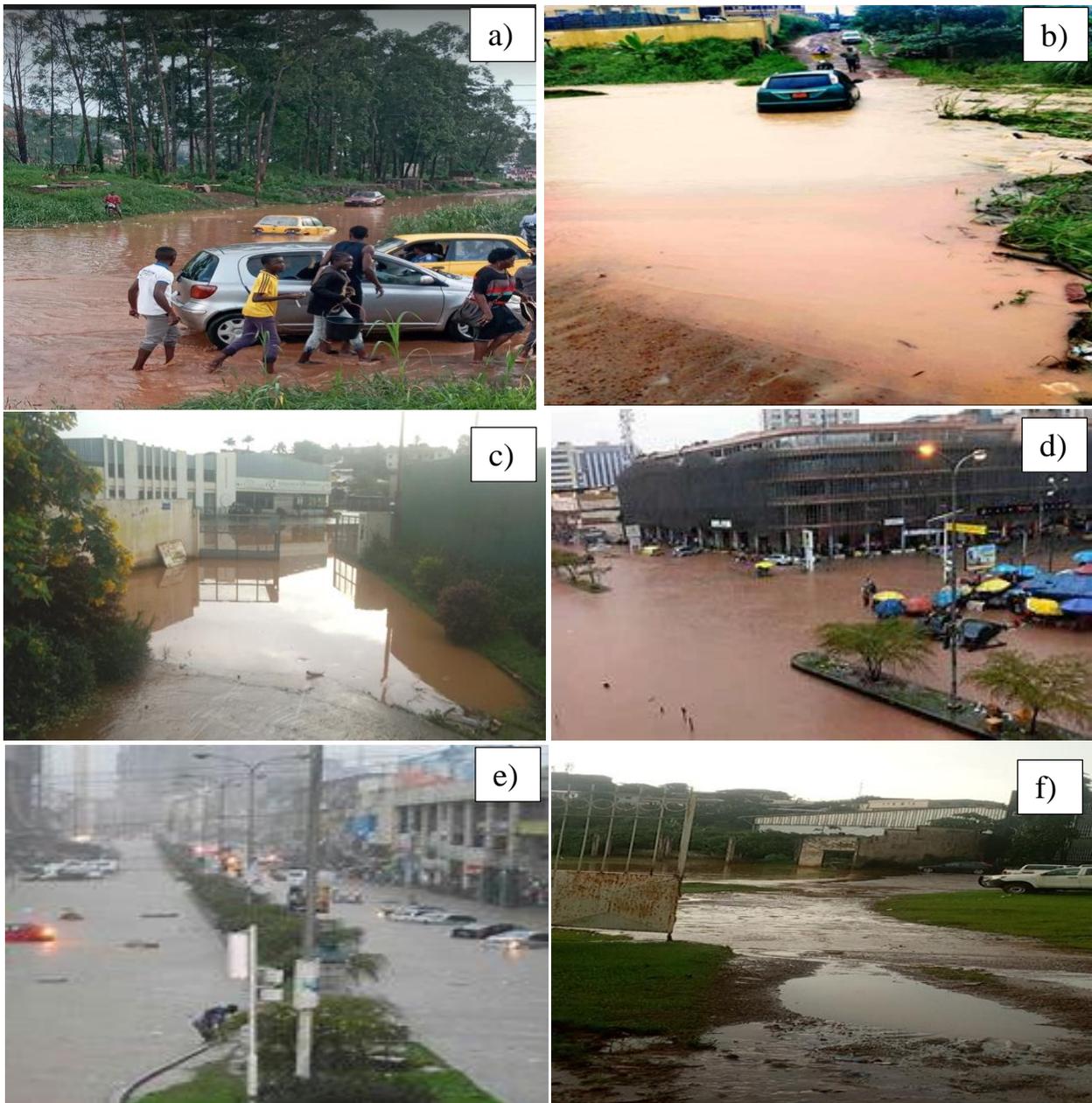


Figure 67 : Quelques épisodes d'inondations dans le bassin versant du Mfoundi : a) à entrer Cité Verte ; b) à Ayéné ; c) à Coron ; d) et e) à avenue Kennedy ; c) à Ahala (*Cliché Nsangou, 2021*)



Figure 68: Quelques activités anthropiques qui favorisent l'apparition des inondations dans le bassin versant du Mfoundi : a), b) et c) ouvrages sous-dimensionnés ; d) occupation des zones marécageuses ; e) rejet des déchets urbains dans le lit du cours d'eau (*Cliché Nsangou, 2021*)

IV.6.5. Limites de la méthodologie de modélisation

Malgré quelques imperfections liées à la qualité de l'image de moyenne résolution (SRTM 30 m) utilisée dans la présente étude, à la subjectivité des cotes attribuées à certains paramètres, il n'en demeure pas moins que la carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant du Mfoundi obtenue constitue un véritable outil de développement, de planification et de prise de décision par les

autorités administratives et les collectivités territoriales décentralisées compétentes. Les résultats de ce travail contribueront à l'amélioration des conditions de vie des populations de cette zone intensément peuplée où le problème de la gestion de l'environnement et de l'assainissement constitue un véritable problème.

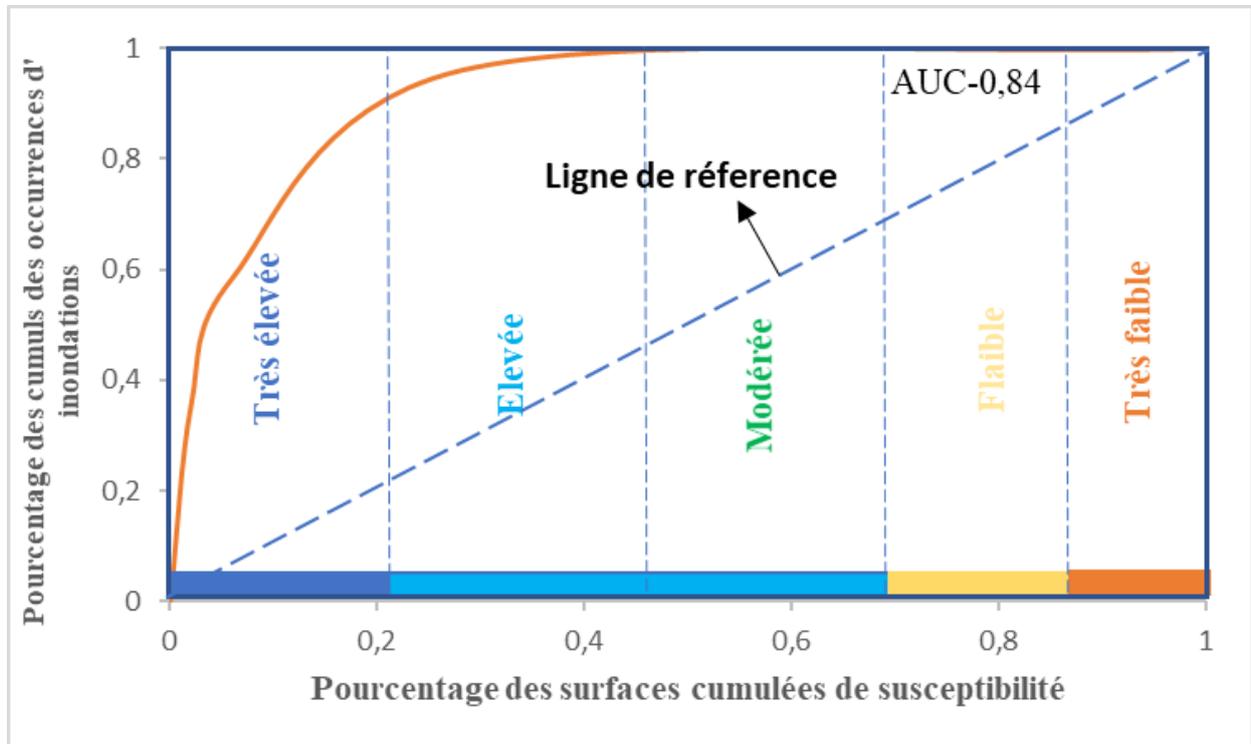


Figure 69: Aire sous la courbe "AUC" relatif à la validation du modèle de susceptibilité aux inondations

CONCLUSION

Le nombre de jours de pluies/an dans le BVAM présente une tendance à la baisse avec une rupture significative mise en évidence en 1988-1989 pour une baisse de -7,68%. L'analyse de l'évolution des quatre classes de hauteurs de pluies montre des légères tendances à la baisse sans ruptures significatives, à l'exception de la classe supérieure à 30 mm qui présente une rupture en 1987-1988 suivie d'une baisse de -27,89%. Les hauteurs de pluies journalières maximales par an, les pluies mensuelles, saisonnières et annuelles présentent des tendances à la baisse sans ruptures significatives exceptés les hauteurs de pluies du mois de février, petite saison de pluies, grande saison de pluies et grande saison sèche qui enregistrent les baisses de -49,63% en 1980-1981, -15,17% en 1989-1990, -12,52% en 1990-1991 et -44,01% en 1983-1984 respectivement.

L'analyse de l'évolution des débits de la Mefou à Nsimalen aux différents pas de temps (journaliers et caractéristiques, mensuels, saisonniers et annuels) présente des tendances généralisées

à la hausse avec des ruptures significatives régulièrement enregistrées durant les années hydrologiques 1976-1977, 1983-1984 et 2009-2010 et des hausses comprises entre 17,24 et 42,6% respectivement. Cette augmentation généralisée de débits en dépit de la présence d'un barrage de retenue dans sa partie amont (Nkolbisson) peut s'expliquer par l'augmentation des zones bâties et des zones agricoles et sols nus. Ces derniers limitent l'infiltration des eaux au bénéfice de l'écoulement rapide de crues avec pour conséquence les phénomènes d'inondation dans la zone.

L'analyse et la modélisation des interactions eaux de surface-eaux souterraines indique : une réaction très rapide des débits des cours d'eau (Mefou et ses affluents) face aux sollicitations (pluies, averses) ; un fort taux de l'écoulement rapide de crues (ruissellement, écoulement hypodermique) ; une faible infiltration qui se manifeste par une augmentation du coefficient de tarissement qui est de 0,032 durant la période récente (2006 à 2019) contre 0,024 pour la période comprise entre 1983 et 2006. Cette hausse traduit le ralentissement de la recharge de la nappe et la diminution des volumes d'eau souterraine. Ainsi, ces relations d'échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines sont majoritairement dominées par deux modes de transferts hydriques : verticaux et latéraux.

La modélisation de la susceptibilité aux inondations dans la partie urbanisée du BVAM qui prend en compte ici le sous bassin du Mfoundi avec la ville de Yaoundé à partir de dix paramètres du milieu naturel par utilisation de l'AHP couplée au SIG. Il en ressort que la valeur du rapport de cohérence (RC) obtenue est de 0,05%, ce qui atteste que les poids attribués aux facteurs sont acceptables. Les indices de risques d'inondation (FHI) varient de 4,16 à 9,16. La classification de ces indices met en évidence cinq grandes classes de susceptibilité aux inondations à savoir : la classe très élevée qui couvre 19,5% du bassin du Mfoundi, la classe élevée (22%), la classe modérée (23%), la classe faible (26%) et la classe très faible (9,50%). La carte de susceptibilité obtenue présente une très bonne précision avec une surface sous la courbe "AUC" égale à 84%. Les facteurs majeurs qui influencent considérablement la génération des inondations dans la zone sont l'occupation du sol avec les surfaces bâties, le relief avec l'altitude et la géologie avec les affleurements rocheux. A ces facteurs d'influences s'ajoutent la variabilité et/ou le changement climatiques, le sous-dimensionnement des ouvrages d'assainissement, le manque de civisme de la population dans la pratique des mesures d'assainissement, et le défaut d'entretien des ouvrages hydrauliques. Malgré quelques imperfections de la méthode liées à la subjectivité de l'AHP en termes d'estimation du poids et de résolution du MNT, les résultats qui en découlent constituent un véritable outil d'aide à la prise de décision pour la planification et l'aménagement du territoire par les pouvoirs publics et les collectivités territoriales décentralisées dans un contexte de développement local.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les grandes agglomérations du monde en général et du Cameroun en particulier sont confrontées aux effets de la variabilité et/ou des changements climatiques et des activités anthropiques qui ont pour conséquence la dégradation des ressources en eau. C'est dans cette optique que la présente étude a été menée afin d'évaluer les processus hydrologiques et les facteurs environnementaux qui influencent les interactions eaux de surface-eaux souterraines et les risques d'inondation dans le bassin versant de la Mefou (BVM). Les résultats montrent que durant la période comprise entre 1964 et 2020 (57 ans), le nombre de jours de pluies par an enregistré dans le BVAM varie entre 95 jours et 177 jours pour une moyenne interannuelle de 118 ± 15 jours. L'évolution de ces nombres de jours de pluies par an présente une tendance à la baisse avec une rupture significative observée durant l'année hydrologique 1988-1989. En ce qui concerne les hauteurs de pluies journalières, les classes comprises entre 1 et 5 mm représentent environ 35,92% des hauteurs de pluies enregistrées dans le bassin ; 5,1 - 15 mm (35,07%) ; 15,1 et 30 mm (18,66%) et la classe supérieure à 30 mm (12,26%). L'analyse de l'évolution de ces classes de pluies montre des fortes fluctuations d'une année à l'autre avec des légères tendances à la baisse sans rupture significative, à l'exception de la classe supérieure à 30 mm qui enregistre une rupture en 1987-88 suivie d'une baisse de -27,89%. Les hauteurs de pluies journalières maximales quant à elles varient entre 50 mm et 107 mm pour une moyenne interannuelle de 70 ± 13 mm. Leur évolution montre une légère tendance à la baisse sans rupture significative. Les variations des hauteurs de pluies mensuelles et saisonnières sont caractéristiques de celles du régime équatorial de transition à quatre saisons inégalement réparties. L'analyse de leur évolution montre des ruptures significatives situées entre 1980 et 1991. Les pluies annuelles quant à elles varient de 1083 mm à 2196,7 mm pour une moyenne interannuelle de 1562 ± 271 mm. Leur évolution montre une alternance d'années sèches et humides avec une légère tendance à la baisse sans aucune rupture significative.

En ce qui concerne les débits journaliers de la Mefou à Nsimalen, varient différemment d'une année à l'autre durant la période comprise entre 1964 et 2019 (32 ans), Le plus faible débit journalier obtenu est de $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré le 10 février 1965, tandis que le plus élevé est de $29,05 \text{ m}^3/\text{s}$ (11 octobre 2011). Ces débits journaliers présentent des tendances à la hausse avec des ruptures enregistrées respectivement en 1976-1977, 1983-1984 et 2009-2010 et des hausses comprises entre 17,24 et 42,6% respectivement. Les débits moyens mensuels et saisonniers montrent une évolution en dos de chameau caractéristique du régime équatoriale de transition. Les variations des débits mensuels et saisonniers suivent dans l'ensemble celles des pluies avec souvent un décalage d'environ un mois entre les pics. Les débits moyens annuels fluctuent quant à eux entre $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$ ($10,22 \text{ l/s/km}^2$) et $13,64 \text{ m}^3/\text{s}$ ($32,09 \text{ l/s/km}^2$) pour un débit moyen interannuel de $7,56 \pm 1,92 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce module correspond à un débit spécifique de $17,80 \text{ l/s/km}^2$, une lame d'eau écoulée de 564 mm représentant

un coefficient d'écoulement de 36%. L'évolution pluriannuelle de ces débits indique une tendance à la hausse accompagnée d'une rupture en 1976 - 1977, correspondant à une augmentation de l'ordre de +33%. L'analyse des relations pluies journalières-débits journaliers durant la période d'étude montre une réaction assez rapide des débits face aux pluies.

Pendant la période comprise entre 1988 et 2020 (32 ans), l'évolution de l'état de l'occupation du sol dans le BVAM, révèle une augmentation des zones bâties d'environ 678% et des zones agricoles et sols nus de 308%. Ces variations de l'état d'occupation du sol correspondent à des taux d'augmentation de 4,04 km²/an pour les zones bâties et de 1,17 km²/an pour les zones agricoles et sols nus. Les surfaces végétales primaire et secondaire ainsi que les zones marécageuses ont diminué de -59,68%, -25,33% et -90,42% respectivement. L'augmentation généralisée des débits de la Mefou à Nsimalen en dépit de la présence d'un barrage de retenue dans sa partie amont peut s'expliquer par l'augmentation des zones bâties et des zones agricoles et sols nus. Ces dernières limitent l'infiltration des eaux au bénéfice de l'écoulement rapide de crues avec pour conséquence les phénomènes d'inondation.

L'analyse et la modélisation des interactions eaux de surface-eaux souterraines indique : (i) une réaction très rapide des débits des cours d'eau (Mefou, Mfoundi, Anga'a, ...) face aux pluies et averses ; (ii) un fort taux de l'écoulement rapide de crues (ruissellement et écoulement hypodermique) ; (iii) une faible infiltration qui se manifeste par une augmentation du coefficient de tarissement qui est de 0,032 durant la période récente comprise entre 2006 et 2019 contre 0,024 pour la période antérieure comprise entre 1983 et 2006. Cette hausse traduit le ralentissement de la recharge de la nappe et la diminution des volumes d'eau souterraine. Les paramètres environnementaux qui influencent ce fonctionnement hydrologique et ces interactions sont : les conditions climatiques (dynamique et distribution des pluies, évaporation et/ou évapotranspiration) ; l'infiltration et/ou la percolation ; les caractéristiques morphologiques du bassin versant ; la densité du réseau hydrographique ; la géologie (structure de la roche mère et les types de sols), l'humidité du sol et les activités anthropiques (imperméabilisation des sols, rejets domestiques, etc.).

La modélisation de la susceptibilité aux inondations dans la partie urbanisée du BVAM qui prend en compte ici le sous bassin du Mfoundi avec la ville de Yaoundé met en évidence cinq grandes classes de susceptibilité aux inondations à savoir : la classe très élevée qui représente 19,5% de la superficie de la zone modélisée à laquelle s'ajoutent les classes élevée (22%), modérée (23%), faible (26%), et très faible (9,5%). La carte de susceptibilité obtenue présente une très bonne précision avec une surface sous la courbe "AUC" égale à 84%. Les facteurs majeurs qui influencent considérablement la génération des inondations dans la zone sont l'occupation du sol avec les surfaces bâties, le relief avec l'altitude et la géologie avec les affleurements rocheux. A ces facteurs

d'influences s'ajoutent la variabilité et/ou le changement climatiques, le sous-dimensionnement des ouvrages d'assainissement, le manque de civisme de la population dans la pratique des mesures d'assainissement, et le défaut d'entretien des ouvrages hydrauliques.

En guise de perspective, la poursuite de cette étude nécessite des travaux complémentaires et / ou orientations suivantes :

- augmenter le nombre et le suivi régulier des stations pluviométrique et hydrométrique dans le BVAM ;
- prendre en compte les paramètres hydrogéochimiques (éléments majeurs, traces et isotopiques) pour l'analyse des interactions eaux de surface-eaux souterraines ;
- tester l'approche de modélisation des inondations développée dans cette étude dans les autres zones urbaines du Cameroun afin de vérifier son efficacité ;
- envisager une modélisation plus poussée qui concilie les volets hydrologique et hydraulique sur des plateformes de modélisation plus performantes (IBER, HEC-RAS, ...) capable de réduire au maximum les marges d'erreur.

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", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal Hydrology*. 87, 45–59.
- Abossolo S.A., Amougou J.A., Tchindjang M., MENA M.S., Batha R.A.S. (2015). Analyse des précipitations annuelles à la station de Yaoundé de 1895 à 2006. *Afrique SCIENCE*. 11(2), 183 - 194
- Adam T.N., David M.C. (2011). Relationships between Arctic shrub dynamics and topographically derived hydrologic characteristics. *Environ Ressource Letter*. 6 : 045506.
- Adja G.M., Djemin J.E., N'Dri F.A.O., Kouame F.K., Biemi J. (2019). Contribution des modèles hydrologiques et des SIG à l'étude de l'impact de la variabilité climatique et du changement de l'occupation du sol sur les ressources en eau du bassin versant de la Volta en Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*. 26(2), 652-667.
- Ake G.E., Kouame K.J., Koffi A.B., Jourda J.P. (2018). Cartography of potential recharge areas of the Bonoua aquifer (Southeastern Côte d'Ivoire). *Journal of Water Science*. 31 (2), 129-144.
- Alam A., Bhat M., Maheen M. (2020). Using Landsat satellite data for assessing the land use and land cover change in Kashmir valley. *Geology Journal*. 85,1529–1543.
- Albergel J. (1986). Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne ; exemple du Burkina-Faso. In colloque Comité Interafricain d'Etude Hydraulique sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la Sécheresse, Ouagadougou. 21-25 mai. 17 p.
- Alexandersson H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*. 6(6), 661-675.
- Ali S.A., Khatun R., Ahmad A., Ahmad A.N. (2019). Application of GIS based analytic hierarchy process and frequency ratio model to food vulnerable mapping and risk area estimation at Sundarban region, India. *Model Earth System Environ*. 5:1083–1102.
- Ambroise B. (1998). Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1-processus et facteurs. *Revue des sciences de l'eau*. 4:471-495.
- Amogu O., Decroix L., Yero K.S., Le Breton E., Mamadou I., Ali A., Vishel A., Bader J.C., Moussa I.B., Gautier E., Boubkraoui S., Belleudy P. (2010). Increasing river flows in Sahel? *Water*. 2(2): 170-199.
- Anaba Onana A.B., Ndam Ngoupayou J.R., Mvondo Ondo J. (2017). Analysis of crystalline bedrock aquifer productivity: case of central region in Cameroon. *Ground Sustain Development*. 5:66–74.
- Apouamoun Y.R. (2006). Hydrologie et transports solides dans un écosystème forestier anthropisé : Exemple du bassin versant de la Méfou (Centre-Sud Cameroun). *Mémoire DEA, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I Cameroun*. 69p+annexes.
- Ardoin Bardin S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau des grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. *Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II*. 330 p.

- Aziz M.A., Moniruzzaman M. Tripathi A. Hossain M.I., Ahmed S. Rahaman K.R., Rahman F., Ahmed R. (2022). Delineating Flood Zones upon Employing Synthetic Aperture Data for the 2020 Flood in Bangladesh. *Earth Systems and Environment*.
- Bader J.C., Lemoalle J., Leblanc M. (2011). Modèle hydrologique du lac Tchad. *Journal des Sciences hydrologiques*. 56(3): 411-425.
- Bagnouls S., Gaussen H. (1957). Climat biologique et leur signification. *Annuaire Géologie*. Xxvi. pp 193- 220.
- Bakoh, S.K. (2008). Analysis of the rainfall-runoff pattern of a catchment with limited data to estimate the runoff potential. Case study: The Mefou sub basin in Cameroon. *International Masters Thesis on Lund University*. TVVR08/5001.
- Bang H., Miles L., Gordon R. (2017). The irony of flood risks in African Dryland Environments: Human Security in North Cameroon. *World Journal of Engineering and Technology*. 109-121.
- Bekoa. (1994). Etudes pédologiques et géochimiques d'une couverture pédologique sur gneiss en zone forestière de l'extrême Sud-Cameroun: Relation avec la dynamique du fer. *Thèse de Doctorat 3^e cycle, Université Yaoundé I*. 160p.
- Belhassan K., Hessane M.A., Essahlaoui A. (2010). Interactions eaux de surface–eaux souterraines : bassin versant de l'Oued Mikkes (Maroc). *Hydrological Sciences Journal*. 55(8), 1371–1384.
- Benaini M., Achite M., Toubal A.K. (2018). Analyse Fréquentielle des précipitations journalières maximales annuelles dans le Nord-Est d'Algérie : Cas de Bassin versant Côtiers Algérois. *SAGREN*. Vol 02, No 1, pp 58-69.
- Benayoun R., Tergny J. (1969). Critères multiples en programmation mathématique : une solution dans le cas linéaire. *RAIRO-Operations Research-Recherche Operationally*. 3(V2), 31-56.
- Beven K. J. (1988). Hydrological response of headwater and side slope areas. *Hydrology Bulletin*. 23. pp 413-437.
- Bilong P. Eno Belinga S. M., Volkoff B. (1992). Séquence d'évolution des paysages et des sols ferrallitiques en zone forestière tropicale d'Afrique centrale. Place des sols à horizon d'argile tachetée. *Compte Rendu Académie des Sciences de Paris, Sér. II*. 314. 109-115pp.
- Bineli Ambomo E. (2009). Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Nyong. *Mémoire DEA, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I Cameroun*. 82p.
- Blöschl G. (2013). Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales. Cambridge University Press, Cambridge.
- Blöschl G., Hall J., Viglione A., Perdigão R.A., Parajka J., Merz B., ... Živković N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*. 573(7772), 108-111.
- Bodian A., Dezetter A., Dacosta H. (2012). Apport de la modélisation hydrologique pour la connaissance de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Climatologie*. 9, 109-125.

- Bodian A., Ndiaye O., Dacosta H. (2014). Evolution des Caractéristiques des Pluies Journalières dans le Bassin Versant du Fleuve Sénégal : Avant et Après Rupture. *Hydrological Sciences Journal*. DOI: 10.1080/02626667.2014.950584
- Bois P., Obled C., Zin L. (2007). Introduction au traitement des données en hydrologie. *Institut national polytechnique de Grenoble, France*. 265 p.
- Boltzmann L., Marcel B. (1902). Leçons sur la théorie des gaz. *Gauthier-Villars*. Vol. 2. 49 p.
- Bon A.F. (2008). Hydrodynamique d'un bassin en zone de socle cristallin fracturé et altéré : cas du bassin versant de l'Olézoa, Yaoundé-Cameroun. *Mémoire DEA, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I Cameroun*. 78p.
- Bon A.F., Ombolo A., Ewodo Mboudou G., Ndam Ngoupayou J. R., Ekodeck G.E. (2016b). Estimation of Hydraulic Conductivity of Soils at a Watershed-Scale Using Porchet's Method: Application in the Olezoa Waterhed, Yaoundé, Cameroon. *International Journal of Geosciences*. Pp 397 - 408.
- Bon. A.F. Ndam Ngoupayou J.R., Ewodo Mboudou G., Ekodeck G.E. (2016a). Caractérisation hydrogéologique des aquifères de socle altéré et fissuré du bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé, Cameroun. *Revue des sciences de l'eau*. Pp 149 - 166.
- Boughton W.C. (1993). A Hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. *Hydrology Water Resources Symposium*. Newctle. IEAust 1993.
- Bouroushaki S., Malczewski J. (2007). Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in Argis. *Computers & Geosciences*. 34 : 399-410.
- Boyogueno S.H., Mbessa M., Tatietsé T.T. (2012). Prediction of flow-rate of Sanaga Basin in Cameroon using HEC-HMS hydrological system: application to the Djerem sub-basin at Mbakaou. *Energy Environ. Res*. 2(1): 205-216.
- Branchet P., Cadot E., Fenet H., Sebag D., Ngounou Ngatcha B., Borrell-Estupina V., Ndam Ngoupayou J.R., Kengne I., Braun J.J., Gonzalez C. (2018). Polar pesticide contamination of an urban and peri-urban tropical watershed affected by agricultural activities (Yaoundé, Center Region, Cameroon). *Environ Science Pollution Ressources*. 25:17690–17715.
- Brans C.H. (1980). Roles of space-time models. *Quantum Theory and Gravitation*. 27p.
- Bridgman P.W. (1922). Dimensional analysis. *Yale university press*.
- Bruckmann L., Amanejieu A., Zogning Moffo M.O., Ozer P. (2019). Analyse géohistorique de l'évolution spatio-temporelle du risque d'inondation et de sa gestion dans la zone urbaine de Douala (Cameroun). *Physio-Géo*. Volume 13.
- BUCREP (2010). Rapport général du troisième recensement de la population et l'habitat du Cameroun. 50p.
- Buishand T.A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of hydrology*. 58(1-2), 11-27.
- Carbonnel J. P. (1983). Analysis of the recent climatic evolution in Burkina-Faso (Upper-Volta). *Nature Resources Forum*, 9. New-York. Pp 53-64.

- Castany G. (1998). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. *Éd. Dunod, Paris V.* 236 p.
- Chapman T. (1999). A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Process.* 13, 701–714.
- Chapman T., Maxwell A. (1996). Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments, in: Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers. *Institution of Engineers, Australia.* 539 p.
- Charlier J.-B., Lachassagne P., Ladouche B., Cattan P., Moussa R., Voltz M. (2011). Structure and hydrogeological functioning of an insular tropical humid andesitic volcanic watershed: A multi-disciplinary experimental approach. *Journal of Hydrology.* 398 : 155-170.
- Cheo A.E., Voigt H., Mbua R.L. (2013). Vulnerability of water resources in northern Cameroon in the context of climate change. *Environ Earth Sciences.* 70:1211–1217.
- Chow C.C., White J.A., Ritt J., Kopell N. (1998). Frequency control in synchronized networks of inhibitory neurons. *Journal of computational neuroscience.* 5(4): 407-420.
- Cohen J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement.* 20(1). pp. 37–46.
- Colmet-Daage A., Cécile L., Borrell-Estupina V., Servat E., Gomez E.S., Ricci S. (2017). Climate change impacts on extreme rainfalls, discharges and floods in Mediterranean catchments, in: *IAHS 2017 Scientific Assembly.*
- Crawford N.H., Linsley R.K. (1966). Digital Simulation in Hydrology' Stanford Watershed Model 4.
- CRED (2018). Natural disasters in 2018: Lower mortality, higher cost, CRED crunch. N°29: 2018, Pp 5-6.
- Dacosta H. (1989). Précipitation et écoulements sur le Bassin de la Casamance. *Thèse de 3ème cycle, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh AntaDiop de Dakar.* 278 p.
- Das S. (2019). Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sensing Application: Society and Environnement.* 14 : 60-74.
- Das S. (2020). Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Application: Society and Environnement.* 20 : 100379.
- Das S., Gupta A. (2021). Multi-criteria decision based geospatial mapping of flood susceptibility and temporal hydro-geomorphic changes in the Subarnarekha basin, India. *Geosciences Fontiers.* 12 : 101206.
- Dassou E.F. (2019). Impact of climate variability on the hydrological response of the Upper Benue watershed (North Cameroon). *Ph.D thesis, University of Maroua, Cameroon.*
- Dassou E.F., Ombolo A., Ali, M., Chouto S., Bineli E., Mbele Abbo F. (2019). Rainfall-runoff modeling on Upper Benue watershed using GR2M. Fifth Workshop on Water Ressources in Developing Countries: Hydroclimate Modeling And Analysis Tools. Trieste, Italy. 27 Mayè07 June 2019 (Poster).

- Dassou E.F., Ombolo A., Chouto S., Ewodo Mboudou G., Abate Essi J.M., Bineli E. (2016). Trends and geostatistical interpolation of spatio-temporal variability of precipitation in Northern Cameroon. *Atmosphere Journal Climate Change*. 5:229–244.
- Degiorgis M., Gnecco G., Gorni S., Roth G., Sanguineti M., Celeste Taramasso A. (2012). Classifiers for the detection of flood prone areas using remote sensed elevation data. *Journal of Hydrology*. 470-471. 302-315.
- Descroix L., Diongue Niang A., Dacosta H., Panthou G., Quantin G. (2013). Evolution des pluies extremes et recrudescence crues au Sahel. *Climatologie*. 10 :37-49.
- Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J.C., Albergel J., Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi, R., Diedhiou A., Lebreton E., Mamadou I., Sighomnou D. (2009). Spatio-Temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: a synthesis. *Journal of Hydrology*. 375(1-2), 90–102.
- Di-Baldassare G., Montanari A., Lins H., Koutsoyiannis D., Brandimarte L., Blöschl G. (2010). Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*. 37: L22402.
- Dingman S.L. (2002). *Physical Hydrology. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River*. 646 p.
- Dixon B. (2004). Prediction of groundwater vulnerability using an integrated GIS-based neuro-fuzzy techniques. *Journal of Hydrology*. 4(309): 17-38.
- Djeuda Tchapnga H.B., Tanawa E., Ngnikam E. (2001). L'eau au Cameroun. *Edition Presses Universitaires de Yaoundé I Tome I*. 345p.
- Djeuda Tchapnga H.B., Tanawa E., Temgoua E., Siakeu J., Ngo Massana B. (1999). Modèles de circulation, mécanismes de recharge et temps de séjour des eaux souterraines des altérites en milieu cristallin : cas du bassin versant de l'Anga'a, Yaoundé – Cameroun. *Collection GÉOCAM, 2/1999, Éd. Sci. : VICAT J.P., BILONG P., Éd. Presses. Université Yaoundé I*. pp 117 – 126.
- Dunne T. (1978). Field studies of hillslope flow processes. *Hillslope hydrology. J. M. Kirkly Ed. New York*.
- Dzana J.G., Amougou J.A., Onana V.D.P., Ngaba M.Q. (2004). Modélisation spatiale des facteurs d'aggravation des écoulements liquides à Yaoundé. Application au bassin versant d'Ake. 77-91, in *Mosella 2004 - Tome XXIX- N°3-4*.
- Dzana J.G., Ndam Ngoupayou J.R., Tchawa P. (2011). The Sanaga discharge at the Edea catchment outlet (Cameroon): an example of hydrologic response of a tropical rain-fed river system to changes in precipitation and groundwater inputs and to flow regulation. *River Resource Applied*. 27:754–771.
- Ebodé V.B. (2022). Variabilité hydroclimatique en Afrique centrale et occidentale : entre analyse des fluctuations observées, modélisation hydroclimatique prédictive et recherche des facteurs explicatifs. *Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I*. 336p+annexes.
- Ebodé V.B., Braun J.J., Nnomo B.N., Mahé G., Nkiaka E., Riotte J. (2022). Impact of Rainfall Variability and Land Use Change on River Discharge in South Cameroon. *Water*. 14, 941.

- Ebodé V.B., Dzana, J.G., Nkiaka E., Nnomo B.N., Braun J.J., Riotte J. (2022). Effects of climate and anthropogenic changes on current and future variability in flows in the So'o River Basin (south of Cameroon). *Hydrology Research*. 53(9) : 1203-1220.
- Ebodé V.B., Mahé G., Dzana J.G., Amougou J.A. (2020). Anthropization and climate change: impact on the discharges of forest watersheds in Central Africa. *Water*. 12:1-24.
- Ekodeck G.E. (1984). Altération des roches métamorphiques du Sud-Cameroun et aspects géotechniques. *Thèse de Doctorat d'Etat, Université Grenoble*. 368 p.
- Ekodeck G.E. et Kamgang Kabayene Beyala V. (2002). L'Altérologie normative et ses applications. Une expression particulière de la pétrologie des roches aluminosilicatées du point de vue de leur évolution supergène. *Presse, Université de Yaoundé*. 231 p.
- Elkhrachy I. (2015). Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *National Authority for Remote Sensing and Space Sciences the Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 18(2) : 261-278.
- Ewane Ewane B. (2021). Land use land cover change and the resilience of social-ecological systems in a sub-region in South west Cameroon. *Environmental Monitoring Assessment*. 193: 338.
- Ewodo Mboudou G., Ombolo A., Fouepe Takounjou A., Bon A.F., Ekodeck G.E. (2012). Etude des Paramètres hydrauliques des aquifères de sub-surface du bassin versant de la Mingosso, région de Yaoundé. *Revue CAMES-Série A*. 13, pp. 123-127.
- Faty A., Kouame F., Fall A.N., Kane A. (2019). Land use dynamics in the context of variations in hydrological regimes in the upper Senegal River basin. *International Journal of Hydrology*. 3(3):185–192.
- Foody G.M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*. 80(1) 185–201.
- Fotso Kamga G. A., Bitjoka L., Akram T., Mengue Mbom A., Rameez Naqvi S., Bouroubi Y. (2021). Advancements in satellite image classification: methodologies, techniques, approaches and applications. *International Journal of Remote Sensing*. 42(20), 7662-7722.
- Fouépé Takounjou A.I., Ndam Ngoupayou J.R., Riotte J., Takem G.E., Mafany G., Maréchal J.C., Ekodeck G.E. (2010). Estimation of groundwater recharge of shallow aquifer on humid environment in Yaoundé, Cameroon using hybrid water-fluctuation and hydro-chemistry methods. *Environ Earth Sciences*. 64:107–118. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0822-x>
- Franqueville A. (1984). Croissance démographique et immigration à Yaoundé. *Cah. O.-m*. 32, Pp 321–354.
- Gardner L.A. (1969). On detecting changes in the mean of normal variates. *The Annals of Mathematical Statistics*. 40(1), 116-126.
- Generino P., Sony E., Proceso L.F. (2014). Analytic hierarchy process (AHP) in spatial modeling for floodplain risk assessment. *International Journal Mach Learn Computer*. 4(5): 450.
- Geoffrion A.M. (1972). Generalized benders decomposition. *Journal of optimization theory and applications*. 10(4), 237-260.

- GIEC (2021). Bilan 2021 des changements climatiques. Ecart entre les besoins et les perspectives en matière de réduction des émissions et nouveaux engagements nationaux en matière de climat, combinés à d'autres mesures d'atténuation.
- Gleick P.H., Palaniappan M. (2010). Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 107(25), 11155-11162.
- Gosain A.K., Zochowski C.G., Cortes W. (2009). Refinements of tissue expansion for pediatric forehead reconstruction: a 13-year experience. *Plast. Reconstr. Surg.* 124, 1559–1570.
- Gutman G., Byrnes R., Masek J., Covington S., Justice C., Franks S., Headley R. (2008). Towards monitoring Land-cover and land-use changes at a global scale: The global land survey. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 74(1), 6–10.
- Hammami S., Zouhri L., Souissi D., Souei A., Zghibi A., Marzougui A., Dlala M. (2019). Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*. 12:653.
- Hansen M., Loveland T. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 122 :66–74.
- Hewlett J-P., Hibbert A.-R. (1967). Factors affecting the response of small watershed to precipitation in humid area in forest hydrology. *Sopper W; E and Lull H. W. Ed. Pergman*.
- Hexagon (2014). Erdas Imagine 2015 (64 bit). Version: 15. Stockholm: Hexagon AB.
- Holman I.P., Hollis J.M., Bramley M.E., Thompson T.R.E. (2003). The contribution of soil structural degradation to catchment flooding: A preliminary investigation of the 2000 floods in England and Wales. *Hydrological Earth System Sciences*. 7(5), 754-765.
- Ikounga M. (1978). Analyse fine du mécanisme de la formation du ruissellement sur sols ferrallitiques sous forêt (Région de Yaoundé-Cameroun). *ORSTOM, Paris*.
- IRAD (2008). Zone agro écologiques du Cameroun. www.irad-cameroon.org juin 2008.
- Iroume J.Y.-A., Onguéné R., Djanna Koffi F., Colmet-Daage A., Stieglitz T., Essoh Sone W., Bogning S., Olinga Olinga J.M., Ntchantcho R., Ntonga J.-C. (2022). The 21st August 2020 Flood in Douala (Cameroon) : A Major Urban Flood Investigated with 2D HEC-RAS Modeling. *Water*. 14, 1768.
- Islam K., Jashimuddin M., Nath B., Nath T. K. (2018). Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 21(1), 37–47.
- Israel E., David A.K., Omolara E.G. (2020). Spatio-temporal variation and trends of long-term meteorological variables in Nigeria. *Arabian Journal of Geosciences*. 13:1290.
- Jaafari A., Najaf A., Pourghasemi H.R., Rezaeian J., Sattarian A. (2014). GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environ Sciences Technology*. 11(4): 909-926.
- Johnstone C., Bedaso Z.K., Ekberg M. (2022). Characterizing surface water and groundwater interaction for sustainable water resources management in southwestern Ohio. *Sustainable Water Resources Management*. 8:10.

- Jourdan C. (2019). Approche mixte instrumentation-modélisation hydrologique multi-échelle d'un bassin tropical peu jaugé soumis à des changements d'occupation des sols : cas du bassin de la Méfou (Yaoundé, Cameroun). *Thèse de Doctorat/Ph.D, Université Montpellier*. 347p+annexes.
- Kamgang Kabayene Beyala V. (1987). Altération supergène des roches grenatifères de la région de Yaoundé (Cameroun) : Pétrologie- Minéralogie. *Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université de Poitiers*. 70p.
- Kamagaté B., Seguis L., Favreau G., Seidel J. L., Descloitres M., Affaton P. (2006). Processus et bilan des flux hydriques d'un bassin versant de milieu tropical de socle au Benin Donga, Haut Ouémé). *Compte Rendu Géoscience*, 339 : 418-429.
- Kazakis N., Kougias I., Patsialis T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and analytical hierarchy process: application in Rhodope-Evros region, Greece. *Sciences of Total Environ*. 538:555-563.
- Kengne Signe E.B., Hamandjoda O., Fanyep N.A., Gubong Takam C.B. (2017). Modeling of Rainfall-Runoff by Artificial Neural Network for Micro Hydro Power Plant: A Case Study in Cameroon. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 6, Issue 8.
- Kengni L., Mboussop A.N., Njueya Kopa A., Tankou C.M., Tematio P. (2019). Rainfall variability on the southern slope of the Bambouto mountain (West-Cameroon) and impact on the crop cultivation calendar. *Journal of African Earth Sciences*. 164-171.
- Koé Miabe D.M. (2013). Hydrologie et qualité des eaux du bassin versant de l'Olézoa (Yaoundé-Cameroun). *Mémoire Master, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I*. 72p+annexes.
- Kohoum Nfockgo A. (2005). Transports fluviaux de matières particulaires et érosion mécanique dans un écosystème tropical humide et forestier : exemple du réseau du Nyong amont (Sud-Cameroun). *Mémoire DEA. Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I*. 72p+annexes.
- Kouassy Kalédjé P.A. (2021). Variabilité hydroclimatologique et qualité des eaux dans un bassin aurifère en exploitation : cas du bassin versant de la Kadey (Est-Cameroun). *Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I*. 200p+annexes.
- Kouassy Kalédjé P.S. (2016). Analysis of climate variability and its influence on the hydrological response of the catchment area of Kadey (East Cameroon). *International Journal of Geosciences*. 2016, 7, 539-547.
- Kouassy Kalédjé P.S., Ndam Ngoupayou J.R., Fouépé Takounjou A., Zebsa M, Mvondo Ondo J. (2019). Floods of 18 and 19 November 2016 in Batouri (East Cameroon): Interpretation of the Hydro-Meteorological Parameters and Historical Context of the Post-Event Survey Episode. Hindawi. *The Scientific World Journal*. vol. 2019, Article ID 3814962, 7.
- Kouassy Kalédjé P.S., Noudja T., Ngoupayou J.R., Rakotondrabe F. (2022). Estimating and analyzing extreme daily rain greater than a equatorial climate threshold: the case of East-Cameroon. *Modeling Earth Systems and Environment*. 1-11.

- Koungbanane D., Zahiri P.E., Totin Vodounon H.S., Amoussou E., Lare L.Y., Djan H., Koubodana N. (2020). Analyse fréquentielle et détermination des seuils pluvio-hydrologiques de risques d'inondation dans le bassin-versant de l'Oti au Togo. *Afrique SCIENCE*. 17(1) 73 – 88.
- Kpoumié A. (2015). Hydroclimatologie et transports solides dans un écosystème tropical anthropisé d'Afrique Centrale : cas du bassin versant de la Sanaga au Cameroun. *Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I*. 245 pages + annexes.
- Kpoumié A., Ndam Ngoupayou J.R., Rusu E., Sfica L., Ichim P., Ekodeck G.E. (2012). Spatiotemporal evolution of rainfall regimes in the Sanaga basin-Cameroon in a deficit context. *Present Environment and Sustainable Development Journal*. Volume 6, N°2, 55-68.
- Kpoumié A., Ngouh A.N., Mfonka Z., Nsangou D., Bustillo V., Ndam Ngoupayou J.R., Ekodeck G.E. (2022). Spatio-temporal assessing rainfall and dam impacts on surface runoff in the Sanaga river basin (transition tropical zone in central part of Cameroon). *Sustainable Water Resources Management*. 8:26.
- Lachassagne P., Dewandel B., Wyns R. (2015). Le modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle altéré et ses applications pratiques. In Actes de la Conférences « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles ». *20èmes Journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. 11-13 Juin 2015, Auditorium ICES, La Roche-sur-Yon, Vendée, France*. 11 p.
- Lachassagne P., Wyns R., Dewandel B. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*. 10 : 1365-3121.
- Lang C., Gille E. (2007). Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'été. *Norois*. 201(4), 31-43.
- Lang M., Townsend P., Kasischke E. (2008). Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. *Remote Sensing of Environment*. 112(10):3898-3907.
- Laraque A., Castellanos B., Steiger J., Lòpez J.L., Pandi A., Rodriguez M., Rosales J., Adèle G., Perez J., Lagane C. (2013). A comparison of the suspended and dissolved matter dynamics of two large inter-tropical rivers draining into the Atlantic Ocean: the Congo and the Orinoco. *Hydrological Process*. Volume 27, Issue 15, 2153–2170. DOI : 10.1002/hyp.9776
- Leclerc B. (1984). Efficient and binary consensus functions on transitively valued relations. *Mathematical Social Sciences*. 8(1), 45-61.
- Leroy B., Cirotteau A. (1956). Carte de reconnaissance du Cameroun, feuille n° NA 32 NE-E 22.
- Letouzey R. (1969). Etude phytogéographique du Cameroun. *Paris*. 511 p.
- Leumbe Leumbe O., Bitom D., Mamdem L., Tiki D., Ibrahim A. (2015). Cartographie des zones à risques d'inondation en zone soudano-sahélienne : cas de Maga et ses environs dans la région extrême-nord Cameroun. *Afrique SCIENCE*. 11(3). 45 - 61.

- Lewis P., Gómez-Dans J., Kaminski T., Settle J., Quaife T., Gobron N., Styles J., Berger M. (2012). An Earth Observation Land Data Assimilation System (EO-LDAS). *Remote Sensing of Environment*. 120, 219–235.
- L'Homme J. (2006). Modélisation des inondations en milieu urbain : approches unidimensionnelles, bidimensionnelle et macroscopique. *Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier*. 298 p.
- Li K.Y., Coe M.T., Ramankutty N., De Jong R. (2007). Modeling the hydrological impact of land-use change in west Africa. *Journal of Hydrology*. 337 :258-268.
- Liéno G. (2007). Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau et le transport des matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs des unités climatiques du Cameroun. *Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I*. 405 p + annexes.
- Liéno G., Mahé G., Paturol J. E., Servat E., Sighomnou D., Ekodeck G.E., Dezetter A., Dieulin C. (2008). Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise : un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale ? *Journal des Sciences Hydrologiques*. 53 (4), 789 – 801.
- Liéno G., Sighomnou D., Sigha Nkamdjou L., Malou R., Saos J.L. (1999b). Caractérisation des relations eaux de surface-eaux souterraines en milieu tropical sec : exemple du bassin de la Nema (Sine Saloum, Sénégal). *Sud Sciences et Technologies*. N°3.
- Liéno G., Sighomnou D., Sigha-Nkamdjou L. (1999a). Impact de la sécheresse sur les ressources en eau de la cuvette du Lac Tchad en période d'étiage : exemple des apports du fleuve Logone. *Coll. GEOCAM n°2, Presses Universitaires de Yaoundé*. Pp 89-97.
- Lodoun T., Giannini A., Sibiry-Traore P., Some L. Sanon M., Vaksman M., Millogo-Rasolodimby J. (2013). Changes in seasonal descriptors of precipitation in Burkina Faso associated with late 20th century drought and recovery in West Africa. *Environmental Development*. Volume 5, 96–108.
- López-Serrano P.M., Corral-Rivas J.J., Díaz-Varela R.A., Álvarez-González J.G., López-Sánchez, C.A. (2016). Evaluation of radiometric and atmospheric correction algorithms for aboveground forest biomass estimation using landsat 5 TM data. *Remote sensing*. 8(5), 1-19.
- Loudière D., Gourbesville P. (2020). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020, *La Houille Blanche*, 106:3, 76-81, DOI:10.1051/lhb/2020024
- Magdalena R., Agnoletti M., Alaoui A., Bathurst J.C., Bodner G., Borga M., Chaplot V., ... Bleischl G. (2017). Land use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Resource Research*. 53.
- Mahé G. (2006). Variabilité pluie-débit en Afrique de l'ouest et centrale au 20ème siècle : changements hydroclimatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. *Habilitation à diriger les recherches, Université de Montpellier 2, France*. 160p.
- Mahé G., Diello P., Paturol J. E., Barbier B., Karambiri H., Dezetter A., ... Rouche N. (2010). Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina Faso. *Sécheresse*. 21(4), 330-332.

- Mahé G., Liéno G., Bamba F., Paturol J. E., Adeaga O., Descroix L., ... Clanet J.C. (2011). Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années. *In Hydroclimatology variability and change, Proceedings of symposium held during IUGG*. Vol. 344, pp. 131-7.
- Mahé G., Liéno G., Descroix L., Bamba F., Paturol J. E., Laraque A., ... Khomsi K. (2013). The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment. *Hydrological Process*. 27(15), 2105-2114.
- Mahé G., Paturol J.E. (2009). 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Géoscience*, 341(7), 538-546.
- Mallinis G., Gitas I.Z., Giannakopoulos V., Maris F., Tsakiri-Strati M. (2011). An object-based approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. *International Journal of Digital Earth*. pp 1-13.
- Mason D.C., Davenport I.J., Neal J.C., Schumann G.J.P., Bates P.D. (2012). Near Real-Time Flood Detection in Urban and Rural Areas Using High-Resolution Synthetic Aperture Radar Images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. 50(8): 3041-3052.
- Mena M.S., Tchamwa P., Amougou J.A., Tchotsoua M. (2016). Les changements climatiques à travers la modification du régime pluviométrique dans la région de Kribi (1935 – 2006). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*. 28 : 389 – 407.
- Messanga P.A., Efon B., Ntamac, D., Tatiéte T.T. (2019). Multicriterial analysis and choice of hydrological models in tropical zone: application to the Sanaga Watershed in Cameroon. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 10: 505-520.
- Metang V., Nomo Negue E., Ganno S., Takodjou Wambo J.D., Ewolo Tene M.A., Teda Soh A.C., Fossi D.H., Mbakam Nkanga M.D., Tchameni R., Nkoumbou C., Nzenti J.P. (2022). Anatexis of metadiorite from the Yaoundé area, Central African Orogenic Belt in Cameroon: implications on the genesis of in-source granodiorite leucosomes. *Arabian Journal of Geosciences*. 15:359.
- Meylan P., Favre A-C., Musy A. (2008). Hydrologie Fréquentielle, Science prédictive. *Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes*. 169p.
- Mfonka Z., Ndam Ngoupayou J.R., Kpoumie A., Ndjigui P.-D., Zammouri M., Ngouh A.N., Mouncherou O.F., Mfochivé O.F., Rakotondrabe F. (2019) Hydrodynamic and groundwater vulnerability assessment of the shallow aquifer of the Fouban locality (Bamoun plateau, Western-Cameroon). *Arabian Journal of Geosciences*. 12:165.
- MINAT/DPC (2017). Protection Civile au Cameroun 2017. *Direction de la Protection Civile, Cameroun*. 43p.
- MINEE (2009). Plan d'action national de gestion intégrée des ressources en eau (PANGIRE) : état des lieux du secteur eau et environnement, décembre 2009. 235p.
- MINEPDED/CARFAD (2019). Etat de l'environnement au Cameroun. 380p.
- Moffo Zogning M. (2017). Contribution des systèmes d'information géographique pour la cartographie des zones à risques inondables à Yaoundé : application au bassin versant du Mfoundi. *Mémoire de Master, Université de Liège*. 55 p+annexes.

- Moffo Zogning M., Tsalefac M., Iaçu C. (2011). Floods risks in the Mfoundi upstream drainage basin in Yaoundé: a response to climatic modifications or to human impacts? *Present Environment & Sustainable Development*. 5.
- Mounirou L., Yacouba Y., Karambiri H., Paturel J.E., Mahé G. (2012). Measure runoff by plots at different scales: understanding and analyzing the source of variation. *Comptes rendus Géosciences*. 344:441-448.
- Moussa R., Chahinian N. (2009). Comparison of different multi-objective calibration criteria using a conceptual rainfall-runoff model of flood events. *Hydrology Earth System Sciences*. 13, 519–535.
- Mpesse J.E. (1999). Contribution à l'étude pétrostructurale des formations métamorphiques de la région de Yaoundé et de la formation de la géométrie de sa tectonique tangentielle. *Thèse de Doctorat 3^e cycle, Université de Yaoundé I*. 148p.
- Munda G. (2006). A NAIADÉ based approach for sustainability benchmarking. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 6(1-2), 65-78.
- Musy A. (2013). Hydrologie. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne*.
- Mvondo H. (2003). Analyse structurale et pétrochimique des roches de la région de Yaoundé Nord ; argument contribuant à la connaissance de l'évolution géotectonique de la chaîne panafricaine du Cameroun. *Thèse de Doctorat Ph.D, Université de Yaoundé I*. 188p.
- Mvondo H., Den Brok S.W.J., Mvondo Ondoa J. (2003). Evidence for symmetric extension and exhumation of the Yaoundé Nappe (Pan-African fold belt), Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*. 36:215-231.
- Mvondo H., Owona S., Mvondo Ondoa J., Essono J. (2007). Tectonic evolution of the Yaoundé segment of the Neoproterozoic Central Orogenic Belt in southern Cameroun. *Canadian Journal of Earth Science*. 44, 433-444.
- Mvondo Ondoa J. (2009). Caractérisation des événements tectoniques dans le domaine Sud de la Chaîne Panafricaine au Cameroun ; styles tectoniques et géochronologie des séries de Yaoundé et de Bafia. *Thèse de Doctorat Ph.D. Université Yaoundé I*. 162p.
- Ndam Ngoupayou J. R. (1997). Bilans hydrogéochimiques sous forêt humide en Afrique tropicale : du bassin expérimental de Nsimi-Zoétéélé aux réseaux hydrographiques du Nyong et de la Sanaga (Sud-Cameroun). *Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France*. 260p.
- Ndam Ngoupayou J. R., Braun J.J., Meybeck M., Bedimo Bedimo J.P. (1998). Réactualisation des données hydroclimatiques des bassins fluviaux de la Sanaga et du Nyong (Sud Cameroun). In Vicat J.P. et Bilong P., Coll. Géocam. *Press. Université de Yaoundé I*. Pp. 51-64
- Ndam Ngoupayou J.R., Bon A., Ewodo Mboudou G., Ngouh A.N., Ekodeck G.E. (2019). Hydrogeological Characteristics of Shallow Hard Rock Aquifers in Yaoundé (Cameroon, Central Africa). *In Intech Open, the world's leading publisher of Open Access books*. 17 p.

- Ndemtsoa Nouna C., (2009). Hydrologie et transport des matières solides dans un bassin peu anthropisé : exemple du So'o. *Mémoire DEA, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I*. 72p+annexes.
- Ndje Mbile J.G. (2013). Hydrologie et transfère de la matière dans la partie amont du bassin versant de la Mefou au CRH à Nkolbisson. *Mémoire Master, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I*. 78p+annexes.
- Ndjigui P.-D., Badinane M.F.B., Nyeck B., Nandjip H.P.K, Bilong P. (2013). Mineralogical and geochemical features of the coarse saprolite developed on orthogneiss in the south Cameroun. *Journal of African Earth Sciences*. 79:125–142.
- Ndongo B., Lako Mbouendeu S., Awe Tirmou A., Ntankouo Njila R., Moukouri Dalla J.D. (2015). Tendances pluviométriques et impact de la marée sur le drainage en zone d'estuaire : cas du Wouri au Cameroun. *Afrique Science*. 11(2) :173-182.
- Ngako V., Affaton P., Nnange J.M., Njanko T. (2003). Pan-African tectonic evolution in the central and the southern Cameroon: transgression during sinistral shear movements. *Journal of African Earth Sciences*. 36:207-214.
- Ngon Ngon G.F., Yongue Fouateu R., Bitom D.L., Bilong P. (2009). A geological study of clayey laterite and clayey hydromorphic materiel of the region of Yaoundé (Cameroon): a prerequisite for local materiel promotion. *Journal of African Earth Sciences*. 55:69-78.
- Ngoundoum Fomouo D. (2012). Hydrologie et qualité des eaux du bassin versant élémentaire d'Odza. *Mémoire Master, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I*. 77p + annexes.
- Ngounou Ngatcha B., Mudry J., Sigha Nkamdjou L., Njitchoua R., Naah E. (2005). Climate variability and impacts on an alluvial aquifer in semi-arid climate, the Logone-Chari plain (South of Lake Chad). In: *Proceedings of symposium S6 held during the seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu. Brazil. IAHS Publ.* 295, 94–100.
- Nguemou Tchado D. (2008). Hydrologie et transports solides dans un écosystème forestier urbanisé : Exemple du bassin versant du Mfoundi au centre sud du Cameroun. *Mémoire DEA, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I*. 83p + annexes.
- Nguimalet C.-R., Orange D. (2019). Caractérisation de la baisse hydrologique actuelle de la rivière Oubangui à Bangui, République Centrafricaine. *La Houille Blanche*. n° 1. Pp 1-7.
- Niasse M., Afouda A., Amani A. (2004). Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification –éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. *Union Mondiale pour la Nature (UICN)*. 82 p.
- Nicholson S.E. (1983). Sub-Saharan rainfall in the years 1976–80: evidence of continued drought. *Monthly weather review*. 111(8), 1646-1654.
- Nonki R.M., Lenouo A., Lennard C.J., Tchawoua C. (2020). Assessing climate change impacts on water resources in the Benue River Basin, Northern Cameroon. *Environmental Earth Sciences*. 78:606.

- Noufé D., Lidon B., Mahé G., Servat E., Brou Y.T., Koli Bi Z., Chaléard J.L. (2011). Variabilité climatique et production de maïs en culture pluviale dans l'est Ivoirien. *Hydrological Sciences Journal*. 56(1), 152–167.
- Noufé F., Coulibaly K., Kambou A., Traoré S., Tankoano H. (2018). Analyses agro-économique des technologies de maintien et d'amélioration de la fertilité des sols dans la zone cotonnière de Dano (Burkina Faso). *Tropicultura*. 36(4), 748-761.
- Nteuga Njike S. (2012). Fonctionnement hydrologique et qualité des eaux du bassin versant du Nkié à Yaoundé (Sud-Cameroun). *Mémoire Master, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I*. 64p+annexes.
- Nzenti J.P., Barbey P., Macaudier E.J., Soba D. (1988). Origin and evolution of the late precambrien high grade Yaoundé gneiss (Cameroon). *Precambrian. Res.* 38 : 91-109.
- Nzenti J.P., Njanko T., Njiosseu E.L.T., Tchoua M. (1998). Les domaines granulitiques de la chaîne panafricaine Nord-Equatoriale au Cameroun. *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris*. Tome 315, série II, 209-215.
- Olivry J.-C. (1986). Fleuves et rivières du Cameroun. Monographies hydrologiques. *MESRES/ORSTOM*. N°. 9, 733p.
- OMM (2020). Rapport de l'Organisation Météorologique Mondiale sur le Changement climatique en 2020 : des indicateurs et des effets de plus en plus alarmants publié le 19 Avril 2021.
- OMM. (1990). Guide des pratiques climatologiques, Publication n° 100, OMM, Genève.
- OMS et ONU-Habitat (2010). El derecho al agua. Folleto Informativo. (35), 7-8.
- Onguéné Mala (1993). Différenciation pédologique dans la région de Yaoundé (Cameroun) : Transformation d'un sol rouge ferrallitique en sol à horizon jaune en relation avec l'évolution du modelé. *Thèse de Doctorat Université de Paris VI*. 254p.
- Ozcan O., Aksu G.A., Erten E., Musaoglu N., Cetin M. (2019). Degradation monitoring in Silvo-pastoral Systems: A case study of the Mediterranean region of Turkey. *Advances in Space Research*. 63(1), 172-189.
- Ozkan P.S., Tarhan C. (2016). Detection of flood hazard in urban areas using GIS: Izmir case. *Procedia Technology*. 22, 373 - 381.
- Paelinck J.H. (1976). Qualitative multiple criteria analysis, environmental protection and multiregional development. *In Papers of the Regional Science Association Springer-Verlag*. Vol. 36, No. 1, 59-74.
- Paturel J.E., Boubacar I., L'Aour A., Mahé G. (2010a). Analyses de grilles pluviométriques et principaux traits des changements survenus au 20ème siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Hydrol Sci J*. 55(8):1281–1288.
- Paturel J.-E., Boubacar I., L'Aour-Cres A., Mahé G. (2010b). Note de recherche : Grilles mensuelles de pluie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Journal of Water Sciences*. 23, 325–333.
- Penaye J., Toteu S.F., Van Scmus W.R., Nzenti J.P. (1993). U-Pb and Sm-Nd preliminary geochronologic data on the Yaoundé series, Cameroon: reinterpretation of the granulic rocks

- as the suture of a collision in the ‘Centrafrican’ belt, *Compte Rendu Academie de Sciences Paris*. 317 :789-794.
- Perrin C. (2000). Vers une amélioration d’un modèle global pluie-débit.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*. 279, 275–289.
- Pettitt A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. 28(2), 126-135.
- Popovici R., Erwin A., Ma Z., Prokopy L.S., Zanotti L., Delgado E.F.B., Larrea G.R.A. (2021). Outsourcing governance in Peru’s integrated water resources management. *Land Use Policy*. 101, 105105.
- Porchet M. (1931). Hydrodynamique des puits. *Annuaire du Génie Rural*, fasc. 60 p.
- Poussin J.K., Botzen W.W., Aerts J.C. (2014). Factors of influence on flood damage mitigation behavior by households. *Environ Sciences Pollution*. 40:69-77.
- Rahman M., Ningsheng C., Mahmud G.I., Islam M.M., Pourghasemi H.R., Ahmad H., Habumugisha M.J., Washakh R.M.A., Alam M., Liu E., Han Z., Ni H., Shufeng T., Ashraf Dewan A. (2021). Flooding and its relationship with land cover change, population growth, and road density. *Geoscience Fontiers*. 12(2021) 101224.
- Rahmati O., Pourghasemi H.R., Zeinivand H. (2016). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocartography International*.
- Razandi Y., Pourghasemi H.R., Neisani N.S., Rahmati O. (2015). Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Sciences Information*. 8(4):867-883.
- Recep C., Veysel A. (2020). Evaluation of hydrological and hydrogeological characteristics affecting the groundwater potential of Harran Basin. *Arabian Journal of Geosciences*. 13:186.
- Roy B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d’informatique et de recherche opérationnelle*. 2(8), 57-75.
- Rushton K., Eilers V., Carter R. (2006). Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. *Journal of Hydrology*. 318(1-4):379-399.
- Saaty T.L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill International. 188p.
- Sado-Inamura Y., Fukushi K. (2019). Empirical analysis of flood risk perception using historical data in Tokyo. *Land Use Policy*. 82 (March), 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.031>.
- Safeeq M., Fares A. (2012). Hydrologic effect of groundwater development in a small mountainous tropical watershed. *Journal of Hydrology*. 428:51–67.
- Samanta R.K., Bhunla G.S., Shit P.K., Pourghasemi H.R. (2018). Flood susceptibility mapping using geospatial frequency ratio technique: a case study of Subarnarekha River Basin. *Model Earth System Environ, India*.

- Samba G., Nganga D. (2011). Rainfall variability in Congo-Brazzaville: 1932–2007. *International Journal of Climatology*. 32(6):854–873.
- Sarkar D., Mondal P. (2020). Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo Bangladesh Barind region. *Applied Water Science*.
- Savané I. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Bulletin Sécheresse*. 12 (4): 231-237.
- Schärfling A. (1985). Décider sur plusieurs critères, Presses Polytechniques Romandes. 304 pages.
- Schumann G.J.P., Neal J.C., Mason D.C., Bates P.D. (2011). The accuracy of sequential aerial photography and SAR data for observing urban flood dynamics, a case study of the UK summer 2007 floods. *Remote Sensing of Environment*. 115(10) : 2536-2546.
- Serra P., Pons X., Sauri D. (2003). Post-classification change detection with data from different sensors: some accuracy considerations. *International Journal of Remote Sensing*. 24(16) : 3311–3340.
- Seyed A.N., Mehdi V., Hossein H., Biswajeet P., Seyed J.A. (2020). Water resources management through flood spreading project suitability mapping using frequency ratio, k-nearest neighbours, and random forest algorithms. *Natural Resources Research*. Vol. 29, No. 3.
- Shaban A., Khawlie M., Abdallah C. (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeological Journal*. 14(4):433-443.
- Shaban A., Khawlie M., Kheir R.B., Abdallah C. (2001). Assessment of road instability along a typical mountainous road using GIS and aerial photos, Lebanon-eastern Mediterranean. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 1 ; 60(2):93-101.
- Sigha-Nkamdjou L. (1994). Fonctionnement hydrochimique d'un écosystème forestier de l'Afrique Centrale : La Ngoko à Moloundou (Sud-Est du Cameroun). *Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud (Orsay)*. Travaux et Documents Microfichés 111, ed. Orstom, 378 p.
- Sighomnou D. (2004). Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspective d'évolution des ressources en eau. *Thèse de Doctorat d'Etat Université de Yaoundé I*. 289 p + annexes.
- Sighomnou D., Sigha-Nkamdjou L., Liéno G., Dezetter A., Mahé G., Servat E., Paturel J.E., Olivry J.C., Tchoua F., Ekodeck G.E. (2007). Impacts des fluctuations climatiques sur le régime des écoulements du fleuve Sanaga au Cameroun, perspectives pour le XXIème siècle.
- Sophocleous M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeological Journal*. 10(1):52–67.
- Soro G.E., Anouman D.G.L., BI T.G., Srohorou B., Savane I. (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême nord-ouest de la Cote d'Ivoire. *LARHYSS Journal*. P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (18).
- Soro T.D., Kouakou-Djè B., Kouassi-Ahoussi E., Soro G., Kouassi A.M., Kouadio-Konan E., Oga-Yéi M.S., Soro N. (2013). Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *VertigO - la revue électronique*

en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 13 N°3, mis en ligne le 30 décembre 2013, consulté le 03 mars 2014. DOI:10.4000/vertigo.14468.

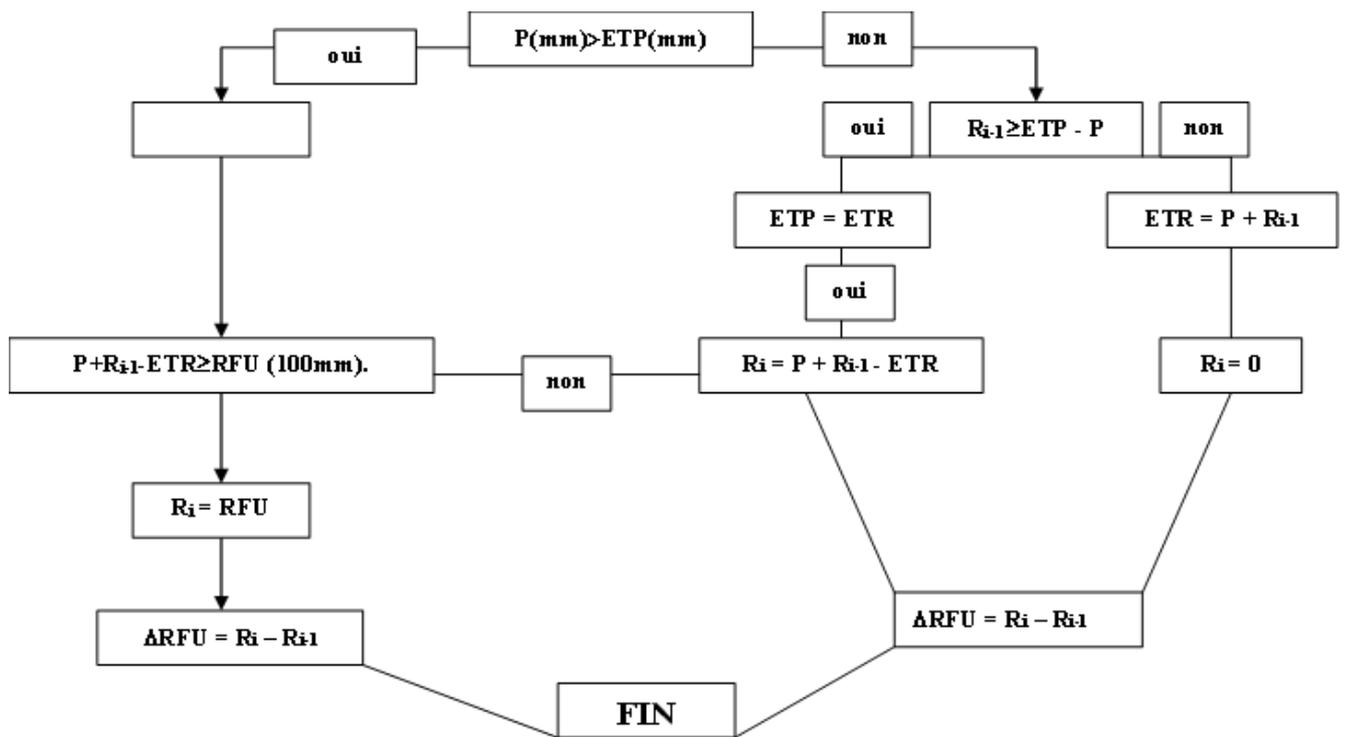
- Soulsby C., Tetzlaff D., Hrachowitz M. (2010). Spatial distribution of transit times in montane catchments: conceptualization tools for management. *Hydrological Process.* 24:3283–3288.
- Suchel J. B. (1987). Les climats du Cameroun. *Thèse Doctorat d'Etat Université de Bordeaux III. France.* 1186p.
- Tallaksen L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology.* 165, 349-370.
- Tchamagam Touko A. (2014). Hydrologie du bassin amont de la Mefou et quantification des transports solides dans la Retenue du lac Mopfou a Nkolbisson. *Mémoire Master Faculté des Sciences Université Yaoundé I.* 78p + annexes.
- Tchindjang M. (2009). Les Etudes d'impacts environnementaux comme outil du développement durable. *Agence Universitaire de la Francophonie.*
- Tchindjang M. (2021). Les grands ensembles orographiques du Cameroun : Quels nouveaux chantiers de recherche en géomorphologie ? Pp 79-134.
- Tchotsoua M. (1994). Dynamique informelle de l'espace urbain et érosion accélérée en milieu tropical humide : le cas de la ville de Yaoundé. *Cah. O.-m.* 47, 123–136.
- Tchotsoua M., Fotsing J.M., Moussa, A. (2007). Evaluation des risques d'inondation dans la vallée de la Bénoué en aval du barrage de Lagdo (Cameroun). *In Actes JSIRAUF (Journée Scientifique Inter Réseau de l'AUF).* Ed. Sc.: D. Orange, E. Roose, P. Vermande, J-P. Gastellu - Etchegorry and pham Quang Ha. 9 p.
- Thornthwaite C.W. (1954). The measurement of potential evapotranspiration. *John P. Mather Seebrook, New Jersey.* 225p.
- Tiamgne X.T., Kalaba F.K., Nyirenda V.R. (2021). Land use and cover change dynamics in Zambia's Solwezi copper mining district. *Scientific African.* e1087.
- Toteu S.F., Penaye J., Poudjom D.Y. (2004). Geodynamic evolution of the Pan-African belt in the central Africa with special reference to Cameroon. *Can Journal Earth Sciences.* 41: 73-85
- Toteu S.F., Yongue Fouateu R., Penaye J., Tchakounté J., Seme Mouangue A.C., Van Schnus W.R., Deboule E., Stendal H. (2006). U-Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonic in southern Cameroon: consequence for the Pan-African orogenic evolution of central African fold belt. *Journal of African Earth Sciences.* 44:479-493.
- Tsalefac M., Hiol Hiol F., Laraque A., Sonwa D., Sholte P., Pokam W., Haensler A., Beyene T., Ludwig F., Mkankam F.K., Djoufack V.M., Ndjatsana M., Doumenge C. (2015). Climate of Central Africa: past, present and future In: the forests of the Congo basin. *Forest and climate change.*
- UNDESA (2017) World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables.
- UNESCO (2007). Changement climatique et patrimoine mondial : rapport sur la prévision et la gestion des effets du changements climatiques sur le patrimoine mondial et stratégie pour aider les Etats parties à mettre en œuvre des réactions de gestion adaptées. 59p.

- UNESCO, ONU-Eau (2020). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020 : l'eau et les changements climatiques. *Paris: UNESCO*.
- UNISDR (2015). The human cost of natural disasters 2015: A global perspective.
- Ushiyama T., Kwak Y., Ledvinka O., Iwami Y., Danhelka J. (2017). Interdisciplinary approach for assessment of continental river flood risk: a case study of the Czech Republic. *In EGU General Assembly Conference Abstracts*. 19:5737.
- Vakkilainen P., Varis O. (1989). Mass curve technique in controlling a multipurpose multireservoir system-Coupling a water quality description with an interactive system. In 5. *River Basin Management Conf, Rovaniemi (Finland)*, 31 Jul-4 Aug 1989 (Vol. 1989, pp. 183-188).
- Van Der Pol B. (1930). "Frequency modulation." *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*. 18.7: 1194-1205.
- Venkatesan G., Subramani T., Karunanidhi D., Sathya U., Li P. (2021). Impact of precipitation disparity on groundwater fluctuation in a semi-arid region (Vellore district) of southern India using geospatial techniques. *Environmental Science and Pollution Research*. 28(15), 18539-18551.
- Vicat J.P. (1998). Esquisse géologique du Cameroun. *Collection presses Université de Yaoundé I, Édition :11*.
- Von Neumann J. (1941). Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *The Annals of Mathematical Statistics*. 12(4), 367-395.
- Vuillemin J. (1998). La méthode platonicienne de division et ses modèles mathématiques. *Philosophia scientiae*. 3(3): 1-62.
- Wassile G.A., Madi A., Dassou E.F. (2019). Caractérisation de la variabilité pluviométrique sur les bassins versants des barrages collinaires des Monts Mandara, extrême-nord Cameroun. *Afrique SCIENCE*. 15(4), 215 – 231
- Wethé J., Radoux M., Tanawa E. (2003). Assainissement des eaux usées et risques socio –sanitaires et environnementaux en zones d’habitat planifié de Yaoundé (Cameroun). *Vertigo*.
- Yang W., Xiao C., Zhang Z., Liang X., Fang Z. (2021). Estimation of the groundwater balance of a mountainous basin based on long-term streamflow data: a case study of the Tao’er River Basin, China. *Environmental Earth Sciences*. 80:689.
- Yap L., Kande Houetchak L., Nouayou R., Kangia J., Ngouh A.N., Makuate M.B. (2018). Vertical accuracy evaluation of freely available latest high-resolution (30 m) global digital elevation models over Cameroon (Central Africa) with GPS/leveling ground control points. *International Journal of Digital Earth*. 12(4):1-25. DOI:10.1080/17538947.2018.1458163.
- Yashon O., Ryutaro T. (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water*. 6 (6), 1515-1545.
- Yesilnacar E., Topal T. (2005). Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*. 79 (3–4) :251–266.

- Yevalla G.M.S., Seidou D.N., Ngoc B.V., Hoi T.V., Tabod T.C. (2018). Hydrological Studies for the Assessment of Run-of-River Hydropower Potential and Generation over the Wouri-Nkam River using GIS and Remote Sensing Techniques. *Aquademia: Water, Environment and Technology*. 2(1): 02.
- Yevalla G.-M.S., Seidou D.N., Ngoc B.V., Hoi T.V., Tabod, T.C. (2018). Hydrological Studies for the Assessment of Run-of-River Hydropower Potential and Generation over the Wouri-Nkam River using GIS and Remote Sensing Techniques. *Aquademia: Water, Environment and Technology*. 2(1), 02.
- Yira Y., Diekkrüger B., Steup G., Bossa A.Y. (2017). Impact of climate change on hydrological conditions in a tropical West African catchment using an ensemble of climate simulations. *Hydrology Earth System Sciences*. 21(4):2143–2161.
- Yoli-Baudet E.B., Haidi S., Probst J.L. (2017). Analyse de la variabilité hydroclimatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d'une rivière de la zone semi-aride : le Sebou au Maroc. *European Sciences Journal*. 13(5) :509–525.
- Yongue Fouateu R. (1986). Contribution à l'étude pétrologique de l'altération des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé. Thèse Doctorat 3^e cycle, Université Yaoundé I. 214 p.
- Yonta Ngouné C. (2009). Le context géologique des indices de talc de la region de Boumnyebel (Chaine panafricaine d'Afrique Centrale, Cameroun). *These de Doctorat Ph.D. Université. Yaoundé I/Henri Poincaré, Nancy I*. 231p.
- Zuberi D.L., Komakech H.C., Muzuka A.N.N. (2019). Estimating groundwater recharge on the southern slope of Mount Kilimanjaro, Tanzania. *Environmental Earth Sciences*. 78:687.

ANNEXES

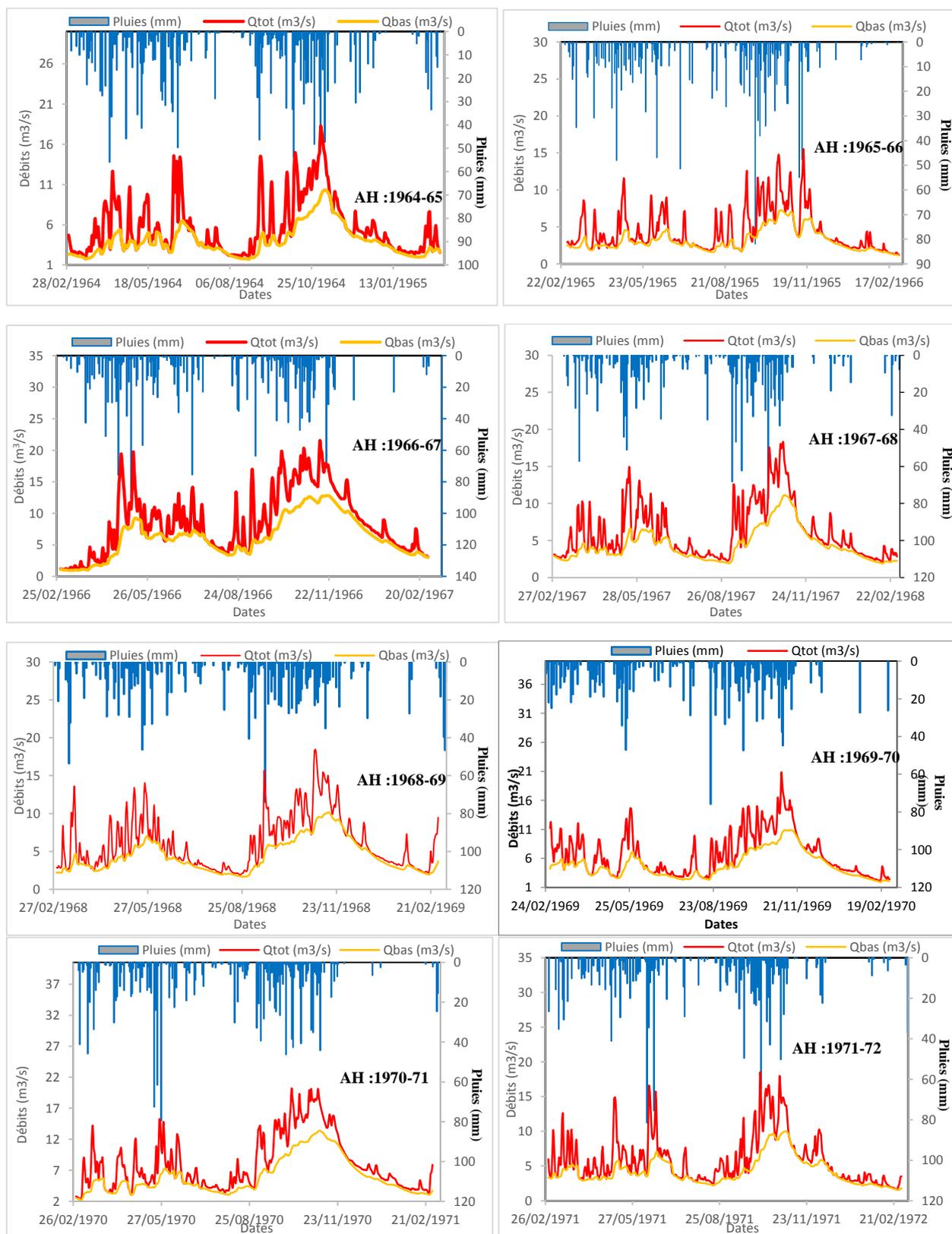
Annexe 1 : Organigramme pour l'évaluation des termes du bilan hydrologique selon Thornthwaite (In Hydrologie de l'Ingénieur, Réménieras, 1972)

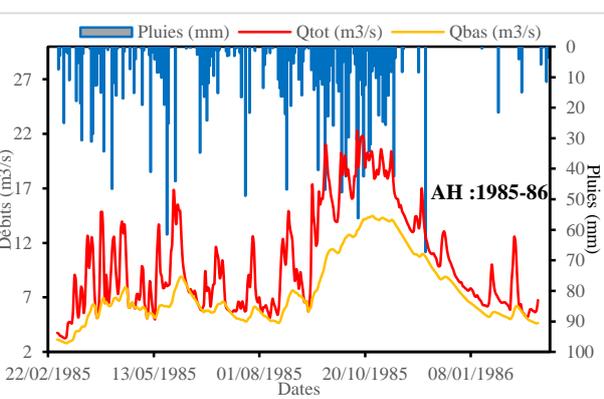
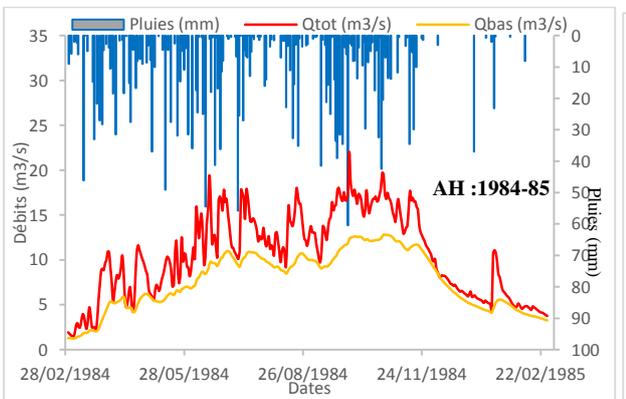
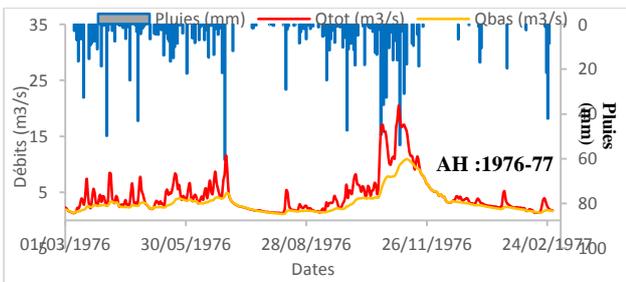
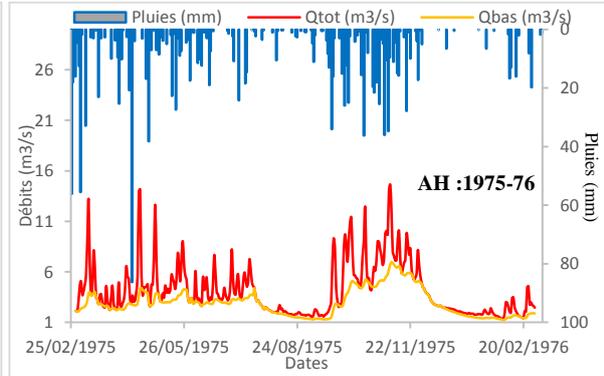
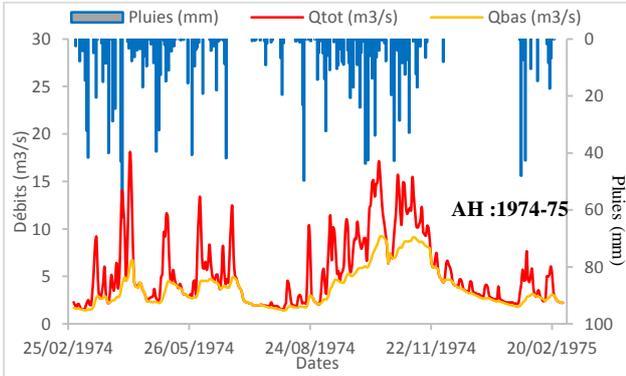
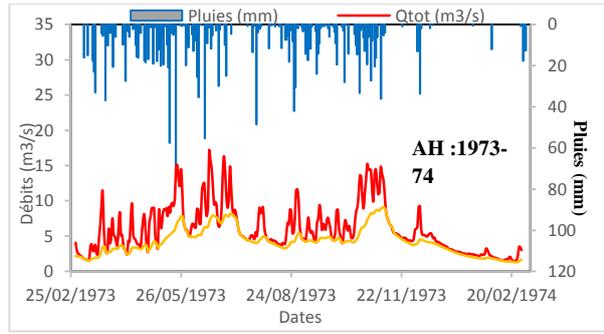
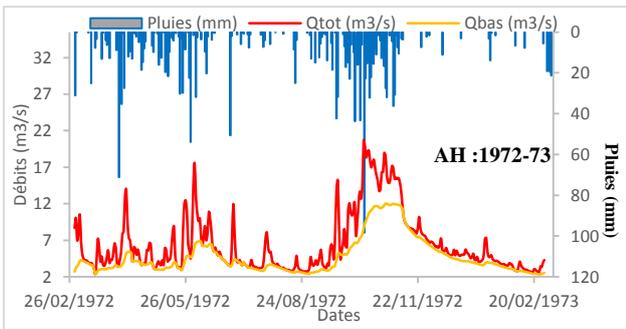


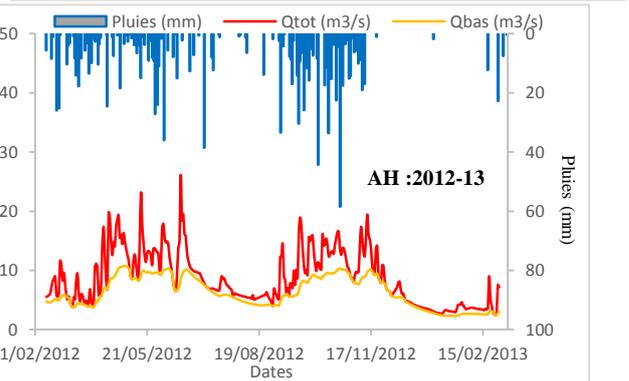
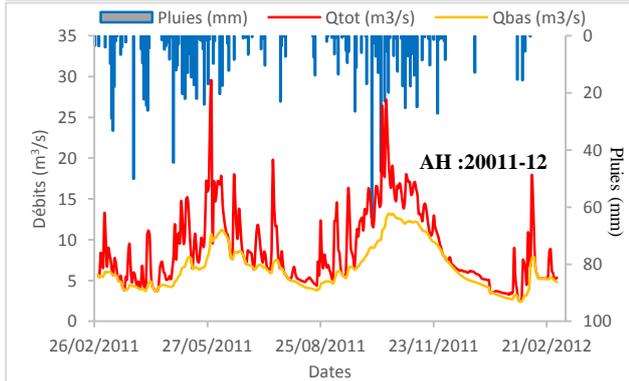
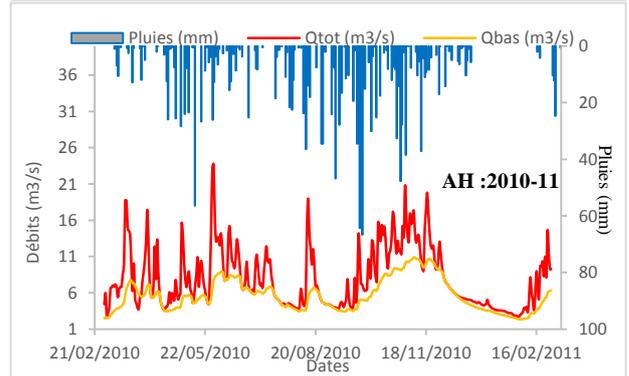
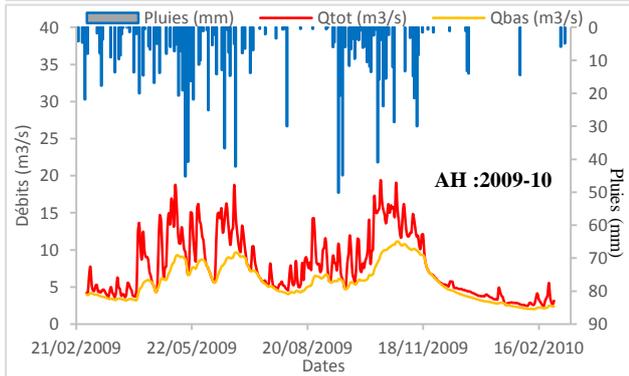
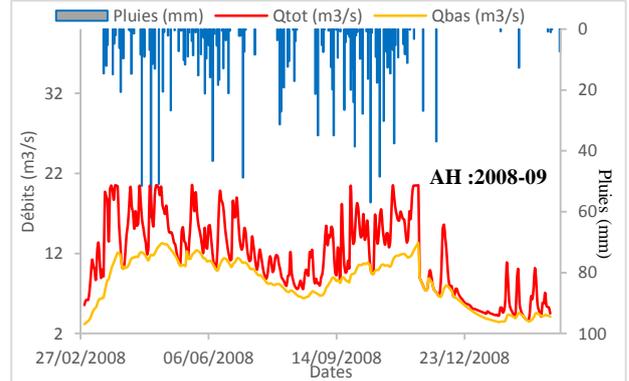
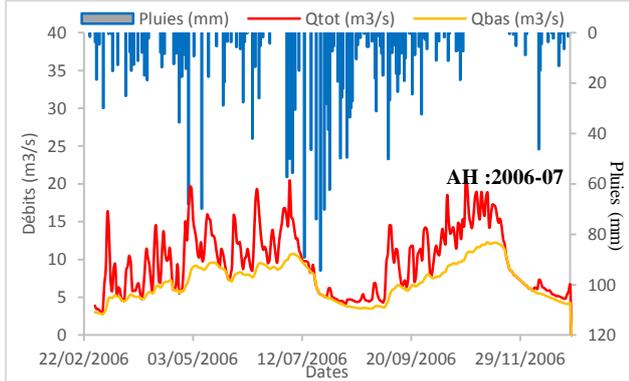
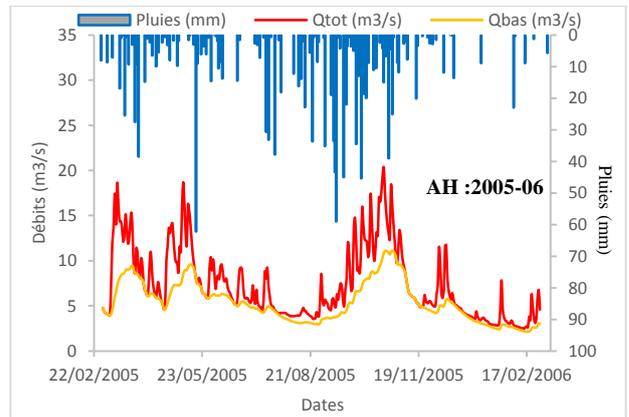
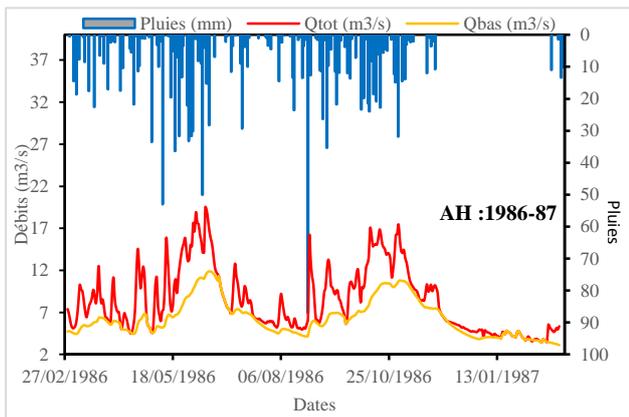
Annexe 2 : Coefficient de tarissement de la Mefou à Nsimalen et du volume mobilisé par l'aquifère de son bassin versant entre 1964 et 2019

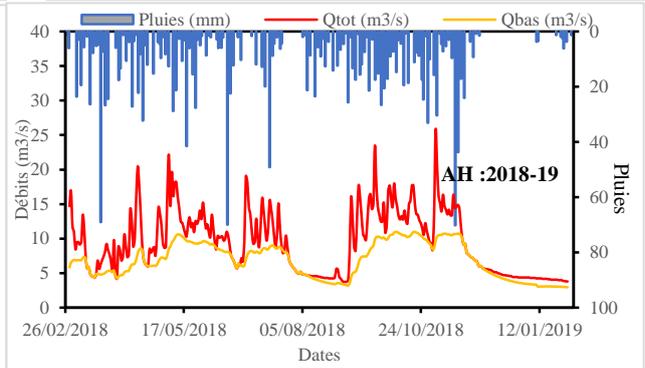
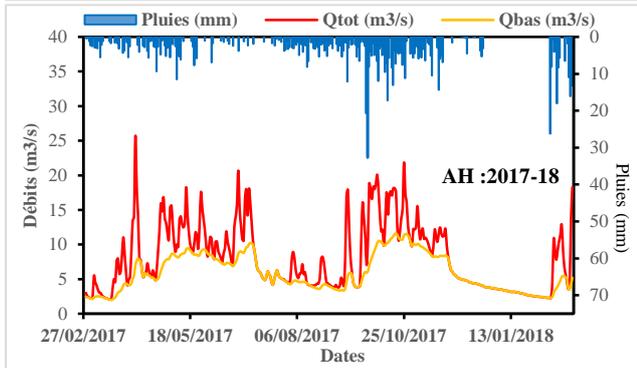
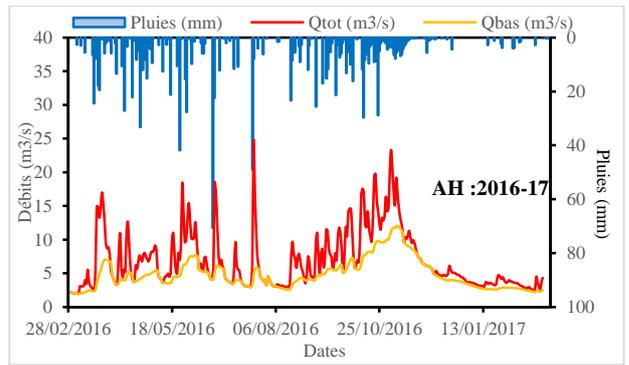
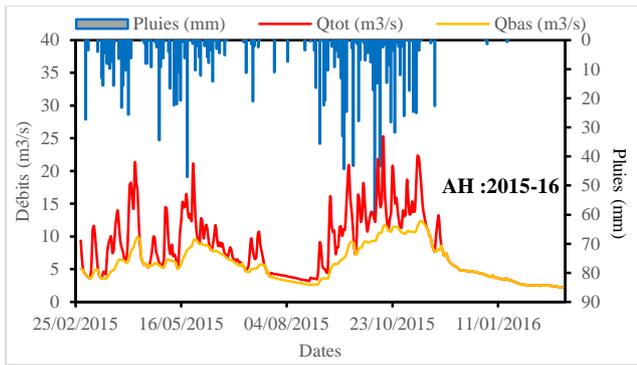
	Durée de l'étiage (jours)	Coefficient de tarissement	Volume d'eau mobilisé (m³)
1964-65	120	0,0237	98,73
1965-66	130	0,015	177,33
1966-67	70	0,0308	80,84
1967-68	95	0,0179	121,23
1968-69	57	0,0106	177,45
1969-70	67	0,0172	156,98
1970-71	92	0,0328	50,67
1971-72	75	0,0235	66,81
1972-73	104	0,0244	61,48
1973-74	85	0,0339	61,06
1974-75	80	0,031	45,81
1975-76	71	0,0316	43,99
1976-77	84	0,0255	54,90
1984-85	84	0,0314	103,50
1985-86	68	0,0245	208,57
1986-87	105	0,0247	135,63
2004-05	60	0,0283	118,37
2005-06	74	0,0207	209,18
2006-07	75	0,03	157,00
2008-09	54	0,0372	75,27
2009-10	74	0,0325	148,92
2010-11	64	0,0348	141,09
2011-12	40	0,0464	52,37
2012-13	54	0,0367	74,93
2015-16	77	0,0394	62,69
2016-17	105	0,0331	74,62
2017-18	60	0,027	82,22
2018-19	75	0,0314	63,06
Min	40,00	0,011	43,99
Max	130,00	0,046	209,18
Moy	78,54	0,028	103,74

Annexe 3 : Hydrogrammes annuels des débits de base de la Méfou à Nsimalen et de pluies journalières pour les années hydrologiques étudiées allant de 1964 à 2019









Annexe 4 : Valeurs numériques des différents types d'écoulement par année dans le BVAM à Nsimalen durant la période allant de 1964 à 2019

AH	Pluies	Ecoulement total			Ecoulement souterraine			Ecoulement direct			BFI
	Pluies (mm)	Qtot (m ³ /s)	Letot (mm)	Ke (%)	Q0 (m ³ /s)	Le0 (mm)	Ke0 (%)	Qr (m ³ /s)	Ler (mm)	Ker (%)	
1964-65	1999,9	5,67	420,91	21,05	4,00	296,60	14,83	1,68	124,31	6,22	0,70
1965-66	1487,1	4,42	328,17	22,07	3,14	232,73	15,65	1,29	95,43	6,42	0,71
1966-67	2179,7	8,59	637,39	29,24	6,23	462,49	21,22	2,36	174,90	8,02	0,73
1967-68	1704,4	6,12	454,17	26,65	4,39	325,40	19,09	1,74	128,77	7,56	0,72
1968-69	1630,4	6,13	454,77	27,89	4,41	327,50	20,09	1,72	127,27	7,81	0,72
1969-70	1581,1	6,69	496,20	31,38	4,84	358,98	22,70	1,85	137,23	8,68	0,72
1970-71	1744,5	7,65	567,35	32,52	5,51	408,74	23,43	2,14	158,61	9,09	0,72
1971-72	1555,8	5,93	440,35	28,30	4,24	314,55	20,22	1,70	125,81	8,09	0,71
1972-73	1717,3	5,96	442,59	25,77	4,24	314,49	18,31	1,73	128,10	7,46	0,71
1973-74	1646,9	6,04	447,87	27,19	4,25	315,25	19,14	1,79	132,62	8,05	0,70
1974-75	1614,5	5,42	402,19	24,91	3,79	281,10	17,41	1,63	121,09	7,50	0,70
1975-76	1427	4,16	308,35	21,61	2,95	218,73	15,33	1,21	89,62	6,28	0,71
1976-77	1406,1	4,41	327,49	23,29	3,17	235,06	16,72	1,25	92,43	6,57	0,72
1984-85	2061,4	10,50	779,47	37,81	7,69	570,90	27,69	2,81	208,57	10,12	0,73
1985-86	2068,5	10,26	761,22	36,80	7,46	553,22	26,74	2,80	208,00	10,06	0,73
1986-87	1501,7	8,46	627,98	41,82	6,32	468,86	31,22	2,14	159,12	10,60	0,75
2004-05	1387,5	10,19	756,42	54,52	7,34	544,63	39,25	2,85	211,79	15,26	0,72
2005-06	1319	7,39	548,53	41,59	5,40	400,83	30,39	1,99	147,69	11,20	0,73
2006-07	2148,7	8,48	628,97	29,27	7,07	524,97	24,43	1,40	104,00	4,84	0,83
2008-09	1551,4	11,64	863,63	55,67	8,53	632,73	40,78	3,11	230,91	14,88	0,73
2009-10	1218	7,82	580,32	47,65	5,67	420,42	34,52	2,15	159,90	13,13	0,72
2010-11	1645,9	8,00	593,46	36,06	5,65	418,89	25,45	2,35	174,56	10,61	0,71
2011-12	1216,9	8,98	666,58	54,78	6,57	487,18	40,03	2,42	179,40	14,74	0,73
2012-13	1150,9	8,65	642,10	55,79	6,29	466,98	40,58	2,36	175,13	15,22	0,73
2015-16	1346	8,06	598,41	44,46	5,94	440,91	32,76	2,12	157,50	11,70	0,74
2016-17	1138,1	6,95	515,88	45,33	4,83	358,26	31,48	2,12	157,62	13,85	0,69
2017-18	1596,4	8,10	601,39	37,67	5,89	437,34	27,40	2,21	164,06	10,28	0,73
2018-19	1836,5	9,42	699,11	38,07	6,61	490,66	26,72	2,81	208,44	11,35	0,70
Min	1138,10	4,16	308,35	21,05	2,95	218,73	14,83	1,21	89,62	4,84	0,69
Max	2179,70	11,64	863,63	55,79	8,53	632,73	40,78	3,11	230,91	15,26	0,83
Moy	1602,91	7,50	556,83	35,68	5,44	403,87	25,84	2,06	152,96	9,84	0,72

Légende : Qtot (Débit total) ; Letot(Lame d'eau d'écoulement total) ; Ke (Coefficient d'Écoulement Total) ; Q0(Débit de base) ; Le0(Lame d'eau d'écoulement de base) ; Ke0 (Coefficient d'Écoulement de base) ; Qr (Débit d'écoulement direct) ; Letot(Lame d'eau d'écoulement direct) ; Ke (Coefficient d'écoulement rapide de crue) ; Min (minimum) ; Max (Maximum) ; Moy (Moyenne) ; BFI (Base Flow Index).

Annexe 5 : Liste des articles scientifiques issus de la thèse

- **Nsangou, D., Kpoumié, A., Mfonka, Z., Bateni, S. M., Ngouh, A. N., & Ndam Ngoupayou, J. R. (2022).** The Mfoundi Watershed at Yaoundé in the Humid Tropical Zone of Cameroon: a case study of urban flood susceptibility mapping. *Earth Systems and Environment*, 6(1), 99-120.

- **Nsangou, D., Kpoumié, A., Mfonka, Z., Ngouh, A. N., Fossi, D. H., Jourdan, C., ... & Ngoupayou, J. R. N. (2022).** Urban flood susceptibility modelling using AHP and GIS approach: case of the Mfoundi watershed at Yaoundé in the South-Cameroon plateau. *Scientific African*, 15, e01043.



The Mfoundi Watershed at Yaoundé in the Humid Tropical Zone of Cameroon: A Case Study of Urban Flood Susceptibility Mapping

Daouda Nsangou¹ · Amidou Kpoumié² · Zakari Mfonka³ · Sayed M. Bateni⁴ · Abdou Nasser Ngouh^{1,5} · Jules Remy Ndam Ngoupayou¹

Received: 17 July 2021 / Revised: 30 October 2021 / Accepted: 2 November 2021 / Published online: 23 November 2021
© King Abdulaziz University and Springer Nature Switzerland AG 2021

Abstract

Most of the world's major cities currently face the risk of flooding, which is becoming more frequent. Floods often leave behind enormous material damage and, worse still, loss of human life. With this in mind, this paper proposes a conceptual approach to modeling flood risk-sensitive areas in the Mfoundi watershed (95.6 km²) that drains Yaoundé town, the political capital located in the humid tropical zone of the southern plateau of Cameroon. The multi-criteria decision analysis (MCDA) approach coupled with the analytical hierarchy process (AHP) and the geographical information system (GIS) environment was employed in this study. The method was applied to ten parameters to calculate the flood risk index and hence to generate the flood susceptibility map. The results show five main classes of susceptibility to flooding: very low (9.27 km²), low (24.63 km²), moderate (22.04 km²), high (21.01 km²) and very high (19.50 km²). Two methods were adopted to validate the flood susceptibility map, which was produced by overlaying 50 regularly flooded points identified in the Mfoundi watershed. The so-called visual method shows that 36 of these points (72%) are found in environments with very high susceptibility and 11 points (22%) are located in areas with high susceptibility, proving that the results reflect reality. The presence of flood points in areas of low and moderate susceptibility could be linked to both human activities and climatic disruption, which sometimes triggers high rainfall. The statistical method (AUC) presents a very good accuracy (0.84 or 84%) of the map produced. This study is important for several reasons: (1) it is carried out in an area with potential for environmental accidents but where very few studies were carried out to delineate these hazards; (2) it provides a basic tool for making decisions about environmental issues for more efficient management of the Mfoundi Watershed; (3) it is also an experimental study representative of the humid tropical forest zone subject to forcings that should be extended to larger scales by covering several climate units in Cameroon.

Keywords Yaoundé-Cameroon · Mfoundi watershed · MDCA · AHP · GIS · Flood susceptibility

✉ Daouda Nsangou
nsangoudaoud@yahoo.fr

Amidou Kpoumié
amidou27@yahoo.fr

Zakari Mfonka
zakarimfonka@yahoo.fr

Sayed M. Bateni
smbateni@hawaii.edu

Abdou Nasser Ngouh
n.abdounasser@yahoo.fr

Jules Remy Ndam Ngoupayou
jrndam@gmail.com

¹ Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaounde I, PO Box: 812, Yaounde, Cameroon

² Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Maroua, PO Box: 814, Maroua, Cameroon

³ Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Douala, PO Box: 24157, Douala, Cameroon

⁴ Department of Civil and Environmental Engineering and Water Resources Research Engineering, University of Hawaii, Honolulu, HI, USA

⁵ Laboratory of Image Treatment for Stereo-Restitution, National Institute of Cartography (NIC), P.O. Box: 157, Yaounde, Cameroon

1 Introduction

The management of water resources and associated hydrological risks is becoming a major concern in our societies (Hapuarachchi et al. 2011). Given the wide range of hydrological hazards around the world, floods are the most frequent and most damaging (Samanta et al. 2018). Between 1994 and 2013, floods accounted for 43% of recorded natural disasters, affecting nearly 2.5 billion people (UNISDR 2015). During those two decades, floods caused the death of nearly 158,000 people worldwide and affected more than 2.3 billion people at different levels (CRED 2018). While deaths due to floods have declined significantly since the early 1980s, economic losses from flood-related disasters are increasing (Jha et al. 2012); averaging more than US\$23 billion per year (Jha et al. 2012; UN 2018). Numerous studies show that population growth, urbanization and climate change will lead to a significant increase in flooding in the entire climate zone around the world in the coming years (Vidhee and Amit 2020; Asinya and Alam 2021). These risks are amplified by the characteristics of the various catchments affected by these extreme phenomena (Esteves 2013; Colmet-Daage et al. 2017).

Cameroon, like other sub-Saharan African countries, is currently facing several hydroclimatological risks and/or disasters (floods, mass movements, violent winds and drought). These phenomena invariably leave human, economic and environmental damage at the heart of many concerns (MINAT/DPC 2017; MINEPDED 2019). Between 2007 and 2015, floods affected nearly 367,276 people, making floods the most dangerous natural events in the country (CRED 2018; MINEPDED 2019). Floods are common to varying degrees in the Sudano-Sahelian zone (Leumbe Leumbe et al. 2015). As an example, the flood of the 5th September 2020 in Kousseri (Far North Region) affected more than 10,000 people, nearly 400 households, and destroyed 150 houses. These risks are increasingly recurring in coastal areas due to the flat morphology of these localities and their proximity to the ocean (Bang et al. 2017). Flooding is already occurring more and more in the southern plateau of Cameroon, which is covered by forests and a fairly rugged terrain (INS 2016; Kouassy Kalédjé et al. 2019). These floods are mainly due to climate change and anthropogenic activities (mining activities, anarchic urbanization).

Yaoundé is located in the forest zone of the southern plateau of Cameroon where a humid tropical climate with four unevenly distributed seasons prevails. It is drained by the Mfoundi and Mefou Rivers, and has witnessed population increase from about 60,000 inhabitants in 1960 (Franqueville 1979) to over 3 million in 2017 (UNDESA 2017). This strong demographic growth, combined with

anarchic urbanisation and highly irregular hydrological regimes, is believed to be one of the factors behind the major runoffs and violent flash floods generated by these topographical sub-basins (Bang et al. 2017; Jourdan 2019). The latter are undoubtedly complementary sources and catalysts for floods, which have often caused significant damage and sometimes loss of human life. Between 1980 and 2016, an estimated 171 major floods occurred, which caused more than 70 deaths in the country (Moffo Zogning 2017). Surveys of the inhabitants revealed that flood problems appeared from the mid-70s onwards. At the very beginning of this period, there were an average of three floods per year. Since the 1990s, almost every rainy event has led to flooding (MINAT/DPC 2017). For example, the floods of 11, 12 and 13 October 2019 and the floods of 21 May 2020 affected several localities in Yaoundé, such as the Central Post Office, the Mfoundi Market, Nsimeyong, Melen, Nkolbisson and Obili.

Until now, most studies related to flooding have focused on risks and disasters caused by floods in Yaoundé town, and on the hydroclimatological and hydrological functioning of the Mefou and Mfoundi catchment areas (Sighomnou 2004; Ndam Ngoupayou et al. 2007; Lienou et al. 2008); on the hydrological modelling of the Mefou basin (Jourdan 2019); and on a summary of flood zones based on GIS (Moffo Zogning 2017). These studies reveal that rainfall in the zone is abundant and spread over four seasons but is unevenly distributed throughout the year (with two rainy seasons and two dry seasons). The observed flows follow variations in the rainfall regime. However, the Mfoundi watershed, which drains the city of Yaoundé, responds more quickly to the intensity and duration of the rains. This is the origin of the amplification of floods during periods of high rainfall. To address this problem, the government initiated the Yaoundé Sanitation Projects (PADY). Phases 1 and 2 of these projects led to the construction of a 6.4 km canal along the course of the Mfoundi and 4 of its tributaries, and the implementation of campaigns to clean up certain drains in the city.

Despite these efforts to combat floods, they are increasingly frequent and continue to wreak havoc (MINAT/DPC 2017). Faced with this uncomfortable situation, political decision-makers and civil society personnel need reliable tools to take appropriate measures to mitigate future flood risks. It is also necessary to map areas of susceptibility to flood risk, taking into account the geo-environmental and anthropogenic factors that cause these phenomena. To do this, several tools and techniques have been developed in recent years like: field surveys, hydraulic models, analytical hierarchy process (AHP). Those tools and methods taken in isolation each have their own limitations and inadequacies, which is why it is necessary to confront them, and preferably to combine them in case studies in order to minimise errors and obtain a coherent and acceptable result that

reflects the realities on the field (Fernandez and Lutz 2010). So far these techniques and methods have been applied to very few parameters (eight at most). To improve the reliability of a model, the use of a high number of factors is generally advised (Cea et al. 2020). Thus, the present study is applied to ten (10) natural parameters influencing flood recurrence in the area. Following this logic, the goal of the present study is to map flood-sensitive areas in the Mfoundi urban and humid tropical catchment area, in the heart of the Cameroonian political capital (Yaoundé) using a coupled MDCA approach, with analytical hierarchy process techniques (AHP) applied to GIS.

2 Materials and Methods

2.1 Study Area

2.1.1 Geographical Siting, Climate, and Geomorphology

The Mfoundi watershed is located in Central Africa, precisely in the central region of Cameroon. It covers an area of 95.6 km² that is entirely urbanised (Fig. 1).

The climate of the Mfoundi basin is the transitional tropical and equatorial type with four unevenly distributed seasons (Sighomnou 2004): short rainy season from March to June corresponding to spring; a short dry season (July) corresponding to summer; a long rainy season (August–November) corresponding to autumn and a long dry season (December–February) corresponding to winter (Fig. 2). The average rainfall and inter-annual mean temperature are 1554 ± 261 mm and 24 °C, respectively, for the period 1964–2019. The dominant vegetation in the zone consists of secondary forest that has been severely degraded by human activities (Branchet et al. 2018).

Geo-morphologically, the Mfoundi watershed belongs to the southern Cameroonian plateau with altitudes varying between 670 and 900 m. The relief is highly rugged, dominated by hills and inselberg, cut in the shape of half oranges and with convex slopes, interspersed with wide marshy valleys that are increasingly inhabited by the expanding population growth. The Mfoundi watershed is a sub-basin of the Mefou (840 km²) and the latter is a sub-basin of the Nyong (27,800 km²) which is one of the coastal river basins of Cameroon. The Nyong is the second-most important river in Cameroon after the Sanaga (140,000 km²). The Mfoundi watershed has a dendritic hydrographic network, partially draining 6 of the 7 sub-divisions of the city of Yaoundé. The Mfoundi takes its source NNW of the city of Yaoundé, at the top of Mount Fébé at an altitude of about 950 m. It flows in N–S direction to join Mefou River at the level of Afan-Oyoo (Table A1; Fig. 1).

2.1.2 Geology and Hydrogeology

The Mfoundi catchment is located in the southern part of the Pan-African Central African mobile chain, which is a collection of Precambrian terrain formations (Owona et al. 2011). It belongs to the Yaoundé Group and consists of metamorphic rocks made up of garnet and biotite gneiss and migmatitic rocks. Three main soil types develop on these basement formations: red ferralitic soils, yellow ferralitic soils and hydromorphic soils (Ndjigui et al. 2013).

From a hydrogeological point of view, the zone presents two types of superimposed aquifers. A more or less continuous upper porous aquifer hosted in altered rocks, and a lower fractured and/or fractured discontinuous aquifer in metamorphic basement formations (Anaba Onana et al. 2017; Akoachere et al. 2019; Ndam Ngoupayou et al. 2019). Fluctuations in piezometric levels generally follow the rainfall regimes. However, the fluctuations in piezometric levels are much greater at the top of the slopes compared to the lowlands (Fouépé Takounjou et al. 2010; Bon et al. 2016).

2.2 Description of Methods

The methodological approach used in this study consisted of two phases. First, identify the parameters that have greater or lesser impacts on the flood phenomenon. This was done based on a comprehensive literature review on the flood theme coupled with several field observation campaigns. Second, calculate the flood hazard index (FHI) using the multi-criteria decision analysis (MCDA), analytical hierarchy process (AHP) and the geographical information system (GIS) environment, to generate a flood susceptibility map. This methodology was completed with a validation phase, by adopting the visual and area under the curve (AUC) methods based on verification from field data (i.e., different flood episodes that occurred in the study area) (Fig. 3).

2.3 Identification of the Parameters That Favour Flooding in the Area

From the field observations coupled with a wide-ranging bibliographical study, 10 parameters were identified in the Mfoundi catchment area as factors favouring flooding phenomena. Some of these are natural or geo-environmental factors, such as elevation, drainage density, rainfall, slope, Euclidean distance from the watercourse, topographical humidity, hydraulic conductivity (soil permeability), groundwater level, and the presence of swampy areas and geology. On the other hand are anthropogenic factors, consisting of the land use-land cover (LULC) controlled by galloping population growth and the failure of sanitation systems.

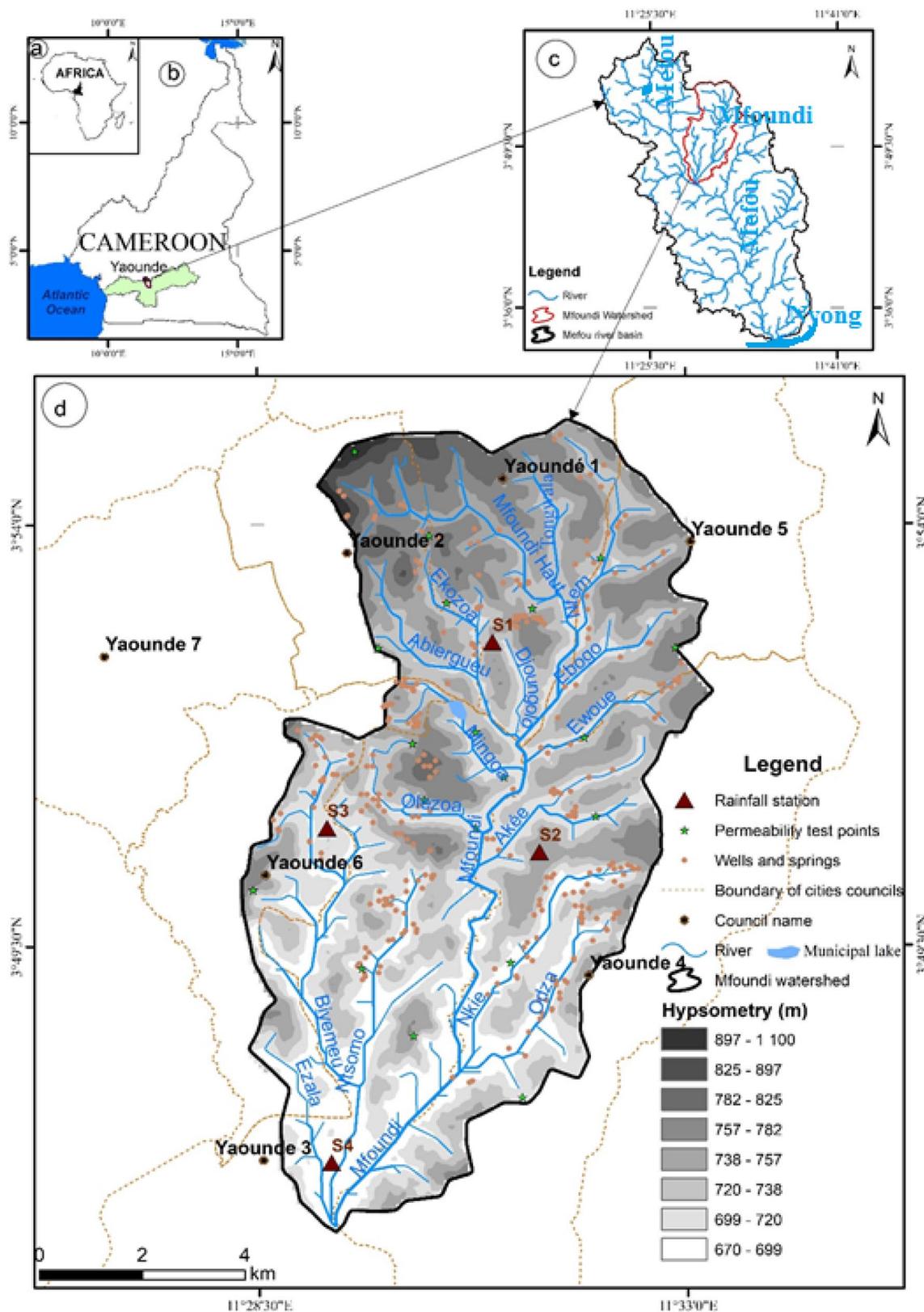


Fig. 1 Location of the study area: **a** Cameroon in Central Africa; **b** Nyong and Mefou basins in Cameroon; **c** the Mfoungou watershed in the Mefou basin; **d** the Mfoungou watershed

Fig. 2 Ombrothermal diagram of the Yaoundé city, based on the mean monthly variations of rainfall and air temperatures for the period from 1964 to 2019 (according Bagnouls and Gausson 1957)

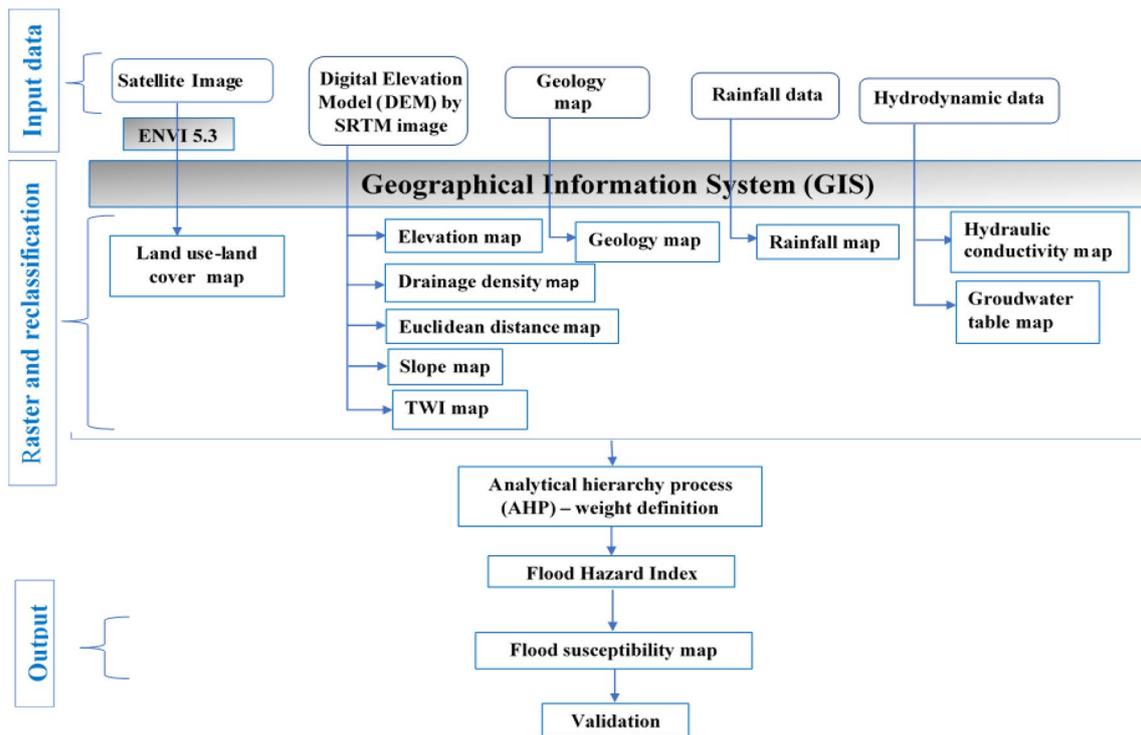
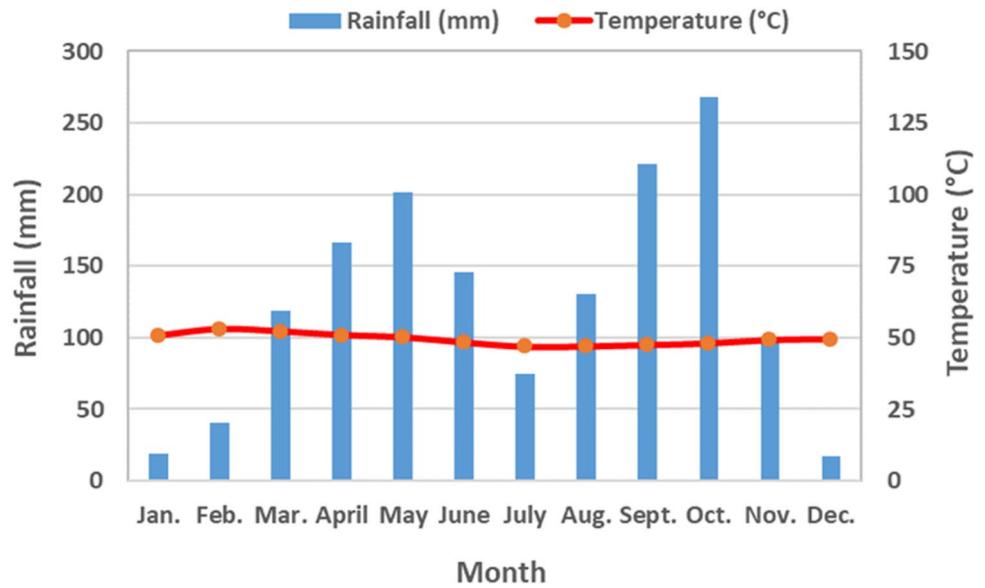


Fig. 3 Conceptual model of flood susceptibility mapping based on multi-criteria decision analysis (MCDA) and analytical hierarchy process (AHP) by GIS

2.4 Data Sources

To achieve the objective of this work, two types of data were used (Table 1). The first type consists of data collected in the field, called primary data. These include rainfall records, hydrodynamic characteristics of the aquifer (hydraulic

conductivity and groundwater table), and GPS coordinates of the points of occurrence of flooding. The second type, called secondary data, consists of cartographic documents and satellite images: Landsat 8 OLI (Operational Land Image) and SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Some data were obtained from specialized institutions or

Table 1 Data source and type used

No	Data description/variable	Year	Source/resolution	Type	
1	LANDSAT-8 OLI	2020	Earthexplorer.gov	Secondary source	
2	SRTM	2020	Earthexplorer.gov (30 m × 30 m)		
3	Geology	1956	NIC (E: 1/500 000)		
4	Rainfall	/	Data collected		Primary source
5	Groundwater table	/	Data collected		
6	Hydraulic conductivity	/	Data collected		
7	Historic floods points	/	Data collected		

NIC National Institute of Cartography

by downloading online. These data are used to generate thematic layers.

2.5 Presentation and Mapping of Parameters

2.5.1 Land Use-Land Cover

The flood frequency of an area can be strongly influenced by the types of land use-land cover (Magdalena et al. 2017). The latter influences at the first level the hydrological response at different periods (Generino et al. 2014). Changes in LULC can amplify the probability of flooding of an area (Magdalena et al. 2017). In this study, the land use-land cover map was produced from the Landsat 8 OLI (path/row: 185/57) sensor satellite image acquired on January 26, 2020. This already pre-processed Landsat-8 (OLI) image was used for supervised classification by applying the maximum likelihood algorithm (Takorabt et al. 2018; Ewané Ewané 2020). Five classes were identified by assigning a pixel to each class based on its probability of belonging to a specific class. The information provided by the different classes was compared to the field observations. Thus, a correction was performed using the 3 × 3 median filter to remove isolated pixels and smooth the contours of the different classes obtained (Samanta et al. 2018). The classification accuracy and kappa statistics were estimated from the validation samples and the confusion matrix of the Landsat 8 OLI data classification

results (Table 2). The overall accuracy is 0.81 (81%) for a kappa coefficient of 0.76 (76%). This Kappa may be due to the fact that the study area is in the middle of the metropolis (Yaoundé), hence the confusion of the classes.

2.5.2 Elevation and Slope

Elevation is the primary factor that controls flood (Poussin et al. 2014). Water flows continuously from higher elevations to lower areas, and flat areas of the plains can flood more quickly than places at higher elevations (Degiorgis et al. 2012; Ozkan and Tarhan 2016). The slope plays a fundamental role in the regulation of surface runoff. In hydrologic studies, it is a very important topographic factor (Das 2019). Areas with low slopes flood more quickly because of the low surface flow velocity. However, areas with high slopes have high runoff velocity. This last case is incompatible with flooding (Blöschl 2013). The elevation and slopes maps were obtained from the DEM (digital elevation model) extracted from the global SRTM image with an accuracy of 30 × 30 m.

2.5.3 Geology

The geological formation is one of the parameters that most influences the susceptibility of flooding. This factor is closely related to the permeability that varies from one type of rock to another. Rainwater infiltration is less important for

Table 2 Confusion matrixes for land use-land cover classification of Landsat 8 OLI data

Class names	Swampy areas	Green areas	Built-up areas	Forest	Agricultural areas/bare land	Total	User's accuracy
Swampy areas	12	0	4	4	0	20	0.60
Green areas	0	16	4	0	0	20	0.80
Built-up areas	0	0	19	0	1	20	0.95
Forest	0	0	2	16	2	20	0.8
Agricultural areas/bare land	0	0	0	2	18	20	0.9
Total/average	12	16	29	22	21	100	0.81
Producers accuracy	1	1	0.66	0.73	0.86		
	Overall Kappa: 0.76			Overall accuracy: 0.81			

an impermeable rock, which favours water stagnation and the extension of runoff surfaces that will amplify flood risks (Kazakis et al. 2015). The geological map was obtained from the Douala East sheet extracted from the database of the National Institute of Cartography in Yaoundé, Cameroon, and then digitised.

2.5.4 Rainfall and Hydraulic Conductivity/Permeability

Precipitation is the primary factor in the occurrence of flooding, regardless of environmental conditions. After a rain-storm or a succession of rainstorms, streams can overflow their banks. However, the amount of rainfall that falls in a locality is not equal at every point in the area (Colmet-Daage et al. 2017). As a result, areas with the highest rainfall amounts will be considered susceptible to flooding. For this study, rainfall maps were drawn from monthly mean rainfall data obtained from four rainfall stations in the study area (Fig. 1).

Hydraulic conductivity provides an estimate infiltration rate of water into a soil (Ushiyama et al. 2017; Recep and Veysel 2020). This infiltration rate varies from one type of soil to another, with permeability values being low in a clay soil and higher in a sandy soil. Hydraulic conductivity maps were drawn from infiltration data that were obtained from permeability tests carried out in the area using Porchet's method (1931). This method is extensively described in the literature. The permeability tests were carried out at several points homogeneously distributed over the site. The rainfall and hydraulic conductivity values were then interpolated using inverse distance weighting (IDW).

2.5.5 Euclidean Distance

The expansion of a flood event depends on the distance of a location from the drainage system (Elkhrachy 2015). Areas near the drainage system, generally experience greater flooding than areas farther away, as nearby locations are in the flow path (Samanta et al. 2018). The Euclidean distance map derives directly from the map of the river system in the basin.

2.5.6 Groundwater Table

During the flooding period, a rapid change in groundwater flow can be observed due to new water infiltrated during heavy rainfall. This flow of water arriving in a short period of time can increase the groundwater level and affect the infiltration capacity of the soil. In this way, it increases the hydraulic pressure in the aquifer and in areas where groundwater is very close to the surface (Recep and Veysel 2020). The groundwater table map was based on water levels in 267 wells (annual monthly mean static level), 59 springs

(resurgence point elevation) and rivers (surface elevation of some streams). The interpolation method used for the latter was spherical kriging.

2.5.7 Drainage Density

Drainage density is defined as the ratio of the total length of streams in a watershed to the area of the watershed (Degiorgis 2012). The higher the drainage density, the more likely it is to be flooded which justifies its significant impact on flood occurrence. The drainage density map of the Mfoundi watershed was created using the line density analysis tool.

2.5.8 TWI

The topographic wetness index is a physical representation of flood zones, which is an important component of a watershed (Soulsby et al. 2010). The flood propensity index of a watershed reflects two types of metrics, flat land and hydrographic positions (Das 2019). There is a strong relationship between the geomorphology and the TWI. TWI values are generally higher in floodplain environments (Adam and David 2011). In the present study, the TWI map was constructed from the DEM through the following equation, computed on a Raster Calculator (Ali et al. 2019; Sarkar and Mondal 2020):

$$TWI = [\text{Ln}(\text{FLOWACC} \times 900/\tan(\beta))], \quad (1)$$

where FLOWACC is the flow accumulation derived from DEM in the ArcGIS environment, and β is the slope (in degrees).

The ENVI 5.3 and ArcGIS 10.3.1 software were used for processing the LANDSAT 8 OLI satellite image and for producing all the thematic maps, respectively.

2.6 Reclassification of Parameters

The various thematic maps were then subdivided into classes. The evaluation of these classes enabled them to be rated according to their degree of influence on flood susceptibility. To rate the different parameters in a homogeneous manner, a value scale was developed based on the work of Shaban et al. (2006), Ozkan and Tarhan (2016) and Hammami et al. (2019), while also accounting for local environmental conditions. This rating scale has the following five values: 1 (very low); 2 (low); 5 (medium); 8 (high) and 10 (very high). The discretization of the parameters according to this scale helps to determine the ratings for each class.

2.7 Assessment the Effect of Factors Taken in Pairs on Flood-Susceptible Zone

To assess the influence of each factor on flood susceptibility, the factors were correlated two by two. For this purpose, the schematic sketch of Shaban et al. (2001) was used. As a general rule, one (1) point is assigned to a factor when it is dominant (major), and half (0.5) a point when it is minor (Shaban et al. 2006; Hammami et al. 2019). The sum of points obtained was used to rank the parameters according to their importance for flood susceptibility. This classification was then used in the analytical hierarchy process (AHP) of Saaty (1980).

2.8 Analytical Hierarchy Process (AHP)

Saaty's AHP (1980) allows objective determination of weights or weighting coefficients by comparing factors taken two by two using a matrix. The first step is to define the decision problem. The second step is to judge the relative importance of the factors based on the Saaty scale (Table A2) and then develop the comparison matrix. This also makes it possible to determine the weighting coefficient from the eigenvectors of these factors. Each factor was assigned a numerical value between 1 and 9, depending on its importance. A numerical value of 1 means that the two factors being compared are of equal importance, while a numerical value of 9 means that the factor in the row is much more important than the factor in the column (Table A2). Once the matrix has been produced, the third step is the normalisation of the eigenvector values (Das 2019). Finally, the last stage consists of verifying the logic in the judgements through the establishment of properties (Elkhrachy 2015; Kazakis et al. 2015). This serves to mathematically synthesise the judgements to verify their consistency, based on the calculation of the consistency ratio (CR) (Yashon and Ryutaro 2014). CR is the ratio of IC and RI from a matrix of the same size, where CI is the consistency index and RI the random inconsistency index. This ratio is given by Eq. (2) below:

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (2)$$

If $CR \leq 0.1$ or $CR \leq 10\%$, the matrix is considered to be sufficiently consistent. If this value exceeds 10%, the assessments may require some revisions. IC is the ratio between the consistency vector λ_{max} minus the number (n) of factors on the latter, and n minus one. Its mathematical expression is given by the following Eq. (3):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)}. \quad (3)$$

The different RI values are shown in Table A3.

2.9 Flood Susceptibility Mapping

The database used for the mapping of areas susceptible to flood risks was previously processed in the ArcGis software. Each parametric map was provided in raster format with a size of 30×30 m. From the ratings assigned to each parameter class, the "Reclassify" module was used to produce the layers (Elkhrachy 2015). The aggregation of the different layers using the "Mapcalculator" module made it possible to draw up the final flood risk susceptibility map of the Mfoundi catchment area. The iterative calculation of the flood risk index (FHI) was carried out according to Eqs. (4) and (5):

$$FHI = \sum_{i=1}^n W_i F_i. \quad (4)$$

Here W_i corresponds to the weight of each factor, F_i is the rating factor and n is the number of parameters.

Equation (4) can also be written in a more developed form as Eq. (5):

$$FHI = W_{LULC} F_{LULC} + W_{EL} F_{EL} + W_{LT} F_{LT} + W_{RF} F_{RF} \\ + W_{DD} F_{DD} + W_{DE} F_{DE} + W_{SL} F_{SL} + W_{PE} F_{PE} \\ + W_{TWI} F_{TWI} + W_{GL} F_{GL}. \quad (5)$$

Here W_{LULC} , F_{LULC} , W_{EL} , F_{EL} , ..., W_{GL} , F_G represent the weight and rating of the LULC and elevation parameters, respectively, with the other terms representing the weights and ratings of the other contributing parameters.

2.10 Validation

The validation of the flood susceptibility map is based on the verification of well-recorded past occurrences. For the Mfoundi watershed, two validation methods based on flood occurrence points (50 points) were used. The first validation technique is called visual. It consists in projecting the points of occurrence of flooding on the map obtained. The different positions of these points in relation to the flood classes allowed us to judge the reliability (or not) of the map obtained. The second validation technique used in this study, which is the most common one, is the statistical method of the area under the curve (AUC). This method, based on the verification of past occurrences and scientifically justified, allowed us to verify the accuracy of the model obtained. For the present study, the flood susceptibility map was subdivided into 100 classes (based on the natural breakup algorithm present in Arcgis) and the number of pixels belonging to each class was determined. The flood occurrence points were then overlaid on the resulting map, and the number of

flood occurrences for each class was listed. Based on this, the cumulative area of the different classes (plotted on the “X” axis) and the cumulative number of flood occurrences (plotted on the “Y” axis) were calculated on a standardized scale of 0–1. Then, we calculated the area under the curve (AUC) using the Eq. (6) (Das 2019):

$$AUC = \sum_{i=1}^{n=100} \frac{(X_1 + X_2)}{2(Y_2 + Y_1)}, \tag{6}$$

where *X* denotes the cumulative percentage of the area (highest to lowest); *Y* denotes the cumulative percentage of flood occurrences; 1 and 2 are two sequential classes of data and *n* is the number of classes (for our study, *n* = 100).

The AUC value ranges from 0.00 to 1.00, where 0.50–0.60 indicates low accuracy; 0.61–0.70 indicates moderate accuracy; 0.71–0.80 indicates good accuracy; 0.81–0.90 indicates very good accuracy; and 0.91–1.00 indicates excellent accuracy (Rahman et al. 2021).

3 Results and Discussion

3.1 Multiple Influencing Factors of Flood-Susceptible Zone

The ten (10) factors selected for the mapping of the flood susceptibility of the Mfoundi basin intervene independently and at varying degrees. Each factor is subdivided into classes to which are assigned ratings whose values are proportional to the degree of influence of the class.

3.1.1 Land Use-Land Cover Map

Land use-land cover has a significant influence on flooding (Rahmati et al. 2016; Magdalena et al. 2017). While vegetation favours the infiltration process, buildings, uncontrolled land use and other urban developments tend to promote runoff, which increases flooding. The land use-land cover map of the Mfoundi catchment area is shown in Fig. 4a. It is subdivided into five classes: built-up areas, which account

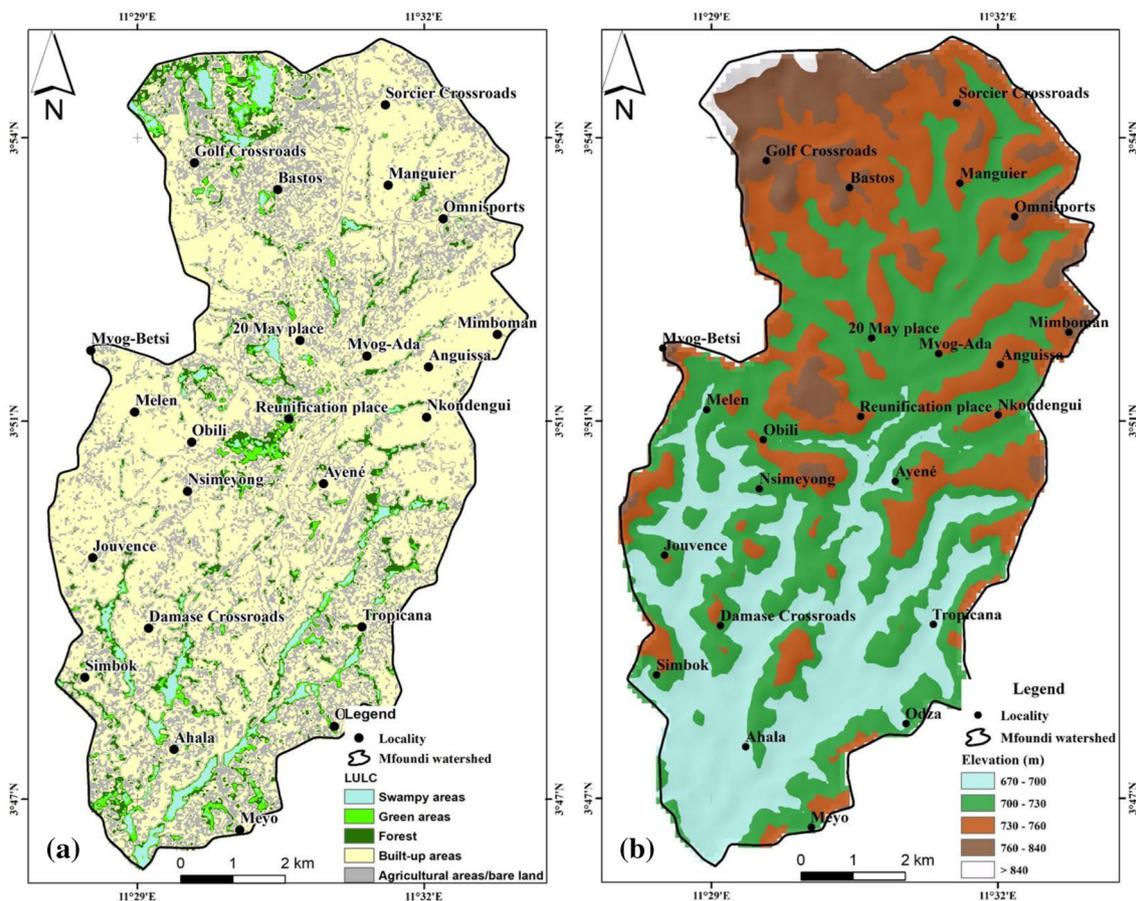


Fig. 4 Thematic maps: a land use-land cover and, b elevation

for 62% of the area of the basin; swampy areas (8%); agricultural areas and bare land (25%); green areas (3%) and finally forest (2%). Ratings of 10, 8, 5, 2 and 1 were assigned to each class according to its influence on flooding (Table 6).

3.1.2 Elevation Map

Elevation plays a very important and influential role in flood susceptibility (Degiorgis et al. 2012; Poussin et al. 2014). The elevation map of the area shown in Fig. 4b has been subdivided into five classes (670–700 m, 700–730 m, 730–760 m, 760–840 m and >840 m) represented by the following respective percentages: 22%, 26%, 38%, 12% and 2%. These different classes have been assigned grades 10, 8, 5, 2, and 1, respectively (Table 6).

3.1.3 Geology Map

The geology of the area is a significant factor used to define flood zones. The geological formations encountered in the study area are mainly composed of migmatites and biotite and garnet gneisses (Fig. 5a). These rocks are all impermeable and correspond to one class that has been assigned a rating of 10 (Table 6).

3.1.4 Rainfall Map

Precipitation is the main trigger of flooding (Collet et al. 2014; Colmet-Daage et al. 2017). The rainfall distribution map in the Mfoundi basin is divided into five classes ranging from 1559 to 1870 mm, with an amplitude of about 55 mm. These inter-annual rainfall amounts decrease from west to east (Fig. 5b). To these five classes are respectively assigned ratings 10, 8, 5, 2, and 1 (Table 6), each rating being proportional to the degree of susceptibility of the parameter to the flooding phenomenon.

3.1.5 Drainage Density Map

The drainage density map shown in Fig. 5c was reclassified into five classes, with values ranging from 0.12 to 2.61 km/km². The high values are around watercourses and at confluences. Based on its significant contribution to the flooding process, the highest density class was assigned a rating of 10, while the lowest density class was assigned a rating of 1 (Table 6).

3.1.6 Euclidean Distance Map

The Euclidean distance is a factor associated with rivers, which highlights the flood risk due to proximity to the channel (Elkhrachy 2015). The distance map of the area has five main classes: 0–102 m; 102–210 m; 210–310 m;

310–431 m; and 431–815 m (Fig. 5d). The Euclidean distance class with the lowest values (0–102 m) has a high risk of flooding and therefore has a score of 10. Those with high Euclidean distance values (431–815 m) have correspondingly lower risks. The latter class was assigned a rating of 1 (Table 6).

3.1.7 Slope Map

Slopes influence surface runoff and rainwater infiltration (Blöschl 2013; Ushiyama et al. 2017).

The slope map in the Mfoundi basin expressed in % shows five classes ranging from 0 to 33. This area is dominated by slopes below 5% (Fig. 6a). The lowest class with slopes between 0 and 2% has a slope score of 10, while the highest class (slope $>25\%$) has a score of 1. Note that the latter class is the least represented in the study area (Table 6).

3.1.8 Hydraulic Conductivity Map

The hydraulic conductivity of a soil is the capacity of the soil to allow water to pass through it (Ushiyama et al. 2017; Recep and Veysel 2020). The hydraulic conductivity map of the Mfoundi catchment area shows four classes with values ranging from 9.2×10^{-6} to 8.3×10^{-4} m/s (Fig. 6b). Thus, the highest rating (10) was assigned to the lowest classes (9.2×10^{-6} and 2.6×10^{-4} m/s). The lowest rating (2) was assigned to the highest classes (4.5×10^{-4} and 8.3×10^{-4} m/s) (Table 6).

3.1.9 Topographical Wetness Index Map (TWI)

The TWI highlights the relatively flat and naturally wet areas in the catchment (Haghizadeh et al. 2017; Sarkar and Mondal 2020). The higher this parameter value, the more likely is the area to flood (Haghizadeh et al. 2017). In the present study, the TWI map presented in Fig. 6c is divided into five classes with values ranging from 5 to 15. The class with a TWI between 11 and 15 was assigned a score of 10, while the class with TWI between 5 and 7 was assigned a rating of 1 (Table 6).

3.1.10 Groundwater Table Map

Groundwater levels vary between areas (Zuberi et al. 2019). The map of groundwater levels in the area was divided into five classes (0–2 m; 2–4 m; 4–6 m; 6–8 m and 8–28 m) (Fig. 6d). The areas of low static level (0–2 m) have a rating of 10 (Table 6); this covers about 20% of the area of the basin. Note that the depth of the water table decreases progressively from the northwest to the southeast sector of the study area.

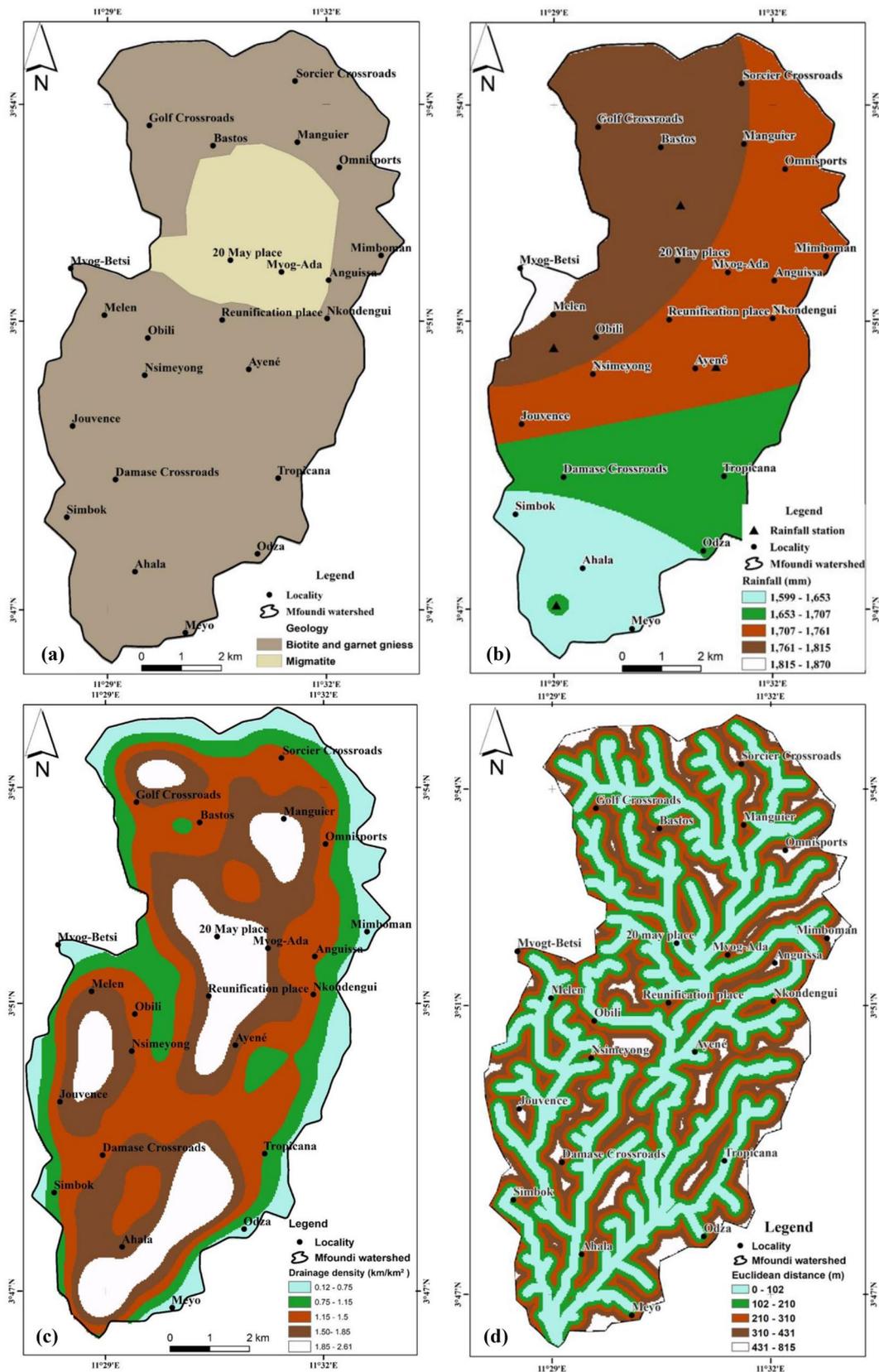


Fig. 5 Thematic maps: **a** geology, **b** rainfall, **c** drainage density, **d** Euclidean distance

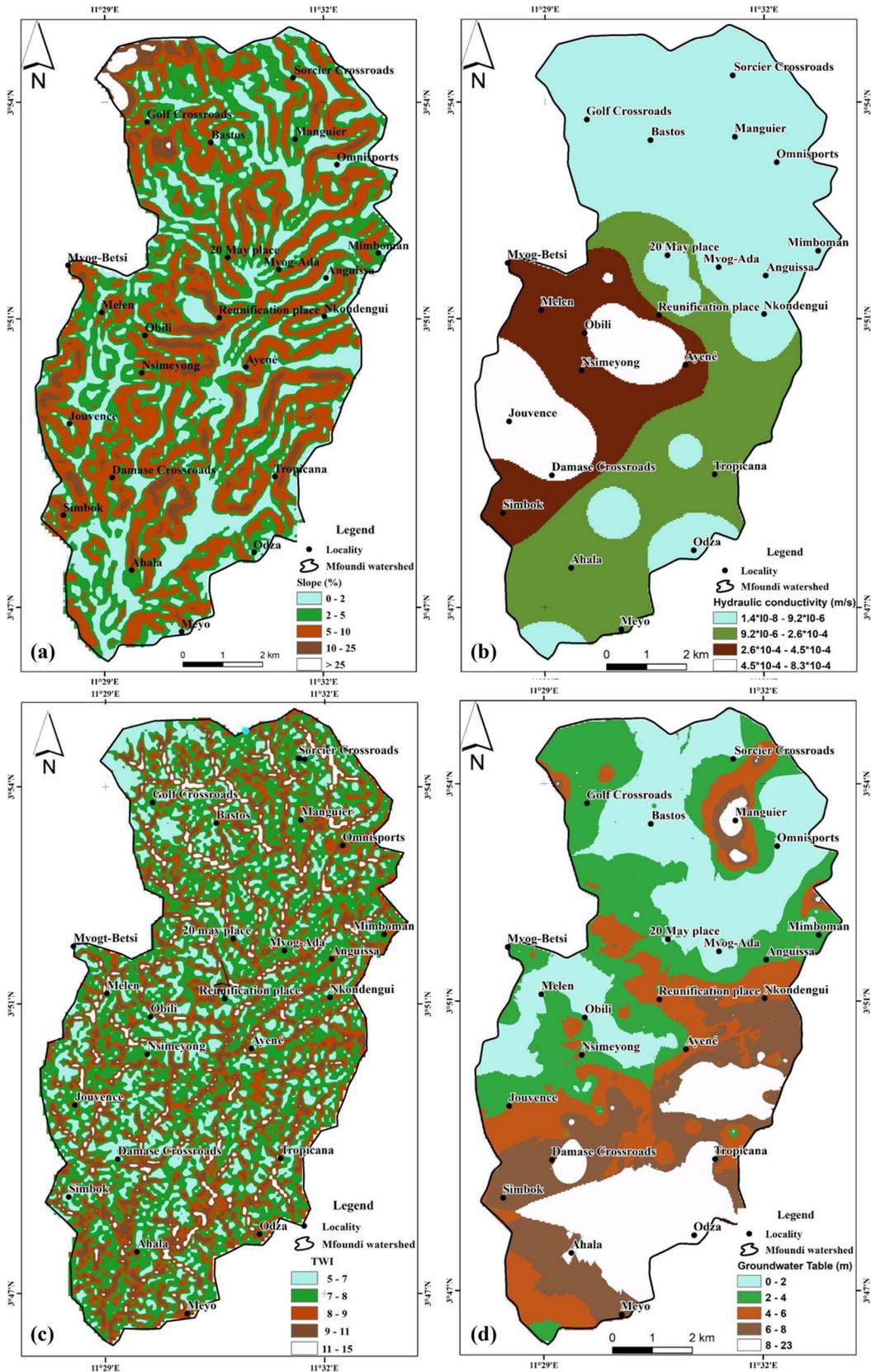


Fig. 6 Thematic maps: a slope, b hydraulic conductivity, c topographical wetness index, d groundwater table

3.2 Interrelationship and Pairwise Comparisons of the Factors Flood Hazard

As not all factors have the same degree of influence on the flood generation mechanism in the area, it is necessary to determine the weight of each factor in relation to the phenomenon being studied.

3.3 Multi-influencing Factors of Flood-Susceptible Zone

Determining risk areas can only be possible if each factor is taken independently. The relationship of Shaban et al. (2001) was applied to the factors to assess the influence of each of them on flood susceptibility is summarised in Fig. 7. This shows that for two parameters separated by a discontinuous arrow, the arrow between them points towards the dominant one. Conversely, when the line is continuous between two parameters, the arrow points towards the less dominant one, or minor element. The sum of the numbers of points for each risk factor is recorded in Table 3. The descending order of all these parameters according to their sensitivity to the phenomenon of interest is as follows: LULC with a total of 9 points, followed by elevation and geology with 8 points each, then rainfall (7.5), drainage density (7), Euclidian distance (6.5), slope (6), permeability (5.5), TWI (5) and Groundwater (4.5).

Table 3 Interrelationship of factors

No	Parameters	Major or minor effects	Outcome
1	DD	5 majors + 4 minors = 5 (1) + 4 (0.5)	7
2	LULC	9 majors + 0 minor = 9 (1) + 0 (0.5)	9
3	EL	7 majors + 2 minors = 7 (1) + 2 (0.5)	8
4	LT	7 majors + 2 minors = 7 (1) + 2 (0.5)	8
5	RF	6 majors + 3 minors = 6 (1) + 3 (0.5)	7.5
6	SL	3 majors + 6 minors = 3 (1) + 6 (0.5)	6
7	PE	2 majors + 7 minors = 2 (1) + 7 (0.5)	5.5
8	DE	4 majors + 5 minors = 4 (1) + 5 (0.5)	6.5
9	TWI	1 major + 8 minors = 1 (1) + 8 (0.5)	5
10	GT	0 major + 9 minors = 0 (1) + 9 (0.5)	4.5

LULC land use/land cover, *EL* elevation, *LT* geology, *RF* rainfall, *DD* drainage density, *DE* Euclidian distance, *SL* slope, *PE* hydraulic conductivity, *TWI* topographical wetness index, *GT* groundwater table

3.4 Weights of Factors

The matrix comparing pairs of parameters was computed to determine the weight of each factor (Table 4). The first row of this matrix shows the importance of land use/land cover (LULC) with respect to other parameters. LULC is considered more important than groundwater level, and therefore was assigned the numerical value 8. Calculating the weighting coefficients (*W*) from the eigenvectors of the ranking matrix reveals that the minimum value of 0.02 corresponds to the weight of groundwater level, while the maximum

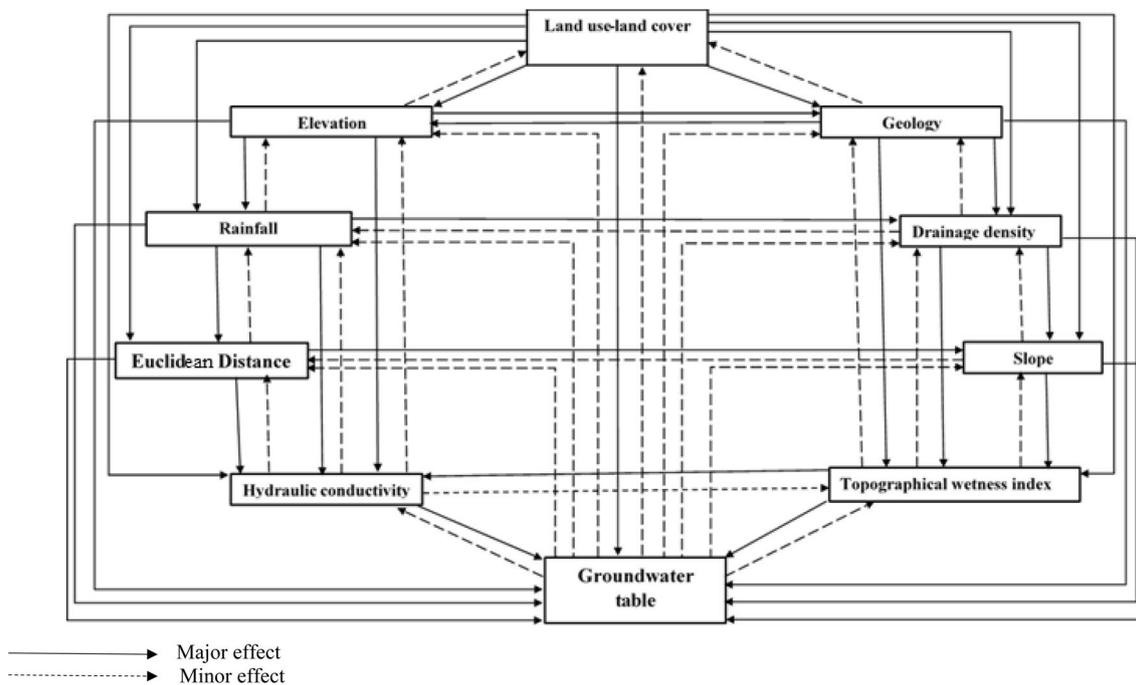


Fig. 7 Schematic sketch showing the interactive influence of factors concerning flood susceptibility (Shaban et al. 2001 modified)

Table 4 Matrix of pairwise comparisons of weight factors for AHP process

Parameters	LULC	EL	LT	RF	DD	DE	SL	PE	TWI	GT	Sum	W
LULC	1.00	1.50	1.50	2.00	2.50	2.75	3.00	4.50	5.00	8.00	31.75	0.20
EL	0.67	1.00	1.00	1.50	2.00	3.00	3.25	3.50	8.00	7.00	30.92	0.17
LT	0.67	1.00	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	8.00	7.00	30.17	0.17
RF	0.50	0.67	0.67	1.00	1.50	2.00	3.00	3.00	6.00	6.00	24.33	0.13
DD	0.40	0.50	0.50	0.67	1.00	3.00	3.00	3.50	4.00	4.00	20.57	0.11
DE	0.36	0.33	0.40	0.50	0.33	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	11.93	0.07
SL	0.31	0.40	0.33	0.33	0.33	0.67	1.00	1.50	2.75	3.00	10.62	0.06
PE	0.22	0.29	0.29	0.33	0.29	0.50	0.67	1.00	3.00	2.00	8.58	0.04
TWI	0.20	0.13	0.13	0.17	0.25	0.40	0.36	0.33	1.00	3.00	5.96	0.03
GT	0.13	0.14	0.14	0.17	0.25	0.33	0.33	0.50	0.33	1.00	3.33	0.02

LULC land use-land cover, *EL* elevation, *LT* geology, *RF* rainfall, *DD* drainage density, *DE* Euclidean distance, *SL* slope, *PE* hydraulic conductivity, *TWI* topographical wetness index, *GT* groundwater table, *Sum* summer, *W* weight

value of 0.20 corresponds to the weight of LULC (Table 4). Thus, groundwater level is ranked as the least important factor in the flood generation process, while LULC is ranked as the most important.

3.5 Consistency Ratio (CR)

The consistency ratio is used to check the consistency of judgements. In this study, the RI and consistency index (CI) values for the ten (10) parameters used are 1.49 and 0.062, respectively, for a consistency ratio of the order 0.05 or 5% (Table 5). This value is less than 10%, which indicates that the hierarchical matrix is acceptable (Saaty 1980). This CR value is higher than that obtained by Hammami et al. (2019) (0.013 or 1.3%) and lower than those of Kazakis et al. (2015) and Ake et al. (2018). They obtained values of 0.08 (8%) and 0.07 (7%), respectively, in the context of mapping flood

zones on the one hand, and mapping potential groundwater recharge zones on the other hand. However, these values vary according to the number of parameters used and the shoreline values assigned to each decision parameter.

3.6 Classes of the Factors by Weights

The contribution of the classes of factors used to produce the flood susceptibility map is shown in Table 6. This shows the ratio of the weight of each class to the sum of the weights of the classes of the factor under consideration. The results are expressed as a percentage. Thus, for the elevation factor, note that the area between 670 and 700 m is much more significant than the other elevation classes (700–730 m, 730–760 m, 760–780 m and > 840 m). The rainfall factor shows that the high rainfall class (1815–1870 mm) is much more significant than the other classes (1761–1815 mm,

Table 5 Normalized matrix of pairwise comparisons of weight factors

Parameters	LULC	EL	LT	RF	DD	PR	SL	PER	TWI	GT	SUM	VRP	PV	λ_{max}	CI	CR
LULC	0.20	0.31	0.25	0.26	0.28	0.18	0.17	0.20	0.14	0.17	2.16	10.58	0.22	/	/	/
EL	0.14	0.20	0.17	0.19	0.22	0.20	0.18	0.15	0.23	0.15	1.83	10.63	0.18	/	/	/
LT	0.14	0.20	0.17	0.19	0.22	0.16	0.17	0.15	0.23	0.15	1.78	10.63	0.18	/	/	/
RF	0.10	0.14	0.11	0.13	0.17	0.13	0.17	0.13	0.17	0.13	1.37	10.60	0.14	/	/	/
DD	0.08	0.10	0.08	0.09	0.11	0.20	0.17	0.15	0.11	0.08	1.18	10.57	0.12	/	/	/
RP	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04	0.07	0.08	0.09	0.07	0.06	0.68	10.44	0.07	/	/	/
SL	0.06	0.08	0.06	0.04	0.04	0.04	0.06	0.07	0.08	0.06	0.59	10.51	0.06	/	/	/
PER	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.08	0.04	0.47	10.26	0.05	/	/	/
TWI	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.06	0.29	10.49	0.03	/	/	/
GT	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.22	11.59	0.02	/	/	/
Sum	0.91	1.21	1.00	1.06	1.17	1.06	1.07	1.03	1.15	0.93	10.57	106.30	1.06	10.63	0.06	0.05

LULC land use/land cover, *EL* elevation, *LT* geology, *RF* rainfall, *DD* drainage density, *DE* Euclidean distance, *SL* slope, *PE* hydraulic conductivity, *TWI* topographical wetness index, *GT* groundwater table, *Sum* summer, *VRP* vector rational priority, *PV* priority vector, λ_{max} value of the consistency vector, *CI* consistency index, *CR* consistency ratio

Table 6 Classes of factors according to different weights

No	Factors	Class	Descriptive level	Rating	Factor weight	Class weight	Class weight (%)
1	Land use/land cover	Built-up areas	Very high	10	0.2	2	38
		Swampy areas	High	8		1.6	31
		Agricultural areas/bare land	Medium	5		1	19
		Green areas	Low	2		0.4	8
		Forest	Very low	1		0.2	4
2	Elevation (m)	670–700	Very high	10	0.17	1.7	38
		700–730	High	8		1.36	31
		730–760	Medium	5		0.85	19
		760–840	Low	2		0.34	8
		> 840	Very low	1		0.17	4
3	Geology	Migmatite and garnet biotite gneiss	Very high	10	0.17	1.7	100
4	Rainfall (mm)	1599–1653	Very low	1	0.13	0.13	4
		1653–1707	Low	2		0.26	8
		1707–1761	Medium	5		0.65	19
		1761–1815	High	8		1.04	31
		1815–1870	Very high	10		1.3	38
5	Drainage density (km/km ²)	0.12–0.75	Very low	1	0.11	0.11	4
		0.75–1.15	Low	2		0.22	8
		1.15–1.50	Medium	5		0.55	19
		1.5–1.85	High	8		0.88	31
		1.85–2.61	Very high	10		1.1	38
6	Euclidean distance (m)	0–102	Very high	10	0.07	0.7	38
		102–210	High	8		0.56	31
		210–310	Medium	5		0.35	19
		310–431	Low	2		0.14	8
		431–815	Very low	1		0.07	4
7	Slope (%)	0–2	Very high	10	0.06	0.6	38
		2–5	High	8		0.48	31
		5–10	Medium	5		0.3	19
		10–25	Low	2		0.12	8
		> 25	Very low	1		0.06	4
8	Hydraulic conductivity (m/s)	1.4×10^{-8} – 9.2×10^{-6}	Very high	10	0.04	0.4	42
		9.2×10^{-6} – 2.6×10^{-4}	High	8		0.32	33
		2.6×10^{-4} – 4.5×10^{-4}	Medium	5		0.20	21
		4.5×10^{-4} – 8.3×10^{-4}	Low	2		0.08	4
9	Topographical wetness index (TWI)	5–7	Very low	1	0.03	0.03	4
		7–8	Low	2		0.06	8
		8–9	Medium	5		0.15	19
		9–11	High	8		0.24	31
		11–15	Very high	10		0.3	38
10	Groundwater table (m)	0–2	Very high	1	0.02	0.02	4
		2–4	high	2		0.04	8
		4–6	Medium	5		0.15	19
		6–8	low	8		0.16	31
		8–23	Very low	10		0.2	38

1707–1761 mm, 1653–1707 mm, 1599–1653 mm). For the LULC factor, the area of the built-up areas has more influence on the phenomenon compared to the other classes (swampy area, agricultural/soil, green area and forest).

3.7 Flood Hazard Index (FHI)

FHI is related to the factor weights associated with the respective ratings of the different layers (Generino et al. 2014; Hammami et al. 2019). It was calculated in a GIS according to Eq. (6):

$$\text{FHI} = 0.20F_{\text{LULC}} + 0.17F_{\text{EL}} + 0.17F_{\text{LT}} + 0.13F_{\text{RF}} + 0.11F_{\text{DD}} + 0.07F_{\text{DE}} + 0.06F_{\text{SL}} + 0.04F_{\text{PE}} + 0.03F_{\text{TWI}} + 0.02F_{\text{GL}}. \quad (7)$$

The resulting flood hazard index (FHI) values vary from 4.16 to 9.16. The higher the value, the more sensitive the area is to flood risk.

3.8 Flood Susceptibility Map

The flood susceptibility map obtained by thematic mapping coupled with parametric and multi-criteria analyses (MDCA, AHP) highlights five main classes of flood susceptibility (Fig. 8). These are:

- The very low flood risk class which represents 9.50% of the study area; it is located at the level of the crest lines of the Mfoundi basin and its sub-basins;
- The weak class, which covers 26% of the study area and is scattered throughout the basin;
- The moderate class, which covers 23% of the study area;
- The high class which covers 22% of the study site is more represented in the central part, but slightly scattered in the northern and southern parts, and;
- The very high class which spreads over 19.5% of the surface area and is observed everywhere in the study zone, at times seen as isolated islets with extensions to the North.

The tests of Shaban et al. (2001) and Saaty (1980) applied to the present work reveal that the factors that primarily influence the flood phenomenon are LULC, elevation and geology. The same factors were highlighted by Hammami et al. (2019) in the Tunis region, where he used 8 weighting factors over an area of about 524.4 km² to map flood-prone areas. On the other hand, Kazakis et al. (2015) carried out in the Rhodope-Evros region in Greece (5004 km²) using seven (7) factors: (flow accumulation, distance from drainage network, elevation, land use, rainfall intensities, slope, and geology), found that the factors influencing flood susceptibility are, in order of importance, the flow accumulation, distance from drainage network and elevation.

Of these three factors that most influence flooding phenomena in the area, LULC has undergone an exponential change in recent years. In this regard, built-up areas that occupied 30% of the study area in 2010 (Moffo Zogning 2017) have increased to 62% in 2020 (data from this study), which would reflect a high level of soil sealing leading to flooding (Jourdan 2019; Das 2019).

In addition to these influencing factors, climate variability and change are added, which are designated here by the decrease in the number of rainy days per year (–10%), although the annual rainfall accumulation does not show any significant change over the last 56 years (1964–2019). These would explain the increase in daily rainfall intensity favourable to flooding events.

3.9 Validation of Flood Susceptibility Map

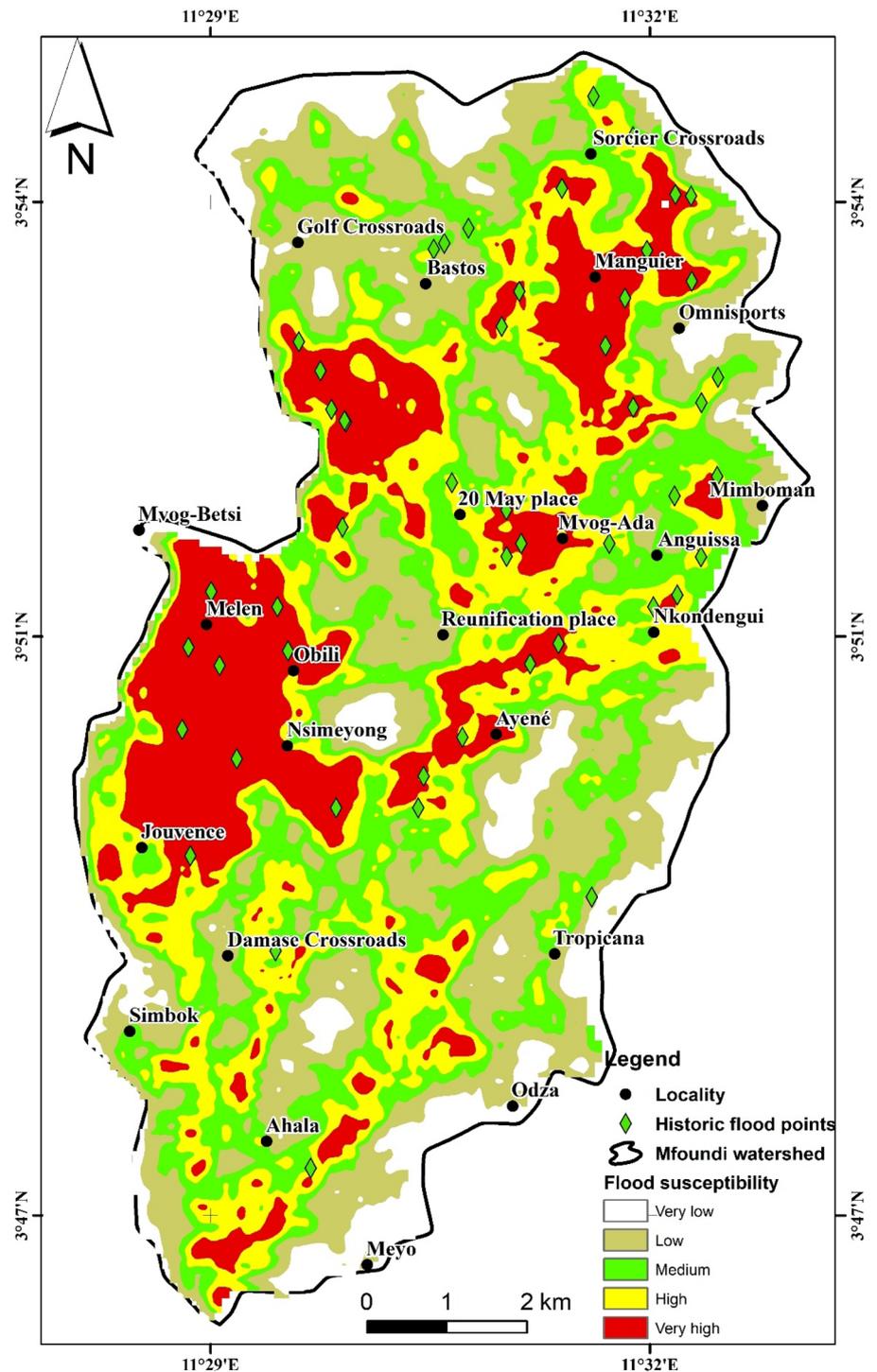
The flood susceptibility map was validated on the basis of historical flooding information in the study area (Fig. 9a–c). This information was gathered from the local population, decentralised local authorities, and direct observations in the field (e.g., flood levees on house walls, drains, and watercourses).

The visual validation technique shows that, overlaying the fifty (50) regularly flood-prone points on the final map reveals that thirty-six (36) points (72%) and eleven (11) points (22%) are located on the very high (18.65 km²) and high (21.98 km²) susceptibility areas, respectively (Table 7). By merging the latter, we obtain a surface area of potentially flood-prone areas of 39.66 km², i.e. 41.49% of the surface area of the Mfoundi catchment area.

Only 2% and 4% of the regularly flooded points are located in the low and moderate susceptibility zones with areas of 23.05 km² and 21.98 km², respectively (Table 7). The recurrence of flooding phenomena in these areas can be explained by the under sizing of sanitation works (canalisation and evacuation of rainwater) (Fig. 10a, c), the lack of civic responsibility of the population in the practice of sanitation measures (discharge of solid and liquid waste into the drains), and failure in the maintenance of hydraulic works (Fig. 10b, d).

The validation based on the statistical method reveals a high AUC value (0.84 or 84%). This demonstrates a very good accuracy of the flood susceptibility map of the Mfoundi watershed (Fig. 11). Mapping the flood susceptibility of the Mfoundi catchment area using a MCDA, AHP and GIS approach provides credible baseline information that needs to be taken into account by decision-makers in urbanisation and environmental management projects in general. However, the use of this conceptual approach has some weaknesses which are linked to local study condition.

Fig. 8 Flood susceptibility map of the Mfoundi watershed including 50 historic flood points



3.10 Recommendations to Avoid Floods in the Present Study

The analysis and observation of flooding phenomena in the Mfoundi watershed have led to a number of recommendations to limit and reduce the risks associated with flooding for both the population and the public authorities.

Local populations should: avoid living in flood-prone areas because they are very dangerous; no longer dump waste in waterways, because they obstruct the flow and are generally the cause of emersion phenomena; always approach the competent public services before acquiring a plot of land to evaluate the flood susceptibility of the site;



Fig. 9 Some flooding episodes in the Mfoundi watershed in general and the city center in particular: **a** at Kennedy Avenue; **b** at the Mfoundi market; **c** at the postal office zone

Table 7 Class and descriptive level of the Mfoundi basin associated with the historical number of flood events

Class	Descriptive level	Area (km ²)	Area (%)	Number of flood points	Flood points (%)
I	Very low	9.27	9.50	0	0
II	Low	24.63	26	1	2
III	Medium	22.04	23	2	4
IV	High	21.01	22	11	22
V	Very high	18.65	19.50	36	72

always consult the map provided by this study before any development project in the site.

For the public authorities, several challenging options present themselves: relocate the populations living in areas at risk of very high flooding to low-risk areas; carry out systematic and regular cleaning and maintenance of the minor beds of the Mfoundi and its tributaries; set up a protection perimeter in areas at high risk of flooding; create artificial water retention basins during stormy rains; set up a meteorological warning system; develop “urban gardens” in the wetlands (swampy areas); organize awareness and education campaigns for the riparian populations on flood management; multiply the hydropluviometric stations throughout

the study area; consider the alarm system in case of flood risk to inform the populations so that they take provisions for evacuation.

4 Conclusion

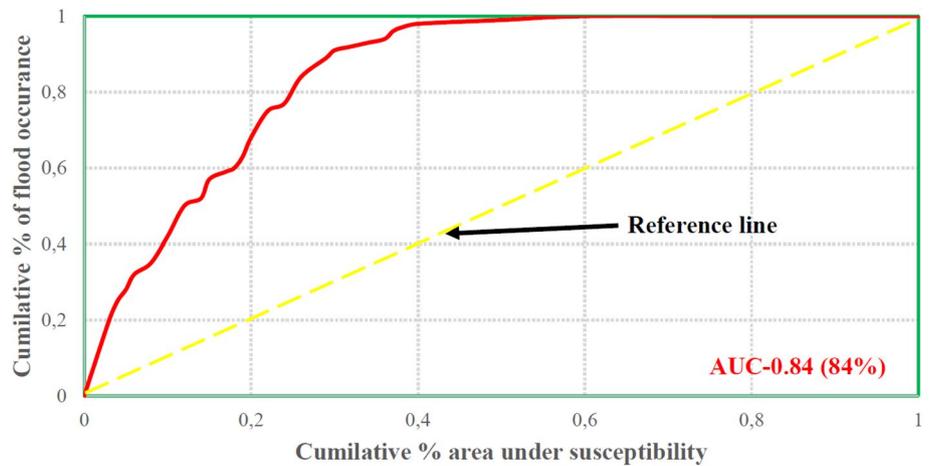
The objective of this study was to map the areas of susceptibility to flooding in the Mfoundi catchment area, to support better environmental management of the basin. The methods used were the multi-criteria decision analysis (MCDA), coupled with the analytical hierarchy process (AHP) and the GIS environment. According to the results:

- The value of the consistency ratio (0.05 or 5%) indicates that the prioritisation matrix is acceptable; this varies according to the scores assigned to each factor;
- The flood hazard index (FHI) varied from 4.16 to 9.16. The higher the value, the more sensitive the area is to the risk of flooding;
- Five main classes of flood susceptibility were identified: the very low class representing 9.50%, the low class (26%), the moderate class (23%), the high class (22%) and the very high class (19.5%);



Fig. 10 Some human activities which favor the flood in the Mfoundi watershed: **a** and **b** discharge of urban waste in the river bed; **c** embankment; **d** swamp occupation

Fig. 11 Area under the curve (AUC) related to susceptibility model validation



- The test of Shaban et al. (2001) and AHP show that land use-land cover, elevation and geology are the main factors that primarily contribute to flooding. It was found that while the yearly cumulative precipitation has not really changed, there has been a decrease in the number of rainy days and an increase in daily precipitation, which has become intense, even torrential, and also contributes to recurrent flooding;
- The flood susceptibility map was validated on the basis of field data. Of fifty (50) regularly flooded points in the Mfoundi catchment area superimposed on this map, thirty-six (36) of these points (72%) are found in environments with very high susceptibility, while eleven (11) points (22%) are located in areas of high susceptibility, proving that the model accurately reflects reality;
- The presence of regularly flooded points in areas with low and moderate susceptibility could be linked to human activities and the climate change;
- The flood susceptibility map obtained by AHP showed a very good accuracy (AUC: 84%).

Despite some imperfections in the method linked to the subjectivity of the AHP in terms of weight estimation, the results obtained constitute a real decision-making tool to aid planning and development by public authorities and decentralised local authorities in the context of local development.

Supplementary Information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00276-9>.

Acknowledgements The authors thank the LMI DYCOFAC of the French National Research Institute for Development (IRD) for their support; Department of National Meteorology (DNM) of the Ministry of Transport of Cameroon (MINTRANS) for generously providing weather data, Mr. Willy Franck SOB (SOGEFI-Cameroon) for his collaboration and Dr Mouafo Lucas of the University of Yaoundé I for amending the language.

Author Contributions DN designed the roadmap, prepared the methodology and wrote the draft; AK prepared the methodology and wrote the draft; ZM did the formal analysis; ANN generated different maps. JRNN and SMB revised the draft.

Declarations

Conflict of interest The authors declare that they have no conflict of interest between each other.

References

- Adam TN, David MC (2011) Relationships between Arctic shrub dynamics and topographically derived hydrologic characteristics. *Environ Res Lett* 6:045506
- Ake GE, Kouame KJ, Koffi AB, Jourda JP (2018) Cartography of potential recharge areas of the Bonoua aquifer (South-Eastern Côte d'Ivoire). *J Water Sci* 31(2):129–144. <https://doi.org/10.7202/1051696ar>
- Akoachere RAI, Yaya OO, Egbe SE, Eyong TA, Nji BN, Tambe DB (2019) GIS-hydrogeo-chemical model of the Yaoundé Fractured Rock Aquifer, Cameroon: aquifer setting, seasonal variations in groundwater-rock. Interaction and water quality. *J Geosci Environ Prot* 7:232–263. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.75018>
- Ali SA, Khatun R, Ahmad A, Ahmad AN (2019) Application of GIS based analytic hierarchy process and frequency ratio model to flood vulnerable mapping and risk area estimation at Sundarban region, India. *Model Earth Syst Environ* 5:1083–1102. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00593-z>
- Anaba Onana AB, Ndam Ngoupayou JR, Mvondo Ondoa J (2017) Analysis of crystalline bedrock aquifer productivity: case of central region in Cameroon. *Ground Sustain Dev* 5:66–74. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.05.003>
- Asinya AE, Alam MJB (2021) Flood risk in rivers: climate driven or morphological adjustment. *Earth Syst Environ*. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00257-y>
- Bagnouls F, Gaussen H (1957) Les climats biologiques et leur classification. *Ann Géogr* 355:193–220. <https://www.jstor.org/stable/23443505>
- Bang H, Miles L, Gordon R (2017) The irony of flood risks in African dryland environments: human security in North Cameroon. *WJET* 5(3):109–121
- Blöschl G (2013) *Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press, Cambridge
- Bon AF, Ombolo A, Ewodo Mboudou G, Ndam Ngoupayou JR, Ekodeck GE (2016) Estimation of hydraulic conductivity of soils at a watershed-scale using Porchet's method: application in the Olezoa Watershed, Yaoundé, Cameroon. *Int J Geosci* 7:397–408
- Branchet P, Cadot E, Fenet H, Sebag D, Ngounou Ngatcha B, Borrell-Estupina V, Ndam Ngoupayou JR, Kengne I, Braun JJ, Gonzalez C (2018) Polar pesticide contamination of an urban and peri-urban tropical watershed affected by agricultural activities (Yaoundé, Center Region, Cameroon). *Environ Sci Pollut Res* 25:17690–17715. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1798-4>
- Cea GL, Bladé CE, Sanz RM, Fraga I, Sañudo E, García-Leal O, Gómez-Gesteira M, González-Cao J (2020) Benchmarking of the Iber capabilities for 2D free surface flow modelling. A Coruña. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497640> (ISBN: 978-84-9749-764-0)
- Collet L, Ruelland D, Borrell-Estupina V, Servat E (2014) Assessing the long-term impact of climatic variability and human activities on the water resources of a meso-scale Mediterranean catchment. *Hydrol Sci J* 59:1457–1469. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.842073>
- Colmet-Daage A, Cécile L, Borrell-Estupina V, Servat E, Gomez ES, Ricci S (2017) Climate change impacts on extreme rainfalls, discharges and floods in Mediterranean catchments. In: IAHS 2017 Scientific Assembly
- CRED (2018) Natural disasters in 2018: lower mortality, higher cost. *CRED crunch*, N° 29: 2018, p 6
- Das S (2019) Geospatial mapping of flood susceptibility and hydrogeomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sens Appl Soc Environ* 14(2019):60–74. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.02.006>
- Degiorgis M, Gnecco G, Gorni S, Roth G, Sanguineti M, Celeste Tar-masso A (2012) Classifiers for the detection of flood prone areas using remote sensed elevation data. *J Hydrol* 470–471:302–315. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.006> (ISSN00221694)
- Elkhrachy I (2015) Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *Egypt J Remote Sens* 18(2):261–278

- Esteves LS (2013) Consequences to flood management of using different probability distributions to estimate extreme rainfall. *J Environ Manag* 115:98–105
- Ewané Ewané B (2020) Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon. *Environ Monit Assess* 192:507. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08448-2>
- Fernandez DS, Lutz MA (2010) Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol* 111:90–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- Fouépé Takounjou AI, Ndam Ngoupayou JR, Riote J, Takem GE, Mafany G, Maréchal JC, Ekodeck GE (2010) Estimation of groundwater recharge of shallow aquifer on humid environment in Yaoundé, Cameroon using hybrid water-fluctuation and hydrochemistry methods. *Environ Earth Sci* 64:107–118. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0822-x>
- Franqueville A (1979) Croissance démographique et immigration à Yaoundé. *Cah o-m* 32:321–354
- Generino P, Sony E, Proceso LF (2014) Analytic hierarchy process (AHP) in spatial modeling for floodplain risk assessment. *Int J Mach Learn Comput* 4(5):450
- Haghizadeh A, Siahkamari S, Haghiabi AH, Rahmati O (2017) Forecasting flood-prone areas using Shannon's entropy model. *J Earth Syst Sci* 126:39. <https://doi.org/10.1007/s12040-017-0819-x>
- Hammami S, Zouhri L, Souissi D, Souei A, Zghibi A, Marzougui A, Dlala M (2019) Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). *Arab J Geosci* 12:653. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4754-9>
- Hapuarachchi HAP, Wang QJ, Pagano TC (2011) A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrol Process* 25:2771–2784. <https://doi.org/10.1002/hyp.8040>
- INS (2016) Atlas des Statistique de l'environnement. Yaoundé. Cameroon, p 284
- Jha AK, Bloch R, Lamond J (2012) Cities and flooding. A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. International Bank for Reconstruction and Development-The World Bank, Washington, DC, USA, pp 55–62
- Jourdan C (2019) Approche mixte instrumentation-modélisation hydrologique multi-échelle d'un bassin tropical peu jaugé soumis à des changements d'occupation des sols: Cas du bassin de la Mefou (Yaoundé, Cameroon). Thèse de Doctorat/Phd Univ Montpellier, p 369
- Kazakis N, Kougiass I, Patsialis T (2015) Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and analytical hierarchy process: application in Rhodope-Evros region, Greece. *Sci Total Environ* 538:555–563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>
- Kouassy Kalédjé PS, Ndam Ngoupayou JR, Fouépé Takounjou A, Zebza M, Mvondo Ondo J (2019) Floods of 18 and 19 November 2016 in Batouri (East Cameroon): interpretation of the hydro-meteorological parameters and historical context of the post-event survey episode. *Sci World J*. <https://doi.org/10.1155/2019/3814962>
- Leumbe Leumbe O, Bitom D, Mamdem L, Tiki D, Ibrahim A (2015) Cartographie des zones à risques d'inondation en zone soudano-sahélienne: cas de Maga et ses environs dans la région extrême-nord Cameroun. *Afr Sci* 11(3):45–61
- Lienou G, Mahe G, Paturel JE, Servat E, Sighomnou D, Ekodeck GE, Dezetter A, Dieulinc (2008) Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise : un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale ? *Hydrol Sci J* 53(4):789–801. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.4.789>
- Magdalena R, Agnoletti M, Alaoui A, Bathurst JC, Bodner G, Borga M, Chaplot V, Gallart F, Glatzel G, Hall J, Holden J, Holko L, Horn R, Kiss A, Kohnov S, Leitingner G, Lennartz B, Parajka J, Perdigao R, Peth S, Plavcov L, Quinton JN, Robinson M, Salinas JL, Santoro A, Szolgay J, Tron S, Den V, Akker JJH, Viglione A, Bleoschl G (2017) Land use change impacts on floods at the catchment scale: challenges and opportunities for future research. *Water Resour Res*. <https://doi.org/10.1002/2017WR020723>
- MINAT/DPC (2017) Plan National de Contingence. Direction de la Protection Civile, Cameroun, p 136
- MINEPDED (2019) Etat de l'environnement au Cameroun, p 380
- Moffo Zogning M (2017) Contribution des systèmes d'information géographique pour la cartographie des zones à risques inondables à Yaoundé: application au bassin versant du Mfoundi. Mém de Mast Univ Liège, p 55
- Ndam Ngoupayou JR, Apouamoun Yiagnigni R, Youego S, Ngnike PM, Boeglin JL, Bedimo JP (2007) Transfert d'eau et de matières dans un écosystème forestier urbanisé en Afrique: le bassin versant de la Mefou au sud du Cameroun. In actes JSIRAUF (Journée Scientifique Inter Réseau de l'AUF), pp 13–18
- Ndam Ngoupayou JR, Bon A, Ewodo Mboudou G, Ngouh AN, Ekodeck GE (2019) Hydrogeological characteristics of shallow hard rock aquifers in Yaoundé (Cameroon, Central Africa). Intech, London, p 17
- Ndjigui P-D, Badinane MFB, Nyeck B, Nandjip HPK, Bilong P (2013) Mineralogical and geochemical features of the coarse saprolite developed on orthogneiss in the south Cameroon. *J Afr Earth Sci* 79:125–142. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.11.008>
- Owona S, Schulz B, Ratschbacher L, Mvondo Ondo J, Ekodeck GE, Tchoua MF, Affaton P (2011) Pan-African metamorphic evolution in the southern Yaounde Group (Oubanguidé Complex, Cameroon) as revealed by EMP-monazite dating and thermobarometry of garnet metapelites. *J Afr Earth Sci* 59:125–139
- Ozkan PS, Tarhan C (2016) Detection of flood hazard in urban areas using GIS: Izmir case. *Proc Technol* 22:373–381. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.026>
- Porchet M (1931) Hydrodynamique des puits. *Annuaire du Génie Rural*, Fasc, p 60
- Poussin JK, Botzen WW, Aerts JC (2014) Factors of influence on flood damage mitigation behavior by households. *Environ Sci Pollut Res* 40:69–77
- Rahman M, Ningsheng C, Mahmud GI, Islam MM, Pourghasemi HR, Ahmad H, Habumugisha MJ, Washakh RMA, Alam M, Liu E, Han Z, Ni H, Shufeng T, Ashraf Dewan A (2021) Flooding and its relationship with land cover change, population growth, and road density. *Geosci Front* 12:101224. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101224>
- Rahmati O, Pourghasemi HR, Zeinivand H (2016) Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto Int*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1041559>
- Recep C, Veysel A (2020) Evaluation of hydrological and hydrogeological characteristics affecting the groundwater potential of Harran Basin. *Arab J Geosci* 13:186. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5195-1>
- Saaty TL (1980) The analytic hierarchy process. McGraw-Hill International, New York
- Samanta RK, Bhunla GS, Shit PK, Pourghasemi HR (2018) Flood susceptibility mapping using geospatial frequency ratio technique: a case study of Subarnarekha River Basin. *Model Earth Syst Environ* 4(1):395–408. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0427-z>
- Sarkar D, Mondal P (2020) Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo-Bangladesh Barind region. *Appl Water Sci* 10:17. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1102-x>
- Shaban A, Khawlie M, Kheir RB, Abdallah C (2001) Assessment of road instability along a typical mountainous road using GIS and

- aerial photos, Lebanon–eastern Mediterranean. *Bull Eng Geol Environ* 60:93–101. <https://doi.org/10.1007/s100640000092>
- Shaban A, Khawlie M, Abdallah C (2006) Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeol J* 14(4):433–443
- Sighomnou D (2004) Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun: perspective d'évolution des ressources en eau. *Th Doc Etat Univ Ydé* I:289
- Soulsby C, Tetzlaff D, Hrachowitz M (2010) Spatial distribution of transit times in montane catchments: conceptualization tools for management. *Hydrol Process* 24:3283–3288
- Takorabt M, Toubal AC, Haddoum H, Zerrouk S (2018) Determining the role of lineaments in underground hydrodynamics using Landsat 7 ETM+ data, case of the Chott El Gharbi Basin. *Arab J Geosci* 11:76. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3412-y>
- UN (2018) World urbanization prospects 2018, New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN-DESA), Population Division. May (16) Retrieved from United Nations Department of Economic and Social Affairs
- UNDESA (2017) World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables
- UNISDR (2015) The human cost of natural disasters 2015: a global perspective
- Ushiyama T, Kwak Y, Ledvinka O, Iwami Y, Danhelka J (2017) Interdisciplinary approach for assessment of continental river flood risk: a case study of the Czech Republic. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, vol 19, p 5737
- Vidhee A, Amit G (2020) Implications of land use transitions and climate change on local flooding in urban areas: an assessment of 42 Indian cities. *Land Use Policy* 95:104571. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104571>
- Yashon O, Ryutaro T (2014) Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water* 6(6):1515–1545. <https://doi.org/10.3390/w6061515>
- Zuberi DL, Komakech HC, Muzuka ANN (2019) Estimating groundwater recharge on the southern slope of Mount Kilimanjaro, Tanzania. *Environ Earth Sci* 78:687. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8>



Urban flood susceptibility modelling using AHP and GIS approach: case of the Mfoundi watershed at Yaoundé in the South-Cameroon plateau



Daouda Nsangou^a, Amidou Kpoumié^b, Zakari Mfonka^c, Abdou Nasser Ngouh^{a,d}, Donald Hermann Fossi^{a,e}, Camille Jourdan^f, Henri Zobo Mbele^a, Oumar Farikou Mouncherou^e, Jean-Pierre Vandervaere^g, Jules Remy Ndam Ngoupayou^{a,*}

^a Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaounde I, PO Box: 812, Yaoundé, Cameroon

^b Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Maroua, PO Box: 814, Maroua, Cameroon

^c Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Douala, PO Box: 24157, Douala, Cameroon

^d National Institute of Cartography (NIC), Laboratory of Image Treatment for Stereo-restitution, P.O. Box:157, Yaoundé, Cameroon

^e Institute of Mining and Geological Research (IRGM), Hydrological Research Center, P.O. Box: 4110, Yaoundé, Cameroon

^f Laboratory for the Study of Soil-Agrosystem Interactions-Hydrosystem (LISAH), University of Montpellier, PO Box: 34060, Montpellier cedex 1, France

^g Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Université Grenoble Alpes, BP: CS 40700, 38058 Grenoble cedex 9, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 May 2021

Revised 28 October 2021

Accepted 2 November 2021

Editor: DR B Gyampoh

Keywords:

Yaoundé-Cameroon

Multi-criteria decision analysis

Mapping

Flood hazard

Validation

ABSTRACT

Floods are considered as the natural hazards that affect the world's major metropolises the most. Thus, the present study aimed at evaluating the sensitivity to flood risks of the Mfoundi watershed (96.5 km²) located in the heart of the Cameroonian political capital in a tropical humid forest zone, more precisely in the South Cameroon plateau. The methodological approach adopted was to identify the factors that most favor the risk of flooding in the area from intense literature review and field investigations; the analysis of these factors and the calculation of the Flood Hazard Index (FHI) using the Analytical Hierarchy Process (AHP) approach coupled with the Geographical Information System (GIS) environment. The results reveal that among the ten parameters of the natural environment (elevation, drainage density, rainfall, slope, distance from the river, topographic humidity, hydraulic conductivity, groundwater level, geology and land cover) selected, the land cover, elevation and the geology are the factors that most influences the flooding phenomenon in the area. The value of Flood Hazard Index (FHI) varied from 4.16 to 9.16, the higher the value, the more sensitive the area is to the risk of flooding. Five main classes of flood susceptibility are highlighted: very low, low, moderate, high and very high, representing 9.50, 26, 23, 22 and 19.5%, respectively of the study area. To validate the efficiency of the obtained flood susceptibility map, the adopted Area Under the Curve (AUC) method shows a very good accuracy (0.84 or 84%). The results of this study constitute a basic tool for

* Corresponding authors at: Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaoundé I, PO Box: 812, Yaoundé, Cameroon.

E-mail addresses: nsangoudaoud@yahoo.fr (D. Nsangou), amidou27@yahoo.fr (A. Kpoumié), zakarimfonka@yahoo.fr (Z. Mfonka), n.abdounasser@yahoo.fr (A.N. Ngouh), fdonaldhermann@yahoo.fr (D.H. Fossi), camille.jourdan@umontpellier.fr (C. Jourdan), zmhenri@gmail.com (H.Z. Mbele), omouncherou@yahoo.fr (O.F. Mouncherou), jean-pierre.vandervaere@univ-grenoble-alpes.fr (J.-P. Vandervaere), jrdam@gmail.com (J.R. Ndam Ngoupayou).

decision-making for environmental management by public authorities and decentralised territorial authorities with territorial jurisdiction.

© 2021 Published by Elsevier B.V. on behalf of African Institute of Mathematical Sciences / Next Einstein Initiative.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Introduction

The management of water resources and associated hydrological risks is becoming a major concern in our societies [1]. Being the wide range of hydrological hazards around the world, floods are the most frequent and damaging [2]. Between 1994 and 2013, floods accounted for 43% of recorded natural disasters, affecting nearly 2.5 billion people [3]. During these two decades, floods has caused the death of nearly 158,000 people worldwide and affected more than 2.3 billion people at different levels. While deaths due to floods have declined significantly since the early 1980s, economic losses from flood-related disasters are increasing [4]; they average more than US\$23 billion per year [4]. Numerous studies show that population growth, urbanization and climate change will lead to a significant increase in flooding in the coming years [5,6]. These are amplified by the orohydrographic characteristics of the various catchments affected by these extreme phenomena [7].

Cameroon, like other sub-Saharan African countries, is currently facing several hydroclimatological risks and/or disasters (floods, mass movements, violent winds and drought) [6]. These phenomena variably leave human, economic and environmental damage at the heart of many concerns. Between 2007 and 2015, floods affected nearly 367,276 people, leaving them the most risky in the country [8]. In Cameroon, floods are more common to varying degrees in Sudano-Sahelian, humid tropical, continental and coastal cities [9,10]. For example the flood of the 5th September 2020 in Kousseri (Far North Region) which affected more than 10,000 people, almost 400 households and destroyed 150 houses. Those, that occurred on the 18th and 19th November 2016 in Batouri (southern plateau of Cameroon) causing material damage. That of the night of 21st August 2020 in Douala (Littoral Region), which affected around 500 families and left significant material and economic damage. But also the one that occurred very recently in the Douala town on the morning of 12th August 2021, having caused human deaths and destroyed infrastructure (bridges, houses, etc.).

The Yaoundé town (Cameroon's political capital), which is drained by the Mfoundi and Mefou rivers, has witnessed population increase from about 60,000 inhabitants in 1960 [11] to over 3 million in 2017 [12]. This strong demographic growth, combined with anarchic urbanisation, orohydrographic characteristics and highly irregular hydrological regimes, is believed to be one of the factors behind the major runoffs and violent flash floods generated by these topographical sub-basins [7,8]. The latter are undoubtedly complementary sources and catalysts for floods, which have often caused significant damage and sometimes loss of human life. Between 1980 and 2016, there was an estimated 171 major floods that caused more than 70 deaths in the country [13]. Surveys of the inhabitants revealed that flood problems appeared from the mid-70s onwards. At the very beginning, there were an average of three floods per year. Since the 1990s, almost every rainy event has led to flooding. For example, the floods of 11th, 12th and 13th October 2019; the floods of 21 May 2020 and the flood of 17th August 2021 which affected several localities in the Yaoundé such as the Central Post Office, the Mfoundi Market, Nsimeyong, Melen, Nkolbisson, Tropicana and Obili.

Indeed, most of the studies related to flooding till date has focused on risks and disasters caused by floods in the Yaoundé town, on the hydroclimatological and hydrological functioning of the Mefou and Mfoundi catchment areas [14,15]; on the hydrological modelling of the Mefou basin [7]; and a summary of inventory of flood zones based on GIS [13]. These studies reveal that rainfall in the zone is abundant and spreads over four seasons unevenly distributed over the year (two rainy seasons and two dry seasons). The observed flows follow variations in the rainfall regime. However, the Mfoundi watershed which drains the Yaoundé town responds more quickly to the intensity and duration of the rains. This is the origin of the resurgence of floods during periods of high rainfall. To address this problem, the government initiated the Yaoundé Sanitation Projects (PADY) for its phases 1 and 2 [7], which led to the construction of a 6.4 km canal on the course of the Mfoundi on 4 of its tributaries, and the implementation of campaigns to clean up certain drains in the city. Despite all these measures taken, floods are becoming more frequent and continue to take a toll [13]. In order to facilitate the implementation of a flood mitigation strategy in the territory, the delineation of flood susceptibility areas based on geo-environmental and anthropogenic factors remains a very effective tool to prevent future damages. This susceptibility to flooding can be further defined as the sensibility or ease with which each area of the basin is flooded [16,17,18,19]. In this regard, several tools and techniques have been developed in recent years. Examples include: 1) the use of field surveys [19,20]; 2) modelling from hydraulic models [21] and mathematical models; 3) the Analytical Hierarchy Process (AHP) [17,18,21,22]; 4) Geographic Information Systems [23]; 5) the use of Geographic Information System (GIS) and different forms of remote sensing (frequency ratio, optical, passive microwave and active microwave) [1,2]; 6) the use of coupled AHP and GIS approaches [16,19]. Among these different techniques and methods, the Analytical Hierarchy Process (AHP) which is a method of multi-criteria decision analysis (MCDA) coupled with GIS is the most widely used. It can take into account a large number of parameters in order

to obtain precise results that are close to reality. This method has already been used in other climatic and morphological environments; but also at the largest scales. However, its application in a medium-sized basin located in the humid tropical forest zone characterized by a rather uneven morphology, a strong urbanization, the notorious incivism of the populations in the environmental management and the impacts of the climate variabilities and/or changes like Mfoundi becomes a necessity.

The Mfoundi watershed, which drains the entire of Yaoundé town, is a victim of flooding every year during the rainy seasons (spring and autumn) [7,13]. Thus, the objective of the present study is to conduct an accurate mapping of flood susceptibility areas in the urbanized Mfoundi watershed using the Analytical Hierarchy Process (AHP) coupled with the Geographic Information System (GIS). The AHP is established using existing conditions as a reference and previous work [16,17,18,19,22] to evaluate the importance of parameters on defining flood zones. GIS facilitates the processing and analysis of spatial data and facilitates the visualization, interpretation and evaluation of the results of the AHP [16,18]. The approach proposed in this study is applied for the first time in the study area. It allows us to compare the parameters, test them and rank them according to their intervention in the production of flooding in the study area. This technique has already been successfully applied in various fields, including groundwater assessment [23,24] and risk areas (flood, landslide...) [16,25].

Material and methods

Study area

Geographical sitting, climate and oro-hydrography

The Mfoundi watershed is located in Central Africa, precisely in the Center region of Cameroon. It covers an area of 95.6 km² entirely urbanised. It extends between latitudes 3° 47' and 3° 54' North, and longitudes 11° 29' and 11° 32' East (Fig. 1).

The climate of the Mfoundi basin is that of the city of Yaoundé and its surroundings. It is of the transitional tropical and equatorial type with four unevenly distributed seasons (two rainy and two dry seasons) [14,26]: a short rainy season from March to June corresponding to spring; a short dry season (July) corresponding to summer; a long rainy season (August to November) corresponding to autumn and; a long dry season (December to February) corresponding to winter (Fig. 2). The average rainfall and interannual mean temperature are 1,554±261 mm and 24°C, respectively for the period between 1964 and 2019. The dominant vegetation observed in the zone consists of secondary forest that has been severely degraded by human activities.

Geomorphologically speaking, the Mfoundi watershed belongs to the southern Cameroonian plateau with altitudes varying between 670 m and 900 m. The relief is highly rugged, dominated by hills and incised valleys, cut in the shape of half oranges and with convex slopes interspersed with wide marshy valleys that are increasingly inhabited by the expanding population growth. The Mfoundi watershed is a sub-basin of the Mefou (840 km²) and the latter is a sub-basin of the Nyong (27,800 km²) which is part of the coastal river basins of Cameroon. The Nyong basin is the second most important river in Cameroon [26] after the Sanaga. The Mfoundi watershed has a dendritic hydrographic network, partially draining 6 of the 7 sub-divisions of the Yaoundé town; the latter Mfoundi takes its source NNW of the city of Yaoundé, at the top of Mount Fébé at an altitude of about 950m. It flows in a N-S direction to join Mefou River at the level of Afan-Oyoo. The main tributaries on the left bank are: the Tongwala, Ntem, Ebogo, Ewoué, Aké, Nkié, Odza rivers; and those on the right bank are: the Abiergueu, Ekozoa and Djoungolo, Mingoa, Olezoa, and Biyemé, Ntsomo and Ezala rivers (Fig. 1 and Table 1). The water transfer from the Mfoundi to the Mefou and to Nyong shows that for an interannual rainfall of between 1,560 mm and 1,750 mm, respective flow coefficients of 80 % are recorded for a Specific Flow (SF) of 42.5 l/s/km², 37 % (SF = 20 l/s/km²) and 18 % (SF = 10 l/s/km²) [15]. The 2006-2007 flood hydrograph for the Mfoundi River (Fig. A.1) shows several successive peaks in May 2007 (the flood of May 11 with a flow of 12.6 m³/s, May 21 with 12.6 m³/s, May 23 with 18, 5 m³/s, and the 29th with 18.4 m³/s) which combined with other factors (domestic discharges, state of saturation of the soil, type of rainfall...) were at the origin of the floods of May 29th of this year [27].

Geology and Hydrogeology

The Mfoundi catchment is located in the southern part of the Pan-African Central African mobile chain, which is a collection of Precambrian terrain [28]. It belongs to the Yaoundé Group and consists of metamorphic rocks made up of garnet and biotite gneiss and migmatitic rocks. Three main soil types develop on these basement formations: red ferralitic soils, yellow ferralitic soils and hydromorphic soils [29].

From a hydrogeological point of view, the zone presents two types of superimposed aquifer. A more or less continuous upper porous aquifer hosted in altered rocks and a lower fractured and/or fractured discontinuous aquifer in metamorphic basement formations [30]. Fluctuations in piezometric levels generally follow the rainfall regimes. However, the fluctuations in piezometric levels are much greater at the top of the slopes compared to the lowlands [30].

Description of method

The methodological approach used in this study consisted of: 1) identifying the parameters that have more or less an impact on the flood phenomenon. This was done on the basis of an intense literature review on the flood theme coupled with several field observation campaigns; 2) the calculation of the Flood Hazard Index (FHI) using Analytical Hierarchy

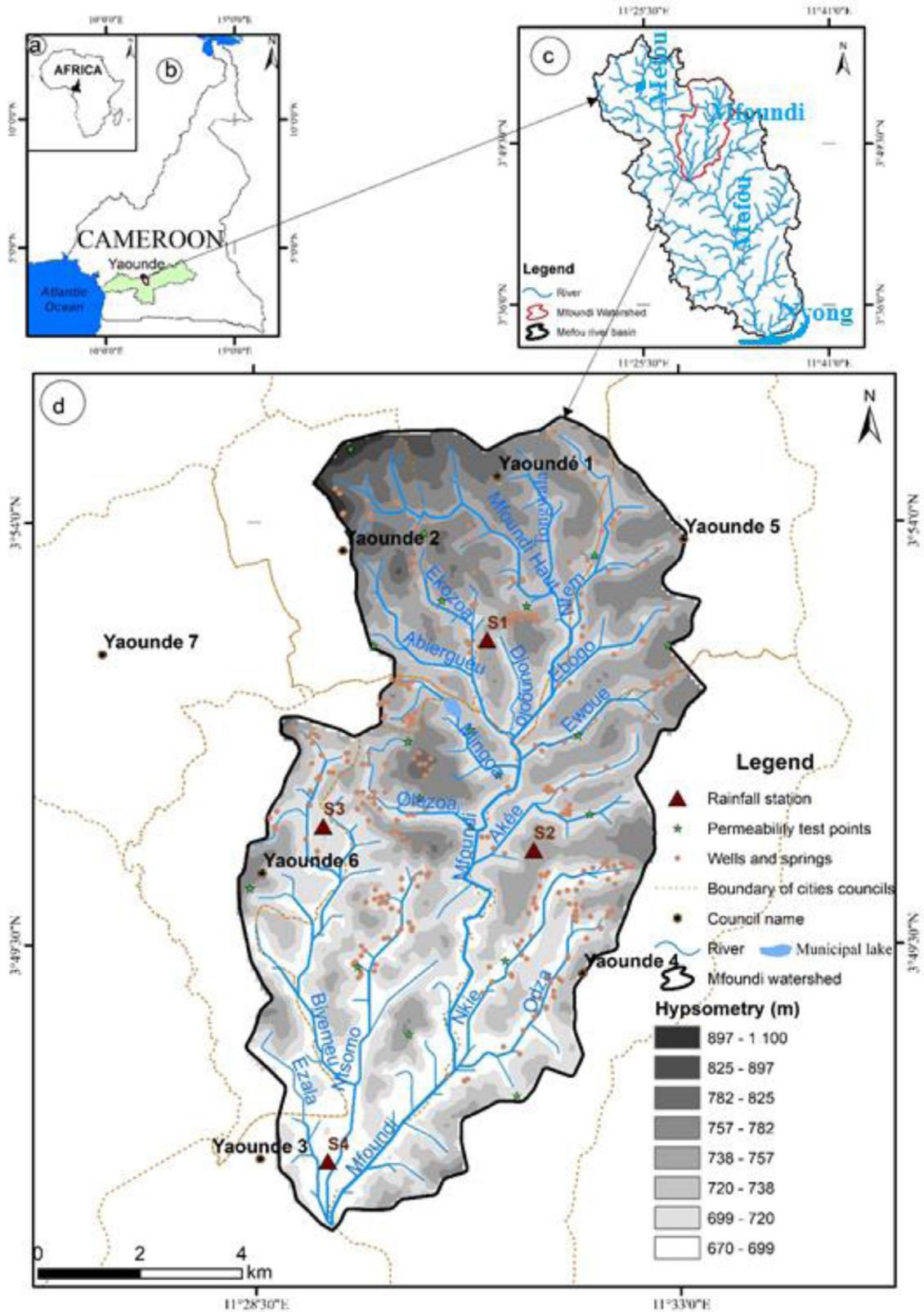


Fig. 1. Location of the study area: (a) Cameroon in Central Africa; (b) Nyong and Mefou basins in Cameroon; (c) the Mfoundi watershed in the Mefou basin; (d) the Mfoundi watershed

Table 1
Physiographic characteristics of Mfoundi's elementary catchment areas

Characteristics													
Elementary catchment		X	Y	A(km ²)	P(km)	GC	Form of the basin	Lb(km)	lb(km)	Z. Min(m)	Z. Max (m)	Z. Median (m)	U
Left-bank tributary	Tongwala	3° 53' and 3° 55'	11° 31' and 11° 32'	3.42	9.2	1.4	Rectangle	3.52	0.97	715	770	739	2
	Ntem	3° 52' and 3° 55'	11° 31' and 11° 33'	5.8	15.0	1.8	Rectangle	6.92	0.83	713	777	745	3
	Ebogo	3°52' and 3° 53'	11° 32' and 11° 33'	3.38	10.0	1.6	Rectangle	3.07	1.1	700	757	724	2
	Ewoué	3°51' and 3° 52'	11° 31' and 11° 34'	3.64	10.0	1.5	Rectangle	4.25	0.85	687	770	741	2
	Akéé	3°50' and 3° 51'	11°31' and 11° 33'	4.92	9.2	1.2	Rectangle	3.23	1.52	762	713	736	2
	Nkié	3° 48' and 3° 50'	11° 31' and 11°32'	5.17	14	1.8	Rectangle	6.16	0.84	660	760	720	2
Right bank tributary	Odza	3° 46' and 3° 50'	11°30' and 11°32'	6.1	14	1.59	Rectangle	5.96	1.2	670	750	712	2
	Abiergueu	3° 52' and 3° 54'	11°29' and 11° 31'	6.25	15.0	1.5	Rectangle	5.58	1.12	715	840	732	2
	Ekozoa	3° 52' and 3° 54'	11°30' and 11° 31'	4.03	7.5	1.15	Rectangle	2.53	1.59	712	830	738	2
	Djoungolo	3° 51' and 3° 53'	11°30' and 11° 32'	1.42	5.6	1.3	Rectangle	2.08	0.68	705	745	728	2
	Mingoa	3° 51' and 3° 53'	11°28' and 11° 31'	3.49	9.0	1.4	Rectangle	3.74	0.93	725	780	760	2
	Olézoa	3° 50' and 3° 51'	11° 29' and 11° 31'	3.62	8.44	1.21	Rectangle	3.10	1.12	700	795	740	2
	Ntsomo	3° 48' and 3° 51'	11°29' and 11° 30'	8.02	15	1.5	Rectangle	6.32	1.26	680	740	738	2
	Biyéme	3° 46' and 3° 51'	11°28' and 11° 30'	12.15	19.0	1.6	Rectangle	8.54	1.42	680	753	719	3

Legend: X=Latitude; Y=Longitude; A= Basin area; P=Perimeter; GC= Gravelius compactness coefficient; Lb= basin length; lb= basin width; Z=elevation; Z. Max=maximum height of the basin; Z. Min=minimum height of the basin; Z. Median=medium height of the basin; U= Stream order.

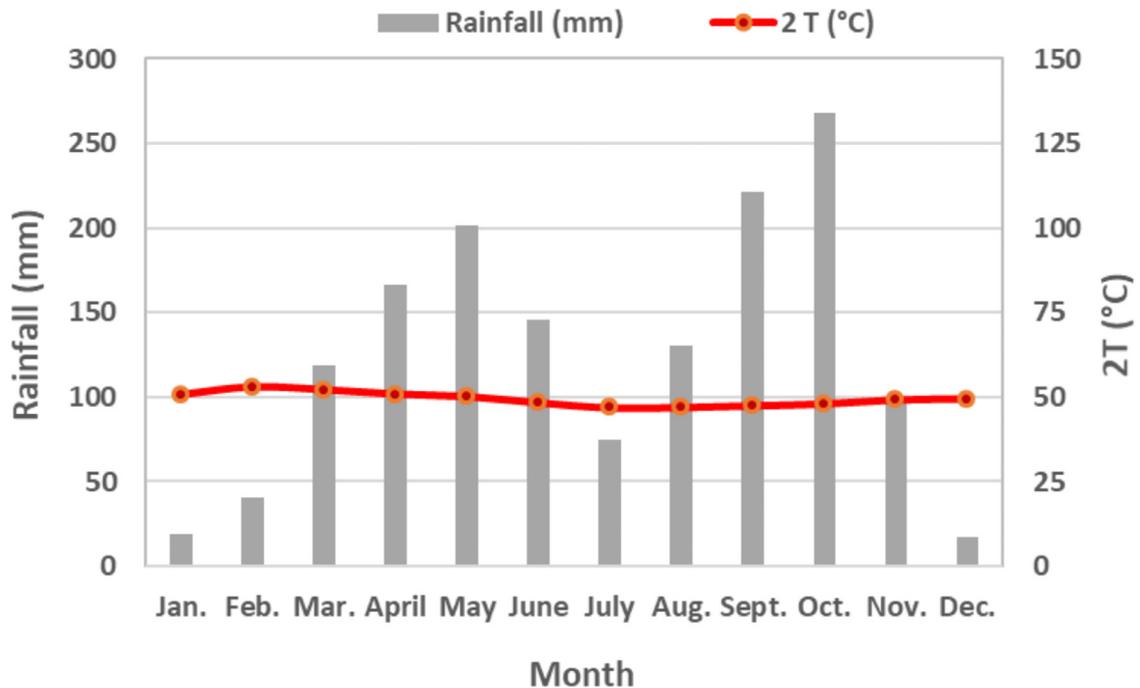


Fig. 2. Ombrothermal diagram of the Yaoundé city, based on the mean monthly variations of rainfall and air temperatures for the period from 1964 to 2019

Process (AHP) and the Geographical Information System (GIS) environment, in order to generate a flood susceptibility map. This methodology was completed by the validation of the latter from the Area Under the Curve (AUC) method based on the verification of field data (different flooding events having taken place in the study area) (Fig. 3).

Identification of the parameters that favour flooding in the area

From the field observations coupled with an intense bibliographical study, 10 parameters have been identified in the Mfoundi catchment area as factors favouring flooding phenomena. On one hand, these are called natural or geo-environmental factors such as: elevation, drainage density, rainfall, slope, distance from the river, topographical humidity, hydraulic conductivity (soil permeability), groundwater level, the presence of swampy areas and geology; and on the other hand, anthropogenic factors consisting of the Land Cover (LC) controlled by galloping population growth and the failure of sanitation systems.

Data sources, mapping and reclassification of parameters

In order to achieve the objective of this work, two types of data were used (Table A.1): i) data collected in the field, which could be called primary data; these are made up of cartographic documents, rainfall records, hydrodynamic characteristics of the aquifer (hydraulic conductivity and groundwater table) and GPS coordinates of the points of occurrence of flooding; ii) secondary data made up of satellite images (Landsat 8 OLI and SRTM). Some data obtained from specialized institutions or by downloading online.

These data were used to map the following parameters:

The land cover map

It was produced from the Landsat 8 OLI (Operational Land Image) sensor satellite image acquired on January 26th 2020. The main stages in the production of this map are: image pre-processing by geometric, radiometric and atmospheric corrections; image enhancement by spectral refinement and noise suppression; image transformation using Principal Component Analysis (PCA); and finally, supervised classification of the image using the maximum likelihood method [31]. The information provided by this map was compared with field observations. Thus, a correction was made using the 3×3 median filter to eliminate isolated pixels and soften the contours of the different classes obtained [2].

Elevation and slope maps

They result from the DEM (Digital Elevation Model) extracted from the global SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) image with an accuracy of 30×30 m.

Geological map

The geological map was obtained from the Douala East sheet extracted from the database of the National Institute of Cartography in Yaoundé Cameroon and then digitised.

Rainfall and hydraulic conductivity/permeability maps

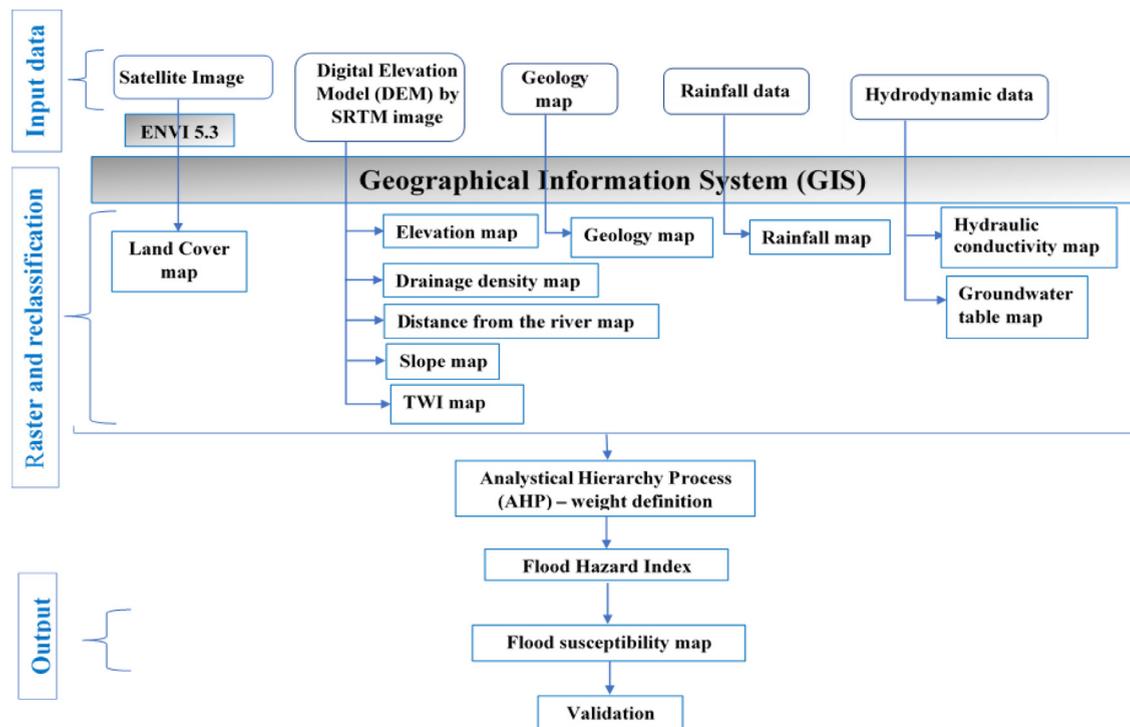


Fig. 3. Conceptual flood susceptibility mapping model based on the analytical prioritization process (AHP) coupled with GIS

They were drawn respectively from monthly average rainfall data obtained from 4 rainfall stations in the study area (Fig. 1); infiltration data, were obtained from permeability tests carried out in the area using Porchet's [32] method; the latter method is extensively described in the literature [33]. The permeability tests were carried out at several points homogeneously distributed over the site. These data were then interpolated using Inverse Distance Weighting (IDW).

The distance from the river map

The distance from the river map derives directly from the map of the river system in the basin, while the groundwater table was based on water levels in 267 wells, 59 springs and rivers. The interpolation method used for the latter is spherical kriging.

The drainage density map

It was created using the line density analysis Tool.

The TWI map

The TWI map has been constructed from DEM by running following equation on Raster Calculator [1].

$$TWI = [\text{Ln}(\text{FLOWACC} \times 900 / \tan(\beta))] \quad (1)$$

where FLOWACC is the flow accumulation derived from DEM in the ArcGIS environment and β is the slope (in $^{\circ}$).

The ENVI 5.3 and ArcGIS 10.3.1 software was used for processing the LANDSAT 8 OLI satellite image and for producing all the thematic maps, respectively.

The various thematic maps were then subdivided into classrooms. The evaluation of these classes enabled them to be rated according to their degree of influence on flood susceptibility. In order to estimate the ratings of the different parameters in a homogeneous manner, a value scale was developed based on the work of Shaban et al. [34], Ozkan and Tarhan [25] and Hammami et al. [16], also taking into account local environmental conditions. This scale of ratings ranging from 1 (very low) to 10 (very high) (Table A.2). The discretization of the parameters according to this scale helps to obtain the ratings for each class.

Assessment the effect of factors taken in pairs on flood susceptible zone

In order to assess the influence of each factor on flood susceptibility, the factors were correlated two by two. For this purpose, the schematic sketch of Shaban et al. [34] was used. As a general rule, one (1) point is assigned to a factor when it is dominant (major) and 0.5 point when it is minor [16,35]. The sum of points obtained is used to rank the parameters according to their importance on flood susceptibility. This classification is then used for the analytical hierarchy process (AHP) of Saaty [36].

Analytical Hierarchy Process (AHP)

Saaty's AHP [36] allows objective determination of weights or weighting coefficients by comparing factors taken two by two using a matrix. Thus, the first step is to define the decision problem. The second step is to judge the relative importance of the factors based on the Saaty [36] scale (Table A.3) and the development of the comparison matrix. It also makes it possible to determine the weighting coefficient from the eigenvectors of these factors. Each factor was assigned a numerical value between 1 and 9, depending on its importance [25]. A numerical value of 1 means that the two factors being compared are of equal importance. However, a numerical value of 9 means that the factor in the row is much more important than the factor in the column (Table A.3).

Once the matrix has been produced, the third step is the normalisation of the eigenvector values [36]. Finally, the last stage consists in verifying the logic in the judgements through the establishment of properties [22,37]. The latter helped to mathematically synthesise the judgements in order to verify their consistency, based on the calculation of the consistency ratio (CR) [24].

CR is the ratio of IC and RI of a matrix of the same size. This ratio is given by Eq. (2) below

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{2}$$

where: CI is Consistency Index and RI is Random inconsistency Index;

If $CR \leq 0.1$ or $CR \leq 10\%$, the matrix is considered to be sufficiently consistent, in case this value exceeds 10%, the assessments may require some revisions.

IC is the ratio between the difference in the value of the consistency vector λ_{max} and the number (n) of factors on the latter minus one. Its mathematical expression is also given by the following Eq. (3):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)} \tag{3}$$

The different RI values are shown in table A.4.

Flood susceptibility mapping

The database used for the mapping of areas susceptible to flood risks has been previously processed in the ArcGis software. Each parametric map is elaborated in raster format with a size of 30 × 30 m. From the dimensions assigned to each parameter class, the "Reclassify" module was used to produce the layers [37]. The aggregation of the different layers using the "Mapcalculator" module made it possible to draw up the final flood risk susceptibility map of the Mfoundi catchment area. The iterative calculation of the Flood Risk Index (FHI) was carried out according to Eq. (4) and (5) below:

$$FHI = \sum_{i=1}^n W_i F_i \tag{4}$$

Where: **W_i** correspond to the weight of each factor;

F_i the rating of the factor and **n** the number of parameters;

This Eq. (4) can also be written in a more developed form presented by the following Eq. (5):

$$FHI = W_{LULC}F_{LULC} + W_{EL}F_{EL} + W_{LT}F_{LT} + W_{RF}F_{RF} + W_{DD}F_{DD} + W_{DE}F_{DE} + W_{SL}F_{SL} + W_{PE}F_{PE} + W_{TWI}F_{TWI} + W_{GL}F_{GL} \tag{5}$$

Where W_{LULC} , F_{LULC} , W_{EL} , F_{EL} , represent the weight and rating of the LULC and elevation respectively.

Validation

The Area Under the Curve (AUC) method was used to validate the flood susceptibility map of the Mfoundi watershed. This simple method, based on the verification of past occurrences and scientifically justified, allows the accuracy of the AHP model to be verified. It has already been used in several studies and is considered the most appropriate method to validate AHP models [6,17,18]. For the present study, the AHP-based flood susceptibility map (FHI) was subdivided into 100 classes and the number of pixels belonging to each class was determined. The flood occurrence points were then overlaid on the resulting map, and the number of flood occurrences for each class was listed. Based on this, the cumulative area of the different classes (plotted on the "X" axis) and the cumulative number of flood occurrences (plotted on the "Y" axis) were calculated on a normalized scale from 0 to 1. Then, we calculated the Area Under the Curve (AUC) using the Eq. (6) [18]:

$$AUC = \sum_{i=1}^{n=100} \frac{(X_1 + X_2)}{2(Y_2 + Y_1)} \tag{6}$$

Where:

X denotes the cumulative percentage of the area (highest to lowest);

Y denotes the cumulative percentage of flood occurrences;

1 and 2 are two sequential classes of data and n is the number of classes (for our study, n = 100).

The AUC value ranges from 0.00 to 1.00, where 0.50-0.60 indicates low accuracy; 0.61-0.70 indicates moderate accuracy; 0.71-0.80 indicates good accuracy; 0.81-0.90 indicates very good accuracy; and 0.91-1.00 indicates excellent accuracy [38].

Table 2
Classes of factors according to different weights

N°	Factors	Class	Descriptive level	Rating	Factor weight	Class weight	ClassWeight (%)
1	Land cover	Built	Very high	10	0.2	2	38
		Swampy area	High	8		1.6	31
		Agricultural/bare soil	Medium	5		1	19
		Green area	Low	2		0.4	8
		Forest	Very low	1		0.2	4
2	Elevation (m)	670–700	Very high	10	0.17	1.7	38
		700–730	High	8		1.36	31
		730–760	Medium	5		0.85	19
		760–840	Low	2		0.34	8
		> 840	Very low	1		0.17	4
3	Geology	Migmatite and garnet biotite gneiss	Very high	10	0.17	1.7	100
4	Rainfall (mm)	1,599–1,653	Very Low	1	0.13	0.13	4
		1,653–1,707	Low	2		0.26	8
		1,707–1,761	Medium	5		0.65	19
		1,761–1,815	High	8		1.04	31
		1,815–1,870	Very High	10		1.3	38
5	Drainage density (km/km²)	0.12–0.75	Very Low	1	0.11	0.11	4
		0.75–1.15	Low	2		0.22	8
		1.15–1.50	Medium	5		0.55	19
		1.5–1.85	High	8		0.88	31
		1.85–2.61	Very High	10		1.1	38
6	Distance from the river (m)	0–102	Very high	10	0.07	0.7	38
		102–210	High	8		0.56	31
		210–310	Medium	5		0.35	19
		310–431	Low	2		0.14	8
		431–815	Very low	1		0.07	4
7	Slope (%)	0–2	Very high	10	0.06	0.6	38
		2–5	High	8		0.48	31
		5–10	Medium	5		0.3	19
		10–25	Low	2		0.12	8
		>25	Very low	1		0.06	4
8	Hydraulic conductivity (m/s)	$1.4 \cdot 10^{-8}$ – $9.2 \cdot 10^{-6}$	Very high	10	0.04	0.4	42
		$9.2 \cdot 10^{-6}$ – $2.6 \cdot 10^{-4}$	High	8		0.32	33
		$2.6 \cdot 10^{-4}$ – $4.5 \cdot 10^{-4}$	Medium	5		0.20	21
		$4.5 \cdot 10^{-4}$ – $8.3 \cdot 10^{-4}$	Low	2		0.08	4
		5–7	Very Low	1		0.03	4
9	Topographical wetness index (TWI)	7–8	Low	2	0.03	0.06	8
		8–9	Medium	5		0.15	19
		9–11	High	8		0.24	31
		11–15	Very high	10		0.3	38
		0–2	Very high	1		0.02	0.02	4
2–4	high	2	0.04	8			
4–6	Medium	5	0.15	19			
6–8	low	8	0.16	31			
8–23	Very low	10	0.2	38			

Results and discussion

Multi-influencing factors of flood-susceptible zone

The ten (10) factors selected for the mapping of the flood susceptibility of the Mfoundi basin intervene at varying degrees and independently. Thus each factor is subdivided into classes to which are assigned ratings whose values are proportional to the degree of influence of the class.

Land cover map

Land cover has a significant influence on flooding [5,6]. While vegetation favours the infiltration process, buildings, uncontrolled land use and other urban development tend to promote runoff, which increases flooding. The land cover map of the Mfoundi catchment area is shown in Fig. A.2a. It is subdivided into five classes: built-up areas, which account for 62% of the area of the basin; swampy areas (8%); agricultural areas and bare land (25%); green areas (3%) and finally forest (2%). Ratings of 10, 8, 5, 2 and 1 have been assigned to each class according to its influence on flooding (Table 2).

Elevation map

Elevation plays a very important and effective role in flood susceptibility [39]. The lower it is, the more likely the area is to be flooded, as low-lying areas are the points of convergence of the various rivers [6]. The Mfoundi watershed is developed on a rugged terrain with altitudes between 670 m and 1100 m for an average of 750 m. The map of elevations in the area shown in Fig. A.2b has been subdivided into five classes (670 - 700 m, 700 - 730 m, 730 - 760 m, 760 - 840 m and > 840 m) represented by the following respective percentages: 22%, 26%, 38%, 12% and 2%. These different classes have been assigned grades 10, 8, 5, 2, and 1, respectively (Table 2).

Geology map

The geology of the area is one of the significant factors used to define flood zones. This factor is closely related to the permeability that varies from one rock to another. The infiltration of rainwater is less important for an impermeable rock, which favors the stagnation of water and the extension of runoff surfaces that will amplify the flood risks [16]. The geological formations encountered in the study area are mainly composed of migmatites and biotite and garnet gneisses (Fig. A.2c). These rocks are all impermeable and correspond to one class that has been assigned a rating of 10 (Table 2). The geological formations encountered in the study area are mainly composed of migmatites and biotite and garnet gneisses (Fig. A.2c). These rocks are all impermeable and correspond to one class that has been assigned a rating of 10 (Table 2).

Rainfall map

Precipitation is the main trigger of flooding [9]. After a rainstorm or a succession of rainstorms, streams can move beyond their beds. However, the amount of rainfall that falls in a locality is not equal at every point in the area [39]. As a result, areas with the greatest rainfall amounts will be considered susceptible to flooding. The rainfall distribution map in the Mfoundi basin is divided into 5 classes ranging from 1,559 mm to 1,870 mm with an amplitude of about 55 mm; these interannual rainfall amounts decrease from west to east (Fig. A.2d). To these five classes are respectively assigned ratings 10, 8, 5, 2, and 1 (Table 2), each rating being proportional to the degree of susceptibility of the parameter to the flooding phenomenon.

Drainage density map

Drainage density is defined as the ratio of the total length of streams in a watershed to the area of the watershed. The higher the drainage density of an area the more likely it is to be flooded which justifies its significant impact on flood occurrence [9]. The drainage density map shown in Fig. A.2e has been reclassified into five classes, with values ranging from 0.12 to 2.61 km/km². These values are high around watercourses and at confluences. Based on its significant contribution to the flooding process, the highest density class has been assigned a rating of 10, while the lowest density class has been assigned a rating of 1 (Table 2).

Distance from the river map

The distance from the river is a factor generated from rivers which highlights the flood risk due to proximity to the channel [37]. The distance map of the area has five main classes: 0 - 102 m; 102 - 210 m; 210 - 310 m; 310 - 431 m; 431 - 815 m (Fig. A.2f). The distance from the river class with the lowest values (0 - 102 m) has a high risk of flooding and therefore has a score of 10. Those with high distance from the river values (431 - 815 m) have the opposite effect. The latter class has been assigned a rating of 1 (Table 2).

Slope map

Slopes influence surface runoff and rainwater infiltration [16,18]. Areas with low slopes flood more quickly because of the low surface runoff velocity. Areas with high slopes, on the other hand, have high runoff velocity that is incompatible with flooding [17]. The slope map in the Mfoundi basin expressed in % shows five classes ranging from 0 to 33%. This area is dominated by slopes below 5% (Fig. A.2g). The lowest class with slopes between 0 and 2% has a slope of 10, while the highest class (> 25%) has a slope of 1. It is important to note that the latter class is the least represented in the study area (Table 2).

Hydraulic conductivity map

The hydraulic conductivity of a soil is the capacity of the soil to allow water to pass through it [40]. The latter provides an estimate of how quickly water infiltrates a soil [40]. This infiltration rate varies from soil to soil, permeability values will be low in a clay soil and higher in a sandy soil. The hydraulic conductivity map shows four classes of hydraulic conductivity with values ranging from 9.2×10^{-6} m/s to 8.3×10^{-4} m/s (Fig. A.2h). Thus, the highest rating (10) was assigned to the lowest hydraulic conductivity class (9.2×10^{-6} and 2.6×10^{-4} m/s). This class is more important for the flooding phenomenon, because its low value accentuates the stagnation of water. The lowest rating (2) was assigned to the highest classes (4.5×10^{-4} and 8.3×10^{-4} m/s) (Table 2).

Topographical Wetness Index map

The TWI highlights the relatively flat and naturally wet areas in the catchment [1,17]. The higher this parameter value the more floodable the area [17]. In the present study, the TWI map presented in Fig. A.2i is divided into five classes with values ranging from 5 to 15. The class with a TWI between 11 and 15 is assigned a score of 10. The class with TWI between 5 and 7 has been assigned a rating of 1 (Table 2).

Groundwater table map

Groundwater levels vary between areas. Groundwater rise can be the cause of flooding, this is materialized by the influence of meteoric water (rainfall) that infiltrates at a high speed into the aquifer and can affect the infiltration capacity of the soil. In this way, it increases the hydraulic pressure in the aquifer and in areas where groundwater is very close to the surface [40]. The map of groundwater levels in the area has been divided into five classes (0 - 2 m; 2 - 4 m; 4 - 6 m; 6 - 8 m and 8 - 28 m) (Fig. A.2j). The areas of low static level (0 - 2 m) have a rating of 10 (Table 2); this covers about 20% of the area of the basin. It should be noted that the depth of the water table decreases progressively from the North-West sector to the South-East sector of the study area.

Interrelationship and pairwise comparisons of the factors flood Hazard

As not all factors have the same degree of influence in the flood generation mechanism in the area, it is necessary to determine the weight of each factor in relation to the phenomenon being studied.

Multi-influencing factors of flood susceptible zone

Determining risk areas can only be possible if each factor is taken independently. The relationship of Shaban et al. [34] applied to the factors in order to assess the influence of each of them on flood susceptibility is summarised in Fig. A3. It is shown that: for two parameters separated by a discontinuous arrow, the one towards which the arrow is pointed is dominant in relation to the other; conversely, when the line is continuous between two parameters, the one towards which the arrow is pointed is less dominant, in this case we speak of a minor element. The sum of the numbers of points of each risk factor is recorded in Table A.5. The descending order of all these parameters according to their sensitivity to the phenomenon under study is as follows: the LC which totals 9 points, followed by the elevation and geology which total the same number of points (8), rainfall (7.5), drainage density (7), Distance from the river (6.5), slope (6), permeability (5.5), TWI (5) and Groundwater table (4.5).

Weights of factors

The matrix comparing pairs of parameters was carried out to determine the weight of each factor (Table A6). On this basis, the first row of this matrix shows the importance of land cover (LC) with respect to other parameters. It is noted that LC is considered more important than groundwater level, and therefore has been assigned the numerical value 8. Calculation of the weighting coefficients (W) from the eigenvectors of the ranking matrix reveals that the minimum value of 0.02 corresponds to the weight of groundwater levels and the maximum value of 0.20 corresponds to the weight of land cover (Table A.6). Thus, the groundwater level is considered to be the least important factor in the flood generation process and the land cover is the most important.

Consistency Ratio

The Consistency ratio is used to check the consistency of judgements. In this study, the RI and Consistency index (CI) values for the ten (10) parameters used are 1.49 and 0.062, respectively, for a consistency ratio of the order 0.05 or 5% (Table A.7). This last value is less than 10%, which proves that the hierarchical matrix is acceptable [36]. This CR value is higher than that obtained by Hammami et al. [16] (0.013 or 1.3%) and lower than those of Kazakis et al. [22] and Ake et al. [24], with values of 0.08 (8%) and 0.07 (7%), respectively, obtained within the framework of the mapping of flood zones on the one hand and that of potential groundwater recharge zones on the other hand. However, these values vary according to the number of parameters used and the shoreline values assigned to each decision parameter.

Classes of the factors according weights

The contribution of the classes of factors used to produce the flood susceptibility map are shown in Table 2. It is the ratio of the weight of each class and the sum of the weights of the classes of the factor under consideration. The results are expressed as a percentage. Thus, for the elevation factor, it can be noted that the area between 670 and 700 m is much more significant compared to the other classes (700 - 730 m, 730 - 760 m, 760 - 780 m and > 840 m). The rainfall factor shows that the high rainfall class (1,815 - 1,870 mm) is much more significant compared to the other classes (1,761 - 1,815 mm, 1,707 - 1,761 mm, 1,653 - 1,707 mm, 1,599 - 1,653 mm). For the land cover factor, the area of the buildings has more influence on the phenomenon compared to the other classes (swampy area, agricultural/soil, green area and forest).

Flood Hazard Index

The Flood Hazard Index (FHI) is related to the values of the factor weights associated with the respective ratings of the different layers [16]. It was calculated in a GIS according to Eq. (7). The Flood Hazard Index (FHI) values obtained vary from 4.16 to 9.16. The higher the value, the more sensitive the area is to flood risk.

$$\mathbf{FHI} = 0.20F_{LULC} + 0.17F_{EL} + 0.17F_{LT} + 0.13F_{RF} + 0.11F_{DD} + 0.07F_{DE} + 0.06F_{SL} + 0.04F_{PE} + 0.03F_{TWI} + 0.02F_{GL} \quad (7)$$

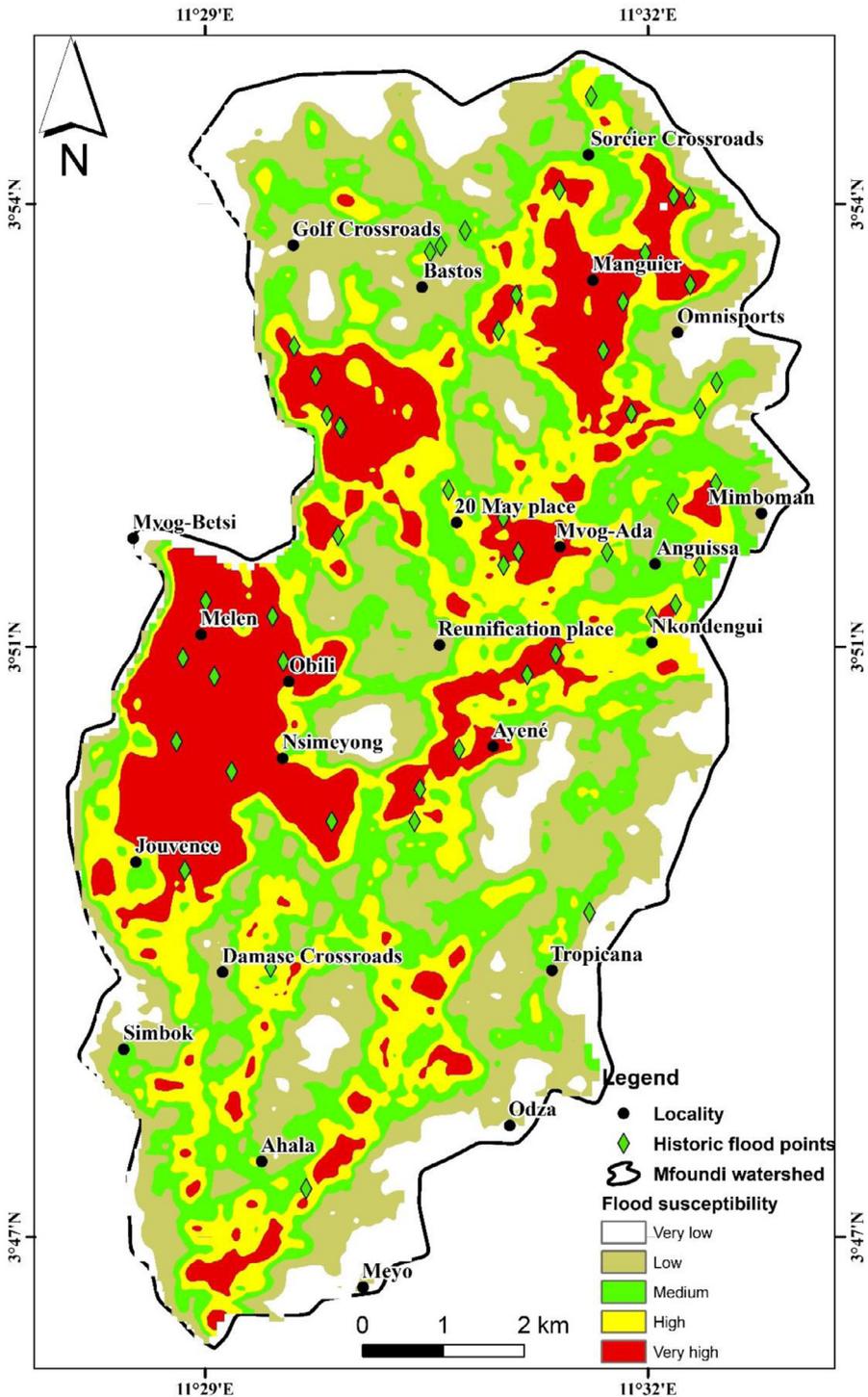


Fig. 4. Flood susceptibility map of the Mfoundi watershed including 50 historic flood points

Flood susceptibility map

The flood susceptibility map obtained by thematic mapping coupled with AHP and then classified based on natural break algorithm in the ArcGIS environment highlights five major classes of flood susceptibility, ranging from very low class to very high class (Fig. 4). These are:



Fig. 5. Some human activities which favor the flood in the Mfoundi watershed: **(a and b)** discharge of urban waste in the river bed; **(c)** embankment; **(d)** swamp occupation

- the very low flood risk class which represents 9.50% of the study area; it is located at the level of the crest lines of the Mfoundi basin and its sub-basins;
- the weak class, which covers 26% of the study area and is scattered throughout the basin;
- the moderate class, which covers 23% of the study area;
- the high class which covers 22% of the study site is more represented in the central part, but slightly scattered in the northern and southern parts and;
- the very high class which spreads over 19.5% of the surface area and is observed everywhere in the study zone, at times seen as isolated islets with extensions to the North.

The tests of Shaban et al. [34] and Saaty [36] applied to the present work reveal that the factors that considerably influence the flood phenomenon are land cover, elevation and geology. These same factors were highlighted by Hammani et al. [16] in the Tunis region where he used 8 weighting factors over an area of about 524.4 km² to map flood-prone areas. On the other hand, the work of Kazaski et al. [22] carried out in the Rhodope-Evros region in Greece (5,004 km²) using seven (7) factors shows that the factors influencing flood susceptibility are, in order of importance, the flow accumulation, distance from drainage network and elevation. Those of Das and Gupta [19] in the Subarnarekha basin (India) applied to 12 factors reveal that the factors that most influence flood susceptibility in this area are elevation, slope, TWI and drainage density. In contrast to the results obtained in the present study, Das and Gupta [19] state that geology is the least influential factor on flooding in the Subarnarekha basin. This difference would be related to the presence of outcrops of impermeable rocks scattered throughout the Mfoundi watershed and more particularly on the hillsides, riverbanks and their beds that promote rapid runoff of floods and stagnation of water with consequent flooding phenomena [16,18].

The superposition of the points regularly subject to flooding to the final map reveals that the majority of these points (94%) are located respectively on the areas of very high susceptibility (18.65 km²) and high (21.98 km²) (Table A.8). These areas are generally located in built-up and swampy areas with outcrops of impermeable geological formations and low altitudes and slopes. The regularly flooded points which are located respectively on the zones of weak (23.05 km²) and moderate susceptibility are not represented (21.98 km²) (Table A.8). The recurrence of flooding phenomena in these areas can be explained by: the undersizing of sanitation works (canalisation and evacuation of rainwater) (Fig. 5a, 5c); the lack of civic responsibility of the population in the practice of sanitation measures (discharge of solid and liquid waste into the drains) and the failure in the maintenance of hydraulic works (Fig. 5b, 5d). In recent years, the various rivers draining the

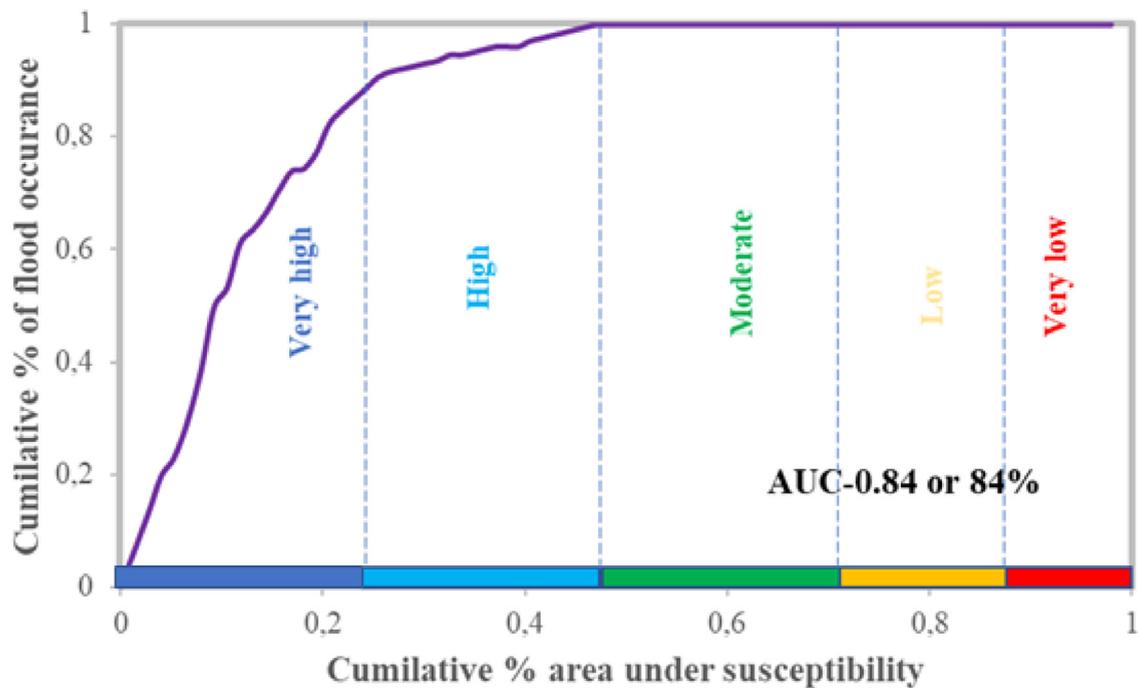


Fig. 6. Area under the curve (AUC) related to susceptibility model validation [[17,18] modified].

Mfoundi catchment area have been filled with plastic bottles of mineral and brewed water, which have still not found a sector for recycling (Fig. 5a, 5b).

The methodology developed in this study can be applied in another area. The only difference is that the evaluation of the parameters that would be included in this flood susceptibility mapping should take into account the local realities and specifics of each environment.

Validation of flood susceptibility map

The validation of the flood susceptibility map generated by the AHP approach coupled with GIS was based on the AUC of past flood occurrence points in the study area (Fig. A.4a, 3b, 3c). The high AUC value (0.84 or 84%) obtained demonstrates a very good accuracy of the flood susceptibility map of the Mfoundi watershed (Fig. 6). This AUC value is similar to those obtained by Das [17,18] respectively for the flood susceptibility mapping of Western Ghat coastal belt (applied to 12 factors) and Ulhas basin (applied to 11 factors) all located in India. On the other hand, the works of Das and Gupta [19] in the Subarnarekha basin (India) and Rahman et al. [6] in the Surma River basin (northeast Bangladesh) all applied to 12 factors reveal AUC values greater than 0.90 (90%) which reflects that the flood susceptibility maps obtained in these studies are excellent. The AUC value obtained in the present study is within the wide range of values obtained in the other study cases. However, the accuracy of the final map obtained in this study accurately verifies the methodology adopted. Therefore, the latter provides a baseline information, which should be taken into account in the urbanization plan, but also in the flood management measures by the decision makers.

Limitations of the methodology and recommendation

Despite some imperfections related to the quality of the medium resolution image (SRTM 30 m) used in the present study, the subjectivity of the coastlines attributed/assigned to certain parameters, the fact remains that the flood susceptibility map of the Mfoundi watershed obtained constitutes a real tool for development, planning and decision-making by the administrative authorities and the decentralized territorial communities with jurisdiction. The results of this work will undoubtedly contribute to the improvement of the living conditions of the populations of this intensely populated area where the problem of environmental management and sanitation constitute a real bottleneck.

Indeed, the map obtained in accordance with the field observations. However, it would be necessary in future work to integrate these impertinences and at best, to try out more efficient models capable of reducing the margins of error to a minimum.

This work is the first of its kind to use a wide range of environmental data (SRTM, rainfall, geology...) to assess the susceptibility of the Mfoundi watershed to flooding in a context of global change. These results constitute a first step in the

search for a solution to the flooding problems in the Yaoundé town; they will also allow the administrative authorities, the government and the decentralized territorial communities and all other development actors to achieve synergy of action in the interventions before, during and after the floods in this city. From a scientific point of view, this work will not only allow us to better understand the environment of the Mfoundi watershed, but also to identify and evaluate the parameters that control the risk of flooding.

Conclusion

The objective of this study was to map the areas of susceptibility to flooding in the Mfoundi catchment area for better environmental management based on ten parameters of the natural environment (elevation, drainage density, rainfall, slope, distance from the river, topographic humidity, hydraulic conductivity, groundwater level, geology and land cover) using the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the GIS environment. In terms of results:

- the value of the consistency ratio (0.05 or 5%) indicates that the prioritisation matrix is acceptable; this varies according to the scores assigned to each factor;
- the Flood Hazard Index (FHI) varied from 4.16 to 9.16, the higher the value, the more sensitive the area is to the risk of flooding;
- five main classes of flood susceptibility have been identified: the very low class representing 9.50%, the low class covering 26%, the moderate class (23%), the high class (22%) and the very high class (19.5%);
- the test of Shaban et al. [34] and AHP show that the land cover, elevation and the geology are the main factors which considerably contribute to the flood phenomenon;
- The flood susceptibility map obtained by AHP showed a very good accuracy (AUC: 84%).

Despite some imperfections in the method linked to the subjectivity of the AHP (Analytical Hierarchy Process) in terms of weight estimation, the results obtained constitute a real decision-making aid tool for planning and development by public authorities and decentralised local authorities in a context of local development. Indeed, the map obtained is in conformity with the field observations. However, it would be necessary in future work, to integrate these imperfections and at best, to try out more efficient models capable of reducing the margins of error to a maximum.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The authors thank the LMI DYCOFAC of the French National Research Institute for Development (IRD) for their support; Department of National Meteorology (DNM) of the Ministry of Transport of Cameroon (MINTRANS) for generously providing weather data, Mr. Willy Franck SOB (SOGEFI-Cameroon) for his collaboration and Dr Mouafo Lucas of the University of Yaoundé I for amending the language.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Supplementary materials

Supplementary material associated with this article can be found, in the online version, at [doi:10.1016/j.sciaf.2021.e01043](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01043).

References

- [1] D. Sarkar, P. Mondal, Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo Bangladesh Barind region, *Applied Water Science* (2020).
- [2] R.K. Samanta, G.S. Bhunla, P.K. Shit, H.R. Pourghasemi, Flood susceptibility mapping using geospatial frequency ratio technique: a case study of Subarnarekha River Basin, *Model Earth Syst Environ, India* (2018).
- [3] UNISDR, The human cost of natural disasters 2015: A global perspective, 2015.
- [4] UN, World Urbanization Prospects 2018. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN-DESA), Population Division. May (16) Retrieved from United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2018.
- [5] R. Magdalena, Agnoletti M, A. Alaoui, J.C. Bathurst, G. Bodner, M. Borga, V. Chaplot, et al., Land use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research, *Water Resour* (2017) Res. 53.
- [6] M. Rahman, C. Ningsheng, G.I. Mahmud, M.M. Islam, H.R. Pourghasemi, H. Ahmad, M.J. Habumugisha, R.M.A. Washakh, M. Alam, E. Liu, Z. Han, H. Ni, T. Shufeng, A. Ashraf Dewan, Flooding and its relationship with land cover change, population growth, and road density, *Geoscience Frontiers* 12 (2021) 101224.
- [7] CRED, Natural disasters in 2018, Lower mortality, higher cost, CRED Crunch, N° 29 (2018) 5–6.
- [8] H. Bang, L. Miles, R. Gordon, The irony of flood risks in African Dryland Environments: Human Security in North Cameroon, *World Journal of Engineering and Technology* (2017) 109–121.

- [9] P.S. Kouassy Kalédjé, J.R. Ndam Ngoupayou, A. Fouépé Takounjou, M. Zebza, J. Mvondo Ondoa, Floods of 18 and 19 November 2016 in Batouri (East Cameroon): Interpretation of the Hydro-Meteorological Parameters and Historical Context of the Post-Event Survey Episode, *Hindawi. The Scientific World Journal* (2019) Article ID 3814962, 7.
- [10] A. Franqueville, Croissance démographique et immigration à Yaoundé, *Cah. O.-m.* 32 (1979) 321–354.
- [11] UNDESA, *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*, 2017.
- [12] C. Jourdan, in: Approche mixte instrumentation-modélisation hydrologique multi-échelle d'un bassin tropical peu jaugé soumis à des changements d'occupation des sols: Cas du bassin de la Méfou (Yaoundé, Cameroun), Thèse de Doctorat/Phd Univ. Montpellier., 2019, p. 369.
- [13] M.Moffo Zogning, in: Contribution des systèmes d'information géographique pour la cartographie des zones à risques inondables à Yaoundé: application au bassin versant du Mfoundi, Mém de Mast Univ Liège, 2017, p. 255.
- [14] D. Sighomnou, Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun: perspective d'évolution des ressources en eau, Th. Doc. Etat Univ. Ydé. 1 (2004) 289.
- [15] J.R. Ndam Ngoupayou, R. Apouamoun Yiagnigni, S. Youego, P.M. Ngnike, J.L. Boeglin, J.P. Bedimo, Transfert d'eau et de matières dans un écosystème forestier urbanisé en Afrique: le bassin versant de la Méfou au sud du Cameroun, in: D. Orange, E. Roose, P. Vermande, J.-P. (Eds.), In Actes JSIRAUF (Journée Scientifique Inter Réseau de l'AUF), Gastellu-Etchegorry and pham Quang Ha, 2007, pp. 13–18.
- [16] S. Hammami, L. Zouhri, D. Souissi, A. Souei, A. Zghibi, A. Marzougui, M. Dlala, Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia), *Arabian Journal of Geosciences* 12 (2019) 653.
- [17] S. Das, Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sensing Application: Society and Environnement* 14 (2019) 60–74.
- [18] S. Das, Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP), *Remote Sensing Application: Society and Environnement* 20 (2020) 100379.
- [19] S. Das, A. Gupta, Multi-criteria decision based geospatial mapping of flood susceptibility and temporal hydro-geomorphic changes in the Subarnarekha basin, India. *Geoscience Frontiers* 12 (2021) 101206.
- [20] Y. Sado-Inamura, K. Fukushi, Empirical analysis of flood risk perception using historical data in Tokyo, *Land Use Policy* 82 (March) (2019) 13–29.
- [21] G.L. Cea, C.E. Bladé, R.M. Sanz, I. Fraga, E. Sañudo, O. García-Leal, M. Gómez-Gesteira, J. González-Cao, Benchmarking of the Iber capabilities for 2D free surface flow modelling, A Coruña. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. ISBN: 978(2020) 84-9749-764-0.
- [22] N. Kazakis, I. Kougias, T. Patsialis, Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and analytical hierarchy process: application in Rhodope-Evros region, Greece. *Sci Total Environ* 538 (2015) 555–563.
- [23] P.S. Ozkan, C. Tarhan, Detection of flood hazard in urban areas using GIS: Izmir case, *Procedia Technology* 22 (2016) 373–381.
- [24] Oikonomidis D, S. Dimogianni, K. Kazakis, K. Voudouris, A GIS/remote sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area Greece, *Journal of Hydrology* 525 (2015) 197–208.
- [25] J.-C. Olivry, in: Fleuves et rivières du Cameroun, Monographies Hydrologiques, ORSTOM, Paris, 1986, p. 488.
- [26] T.D. Nguemou, Hydrologie et transports solides dans un écosystème forestier urbanisé: Exemple du bassin versant du Mfoundi au centre sud du Cameroun, Mém. DEA. Fac des sci. Yaoundé I (2008) 83.
- [27] S. Owona, B. Schulz, L. Ratschbacher, J. Mvondo Ondoa, G.E. Ekodeck, M.F. Tchoua, P. Affaton, Pan-African metamorphic evolution in the southern Yaounde Group (Oubangui Complex, Cameroon) as revealed by EMP-monazite dating and thermobarometry of garnet metapelites, *Journal of African Earth Sciences* 59 (2011) 125–139.
- [28] P.-D. Ndjigui, M.F.B.B. Badinane, H.P.K. Nandjip Nyeck, P. Bilong, Mineralogical and geochemical features of the coarse saprolite developed on orthogneiss in the south Cameroon, *J.Afr. Earth Sci* (2013) 25–142.
- [29] J.R. Ndam Ngoupayou, A.F. Bon, G. Ewodo Mboudou, A.N. Ngouh, G.E. Ekodeck, Hydrogeological Characteristics of Shallow Hard Rock Aquifers in Yaounde (Cameroon, Central Africa), In *Intech Open, the world's leading publisher of Open Access books*, 2019, p. 17.
- [30] B.Ewane Ewane, Assessing land use and landscape factors as determinants of water quality trends in Nyong River basin, Cameroon, *Environ Monit Assess* 192 (2020) 507.
- [31] M. Porchet, Hydrodynamique des puits, *Annuaire du Génie Rural, fasc* (1931) 60.
- [32] O. Banton, M.L. Bangoy, Hydrogéologie, Multisciences environnementale des eaux souterraines. PUQ/AUPELF éd, Sainte-Foy (1997) 460.
- [33] A. Shaban, M. Khawlie, C. Abdallah, Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon, *Hydrogeol J* 14 (4) (2006) 433–443.
- [34] A. Shaban, M. Khawlie, R.B. Kheir, C. Abdallah, Assessment of road instability along a typical mountainous road using GIS and aerial photos, Lebanon–eastern Mediterranean, *Bull EngGeol Environ.* 1 60 (2) (2001) 93–101.
- [35] T.L. Saaty, *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill International, New York, 1980.
- [36] I. Elkhrachy, Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA), National Authority for Remote Sensing and Space Sciences the Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 18 (2) (2015) 261–278.
- [37] G.E. Ake, K.J. Kouame, A.B. Koffi, J.P. Jourda, Cartography of potential recharge areas of the Bonoua aquifer (Southeastern Côte d'Ivoire), *Journal of Water Science* 31 (2) (2018) 129–144.
- [38] E. Yesilnacar, T. Topal, Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey), *Eng. Geol.* 79 (3–4) (2005) 251–266.
- [39] J.K. Poussin, W.W. Botzen, J.C. Aerts, Factors of influence on flood damage mitigation behavior by households, *Environ Sci Pol* 40 (2014) 69–77.
- [40] C. Recep, A. Veysel, Evaluation of hydrological and hydrogeological characteristics affecting the groundwater potential of Harran Basin, *Arabian Journal of Geosciences* 13 (2020) 186.

Annexe 6 : Liste des colloques/conférences scientifiques issus de la thèse

1- Du 06 et 07 octobre 2022 : Participation au Colloque International « Journée de Modélisation des Surfaces Continentales » à l'Institut des Géosciences et de l'Environnement de l'Université de Grenoble Alpes (France).

- **Nsangou D.**, Vandervaere J-P, Fluixá-Sanmartín J., Jourdan C., Ndam Ngoupayou J.R. (2022). Urban flood susceptibility modelling in the Mfoundi watershed (Yaoundé-Cameroon), using multi-Criteria Decision, Analysis analytical hierarchy process and GIS approach. In : Colloque International *Journée de Modélisation des Surfaces Continentales*. Institut des Géosciences et de l'Environnement de l'Université de Grenoble Alpes (France). 06-07 octobre 2022 (Poster).

2- Du 08 au 11 décembre 2021 : Participation au 3^{ème} Colloque de la Cameroon Association of Géoscience (C@G) à l'Université de Dschang. Sous le thème : « Les Géosciences au service de l'humanité ».

- **Nsangou D.**, Kpoumié A., Mfonka Z., M. Bateni S., Hermann Fossi D., Nasser Ngouh A., Jourdan C., Zobo Mbele H., Vandervaere J.-P., Ndam Ngoupayou J.P. (2021). The Mfoundi Watershed at Yaoundé in the Humid Tropical Zone of Cameroon: A Case Study of Urban Flood Susceptibility Mapping. In : Colloque International. *3^{ème} Colloque de la Cameroon Association of Geoscience (C@G)*. Faculté des Sciences de l'Université de Dschang. 08-11 décembre 2021 (Présentation orale).



Daouda NSANGOU
Université Yaoundé I
BP 812, Yaoundé
Cameroun

Date : Le 13/04/2021

Objet : Invitation de M. Daouda NSANGOU pour un séjour scientifique à l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE)

Direction

Aurélien DOMMERGUE

Nicolas CAILLON, directeur adjoint
Gaël DURAND, directeur adjoint
Nicolas GRATIOT, directeur adjoint
Thierry PELLARIN, directeur adjoint
Delphine SIX, directrice adjointe

Madame, Monsieur,

Administration

Carole BIENVENU

Responsable administrative et financière

Je, soussigné Aurélien Dommergue, directeur de l'IGE, invite M. Daouda NSANGOU, doctorant de l'Université Yaoundé I, Cameroun, pour un séjour scientifique de 5 mois à l'IGE (Grenoble, France).

Valérie LANARI, adjointe

Dates du séjour : du 01 septembre 2021 au 31 janvier 2022

Tel : 33(0) 4 56 52 09 88

Mel ige-direction@univ-grenoble-alpes.fr

Durant son séjour, Daouda NSANGOU, mènera des activités de recherche sur la modélisation des interactions eaux de surface-eaux souterraines et impacts sur les risques d'inondation dans le bassin amont de la Mefou (Centre-Cameroun), sous la direction de Jean-Pierre VANDERVAERE, hydrologue de l'IGE, co-encadrant de la thèse de Daouda NSANGOU avec Jules Remy NDAM NGOUPAYOU, professeur à l'Université Yaoundé I.

IGE

Domaine universitaire
38400 Saint-Martin-d'Hères

Ce travail s'effectue dans le cadre des collaborations mises en place lors du projet Marema (Erasmus+ 2016-2020) et du Laboratoire Mixte International DYCOFAC (Dynamique des écosystèmes continentaux d'Afrique Centrale en contexte de changements globaux).

Boite postale :
Université Grenoble Alpes
CS 40700
38058 Grenoble cedex 9

Pendant ce séjour, Daouda NSANGOU sera accueilli au laboratoire IGE en accord avec les règles sanitaires en vigueur.

Sincères salutations

Aurélien Dommergue
Directeur de l'IGE



Objet : Attestation de participation aux journées de Modélisation des Surfaces Continentales 2022 (JMASC2022)

Direction

Aurélien DOMMERGUE

Nicolas CAILLON, directeur adjoint
Gaël DURAND, directeur adjoint
Nicolas GRATIOT, directeur adjoint
Thierry PELLARIN, directeur adjoint
Delphine SIX, directrice adjointe

A qui de droit,

Administration

Carole BIENVENU
Responsable administrative et financière

Valérie LANARI, adjointe

Tel : 33(0) 4 56 52 09 88
Mel ige-direction@univ-grenoble-alpes.fr

Daouda Nsangou a participé aux journées de modélisation des surfaces continentales (JMASC, <https://jmasc2022.sciencesconf.org/>), organisées par l'Institut des Géosciences de l'Environnement de Grenoble, les 6 et 7 octobre 2022. Il a pu présenter ses travaux portant sur 1) « Urban flood susceptibility modelling in the Mfoundi watershed (Yaoundé-Cameroun), using multi-Criteria Decision, Analysis analytical hierarchy process and GIS approach », sur 2) la « Modélisation hydrologique semi-distribuée d'un bassin versant urbain peu jaugé soumis au changement d'occupation du sol : cas du bassin versant de la Mefou (Centre-Cameroun) » et 3) « l'Apport des SIG et de la modélisation numérique prédictive dans l'élaboration des cartes des risques d'inondation : cas de la commune de Yaoundé V (Centre-Cameroun) ».

IGE

Domaine universitaire
38400 Saint-Martin-d'Hères

Boite postale :
Université Grenoble Alpes
CS 40700
38058 Grenoble cedex 9

Pour l'équipe d'organisation des JMASC,

Basile HECTOR, Chargé de Recherches IRD, IGE



Urban flood susceptibility modelling in the Mfoundi watershed (Yaoundé-Cameroon), using multi-Criteria Decision, Analysis analytical hierarchy process and GIS approach

Nsangou Daouda^{1*}, Vandervaere Jean-Pierre², Fluixá-Sanmartín Javier³, Jourdan Camille⁴, Ndam Ngoupayou Jules Remy¹

¹Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaounde I, ²Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Université Grenoble Alpes, ³Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP), ⁴Laboratory for the Study of Soil-Agrosystem Interactions-Hydrosystem (LISAH), University of Montpellier.

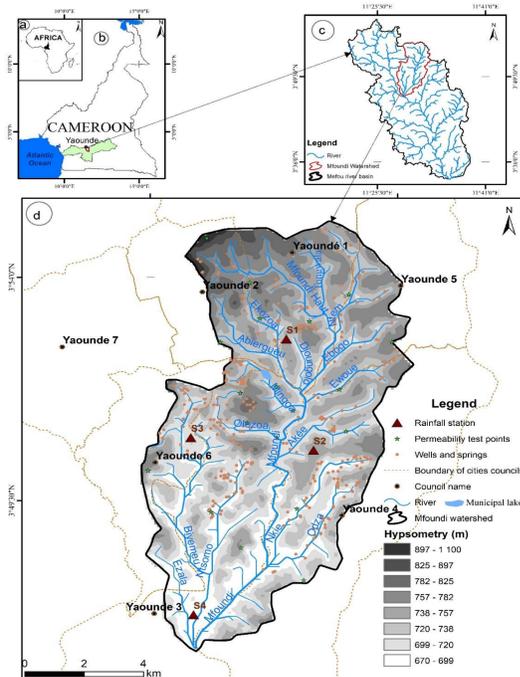
* Corresponding author (E-mail: nsangoudaoud@yahoo.fr)

INTRODUCTION

The management of water resources and associated hydrological hazards is increasingly a major current concern of our societies (Sarkar and Mondal, 2020). In the wide range of hydrological hazards around the world, floods are the most frequent and damaging (Samanta et al., 2018). The city of Yaoundé (Cameroon's political capital), which is drained by the Mfoundi River in its entirety and the Mefou River in part, has seen its population grow from about 60,000 in 1960 (Franqueville, 1979) to over 3 million in 2017 (UNDESA, 2017). This high population growth associated with anarchic urbanization, orohydrographic characteristics, and highly irregular hydrological regimes are believed to be factors behind floods that have often caused significant damage and sometimes loss of life (Jourdan, 2019)... Thus, the objective of this study is to carry out a mapping of susceptibility to flood risks of the area, and this taking into account the geoenvironmental and anthropogenic factors that cause these phenomena.

MATERIAL AND METHODS

Study area



- Geographical sitting:** Located in Central Africa, more precisely in the Centre-Cameroon region (the area of Mfoundi BV is 95.6 km²) (Figure 1)
- Transitional tropical and equatorial climate:** Average rainfall and interannual mean temperature are 1,554±261 mm and 24°C with 04 unevenly distributed seasons (two rainy seasons and two dry seasons);
- Vegetation:** Dense humid forest heavily degraded by human activities
- Geomorphology:** Southern Cameroon plateau (600 m and 900 m)
- Geology:** Plutonometamorphic rocks of Precambrian age
- Hydrogeology:** Two types of aquifers are superimposed: an upper porous alterite aquifer and a lower fractured and/or fissured aquifer.

Figure 1. Location of the study area: (a) Cameroon in Central Africa; (b) Nyong and Mefou basins in Cameroon; (c) the Mfoundi watershed in the Mefou basin; (d) the Mfoundi watershed

Methods

The methodological approach used in this study consisted of: 1) identifying the parameters that have more or less an impact on the flood phenomenon. This was done on the basis of an intense literature review on the flood theme coupled with several field observation campaigns; 2) the calculation of the Flood Hazard Index (FHI) using Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Geographical Information System (GIS) environment, in order to generate a flood susceptibility map. This methodology was completed by the validation of the latter from the Area Under the Curve (AUC) method based on the verification of field data (different flooding events having taken place in the study area) (Figure 2).

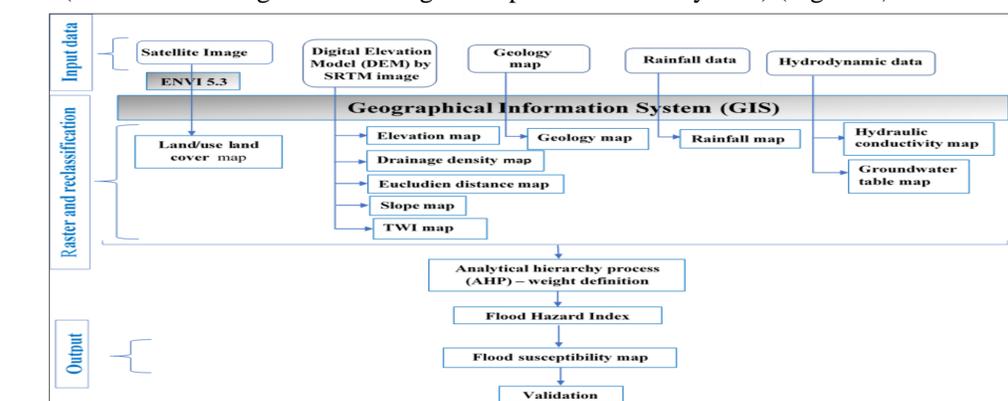


Figure 2: Conceptual model of flood susceptibility mapping based on multi-criteria decision analysis (MCDA) and analytical hierarchy process (AHP) by GIS

CONCLUSION

This study has made it possible to propose a precise mapping of the susceptibility to flooding of the urbanized Mfoundi watershed located in the tropical humid forest zone of the southern Cameroon plateau. The major factors that considerably influence the generation of floods in this basin are the land use with the built-up areas, the relief with the altitude and the geology with the rocky outcrops. The results of this study constitute a decision-making tool for land use planning and development by public authorities and decentralized territorial communities in a local development context.

REFERENCES

- Franqueville, 1979, Cah. O.-m. 32: 321-354
 Jourdan, 2019, Thèse de Doctorat/Phd Univ. Montpellier, pp 369
 Sarkar and Mondal 2020, Appl. Water Sci. 10:17. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1102-x>
 Samanta et al., 2018, Model. Earth Syst. Environ. 4 (1): 395-408. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0427-z>
 Shaban et al., 2001, Bull. Eng. Geol. Environ. 60: 93-101. <https://doi.org/10.1007/s100640000092>
 UNDESA, 2017, Key Findings and Advance Tables

REMERCIEMENTS

The authors thank the LMI DYCOFAC of the French National Research Institute for Development (IRD) for their support

RESULTS AND DISCUSSION

Multi-influencing factors of flood susceptible zone

The ten (10) factors selected for modeling the susceptibility to flooding of the Mfoundi basin are involved to varying degrees and independently (Figure 3).

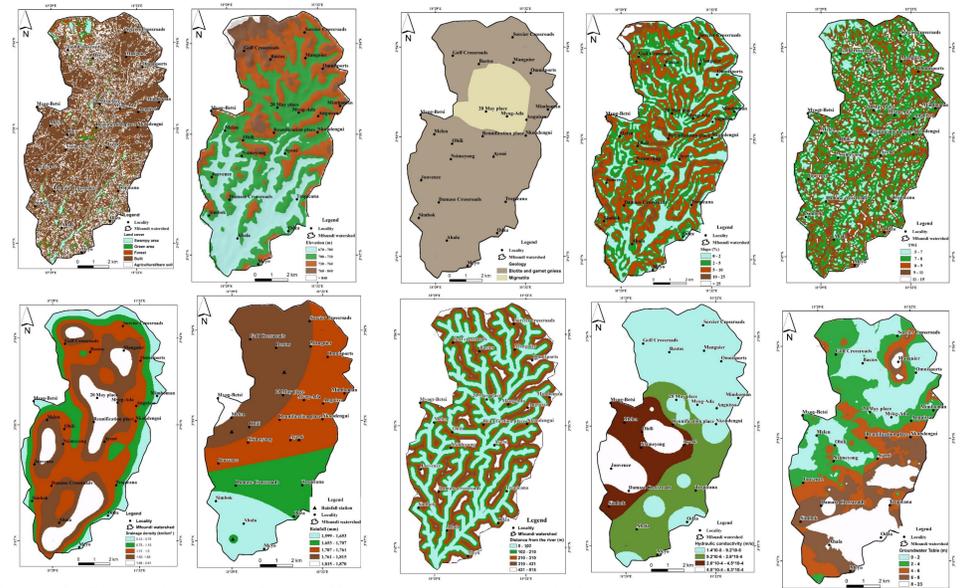


Figure 3: Thematic maps of the different parameters that influence flooding in the area

Comparaison et classification inter-paramétriques

The relationship of Shaban et al, (2001) (Figure 4) applied to the parameters have the following decreasing order of influence: land use > elevation = geology > rainfall > drainage density > Euclidian distance > slope > permeability > TWI > groundwater level.

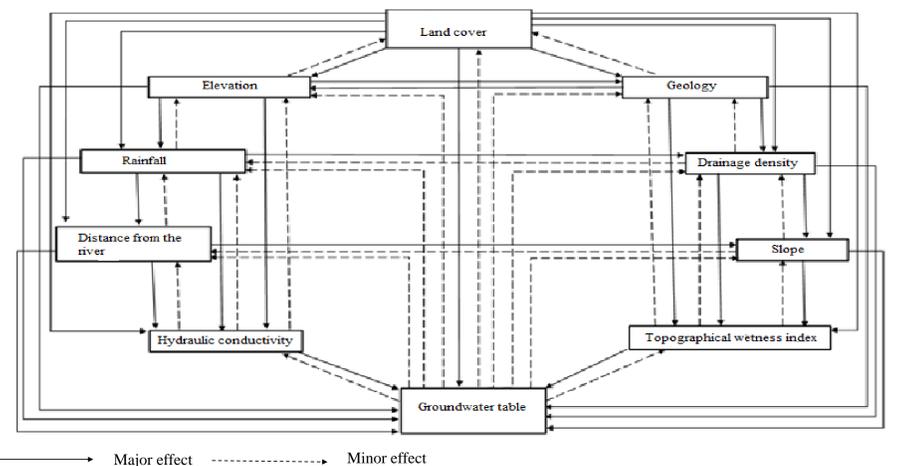


Figure 4: Schematic sketch showing the interactive influence of factors concerning flood susceptibility

Hierarchical Process Analysis (HPA) and Flood Risk Indices

The parameter pair comparison matrix in Table 1 was performed to determine the weight of each factor. The consistency ratio (CR) value obtained is 0.05%, attesting that the weights assigned to the factors are acceptable. The flood hazard indices (FHI) range from 4.16 to 9.16. The classification of these indices highlights five major classes of susceptibility to flooding, namely: the very low class representing 9.50% of the Mfoundi BV, the low class covering 26%, the moderate class (23%), the high class (22%) and the very high class (19.5%) (Figure 5).

Tableau 1 : Matrix of pairwise comparisons of weight factors for AHP process

Paramètres	OS	AL	GEO	PL	DD	DE	PE	CH	TWI	NES	Som	W
OS	1,00	1,50	1,50	2,00	2,50	2,75	3,00	4,50	5,00	8,00	31,75	0,20
AL	0,67	1,00	1,00	1,50	2,00	3,00	3,25	3,50	8,00	7,00	30,92	0,17
GEO	0,67	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	8,00	7,00	30,17	0,17
PL	0,50	0,67	0,67	1,00	1,50	2,00	3,00	3,00	6,00	6,00	24,33	0,13
DD	0,40	0,50	0,50	0,67	1,00	3,00	3,50	4,00	4,00	4,00	20,57	0,11
DE	0,36	0,33	0,40	0,50	0,33	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	11,93	0,07
PE	0,31	0,40	0,33	0,33	0,33	0,67	1,00	1,50	2,75	3,00	10,62	0,06
CH	0,22	0,29	0,29	0,33	0,29	0,50	0,67	1,00	3,00	2,00	8,58	0,04
TWI	0,20	0,13	0,13	0,17	0,25	0,40	0,36	0,33	1,00	3,00	5,96	0,03
NES	0,13	0,14	0,14	0,17	0,25	0,33	0,33	0,50	0,33	1,00	3,33	0,02

Legend : LULC (Land Use Land Cover) ; EL (Elevation) ; LT (Geology) ; RF (Rainfall) ; DD (Drainage density) ; DE (Euclidian Distance) ; SL (Slope) ; PE (Hydraulic conductivity) ; TWI (Topographical wetness index) ; GT (Groundwater table) ; Sum (Somme) ; W (Weighting).

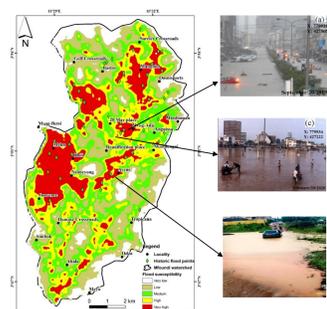


Figure 5: Flood susceptibility map of the Mfoundi watershed including 50 historic flood points

Model validation and limitation

The validation of the flood susceptibility map from the flood occurrence points shows that the developed model presents a very good accuracy with an area under the curve "AUC" equal to 84% (Figure 6). However, the modeling approach developed in this study has some limitations related to the subjectivity of the AHP (Analytical Hierarchy Process) in terms of weight estimation and DTM resolution (30×30m).

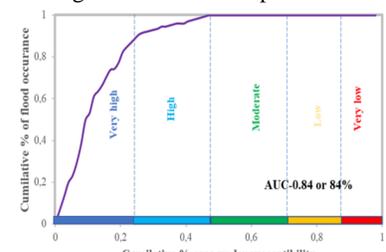


Figure 6: Area under the curve (AUC) related to susceptibility model validation

**Cameroon Association of Geoscience
Association Camerounaise de Géosciences**

N°00001075/RDA/JO6/A2/SAAJP/BAPP – NIU:MO92016482636X

BP: 812 Yaoundé – Cameroun – e-mail: sgcag@gmail.com



CERTIFICATE OF PARTICIPATION

To

NSANGOU Daouda, University of Yaoundé 1

For his participation to the 3rd Colloquium of the Cameroon Association of Geoscience

08th - 11th December 2021, Faculty of Science, University of Dschang

Theme: Geosciences at the service of humanity - Géosciences au service de l'humanité

Date... **10 DEC 2021**

**The President of the Local
Steering Committee**

The President





----- **GEOSCIENCES DSCHANG 2021** -----
 -- Colloquium of the Cameroon Association of Geoscience -
 -- Colloque de l'Association Camerounaise de Géosciences --



--- 8th ~ 11th December 2021, Faculty of Science, University of Dschang ---
Geosciences at the service of humanity - Géosciences au service de l'humanité

Date : 15 / 11 /2021

Subject: Acceptance and Invitation Letter

To: Pr / Dr /Mr / Miss: NSANGO Daouda

We are pleased to inform you that the scientific committee has accepted your abstract Number *EN- HGR23* entitled: **“Urban flood susceptibility modelling in the Mfoundi watershed (Yaoundé-Cameroon), using multi-Criteria Decision, Analysis analytical hierarchy process and GIS approach”**.

The session and date of your presentation will be given later.

Please do not hesitate to contact the Organizing Committee for any further information at:
Geosciences2021@univ-dschang.org or Geosciencesdschang2021@gmail.com

Tel: +237 696 315 247 / 699 819 122 / 699 896 011 / 675 003 126

Looking forward to receiving you in Dschang.

Best Regards
Organizing Committee

Date : 15 / 11 /2021

Objet : Lettre d'acceptation et d'invitation

À : Pr / Dr / M / Mme: NSANGO Daouda

Nous avons le plaisir de vous informer que le comité scientifique a accepté votre résumé Numéro *EN-HGR23* intitulé: **“Urban flood susceptibility modelling in the Mfoundi watershed (Yaoundé-Cameroon), using multi-Criteria Decision, Analysis analytical hierarchy process and GIS approach”**.

La session et la date de votre présentation vous seront communiquées ultérieurement.

N'hésitez pas à contacter le comité d'organisation pour toute information complémentaire à :
Geosciences2021@univ-dschang.org ou Geosciencesdschang2021@gmail.com.

Tél: +237 696 315 247 / 699 819 122 / 699 896 011 / 675 003 126

Au plaisir de vous retrouver à Dschang.

Salutations cordiales
Comité d'organisation



Pr **WOUATONG Armand Sylvain L.**

Urban flood susceptibility modelling in the Mfoundi watershed, Yaoundé-Cameroon using multi-Criteria Decision, Analysis analytical hierarchy process and GIS approach

Daouda Nsangou^{1*}, Amidou Kpoumié², Zakari Mfonka³, Sayed M. Bateni⁴, Donald Hermann Fossi¹, Abdou Nasser Ngouh^{1,5}, Camille Jourdan⁶, Henri Zobo Mbele¹, Jean-Pierre Vandervaere⁷, Jules Remy Ndam Ngoupayou¹.

¹Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaounde I, PO Box: 812, Yaoundé, Cameroon

²Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Maroua, PO Box: 814, Maroua, Cameroon

³Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Douala, PO Box: 24157, Douala, Cameroon

⁴Department of Civil and Environmental Engineering and Water Resources Research Engineering, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.

⁵National Institute of Cartography (NIC), Laboratory of Image Treatment for Stereo-restitution, P.O. Box:157, Yaoundé, Cameroon

⁶Laboratory for the Study of Soil-Agrosystem Interactions-Hydrosystem (LISAH), University of Montpellier, PO Box: 34060, Montpellier cedex 1, France

⁷Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Université Grenoble Alpes, BP : CS 40700

Corresponding authors at: nsangoudaoud@yahoo.fr

Abstract:

Most of the world's major cities currently face the risk of flooding, which is becoming more frequent. Floods often leave behind enormous material damage and, worse still, loss of human life. With this in mind, this paper proposes a conceptual approach to modeling flood risk-sensitive areas in the Mfoundi watershed (95.6 km²) that drains Yaoundé town, the political capital of Cameroon. The Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) approach coupled with the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Geographical Information System (GIS) environment was employed in this study. The method was applied to ten parameters to calculate the flood risk index and hence to generate the flood susceptibility map. The results show five main classes of susceptibility to flooding: very low (9.27 km²), low (24.63 km²), moderate (22.04 km²), high (21.01 km²) and very high (19.50 km²). To validate the generated flood susceptibility map, 50 regularly flooded points in the Mfoundi catchment area were superimposed on this map. 36 of these points (72%) are found in environments with very high susceptibility and 11 points (22%) are located in areas with high susceptibility, proving that the results reflect reality. The presence of flood points in areas of low and moderate susceptibility could be linked to both human activities and climatic disruption, which sometimes triggers high rainfall. This study provides a basic tool for decision makers related to environmental issues for more efficient management of the Mfoundi Watershed.

Keys words: Yaoundé-Cameroon, Mfoundi watershed, multi-criteria decision analyse, AHP (analytical hierarchy process), Geographical information system (GIS), Flood susceptibility



ATTESTATION DE PARTICIPATION

Nous avons l'honneur de certifier que

NSANGOU Daouda

A animé :

L'atelier de formation sur l'intégration des informations climatiques et des risques d'inondation ainsi que des concepts résilients dans la planification urbaine et les projets de développement, organisé par le consortium SOGEFI - CREALP entre le 19 octobre et le 11 novembre 2020 à Yaoundé - Cameroun.

En foi de quoi la présente attestation lui a été délivrée pour servir et valoir ce que de droit.



Pour le MINHDU

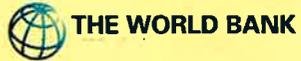


Pour le consortium
Willy Franck SOB, Directeur Général SOGEFI

Fait à Yaoundé, le 11/11/2020

Cette formation a été réalisée dans le cadre d'une assistance technique fournie par la **Banque mondiale** avec **financement du Programme ACP-UE** de prévention des risques de catastrophes naturelles, qui est un partenariat entre la Facilité mondiale pour la prévention des risques de catastrophes et le relèvement (**GFDRR**), gérée par la Banque mondiale, et l'Union européenne. Pour plus d'informations : <https://bit.ly/3dC42u0>





Une Initiative du Groupe des Etats d'Afrique, des Caraïbes
et du Pacifique financée par l'Union Européenne



ATTESTATION

Nous avons l'honneur de certifier que

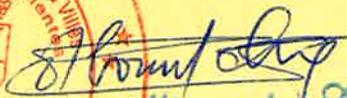
NSANGOU Daouda

A animé a :

L'atelier de formation sur « **la gouvernance et la modélisation des risques d'inondation dans le contexte urbain** » organisé par le bureau d'études SOGEFI du **20 au 23 septembre 2021 à Douala - Cameroun**. Les thématiques abordées portaient sur l'intégration des concepts de modélisation hydrologique et hydraulique dans la gestion des risques et la planification en milieu urbain.

En foi de quoi la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Le Chef de l'Unité de Liaison PDVIR


M'bountcha Stephano
Ingénieur du Génie Electrique
Expert en Efficacité Energétique



Le Directeur Général SOGEFI


Fait à Douala le 23/09/2021

Cette formation a été réalisée dans le cadre d'une assistance technique fournie par **la Banque mondiale** avec financement du **Programme ACP-UE** de prévention des risques de catastrophes naturelles, qui est un partenariat entre la Facilité mondiale pour la prévention des risques de catastrophes et le relèvement (**GFDRR**), gérée par la Banque mondiale, et l'Union européenne. Pour plus d'informations : <https://bit.ly/3dC42u0>

ATTESTATION DE VALIDATION DES COMPÉTENCES

NOUS AVONS L'HONNEUR DE CERTIFIER QUE

Nsanguou Daouda

A PRIS PART À :

L'atelier de renforcement des capacités pour l'intégration des questions climatiques et des risques dans la planification urbaine organisé par le consortium SOGEFI-IRD du 6 au 25 janvier 2020 à Yaoundé-Cameroun.

Pour l'IRD



Jean-Jacques BRAUN

Représentant délégué de l'IRD au Cameroun

Pour SOGEFI



Willy Franck SOB

Le Directeur Général

Fait à Yaoundé Le 25/01/2020



Daouda NSANGOU
Département des Sciences de la
Terre
Faculté des Sciences
Université de Yaoundé I
BP/P.OBOX : 812 Yaoundé
Cameroun

nsangoudaoud@yahoo.fr
(+237) 694911369 / 698419432
Date
15/09/2022

Objet : Invitation aux journées de Modélisation des Surfaces Continentales 2022 (JMISC2022)
et attestation de prise en charge par l'IRD

Direction

Aurélien DOMMERGUE

Nicolas CAILLON, directeur adjoint
Gaël DURAND, directeur adjoint
Nicolas GRATIOT, directeur adjoint
Thierry PELLARIN, directeur adjoint
Delphine SIX, directrice adjointe

A qui de droit,

Administration

Carole BIENVENU
Responsable administrative et financière

Valérie LANARI, adjointe

Tel : 33(0) 4 56 52 09 88
Mel ige-direction@univ-grenoble-alpes.fr

IGE

Domaine universitaire
38400 Saint-Martin-d'Hères

Boite postale :
Université Grenoble Alpes
CS 40700
38058 Grenoble cedex 9

www.ige-grenoble.fr

Unité Mixte de Recherche
CNRS / IRD / UGA / G-INP
UMR 5001 / UR 252

Daouda NSANGOU est cordialement invité à participer aux journées de modélisation des surfaces continentales (JMISC), organisées par l'Institut des Géosciences de l'Environnement de Grenoble, qui auront lieu à Grenoble les 6 et 7 octobre 2022. Mr NSANGOU y présentera ses travaux scientifiques intitulés « Urban flood susceptibility modelling in the Mfoundi watershed (Yaoundé-Cameroun), using multi-Criteria Decision, Analysis analytical hierarchy process and GIS approach », « Modélisation hydrologique semi-distribuée d'un bassin versant urbain peu jaugé soumis au changement d'occupation du sol : cas du bassin versant de la Mefou (Centre-Cameroun) » et « Apport des SIG et de la modélisation numérique prédictive dans l'élaboration des cartes des risques d'inondation : cas de la commune de Yaoundé V (Centre-Cameroun) ».

Mr NSANGOU bénéficie du soutien de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) pour la prise en charge de sa mission. L'ensemble de ses frais de mission (hébergement, transport, restauration) sera donc pris en charge par l'IRD.

Pour l'équipe d'organisation des JMISC,

Basile HECTOR, Chargé de Recherches IRD, IGE

www.ige-grenoble.fr

Unité Mixte de Recherche
CNRS / IRD / UGA / G-INP
UMR 5001 / UR 252

