

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



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace - Work - Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE TECHNOLOGIES AND
GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS
RESEARCH UNIT FOR GEOSCIENCES AND APPLICATIONS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

**VARIABILITE HYDROCLIMATOLOGIQUE ET QUALITE DES
EAUX DANS UN BASSIN AURIFERE EN EXPLOITATION : CAS
DU BASSIN VERSANT DE LA KADEY (EST-CAMEROUN)**

Thèse présentée et soutenue le 27 mai 2021 en vue de l'obtention du grade de
Docteur/Ph.D en Sciences de la Terre

Option : Eau-Sol-Sciences Géotechniques

Spécialité : Hydrologie/Hydrogéologie/Hydrochimie – Environnement

Par

KOUASSY KALELJE Paulin Sainclair

Matricule : 04W589

DEA ès Sciences de la Terre

Devant le jury :

Président : BILONG Paul, Professeur,

Rapporteurs : NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy, Professeur,
MVONDO ONDOUA Joseph, Maitre de Conférences,

Membres : NDJIGUI Paul-Désiré, Professeur,
NKOUMBOU Charles, Professeur,
EKENGELE NGA Léopold, Maitre de Conférences,

Université de Yaoundé I ;

Université de Yaoundé I ;
Université de Yaoundé I ;

Université de Yaoundé I ;
Université de Yaoundé I ;
Université de Ngaoundéré



Mai 2021

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
GEOSCIENCES ET APPLICATIONS



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

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET APPLICATIONS
LABORATORY OF GESCENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS AND APPLICATIONS

**VARIABILITE HYDROCLIMATOLOGIQUE ET QUALITE DES
EAUX DANS UN BASSIN AURIFERE EN EXPLOITATION : CAS
DU BASSIN VERSANT DE LA KADEY (EST-CAMEROUN)**

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

Option : Eau-Sol-Sciences Géotechniques

Spécialité : Hydrologie/Hydrogéologie/Hydrochimie – Environnement

Par

KOUASSY KALELJE Paulin Sainclair

Matricule : 04W589

DEA ès Sciences de la Terre

Sous le co-encadrement de

MVONDO ONDOA Joseph
Maitre de Conférences

NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy
Professeur

Mai 2021



DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE
EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/Ph. D

Option : Sol, Eau, Sciences Géotechniques
Spécialité : Hydrologie/Hydrogéologie/Hydrochimie - Environnement

Noms et Prénoms du candidat : KOUASSY KALELJE Paulin Sainclair

Matricule : 04W589

Titre de la thèse : “ Variabilité hydroclimatologique et qualité des eaux dans un bassin versant aurifère en exploitation : Cas du bassin versant de la Kadey (Est – Cameroun)”

Date de soutenance : Jeudi, le 27 mai 2021.

Nous, membres du jury, après avoir lu le document qui nous a été présenté, 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.

Les membres


Pr. NDIKOU P.-D.

Le Président


Prof. Paul BICONG

Dédicace

A ma famille.

Spécialement à mon épouse et à notre fille Urielle Meryl KALÉDJE.

Remerciements

Je remercie le Seigneur Tout-Puissant, qui jusqu'à ce jour m'a sainement gardé en état ; à Lui la gloire et l'adoration pour les siècles sans fin.

Au moment où j'achève cette thèse pour l'obtention du titre de Docteur/Ph.D de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements à tous ceux qui, par leur enseignement, leur soutien et leurs conseils, m'ont aidé à sa réalisation.

Je tiens tout d'abord à remercier mon Directeur de thèse, le Professeur Jules Rémy NDAM NGOUPAYOU, enseignant au Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I pour ses encouragements, son enthousiasme, sa confiance, ses nombreuses relectures avec des corrections précises et concises. Professeur ta rigueur, ton honnêteté scientifique et ta détermination sont les principales caractéristiques découlant de toi et dont les marques indélébiles à mon intérieur, ont fait de moi, un passionné des Sciences Hydrotechniques malgré leurs complexités. Je t'en suis reconnaissant car, pour moi plus qu'un encadreur, plus qu'un maître, tu es ...

Toute ma reconnaissance va également à l'endroit de mon Co-directeur de thèse, le Professeur Joseph MVONDO ONDOA pour sa disponibilité malgré son emploi de temps extrêmement surchargé.

Je remercie vivement le Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, le Professeur Jean Claude TCHOUANKEU pour sa bienveillante tutelle administrative.

Je pense également à ses prédécesseurs le Professeur Luc AWONA ONANA et surtout le Professeur Paul BILONG qui n'a jamais cessé de m'encourager. Je l'entends encore me dire et redire « *Mon fils ta thèse est à quel niveau ?* »

J'exprime toute ma gratitude au Chef de Département des Sciences de la Terre, le Professeur Paul-Désiré NDJIGUI pour sa rigueur et sa rectitude morale malgré sa simplicité. Aujourd'hui je comprends mieux les nombreux « *Non !!!* » et les rares « *Oui !!!* » que vous m'avez dit pour me pousser à me surpasser dans la recherche de l'excellence. De tout mon cœur, Professeur, je vous dis sincèrement merci.

Je dis ma parfaite reconnaissance à tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I pour leur attention et leur soutien.

J'exprime une profonde sympathie envers mes ami(e)s et collègues en particulier : le Professeur Sylvestre GANNO, les Docteurs Alain FOUEPE, Sylvain KOUAYEP, Amidou KPOUMIE, Felaniaina RAKOTONDRABE, pour leurs aides aussi bien intellectuelles que

morales. Ils m'ont soutenu, encouragé et épaulé tout au long de ces années de recherche. Je leur témoigne mon affection la plus sincère.

A Madame Gislaine Christelle BELINGA pour son assistance et son soutien indéfectible durant ces nombres, pénibles mais exaltantes années de travail.

Je n'oublie pas mes cadets, promotionnaires et aînés académiques avec qui j'ai partagé les meilleurs moments durant ces longues années de travail ; vos sourires et vos encouragements m'ont rassurés que je ne suis pas tout seul. Je pense particulièrement aux Docteurs Zakari MFONKA et Arnaud NGO'O ZE, à Messieurs Terturin NOUDJA, Oumarou Farikou MFOCHIVE, Abdou Nasser NGOUH, Olivier NJIKEU, Mesdames Totancine NGO BILLONG et Elise NGO MAPUNA.

J'adresse également mes remerciements au personnel de l'Institut Universitaire Sous Régional Bilingue Agenla Academy. Je pense personnellement à Maitre Magdaline LAMANGO épouse ENOW et au Professeur Emmanuel TONYE.

Il est bon et juste d'évoquer l'appui moral ainsi que la sollicitude trouvée auprès de toute ma famille. Je tiens à exprimer mes sentiments les plus respectueux et ma profonde reconnaissance à mes très chers parents, Charles et Charlotte KALEDJÉ, à mes frères Sévérin Joël et Christel Blaise, mes sœurs Rosy Sandrine et Minette Elisée et ainsi qu'à mes nièces et neveux.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur contribution au présent travail.

Pour chacun de vous, je formule avec insistance cette prière au Dieu sans qui rien de tout ce qui est et demeure ne puisse l'être : « *Puisse le Seigneur notre Dieu, vous prendre en grâce et vous bénir aujourd'hui et toujours* ».

Table de Matières

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Table de Matières.....	iv
Liste des Figures	xii
Liste des Tableaux	xviii
Résumé.....	xxi
Abstract.....	xxi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : MILIEU NATUREL ET TRAVAUX ANTERIEURS	7
Introduction.....	8
I.1. Cadre biophysique et humain de la zone d'étude.....	8
I.1.1. Situation géographique et administrative	8
I.1.2. Caractéristiques climatiques	9
1.1.2.1. Climat équatorial	9
1.1.2.2. Climat équatorial et tropical de transition	9
1.1.2.3. Températures	10
I.1.3. Végétation.....	10
I.1.4. Orographie	14
I.1.5. Hydrographie	15
I.1.5.1. Bassin de la Sanaga.....	16
I.1.5.2. Bassin des fleuves côtiers	16
I.1.5.3. Bassin du Congo au Cameroun	16
I.1.6. Contexte géologique	17
I.1.6.1. Lithologie	17
I.1.6.2. Pédologie.....	19
I.1.6.3. Hydrogéologie.....	21
I.2. Cadre humain et activités socioéconomiques.....	22
I.3. Travaux antérieurs.....	25
I.3.1. Climatologie	25
I.3.2. Hydrologie	27
I.3.3. Hydrogéologie et hydrodynamique	29
I.3.2. Hydrogéochimie	31
Conclusion	32
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES.....	34
Introduction.....	35
II.1. Identification et présentation du site d'étude.....	35

II.1.1. Critères de choix du bassin versant de la Kadey comme site d'étude.....	35
II.1.2. Présentation du site d'étude : le bassin versant de la Kadey (BVK).....	36
II.1.2.1. Localisation géographique et administrative.....	36
II.1.2.2. Caractéristiques morphométriques (géométriques) et hydrographiques du BVK ...	36
II.1.2.3. Caractéristiques géologiques.....	38
II.1.2.4. Activités socioéconomiques.....	40
II.1.2.4.1. Agriculture.....	40
II.1.2.4.2. Elevage.....	40
II.1.2.4.3. Exploitation forestière.....	40
II.1.2.4.4. Exploitation minière.....	41
II.2. Travaux de terrain.....	41
II.2.1.1. Acquisition de paramètres météorologiques.....	41
II.2.1.1.1. Reconnaissance des stations météorologiques.....	41
II.2.1.1.2. Choix et présentation des stations météorologiques retenues pour la présente étude.....	42
II.2.1.1.3. Origines et méthodes d'acquisition des paramètres météorologiques sur le terrain.....	42
II.2.1.2. Acquisition des paramètres hydrologiques.....	43
II.2.1.2.1. Reconnaissance et identification des stations hydrométriques.....	43
II.2.1.2.2. Choix et présentation de stations hydrométriques retenues dans la présente étude.....	44
II.2.1.2.3. Méthodes d'acquisition de données hydrométriques sur le terrain.....	45
II.2.1.3. Acquisition des paramètres hydrodynamiques et piézométriques.....	46
II.2.1.3.1. Reconnaissance des ouvrages hydrauliques.....	46
II.2.1.3.2. Choix et description des ouvrages hydrauliques retenus dans la présente étude.....	46
II.2.1.3.3. Méthode d'acquisition des données piézométriques sur le terrain.....	47
II.2.1.4. Acquisition de paramètres hydrogéochimiques sur le terrain.....	48
II.2.1.4.1. Choix et présentation des sites d'échantillonnages des eaux de surface et souterraines dans le BVK.....	49
II.2.1.4.1.1. Eaux de surfaces.....	49
II.2.1.4.1.2. Eaux souterraines.....	49
II.2.1.4.2. Prélèvements et conditionnement des échantillonnages d'eau.....	50
II.2.1.4.2.1. Eaux de surface.....	50
II.2.1.4.2.2. Eaux souterraines.....	52
II.2.1.4.3. Mesures des paramètres physico - chimiques des eaux in situ.....	53
II.2.1.4.3.1. pH.....	53
II.2.1.4.3.2. Conductivité Electrique (CE).....	53

II.2.1.4.3.3. Turbidité	53
II.3. Travaux de Laboratoire	54
II.3.1. Traitement et analyse de paramètres météorologiques	54
II.3.1.1. Critiques et validation des paramètres climatiques	54
II.3.1.2. Traitements statistiques des paramètres météorologiques	55
II.3.1.3. Méthode de spatialisation des paramètres météorologiques.....	55
II.3.1.4. Estimation des pluies moyennes à l'échelle du BVK par la méthode des polygones de THIESSEN	56
II.3.1.5. Méthodes d'étude de la variabilité et/ou du changement hydroclimatologiques	56
II.3.1.5.1. Principe de calcul du Filtre pass-bas de Hanning d'ordre 2	57
II.3.1.5.2. Tests de détection des ruptures dans les séries pluviométriques	58
a) Méthode de segmentation de Hubert	58
b) Principe du test de Pettit	58
c) Détermination des déficits hydropluviométriques	59
II.3.2. Traitement et analyse des paramètres hydrométriques	59
II.3.2.1. Transformation des hauteurs d'eaux en débits	60
II.3.2.2. Traitement et analyse des débits	61
II.3.2.2.1. Critiques et validation des débits mensuels et annuels	61
II.3.2.2.2. Traitements statistiques des débits	62
II.3.3. Traitement et analyse des paramètres hydrodynamiques	62
II.3.3.1. Mesures et suivis piézométriques	62
II.3.3.1.1. Détermination du gradient hydraulique	62
II.3.3.1.2. Etablissement de la carte piézométrique	63
II.3.3.2. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite	63
II.3.4. Acquisition et traitement de paramètres physicochimiques	64
II.3.4.1. Mesures des paramètres physiques	64
II.3.4.2. Quantification des Matières en suspension totales (MES) totales.....	64
II.3.4.3. Analyses des cations et anions majeurs	64
II.3.4.4. Analyses des éléments traces ou métaux lourds	65
II.3.4.5. Validation des données et traitement hydrochimiques	65
II.3.4.5.1. Calcul de la Balance Ionique (BI)	65
II.3.4.5.2. Détermination des faciès des eaux.....	66
II.3.4.5.3. Calcul de l'Indice de Saturation (IS) des eaux par le modèle de PHREEQC..	66
II.3.4.5.4. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE)	66
II.3.4.5.5. Calcul de l'indice de pollution métallique (IPM)	67
II.3.4.5.6. Analyse statistique multivariée (ASM)	68
Conclusion	68

CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE LA KADEY	70
Introduction.....	71
III.1. Variations spatio-temporelles des pluies dans le BVK et ses environs.....	71
III.1.1. Pluies annuelles	71
III.1.1.1. Domaine de variations des pluies annuelles dans le BVK et ses environs	71
III.1.1.2. Evolution des pluies annuelles et recherche des ruptures	74
III.1.2. Pluies mensuelles et saisonnières	81
III.1.2.1. Domaine de variations des pluies mensuelles et saisonnières dans le BVK et ses environs	81
III.1.2.2. Evolution des pluies mensuelles et recherche des ruptures dans le BVK et ses environs	88
III.1.3. Evolution des pluies saisonnières et recherche des ruptures dans le BVK et ses environs	92
III.2. Variations spatio-temporelles des températures dans le BVK et ses environs.....	95
III.2.1. Températures annuelles.....	95
III.2.1.1. Domaines de variations des températures annuelles dans le BVK et ses environs	95
III.2.1.2. Evolution temporelle des températures annuelles et recherche des ruptures	97
III.2.2. Températures mensuelles	97
Conclusion	98
CHAPITRE IV : FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA KADEY.....	100
Introduction.....	101
IV.1. Hydrologie du bassin versant de la Kadey	101
IV.1.1. Réactualisation des données hydrométriques de la Kadey à Batouri et à Pana	101
IV.1.1.1. Domaines de variations des débits interannuels de la Kadey à Batouri et à Pana	101
IV.1.1.2. Domaine de variations des débits mensuels de la Kadey à Batouri et à Pana	102
IV.1.1.3. Domaines de variations des débits journaliers et de débits caractéristiques de la Kadey à Batouri et à Pana	104
IV.1.2. Fluctuation des débits de la Kadey à Batouri et à Pana	108
IV.1.2.1. Evolution des débits moyens interannuels de la Kadey à Batouri et à Pana...	108
IV.1.2.2. Evolution pluriannuelle des débits mensuels et saisonniers de la Kadey à Batouri et de la Kadey à Pana	111
IV.1.2.3. Evolution des débits mensuels décennaux de la Kadey à Batouri et à Pana...	113
IV.1.2.4. Evolution des débits caractéristiques de la Kadey à Batouri et à Pana.....	113
IV.1.3. Relations pluies-débits aux pas de temps annuels et mensuels.....	117
IV.1.3.1. Relation pluies annuelles - débits annuels dans le BVK.....	117
IV.1.3.2. Relation pluies mensuelles - débits mensuels	118

IV.1.3.3. Relation pluies journalières-débits journaliers.....	120
IV.1.4. Etude des basses et des hautes eaux du bassin versant de la Kadey.....	121
IV.1.4.1. Etudes de basses eaux ou étiage.....	121
IV.1.4.2. Etudes de hautes eaux ou crues.....	122
IV.1.5. Bilan hydrologique.....	123
IV.1.6. Comparaison avec ceux des autres bassins du Cameroun.....	123
IV.2. Fonctionnement Hydrodynamique du bassin versant de la Kadey.....	124
IV.2.1. Variations spatiotemporelles des niveaux statiques dans le BVK.....	125
IV.2.1.1. Domaines de variations des niveaux statiques.....	125
IV.2.1.2. Evolution spatiotemporelle des niveaux statiques dans le BVK.....	126
IV.2.2. Variations spatiotemporelles des niveaux piézométriques.....	128
IV.2.2.1. Domaines de variations des niveaux piézométriques.....	128
IV.2.2.2. Evolution des niveaux piézométriques dans l'espace et le temps.....	129
IV.2.3. Elaboration et interprétation des cartes piézométriques.....	129
IV.2.3.1. Elaboration et analyse des cartes piézométriques.....	129
IV.2.3.2. Identification des zones d'alimentation des eaux souterraines dans le BVK..	132
IV.2.3.3. Identification des Zones de drainages des eaux souterraines dans le BVK ...	133
IV.2.4. Relations entre les variations des niveaux d'eau souterraine du BVK avec la pluviométrie et le relief.....	134
IV.2.4.1. Relation pluies – variation des niveaux statiques.....	134
IV.2.4.2. Relation topographie – surface piézométrique.....	135
IV.2.4.3. Relations entre les systèmes : pluies – sources – forages et cours d'eau.....	135
IV.2.5. Bilan hydrique.....	136
Conclusion.....	137
CHAPITRE V : HYDROGEOCHIMIE DU BASSIN VERSANT DE LA KADEY ...	139
Introduction.....	140
V.1. Domaine de variations des paramètres physicochimique dans les eaux du Bassin versant de la Kadey.....	140
V.1.1. Paramètres physiques (pH, CE, Turbidité et MES).....	140
V.1.2. Paramètres chimiques (Eléments majeurs et ETMs et cyanures).....	141
V.1.2.1. Cations majeurs et TZ ⁺	141
V.1.2.2. Anions majeurs et TZ ⁻	142
V.1.2.3. Eléments en trace métalliques (ETMs) et cyanures.....	143
IV.1.3. Balance ionique (BI).....	144
IV.1.4. Faciès hydrogéochimiques des eaux de Batouri.....	145
V.2. Niveaux de variations des paramètres physicochimiques dans les eaux de surface et souterraines du BVK à Batouri.....	145

V.2.1. Domaines de variations des Paramètres physiques (pH, conductivité électrique, Turbidité et Matières en suspension totales) dans les eaux du bassin versant de la Kadey	146
V.2.2. Domaine de variations de cations majeurs et de la somme des équivalents cations (TZ⁺)	148
V.2.2.1. Cations majeurs	148
V.2.2.2. Somme des équivalents cations TZ ⁺	149
V.2.3. Domaine de variations des anions majeurs et de la somme des équivalents anions (TZ⁻)	150
V.2.3.1. Anions majeurs	150
V.2.3.2. Somme des équivalents anions TZ ⁻	151
V.3. Analyse de l'évolution spatiotemporelle des paramètres physicochimiques dans les eaux du bassin versant de la Kadey.....	153
V.3.1. Evolution spatiotemporelle des paramètres physiques (pH, CE, Turbidité et MES totales) dans les eaux du BVK.....	153
V.3.2. Evolution spatiotemporelles des paramètres chimiques dans les eaux du BVK.....	159
V.3.2.1. Cations majeurs	159
V.3.2.2. Anions majeurs	161
V.3.2.3. Eléments en traces métalliques (ETMs) et cyanures	164
V.3.2.4. Indice de Saturation (IS).....	166
V.3.2.5. Indice de Pollution Métallique (IPM)	166
V.4. Origines et facteurs environnementaux influençant la qualité physicochimique des eaux du BVK à Batouri	167
V.4.1. Facteurs environnementaux influençant la qualité physicochimique des eaux de la localité de Batouri dans le BVK	167
V.4.2. Origines des éléments en trace métalliques et des cyanures dans les eaux de la localité de Batouri (BVK).....	172
V.5. Estimation du degré de pollution des eaux de la localité de Batouri dans le BVK à partir des normes de l'OMS et du calcul de l'IPM.....	173
Conclusion	174
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	176
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	180
ANNEXES	198
Annexes I : Publications Scientifiques issues de la Thèse.....	199
Annexes II : Participation à des Colloques et Séminaires Nationaux et Internationaux.....	200

Liste des abréviations et des acronymes

ACCFP : Adaptation au Changement Climatique en Afrique

ACP : Analyse en Composante Principale

AFNOR : Agence Française de la Norme

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

ASECNA : Agence pour la SECurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar

BM : Banque Mondiale

BUCREP : Bureau Central de Recensement de la Population

BVET : Bassin Versant Elémentaire ou Expérimental

BVK : Bassin Versant de la Kadey

CE : Conductivité Electrique

CEAEQ : Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec

CERECO : CENTre de REcherche et CONcseil

CEREMA: Center for Studies and Expertise on Risks, the Environment, Mobility and Development

CICOS : Commission Internationale du Bassin Congo Oubangui Sangha

CRH : Centre de Recherche Hydrologique

DEA : Diplôme d'Etudes Approfondies

DMA : Drainage Minier Acide

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

DSDC : Documents Stratégiques pour le Développement et la Croissance

DYLAT : DYnamique des couvertures LATéritiques

EE : Eaux d'Ecoulement

EIEC : Etude d'Impact Environnemental et Cumulatif

ENSAI : Ecole Nationale des Sciences Agroalimentaire et Industrielle

ES : Eaux Souterraines

ETM⁺: Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus

ETMs : Eléments Traces Métalliques

FAO: Food Organization

GEF: Global Environment Facility

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GTZ : Coopération Allemande

GWP : Global Water Partnership

IPCC: International Panel of Climate Change

IPM : Indice de Pollution Métallique
IQE : Indice de Qualité de l'Eau
IRGM : Institut de Recherche Géologique et Minière
IS : Indice de Saturation
LAGE : Laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux
MESTot : Matières et Eléments en Suspension Total
MINEE : MINistère de l'Eau et de l'Energie
MINEPAT : MINistère de l'Economie, de la Planification et de l'Aménagement du Territoire
MINMIDT : MINistère de Mines de l'Industrie et du Développement Technologique
MINSANTE : MINistère de la SANTE
NTU : Nephelometric Turbidity Unit
OHM-CV : Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen - Cévennes-Vivarais
OMS/*WHO* : Organisation Mondiale de la Santé / *World Health Organization*
ONAREST : Office National de Recherche Scientifique et Technique
ORE : Observatoire Régionale de l'Environnement
ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
PAM : Programme Alimentaire Mondial
PAS : Programme d'Ajustement Structurel
PEGI : Programme d'Etude de l'Environnement de la Géosphère Intertropicale
PNED : Programme des Nations Unies pour l'Environnement et le Développement
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
PROSE : PROgramme Sol Erosion
REX : Retour d'EXpérience
RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation
SIE : Système d'Information sur l'Eau
TZ- : Somme des équivalents anions
TZ+ : Somme des équivalents cations
UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature
UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization / *Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture*

Liste des Figures

Figure I.1 : Situation géographique de la zone d'étude : (a) au Cameroun ; (b) avec ses divisions administratives	7
Figure I.2 : Principales unités climatiques du Cameroun	8
Figure I.3 : Différentes zones agro-écologiques du Cameroun	10
Figure I.4 : Segmentation du domaine forestier de la Région de l'Est	12
Figure I.5 : Relief de la région de l'Est-Cameroun	13
Figure I.6 : Principaux bassins versants du Cameroun	14
Figure I.7 : Bassin versant du Congo dans ses composantes Camerounaise et Centrafricaine	15
Figure I.7 : Caractéristiques géologiques de la zone d'étude : a) en zone Afrique Centrale en Afrique ; b) au Cameroun et dans la région de l'Est du Cameroun.....	18
Figure I.8 : Différentes formations pédologiques rencontrées dans la région de l'Est-Cameroun d'après SRADDT-Est/MINEPAT, 2017.....	19
Figure I.9 : Caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'étude : a) au Cameroun avec la région de l'Est du Cameroun ; b) principales formations aquifères de la région de l'Est du Cameroun	20
Figure I.10 . Répartition des différents groupes ethniques dans la région de l'Est-Cameroun	21
Figure I.11 : Taux d'urbanisation des départements de la Région de l'Est	22
Figure I.12 : Tendances d'évolution de la pluviométrie mensuelle dans la région de l'Est du Cameroun	24
Figure I.13 : Évolution des températures moyennes mensuelles en fonction de la latitude et de l'altitude de Moloundou plus au sud à Meiganga au nord	25
Figure I.14 : Évolution des températures moyennes annuelles en fonction de la latitude et de l'altitude dans la région de l'Est-Cameroun	25
Figure II.1 : Unités géomorphologiques du bassin versant de la Kadey	35
Figure II.2 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Kadey	36
Figure II.3 : Formations géologiques identifiées dans le bassin versant de la Kadey	37
Figure II.4 : Batterie verticale d'échelles limnimétriques en palier à la station de Pana sur la Kadey	42
Figure II.5 : Echelle limnimétrique fixée sur un pilier du pont au niveau de la station de Batouri sur la Kadey	43

Figure II.6 : Localisation de différents ouvrages et points d'eau suivis dans le BVK.....	45
Figure II.7 : Opérations de mesures des niveaux statiques de la nappe d'eau en vue de la détermination des niveaux piézométriques : a) Sonde électrique et sonore ; b) Opération de la mesure des niveaux statiques	46
Figure II.8 : Technique de prélèvements des eaux d'écoulement : (a) Sur une même verticale ; (b) par immersion d'un flacon directement dans le lit du cours d'eau	49
Figure II.9 : Technique de prélèvements des eaux souterraines : (a) au niveau d'un forage à Batouri	50
Figure II.10 : Dispositif de mesure de pH avec un pH-mètre de marque WTW pH 315i ...	52
Figure II.11 : Conductimètre de marque HANNA type HI 8033.....	52
Figure II.12 : Turbidimètre à compression de type 2100N/HCAH.....	52
Figure II.13 : Evaluation de la fiabilité des pluies moyennes annuelles par simple cumul aux différentes stations météorologiques du bassin versant de la Kadey au Cameroun.....	53
Figure II.14 : Jaugeage aux flotteurs.....	58
Figure II.15 : Représentation stéréométrique du jaugeage au moulinet	58
Figure II.16 : Evaluation de la fiabilité des débits moyens annuels par simple cumul aux différentes stations hydrométriques du BVK au Cameroun.....	60
Figure II.17 : Organigramme de calcul du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (1954)	63
Figure III.1 : Découpage des polygones de Thiessen à partir des différentes stations pluviométriques exploitées dans le Bassin Versant de la Kadey	72
Figure III.2 : Esquisse des isohyètes interannuelles du bassin versant de la Kadey.....	75
Figure III.3 : Variations des précipitations annuelles de Bertoua.....	75
Figure III.4 : Variations des indices pluviométriques annuelles de Bertoua.....	76
Figure III.5 : Variations des précipitations annuelles de Batouri.....	76
Figure III.6 : Variations des indices pluviométriques annuelles de Batouri.....	77
Figure III.7 : Variations des pluies annuelles d'Abong-Mbang.....	78
Figure III.8 : Variations des indices pluviométriques d'Abong-Mbang.....	78
Figure III.9 : Variations des précipitations annuelles de Yokadouma.....	79
Figure III.10 : Variations des indices pluviométriques de Yokadouma.....	80
Figure III.11 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station de Bertoua (1935-2015)	82

Figure III.12 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station de Batouri (1942-2015)	83
Figure III.13 : Variation des pluies mensuelles et saisonnières à l'échelle du BVK (Bertoua et de Batouri)	84
Figure III.14 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station d'Abong-Mbang (1931-2015)	85
Figure III.15 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station de Yokadouma (1951-2013)	86
Figure III.16 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières dans les différentes stations du BVK et ses environs.....	86
Figure III.17 : Répartition géographiques des types de climats en Afrique de l'Ouest et du Centre	87
Figure III.18 : Histogramme des pluies mensuelles observées avant la rupture (Av rup) et après la rupture (Ap rup) à Bertoua.....	90
Figure III.19 : Histogramme des précipitations mensuelles avant la rupture (Av-rup) et après la rupture (Ap-rup) à Batouri.	90
Figure III.20 : Histogramme des précipitations mensuelles enregistrées à Abong-Mbang avant la rupture (Av-rup) et après la rupture (Ap-rup).	91
Figure III.21 : Histogramme des précipitations mensuelles observées à Yokadouma avant la rupture (Av-rup) et après la rupture (Ap-rup).	91
Figure III.22 : Evolution des pluies à saisonnières à Bertoua avant et après rupture de 1935 à 2015.....	92
Figure III.23 : Evolution des pluies à saisonnières à Batouri avant et après rupture de 1942 à 2015.....	93
Figure III.24 : Evolution des pluies à saisonnières à Abong-Mbang avant et après rupture de 1931 à 2015.....	94
Figure III.25 : Evolution des pluies à saisonnières à Yokadouma avant et après rupture de 1951 à 2013.....	95
Figure III.26 : Evolution des températures interannuelles dans le BVK au cours de la période allant de 1939 à 2015.....	97
Figure III.27 : Evolution des températures moyennes mensuelles dans le BVK au cours de la période allant de 1939 à 2015.....	98
Figure IV.1 : Variation des débits mensuels de la Kadey à Batouri (1954– 2015)	104

Figure IV.2 : Variation des débits mensuels de la Kadey à Pana (1965 – 2015)	105
Figure IV.3 : Variations des débits journaliers de la Kadey à Batouri (1998-2015)	106
Figure IV.4 : Variations des débits caractéristiques de la Kadey à Batouri entre 1954-2015.....	106
Figure IV.5 : Variations des débits journaliers de la Kadey à Pana (1998-2015)	106
Figure IV.6 : Variations des débits caractéristiques de la Kadey à Pana entre 1965-2015	108
Figure IV.7 : Fluctuations des débits moyens annuels de la Kadey à la station de Batouri de 1954 à 2015.....	109
Figure IV.8: Variations des indices des débits annuels de la Kadey à Batouri (1954-2015)	110
Figure IV.9 : Fluctuations des débits annuels de la Kadey à la station de Pana entre 1964 et 2015	111
Figure IV.10 : Variations des indices des débits annuels de la Kadey à Pana (1965-2015)	110
Figure IV.11 : Fluctuations des débits moyens mensuels et saisonniers de la Kadey à Batouri entre 1954 et 1981 et entre 1998 et 2015.....	113
Figure IV.12 : Fluctuations des débits moyens mensuels de la Kadey à Pana de 1965 à 1981 et de 1998 à 2015	113
Figure IV.13 : Evolution des débits décennaux de la Kadey à Batouri et à Pana.....	116
Figure IV.14 : Evolution des débits caractéristiques de la Kadey à Batouri pour les périodes 1954-1981 (Olivry, 1986) et 1998-2015.....	117
Figure IV.15 : Evolution des débits caractéristiques de la Kadey à Pana pour les périodes 1965-1981 (Olivry, 1986) et 1998-2015.....	117
Figure IV.16 : Relations pluies annuelles - débits annuels dans le BVK.....	118
Figure IV.17 : Evolution des débits mensuels en fonction de la pluie mensuelle à Batouri	120
Figure IV.18 : Corrélations pluies mensuelles - débits mensuels de la Kadey à Pana.....	120
Figure IV.19 : Débits et pluies journaliers du bassin de la Kadey (1998-2015)	120
Figure IV.20 : Hydrogramme interannuel du bassin versant de la Kadey (1998-2015).....	121
Figure IV.22 : Répartition spatiale des ouvrages hydrauliques suivis dans le bassin versant de la Kadey entre 2014 et 2015.....	127
Figure IV.23 : Variations des niveaux statiques dans quelques ouvrages témoins (représentatifs) dans le bassin versant de la Kadey	127
Figure IV.24 : Histogramme de la répartition des ouvrages hydrauliques en fonction de la variation du niveau statique dans le BVK au cours de la période d'étude (2014-2015)...	128
Figure IV.25 : Evolution spatiotemporelle des niveaux piézométriques dans le BVK durant la période d'étude 2014 -2015.....	130

Figures IV.26 : Fluctuations de la surface piézométrique du BVK durant la saison sèche (Mars 2015)	132
Figure IV.27 : Fluctuations de la surface piézométrique du BVK durant la saison de pluies (Juillet 2015)	133
Figure IV.28 : Comparaison de la variation du niveau piézométrique à celle des pluies mensuelles dans la localité de Batouri et de ses environs.....	135
Figure V.1 : Niveau de variations des ETMs et des cyanures dans les eaux de la localité de Batouri dans le bassin versant de la Kadey en 2016.....	145
Figure V.2 : Digramme de Piper (1944) montrant les différents faciès hydrochimiques identifiés dans les eaux de la localité de Batouri au cours de l'année 2016.....	146
Figure V.3 : Domaine de variations des paramètres physiques dans les eaux souterraines et de surface de la localité de Batouri.....	149
Figure V.4 : Domaine de variations de cations majeurs et de la TZ^+ dans les eaux de surface et souterraines du BVK à Batouri.....	151
Figure V.5 : Domaine de variations des paramètres chimiques (anions et TZ^-) dans les eaux souterraines et les eaux d'écoulement de la localité de Batouri.....	153
Figure V.6. Variations spatiotemporelle du pH dans les eaux (Ecoulement et Souterraine) de la localité de Batouri.....	154
Figure V.7 : Niveau de variation de pH dans les eaux souterraines et d'écoulement de la localité de Batouri.....	155
Figure V.8 : Variations spatiales des pH dans les eaux de la localité de Batouri.....	156
Figure V.9. Variations spatiotemporelle de la conductivité électrique dans les eaux (Ecoulement et Souterraine) de la localité de Batouri.....	156
Figure V.10 : Niveau de variations de la conductivité électrique dans les eaux de Batouri	156
Figure V.11. Variations spatiotemporelle de la turbidité dans les eaux (Ecoulement et Souterraine) de la localité de Batouri.....	158
Figure V.12. Variations spatiotemporelle des matières et éléments en suspension totales dans les eaux (Ecoulement et Souterraine) de la localité de Batouri.....	158
Figure V.13 : Niveau de variation des turbidités dans les eaux (souterraines et d'écoulement) de la localité de Batouri	159
Figure V.14 : Niveau de variation des MES totales dans les eaux (souterraines et d'écoulement) de la localité de Batouri	160
Figure V.15 : Variations spatiotemporelle des ions Na^+ dans les eaux de la localité de Batouri	161

Figure V.16 : Variations spatiotemporelle des ions K^+ dans les eaux de la localité de Batouri	161
Figure V.17 : Variations spatiotemporelle des ions Ca^{2+} dans les eaux de la localité de Batouri	161
Figure V.18 : Variations spatiotemporelle des ions Mg^{2+} dans les eaux de la localité de Batouri	162
Figure V.19 : Variations spatiotemporelle de HCO_3^- dans les eaux de la localité de Batouri	162
Figure V.20 : Variations spatiotemporelle de l'alcalinité dans les eaux de la localité de Batouri	162
Figure V.21 : Variations spatiotemporelle des ions NO_3^- dans les eaux de la localité de Batouri	163
Figure V.22 : Variations spatiotemporelle des ions Cl^- dans les eaux de la localité de Batouri	163
Figure V.23 : Variations spatiotemporelle des ions SO_4^{2-} dans les eaux de la localité de Batouri	163
Figure V.24 : Variations spatiotemporelle des ions PO_4^{3-} dans les eaux de la localité de Batouri	163
Figure V.25 : Digramme de Piper (1944) montrant les différents faciès hydrochimiques identifiés dans les eaux de la localité de Batouri au cours de l'année 2016	165
Figure V.26 : Variations spatiales des concentrations des différents métaux lourds et du cyanure dans les eaux de la localité de Batouri	166
Figure V.28 : Analyse des paramètres dans le plan factoriel F1-F2 dans les eaux de la localité de Batouri.	171

Liste des Tableaux

Tableau I : Estimation des surfaces couvertes par les différentes classes d'occupation du sol	11
Tableau II : Répartition de la population de la Région de l'Est par département en 2005....	21
Tableau III : Taux d'urbanisation de la Région de l'Est par département par département ...	22
Tableau IV : Évolution des stations hydrométriques suivies par le CRH de 1980 à 2014 dans les cinq bassins hydrographiques du Cameroun	26
Tableau V : Paramètres morphologiques du bassin versant de la Kadey	35
Tableau V : Stations météorologiques identifiées dans le BVK et ses environs	41
Tableau VII : Stations hydrométriques du BVK retenues pour la présente étude	43
Tableau VIII : Présentation et description des points d'eau du BVK retenus dans la présente étude pour les analyses hydrogéochimiques	48
Tableau IX : Fréquence des prélèvements des échantillons d'eau destinées à la détermination des matières en suspension totales (MES _T) sur les trois stations de la Kadey entre mars 2015 et février 2016	50
Tableau X : Poids relatifs de chaque paramètre	69
Tableau XI : Différentes catégories de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE)	69
Tableau XII : Domaine de variation des pluies annuelles dans les stations du BVK et celles environnantes	75
Tableau XIII : Evolution comparative des pluies interannuelles dans les stations du BVK et celles voisines	75
Tableau XIV : Taux de variation des précipitations annuelles dans le bassin de la Kadey et ses environs avant et après ruptures en appliquant les tests de Pettit (1979) et de Hubert et <i>al.</i> (1989)	82
Tableau XV : Variations des pluies mensuelles et saisonnières dans les stations pluviométriques du BVK et de celles avoisinantes	91
Tableau XVI : Résultats des tests Buishand, Pettit, Lee et Heghinian et Hubert dans les séries pluviométriques saisonnières du bassin versant de la Kadey entre 1935 et 2015	98
Tableau XVII : Domaine de variation des températures annuelles dans les stations du BVK et celles environnantes	99
Tableau XVIII : Domaine de variation des débits interannuels en m ³ /s de la Kadey à Batouri et de la Kadey à Pana	105

Tableau XIX : Domaine de variation des débits mensuels (m ³ /s) de la Kadey à Batouri de 1954 à 2015	106
Tableau XX : Domaine de variation des débits mensuels (m ³ /s) de la Kadey à Pana (1965-2015)	106
Tableau XXI : Débits caractéristiques de la Kadey à Batouri entre 1951 et 2015	109
Tableau XXII : Débits caractéristiques de la Kadey à Pana entre 1965 et 2015	110
Tableau XXIII : Coefficients de tarissement de la Kadey (mars 1998-février 2016)	125
Tableau XXIV : Termes du bilan hydrologique du BVK à Batouri pour la période d'étude (1965-2015)	126
Tableau XXV : Comparaison des écoulements de la Kadey a d'autre cours d'eau du Cameroun	127
Tableau XXVI : Variations des niveaux statiques des puits et forages dans le BVK	128
Tableau XXVII : Domaine de variation des niveaux piézométriques dans le BVK durant la période d'étude 2014 – 2015	131
Tableau XXVIII : Termes du bilan hydrique du bassin versant de la Kadey (2015)	140
Tableau XXIX : Domaine de variation de certains paramètres physiques dans les eaux de Batouri entre 2015 et 2016	144
Tableau XXX : Domaine de variation de certains paramètres chimiques (Cations) dans les eaux de Batouri entre 2015 et 2016	145
Tableau XXXI : Domaine de variation de certains paramètres chimiques (Anions) dans les eaux de Batouri entre 2015 et 2016	146
Tableau XXXII : Domaine de variation des éléments en traces métalliques et des cyanures (mg/L) dans les eaux de la localité de Batouri en 2016	147
Tableau XXXIII : Domaine de variations des paramètres physiques dans les eaux d'écoulement du BVK à Batouri entre 2015 et 2016	150
Tableau XXXIV : Domaine de variations de paramètres physiques (pH, CE, Turbidité et MES) dans les eaux souterraines du BVK à Batouri entre 2015 et 2016	150
Tableau XXXV : Relation entre conductivité et minéralisation (Detay 1993).	150
Tableau XXXVI : Domaine de variation de cations dans les eaux d'écoulement du BVK à Batouri entre 2015 et 2016	152
Tableau XXXVII : Domaine de variation de cations dans les eaux souterraines de la localité Batouri entre 2015 et 2016	155
Tableau XXXVIII : Domaine de variation des anions dans les eaux d'écoulement de la localité de Batouri entre 2015 et 2016	156

Tableau XXXIX : Domaine de variation des anions majeurs dans les eaux souterraines de la localité de Batouri entre 2015 et 2016	156
Tableau XXXX : Indices de saturation des eaux de la localité de Batouri au cours de l'année 2016	169
Tableau XXXXI : Indices de pollution métallique (IPM) déterminés dans les eaux de Batouri	170
Tableau XXXXII : Matrice de corrélation des différents paramètres physicochimiques obtenus dans les eaux de la localité de Batouri (2016)	173
Tableau XXXXIII : Matrice de corrélation entre les éléments en traces métalliques et les cyanures dans les eaux du BVK à Batouri	175
Tableau XXXXIV : Indices de pollution métallique pour les eaux d'écoulements de la localité de Batouri dans le BVK	176
Tableau XXXXV : Indices de pollution métallique pour les eaux souterraines de la localité de Batouri dans le BVK	177

Résumé

Le présent travail avait pour objectif d'étudier le fonctionnement hydroclimatologique, hydrodynamique et hydrogéochimique du bassin versant de la Kadey (BVK) dans un contexte de variabilité et/ou de changement et de forçages anthropogéniques. Le BVK est situé sur le plateau forestier sud-camerounais au sud-est de la région de l'Est-Cameroun. Il est drainé par les cours d'eau Kadey et Doumé qui confluent pour se déverser dans la Sangha l'un des affluents du Congo au Cameroun. Son substratum géologique est constitué d'un socle granito gneissique qui appartient à la Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale (CPNE) du Cameroun sur lequel reposent par endroits par d'épaisses couches de sols ferrallitiques et des sols hydromorphes. Sa végétation est constituée d'une forêt dense et /ou d'une forêt dégradées. Les principales activités économiques sont l'agriculture ; l'élevage ; l'exploitation forestière et l'exploitation minière.

Les travaux de terrain ont permis de collecter : i) les paramètres climatiques (pluies et températures) dans certaines stations météorologiques et centres spécialisés du BVK ; ii) les données hydrologiques (débits) de la Kadey à Batouri et à Pana ; iii) les paramètres hydrodynamiques (niveaux statiques) au niveau de 72 ouvrages hydrauliques. Par ailleurs, 25 points d'échantillonnage ont été retenus pour le suivi hydrogéochimique et des prélèvements ponctuels des eaux de surface et souterraines en saisons sèche et humide durant la période comprise entre 2015 et 2016. Les travaux au laboratoire quant à eux ont consisté aux traitements, dépouillements, analyses et interprétations de paramètres hydro climatiques et physicochimiques dans différents laboratoires au Cameroun et en France, et ceci à l'aide de différentes techniques de traitements et d'analyses classiques et statistiques comparatives.

Les résultats montrent que sur le plan climatologique, les températures moyennes annuelles varient au niveau des stations pluviométriques entre 22,9 et 26,1°C dans le BVK. Le test de Pettit n'indique aucune rupture significative pour les températures annuelles et mensuelles. Les pluies annuelles quant à elles oscillent entre 863 et 2362 mm au cours de la même période. Elles évoluent différemment d'une année à une autre avec alternance de périodes humides et sèches. Le test de Pettit révèle des ruptures significatives dans toutes les stations du BVK avec des baisses de pluies annuelles comprises entre -9,5 et -13 %. Les variations des pluies mensuelles et saisonnières sont caractéristiques du régime équatorial de transition au sud du bassin et passe au régime tropical de transition à deux saisons au nord de ce dernier.

Sur le plan hydrologique, les débits annuels de la Kadey à Batouri (8 749 km²) varient entre 97,9 m³/s et 218 m³/s durant la période comprise entre 1954 - 2015 ; ceux de la Kadey à Pana (20 372 Km²), varient entre 148,4 m³/s et 317 m³/s entre 1964 - 2015 sans prendre en compte la lacune d'observation comprise entre 1981 et 1998. Ceci, pour des modules interannuels de 147±25,6 m³/s (Q_e = 16,80 L/s/km², L_e = 529 mm, K_e = 30,08 %) à Batouri et de 304±28,1 m³/s (Q_e = 15 L/s/km², L_e = 470,59 mm, K_e = 28,81 %) à Pana. Lorsque l'on compare les débits de la Kadey à Batouri avant la lacune (120 m³/s) et après la lacune (104,5 m³/s) ainsi que ceux de Pana avant (247 m³/s) et après la lacune (215 m³/s); on enregistre dans l'ensemble une baisse des débits d'environ -13 % sur la Kadey à Batouri et à Pana pendant les périodes actuelles comparativement aux périodes anciennes situées avant les lacunes d'observations.

Sur le plan hydrodynamique, on note une évolution synchrone, tout au long de l'année, de la surface piézométrique dans les différents ouvrages de captages qui pourrait être la résultante et l'expression de l'existence d'un aquifère de sub-surface unique et continu dans tout le bassin comme c'est souvent le cas en zone de socle cristallin fracturé.

Sur le plan hydrogéochimique, les eaux du BVK sont acides et très faiblement à faiblement minéralisées. Plusieurs facteurs environnementaux contrôlent la qualité des eaux du BVK : la lithologie, les activités anthropiques et le climat. L'exploitation de l'or se manifeste surtout par de fortes fluctuations de turbidités et de MES totales. Elle est également à elle est à l'origine de la présence remarquable des ETM (Fe > Mn > Pb > Cr > Cu > Zn > Cd > As > CN) dans les eaux du BVK.

Mots clés : Variabilité hydroclimatologique ; Hydrodynamique ; Niveaux piézométriques ; Eléments Traces Métalliques ; Paramètres physicochimiques ; Bassin versant de la Kadey.

Abstract

The objective of this work was to study the hydroclimatological, hydrodynamic and hydrogeochemical functioning of the Kadey watershed (BVK) in a context of anthropogenic variability and/or change and forcing. The BVK is located on the South-Cameroon forest plateau in the south-east of the East Cameroon region. It is drained by the Kadey and Doumé rivers that converge to flow into the Sangha one of the tributaries of Congo in Cameroon. Its geological substrate consists of a gneissique granito base belonging to the North Equatorial Pan-African Chain (CPNE) of Cameroon, on which thick layers of ferralitic soils and hydromorphic soils are based in places. Its vegetation consists of dense forest and/or degraded forest. The main economic activities are agriculture; Livestock; logging and mining.

The fieldwork collected: (i) climatic parameters (rain and temperature) at some weather stations and specialized centres of the BVK; (ii) hydrological data (flows) from the Kadey to Batouri and Pana; (iii) hydrodynamic parameters (static levels) at the level of 72 hydraulic structures. In addition, 25 sampling points were selected for hydrogeochemical monitoring and spot sampling of surface and groundwater in dry and wet seasons during the period 2015 to 2016. The laboratory's work consisted of treatments, counting, analyses and interpretations of hydro-climatic and physical-chemical parameters in different laboratories in Cameroon and France, using different techniques of treatment and classical analysis and comparative statistics.

The results show that, from a climatological point of view, average annual temperatures vary at the level of rainfall stations between 22.9 and 26.1°C in the BVK. The Pettit test does not indicate any significant disruption for annual and monthly temperatures. Annual rainfall ranges from 863 to 2362 mm over the same period. They evolve differently from year to year with alternating wet and dry periods. The Pettit test reveals significant ruptures at all BVK stations with annual rainfall drops of between -9.5 and -13%. The variations in monthly and seasonal rains are characteristic of the transitional equatorial regime south of the basin and move to the two-season tropical transition regime north of the basin.

Hydrologically, the annual flows of the Kadey to Batouri (8,749 km²) range from 97.9 m³/s to 218 m³/s during the period between 1954 - 2015; those of the Kadey in Pana (20,372 km²), vary between 148.4 m³/s and 317 m³/s between 1964 - 2015 without taking into account the observation gap between 1981 and 1998. This, for year-to-± year-±25.6 m³/s modules (Q_e - 16.80 L/s/km², 529 mm, K_e - 30.08 per cent) in Batouri and 304±28.1 m³/s (Q_e - 15 L/s/km², 470.59 mm, K_e - 28.81 per cent) Pana. When comparing the flows of the Kadey to Batouri before the gap (120 m³/s) and after the gap (104.5 m³/s) as well as those of Pana before (247 m³/s) and after the gap (215 m³/s); overall, there was a decrease in flows of about -13% on the Kadey at Batouri and Pana during the current periods compared to the old periods before the observational deficiencies.

On the hydrodynamic level, there is a synchronous evolution, throughout the year, of the piezometric surface in the various catchment structures that could be the result and expression of the existence of a single and continuous subse surface aquifer throughout the basin as is often the case in a fractured crystalline base area.

Hydrogeochemically, the waters of the BVK are acidic and very weakly mineralized. Several environmental factors control the water quality of the BVK: lithology, human activities and climate. Gold mining is mainly manifested by large fluctuations in turbidities and total ESM. It is also responsible for the high-profile presence of ETMs (Fe > Mn > Pb > Cr > Cu > Zn > CD > As > CN) in BVK waters.

Keywords: Hydroclimatological variability; Hydrodynamics; Piezometric levels; Metallic Traces Elements; Physicochemical settings; Kadey watershed.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau constitue un enjeu majeur pour le développement durable (PNUD/GEF, 2016). En effet, à l'échelle de la planète, les océans qui constituent les eaux salées comptent environ pour 97,5% des réserves globales et, des 2,5% restantes, les calottes polaires représentent environ 68.9% de ces eaux douces, les eaux souterraines 30.8% et enfin, les lacs, fleuves et rivières 0.3% (UNESCO, 1978 ; Banton et Bangoy, 1997 ; Castany, 1998 ; Degrémont, 2005, Gilli et *al.*, 2008). Cette eau douce est une ressource clé à la santé, la prospérité et la sécurité humaine. Elle est essentielle à l'éradication de la pauvreté, à l'égalité des genres, à la sécurité alimentaire et à la préservation d'écosystèmes (Anonyme UNESCO, 2020). On remarque actuellement que des milliards d'êtres humains sont confrontés à de sérieux défis liés à l'eau : quantité et qualité insuffisantes, manque d'installations sanitaires et catastrophes liées aux sécheresses et aux inondations. D'ici à 2030, près de la moitié de la population mondiale vivra dans des régions soumises à un fort stress hydrique (Anonyme UNESCO, 2020).

Face à ce constat global de l'amenuisement progressif et de la rareté des ressources en eau, les Etats et certains organismes internationaux en charge de l'environnement, à travers des conférences qu'ils organisent pour la protection de l'environnement ont mis un accent particulier sur la problématique des ressources en eau durant les dernières décennies. En juillet 2010, l'Assemblée générale des Nations Unies a proclamé comme droit humain fondamental l'accès à une eau propre et à l'assainissement. Or, le manque d'accès à l'eau potable en quantité et qualité suffisantes reste l'un des plus sérieux problèmes pour la santé humaine au niveau mondial. Bien que l'échéance pour l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) sur l'accès à l'eau potable soit arrivée à son terme en 2010, plus de 700 millions de personnes en sont encore privées, dont près de la moitié en Afrique sub-saharienne. Il en est de même pour l'objectif sur l'assainissement. Actuellement, 2,4 milliards de personnes ne disposent pas encore de services d'assainissement améliorés, dont une vaste majorité dans des zones rurales (ACF, 2008).

Par ailleurs, l'accroissement et le développement accélérés des industries, des centres urbains, des activités industrielles, minières, agropastorales, et une démographique exceptionnelle ont sans doute augmenté la demande en eau entraînant ainsi la pénurie de ladite ressource dans le monde. Aujourd'hui, l'aspect quantitatif de la ressource eau est encore plus aggravé par la variabilité et/ou le changement climatique. La qualité de l'eau quant à elle va dépendre de l'environnement biophysique et humain dans lequel elle se trouve et semble être contrôlée par : les apports atmosphériques, la géologie (lithologie et sols), la matière organique végétale et animale, les activités anthropiques. C'est ainsi qu'au cours de son trajet dans les différents

réservoirs du milieu naturel et de l'hydrosphère, l'eau va se mélanger à certains éléments qui lui donneront un chimisme particulier (Xiao et *al.*, 2012). En traversant des formations géologiques plus ou moins perméables, elle est susceptible de connaître une augmentation de sa minéralisation par altération des roches (hydrolyse) et lessivage des sols. Cette situation peut donner lieu à des atteintes graves à sa qualité par contamination verticale due aux activités anthropogéniques.

Les forçages conjugués liés aux changements climatiques et aux activités anthropiques quant à eux ne cessent actuellement d'augmenter la pression sur les ressources en eau tant des points quantitatifs que qualitatifs. Ils modifient les régimes des pluies, dégradent et altèrent la qualité des eaux, l'humidité de l'air et des sols, l'équilibre entre la masse des glaciers et le débit des cours d'eau et les ressources en eaux de surface et souterraines. En même temps, la fréquence et l'intensité des inondations et des sécheresses ne cessent d'augmenter. Au cours des prochains 40 ans, environ 800.000 nouvelles personnes chaque semaine migreront vers les villes à travers le monde (ACF, 2008). La croissance démographique et la rapide urbanisation créeront d'autres pressions sur les ressources en eau, et auront de profonds impacts sur l'environnement naturel. La détérioration des infrastructures hydrauliques dans de nombreuses régions du monde affectera la santé publique et l'environnement.

Les mêmes constats relevés ci-dessus sont observés à l'échelle de l'Afrique et au Cameroun en particulier où malgré l'abondance relative de ressources en eau, sa répartition n'est pas équitable entre le nord et le sud du pays (Olivry, 1986 ; Sighomnou, 2004 ; MINEE, GWP-Cmr 2009a). Le gouvernement camerounais, conscient de la place qu'occupe cette ressource dans la préservation de la santé de la population, la promotion de l'agriculture, la construction et l'entretien des infrastructures ainsi que la protection de sa biodiversité s'est résolument mis en marche pour l'atteinte des objectifs du développement durable (ODD).

Malheureusement, que ça soit sur le plan quantitatif ou même qualitatif, les ressources en eaux sont très peu connues au Cameroun en général et dans la région de l'Est en particulier (MINEE-GWP, 2009a ; MINEE-GWP, 2009b). Les travaux effectués dans cette partie du Cameroun montrent que dans l'ensemble, les pluies interannuelles varient en fonction de la longitude et de la latitude (Olivry, 1986 ; Sighomnou et *al.*, 2005 ; MINEE- GWP-CMr, 2009a) entraînant ainsi l'existence de deux types de climats en relation avec leurs variations mensuelles : un climat équatorial de type guinéen plus au sud et, un climat équatorial et tropical de transition au nord (Suchel, 1988 ; Sighomnou, 2004 ; MINEPAT/SRADDT-Est, 2017). Les études hydrologiques sont très peu nombreuses et au niveau institutionnel, le suivi hydrométrique national est

caractérisé par deux principaux réseaux que sont : le réseau national géré par le Centre de Recherche Hydrologique (CRH) de l'Institut de Recherche Géologique et Minière (IRGM) du MINRESI et de l'ex AES SONEL devenu ENEO pour la production hydroélectrique. Toutefois, on assiste depuis les années 1980 à une décrépitude de ces réseaux même-ci à partir de 2008 on observe une timide reprise des activités par le CRH sur sept stations dans la région de l'Est que sont : la Ngoko à Moloundou, la Kadey à Pana et à Batouri, le Dja à Somalomo et à Bi, la Boumba à Biwala et la Doumé à Doumé (GWP-Caf, CEEAC 2015). Sur le plan hydrogéologique, il n'existe pas ou très peu de travaux réalisés dans cette zone en vue de suivre et de quantifier les ressources en eau souterraine (MINEE- GWP-CMr, 2009a ; MINEPAT/SRADDT-Est, 2017 ; Rakotondrabe, 2019). Quelques travaux préliminaires y sont généralement effectués en hydraulique villageoise par les bureaux d'études, les organisations non gouvernementales, les organismes internationaux et nationaux pour l'implantation des points d'eau tels que les forages et/ou les puits aménagés.

De nombreux travaux réalisés actuellement dans la région de l'Est du Cameroun se sont surtout intéressés sur la qualité physico-chimique des eaux soit en relation avec la lithologie, les éléments traces, les terres rares et les flux de matières dissoutes (Freyssinet et *al.*, 1989 ; Braun et *al.*, 1998 ; Sigha-Nkamdjou, 1994 ; Sigha-Nkamdjou et *al.*, 2005 ; Mumbfu et *al.*, 2017 ; Mimba et *al.*, 2017 ; Vishiti et *al.*, 2017) et/ ou, soit en relation avec les activités anthropiques telles que l'exploitation artisanale aurifère et les flux de matières en suspension (Salomons, 1995 ; Etame, 2001 ; Liéno, 2007 ; Foumena et Bamenjo, 2013 ; Biaka, 2014 ; Omang et *al.*, 2014 ; Asaah et *al.*, 2015 ; Pahimi et *al.*, 2015 ; Tehna et *al.*, 2015 ; Dedzo et *al.*, 2017 ; Rakotondrabe, 2019). Nonobstant cette littérature exhaustive, on remarque que les différents travaux sus cités et menés précédemment dans la zone d'étude sont parcellaires et ne prennent pas simultanément en compte l'aspect pluridisciplinaire (climatologie, hydrologie, hydrodynamique et hydrochimie) utile à une meilleure connaissance des ressources en eau. Pour le moment, le seul point d'ancrage réalisé par Sigha-Nkamdjou (1994) dans le grand bassin versant du Congo et plus spécifiquement dans les sous bassins de la Boumba, le Dja et de la Ngoko assez proche de celui de la Kadey, date d'environ 30 ans.

Objectifs

L'objectif général du présent travail est donc une contribution à l'étude du fonctionnement hydroclimatologique, hydrodynamique et hydrogéochimique du bassin versant de la Kadey dans la région de l'Est du Cameroun dans un contexte de variabilité et/ou de changements

climatiques et des activités anthropiques. Ce site d'étude est ainsi représentatif de ladite zone d'étude des points de vue situation géographique, climatique, géohydrologique et des activités socioéconomiques présentes (exploitation minière artisanale, déforestation, etc.).

De façon spécifique, il s'agit :

- de réactualiser les paramètres hydroclimatiques (pluies, températures et débits) du BVK et d'analyser leur évolution dans le temps et l'espace ;
- de comprendre le fonctionnement hydrodynamique (niveaux statiques et piézométriques) des eaux souterraines (puits, forages et sources) du BVK ;
- d'étudier la qualité physicochimique des eaux de surface et souterraines de ce bassin versant ;
- de déterminer les paramètres environnementaux liés aux forçages climatiques et/ou anthropogéniques qui contrôlent la qualité des eaux du BVK afin de ressortir leur degré de vulnérabilité.

Plan de travail

Le présent travail s'articule autour de cinq (05) chapitres entourés par une introduction et une conclusion générales qui se présentent de la manière suivante :

- le premier chapitre présente la revue de la littérature : a) sur le milieu biophysique et humain de la zone d'étude (caractéristiques géographique, géologique, pédologique, hydro climatique, phytogéographique, anthropique, population et activités socioéconomiques) et, b) les travaux antérieurs sur les transports des matières et éléments en suspensions sur le triangle national de façon générale et dans le bassin versant de la Kadey plus spécifiquement ;
- le deuxième chapitre prend en compte le matériel et l'approche méthodologique utilisés pour mener à bien cette étude ;
- le troisième chapitre présente quant à lui les principaux résultats obtenus au niveau de la climatologie, de l'hydrologie, de l'hydrodynamique et de l'hydrogéochimie actuelles dans le BVK et de ses environs ;
- le quatrième chapitre interprète et discute les résultats précédemment obtenus au niveau de l'hydro climatologie en prenant en compte d'une part, la réponse hydrologique du BVK à partir des séries pluie-débits aux échelles annuelle, mensuelle, saisonnières et journalière et d'autre part, l'évaluation du processus de la recharge de la nappe souterraine à partir de l'analyse des variations des niveaux statiques et piézométriques dans le temps et l'espace ;
- le cinquième chapitre enfin restitue, les résultats sur la qualité physicochimique des eaux d'écoulement et souterraines dans la localité de Batouri, analyse leurs variations dans

l'espace et le temps et ressort les principaux facteurs environnementaux qui contrôlent la qualité des eaux de ce bassin versant représentatif de la région de l'Est du Cameroun.

CHAPITRE I : MILIEU NATUREL ET TRAVAUX ANTERIEURS

Introduction

Ce chapitre présente la revue de la littérature sur le milieu biophysique et humain de la zone d'étude dans la région de l'Est du Cameroun, mais également les travaux effectués antérieurement dans les domaines de la climatologie, l'hydrologie, l'hydrodynamique et la qualité physicochimique des eaux dans cette zone forestière du Sud Cameroun.

I.1. Cadre biophysique et humain de la zone d'étude

I.1.1. Situation géographique et administrative

Avec une superficie de 109 002 km², soit 23 % de celle du territoire national (475 445 km²), la région de l'Est dans laquelle se trouve la zone d'intérêt est située entre les 2° et 6° degrés de latitude Nord et les 12° et 16° de longitude Est. Elle est limitée au nord par la région de l'Adamaoua, à l'ouest par celles du Centre et du Sud, à l'est par la République Centrafricaine et au sud par la République du Congo (Figure I.1). C'est la plus vaste des dix (10) régions du Cameroun avec quatre (04) départements (Haut-Nyong, Lom et Djérem, Boumba et Ngoko et Kadey), trente-trois (33) arrondissements. Elle a pour chef-lieu la commune de Bertoua (Anonyme, 2013).

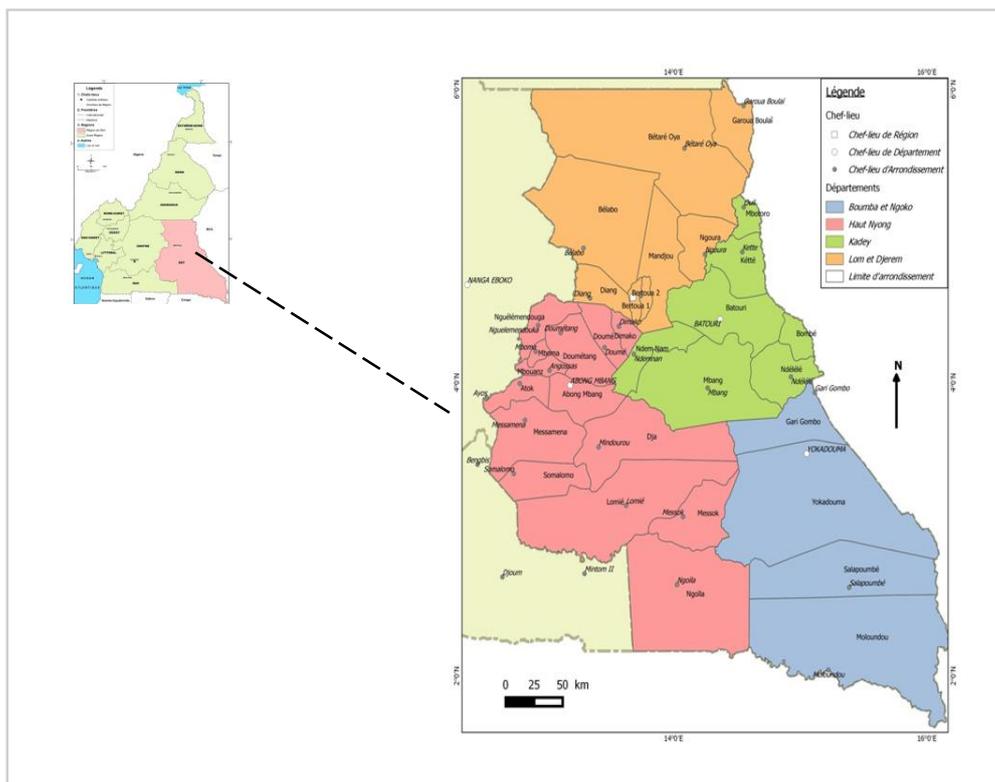


Figure I.1 : Situation géographique de la zone d'étude : (a) au Cameroun ; (b) avec ses divisions administratives (MINEPAT/SRADDT-Est, 2017).

I.1.2. Caractéristiques climatiques

La zone d'étude est couverte par les unités climatiques (1) et (4) correspondant respectivement au climat équatorial et au climat équatorial et tropical de transition (Olivry, 1986 ; Suchel, 1988 ; Sighomnou, 2004) (Figure I.2).

1.1.2.1. Climat équatorial

Celui-ci est dominant à l'extrême Sud-Est de la région de l'Est avec quatre (04) saisons contrastées :

- deux saisons pluvieuses dont la première va de mars à mai (petite saison de pluies) et la seconde de septembre à novembre (grande saison de pluies) ;
- deux saisons sèches dont la plus grande va de décembre à mars et la plus petite entre juin et août.

1.1.2.2. Climat équatorial et tropical de transition

Ce dernier sévit dans le reste de la région de l'Est entre les latitudes 4° et 6° Nord et à l'Est du 12^{ème} méridien (Figure I.2). Il se différencie du climat équatorial par une chute de la pluviosité qui est observée en juillet – août mais sans véritable petite saison sèche (Olivry, 1986 ; Suchel, 1987 ; Sigha, 1994 ; Sighomnou, 2004).

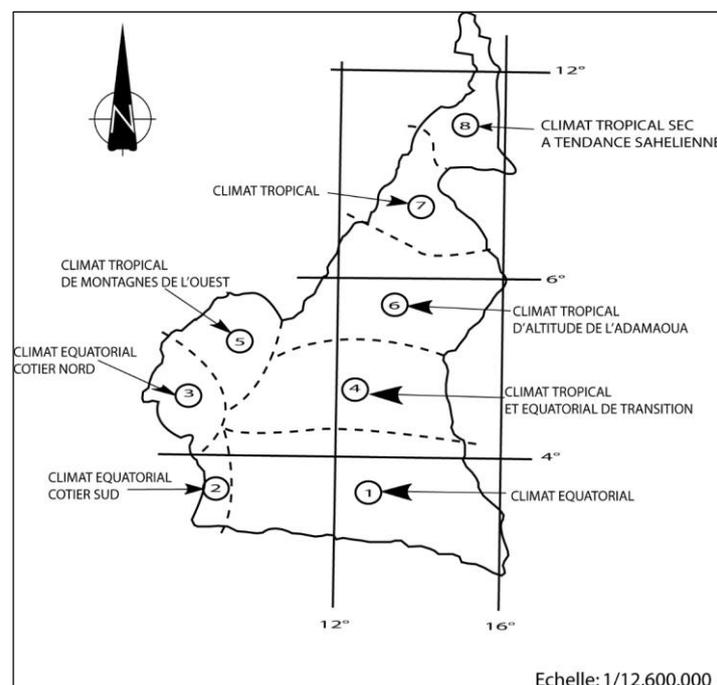


Figure I.2 : Principales unités climatiques du Cameroun (Olivry, 1986)

1.1.2.3. Températures

Elles varient dans l'ensemble entre 20,00 et 25,5°C. Le mois le plus chaud est généralement celui de mars (23°C) alors que le mois le plus humide est celui de juillet (20°C). La température moyenne interannuelle est d'environ 21,3°C (Olivry, 1986 ; Suchel, 1987 ; Sighomnou, 2004).

1.1.3. Végétation

Le climat présenté ci-dessus entretient dans la région de l'Est une végétation de type forêt dense semi-décidue de moyenne altitude (Letouzey, 1968 ; IRAD, 2008) (Figure I.3).

L'analyse fine de cette végétation montre toutefois de l'extrême sud-est au nord de cette partie du pays et en fonction des activités anthropiques et de la répartition du climat : une forêt héli-ombrophile congolaise, une forêt héli-ombrophile à sterculiacée et une savane péri-forestière.

- La forêt héli-ombrophile congolaise couvre le Sud de la région jusqu'à 3°30' de latitude Nord où elle entre en contact avec la forêt semi-décidue ; à l'ouest, elle est délimitée par la forêt biafréenne et se prolonge au sud vers le grand bassin du Congo. Du point de vue de la flore, elle se caractérise par l'abondance de *Gilbertiodendron dewevrei* (*Césalpiniacée*) (Letouzey, 1968 ; Olivry, 1986).
- La forêt héli-ombrophile à sterculiacée quant à elle est représentée à l'ouest de la forêt congolaise où elle est fortement dégradée. Elle fait partie des forêts inondées à peuplement de raphias des vallées du haut Nyong et de quelques essences ligneuses spécifiques comme *Mytragymaciliata*, *Paludosa*, etc. (Letouzey, 1968).
- La savane péri-forestière couvre quant à elle près de 14% du territoire de la région de l'Est, en particulier la partie nord. Elle constitue une mosaïque complexe de peuplements végétaux dont les principales espèces d'arbres sont : *Albizia zygia*, *Ficus sp.*, *Annona senegalensis* (Letouzey, 1968).

Une estimation de l'occupation des sols de la région de l'Est-Cameroun par les différents types de végétations rencontrées (Nguenang et *al.*, 2003) ainsi que la segmentation du domaine forestier de la région de l'Est-Cameroun sont présentés respectivement dans le Tableau I et la figure I.4. On y distingue les réserves forestières, les aires protégées, les forêts communautaires et les plantations (DR/FOF-EST, 2015).

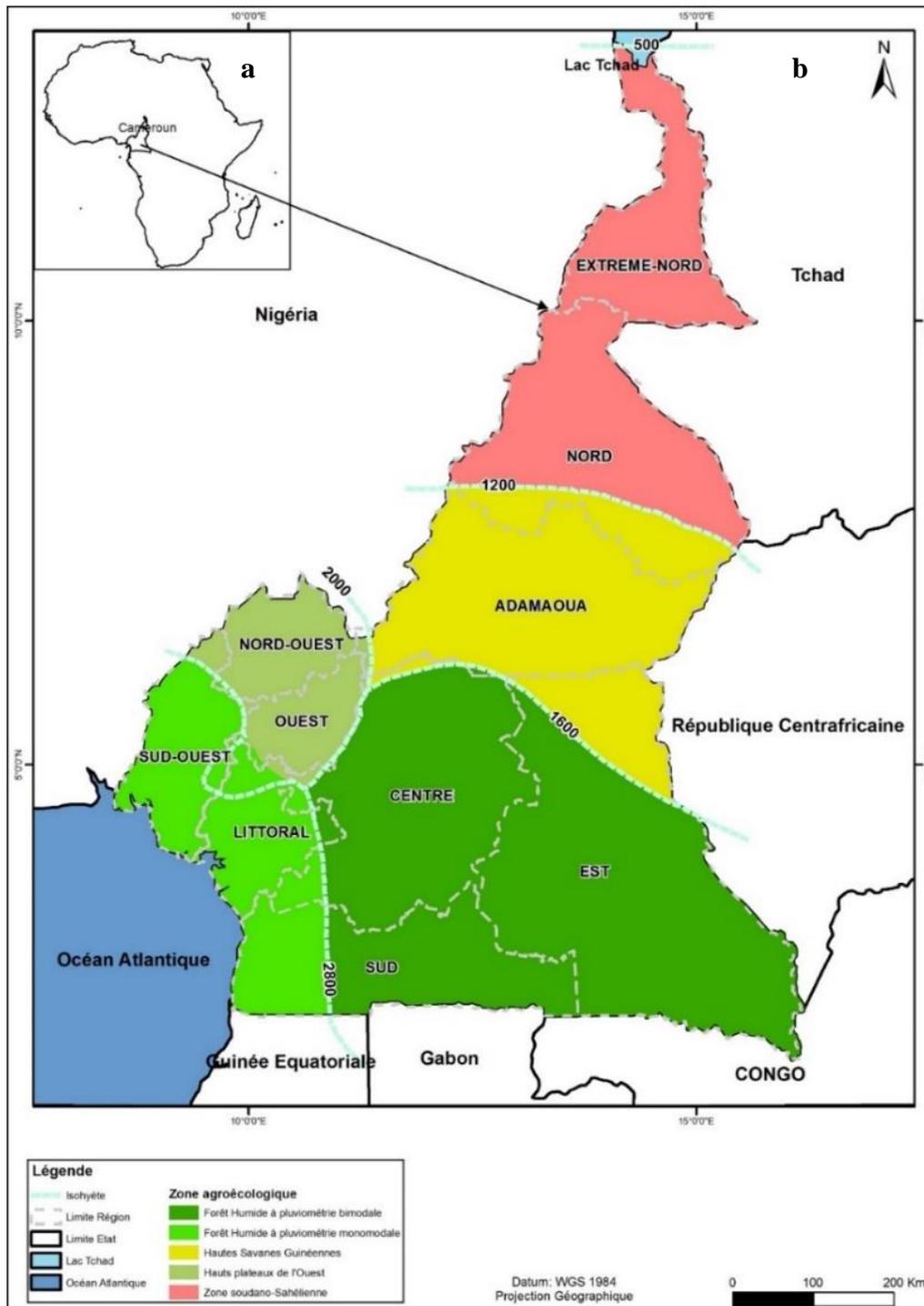


Figure I.3 : Différentes zones agro-écologiques du Cameroun (Letouzey, 1968 ; IRAD, 2008)

Tableau I : Estimation des surfaces couvertes par les différentes classes d'occupation du sol

Département Occupation du sol	Lom-et-Djérem (km²)	Kadey (km²)	Boumba-et- Ngoko (km²)	Haut-Nyong (km²)	Total (km²)
Forêt	12 102,8	10073,8	30 606,0	35 082,5	87 865,1
Savane	9 536,1	3815,8	26,1	121,5	13 499,4
Zone agricole	595,2	413,6	178,2	321,6	1 508,5
Habitat, sols nus et autres	56,7	28,4	74,9	64,5	224,4
Zones humides	90,7	38,5	165,0	65,8	360,1
Plan d'eau	3,1	0,0	24,3	13,1	40,4
Savane boisée	3 978,9	1811,4	110,3	644,6	6 545,3
Plantations	3,4	0,0	0,2	19,8	23,4
	26 367,0	16 181,6	31 184,9	36 333,3	110 066,8

Source : Nguenang et *al.*, 2003

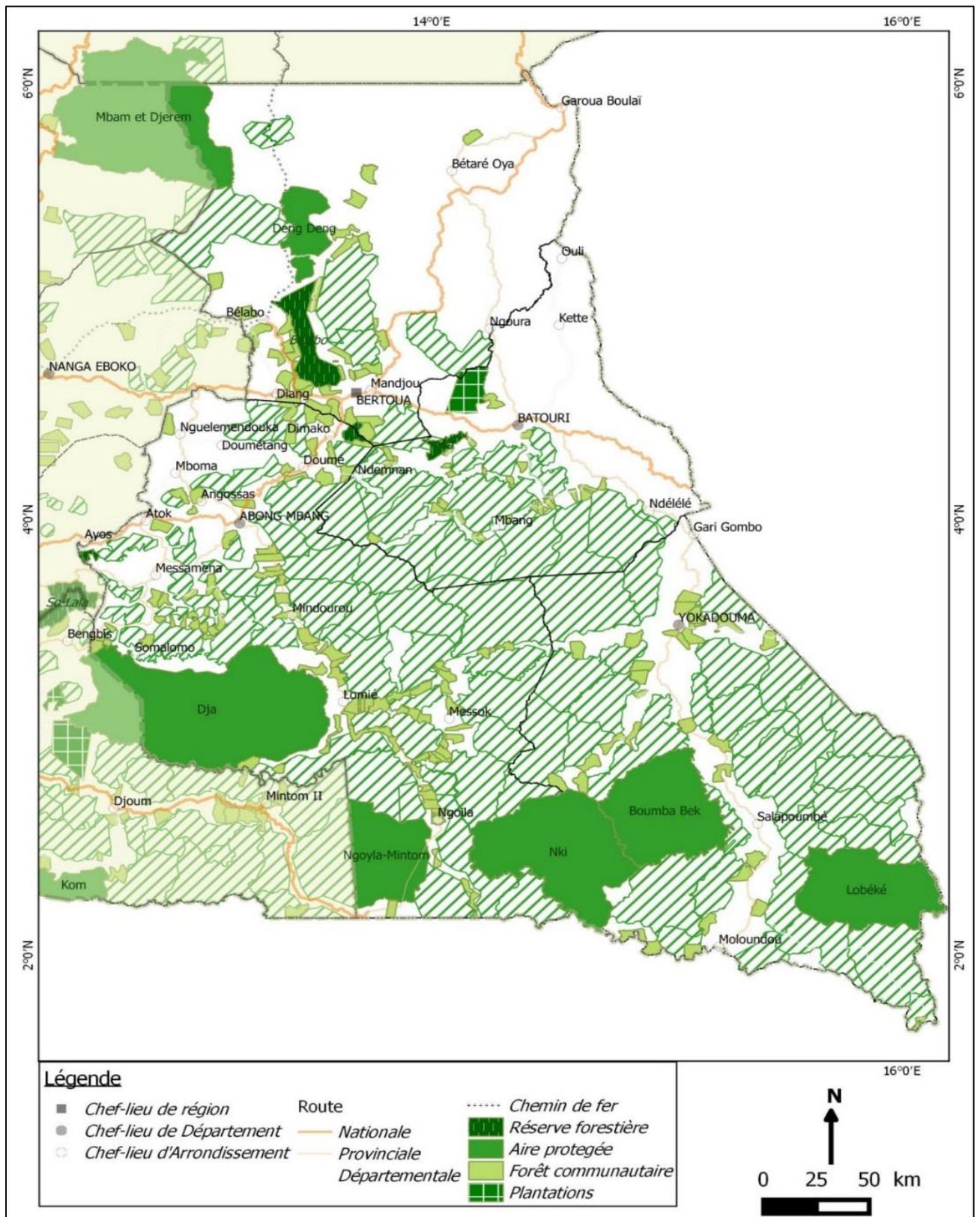


Figure I.4 : Segmentation du domaine forestier de la Région de l'Est (Nguenang et *al.*, 2003 ; DR/FOF-EST, 2015)

I.1.4. Orographie

La région de l'Est-Cameroun appartient majoritairement au plateau Sud-Camerounais avec trois (03) principales unités morphologiques (Toteu et *al*, 2001) :

- l'unité de Moloundou-Yokadouma où les altitudes sont inférieures à 600 m avec un caractère hydromorphe prononcé ;
- l'unité de Bertoua aux altitudes comprises entre 600 et 800 m qui est la plus étendue ;
- l'unité de Bétaré-Oya qui culmine à plus de 800 m et qui est le raccord de la surface fondamentale au plateau de l'Adamaoua (Figure I.5).

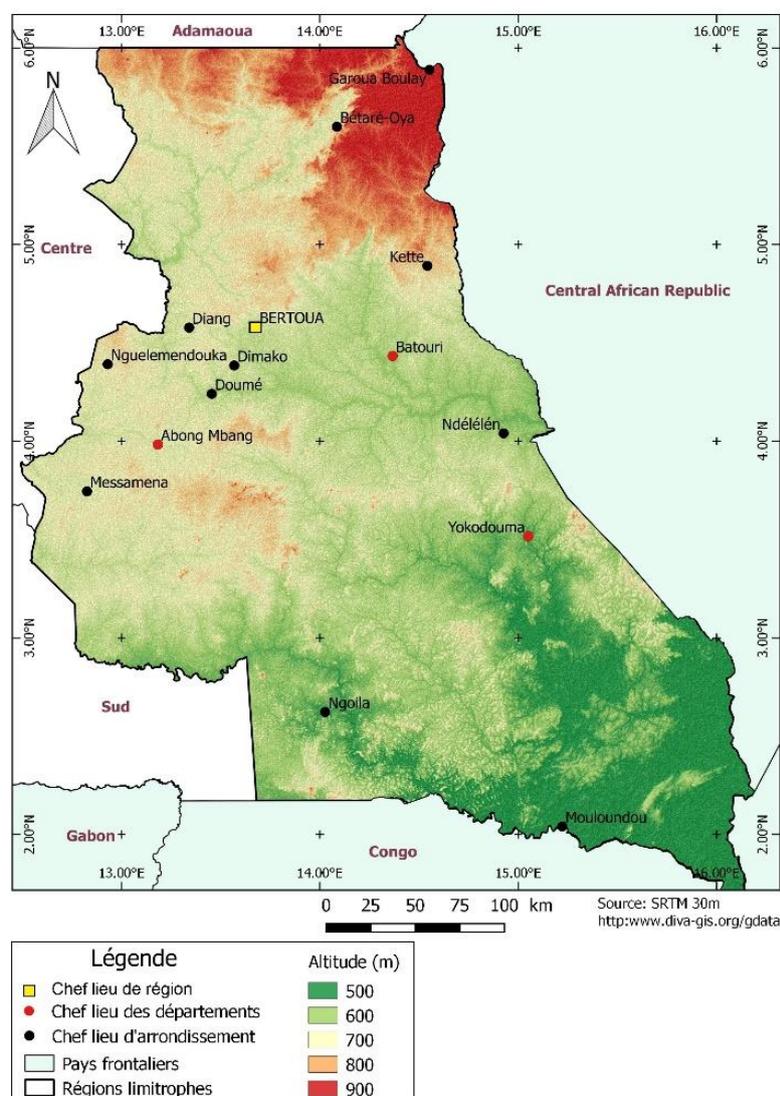


Figure I.5 : Relief de la région de l'Est-Cameroun (d'après les images SRTM 30 m, modifiées)

I.1.5. Hydrographie

Le réseau hydrographique de la région de l'Est est très dense. Il est drainé par les cours d'eau qui appartiennent à trois des cinq grands bassins hydrographiques du Cameroun (Figure I.6) : le bassin du Congo au sud-est, une partie du bassin de la Sanaga au nord et la partie amont du bassin des fleuves côtiers à l'ouest et au sud. Les deux autres bassins qui n'affectent pas la région de l'Est sont les bassins du lac Tchad et du Niger dans la partie septentrionale (Olivry, 1986) (Figure I.6).

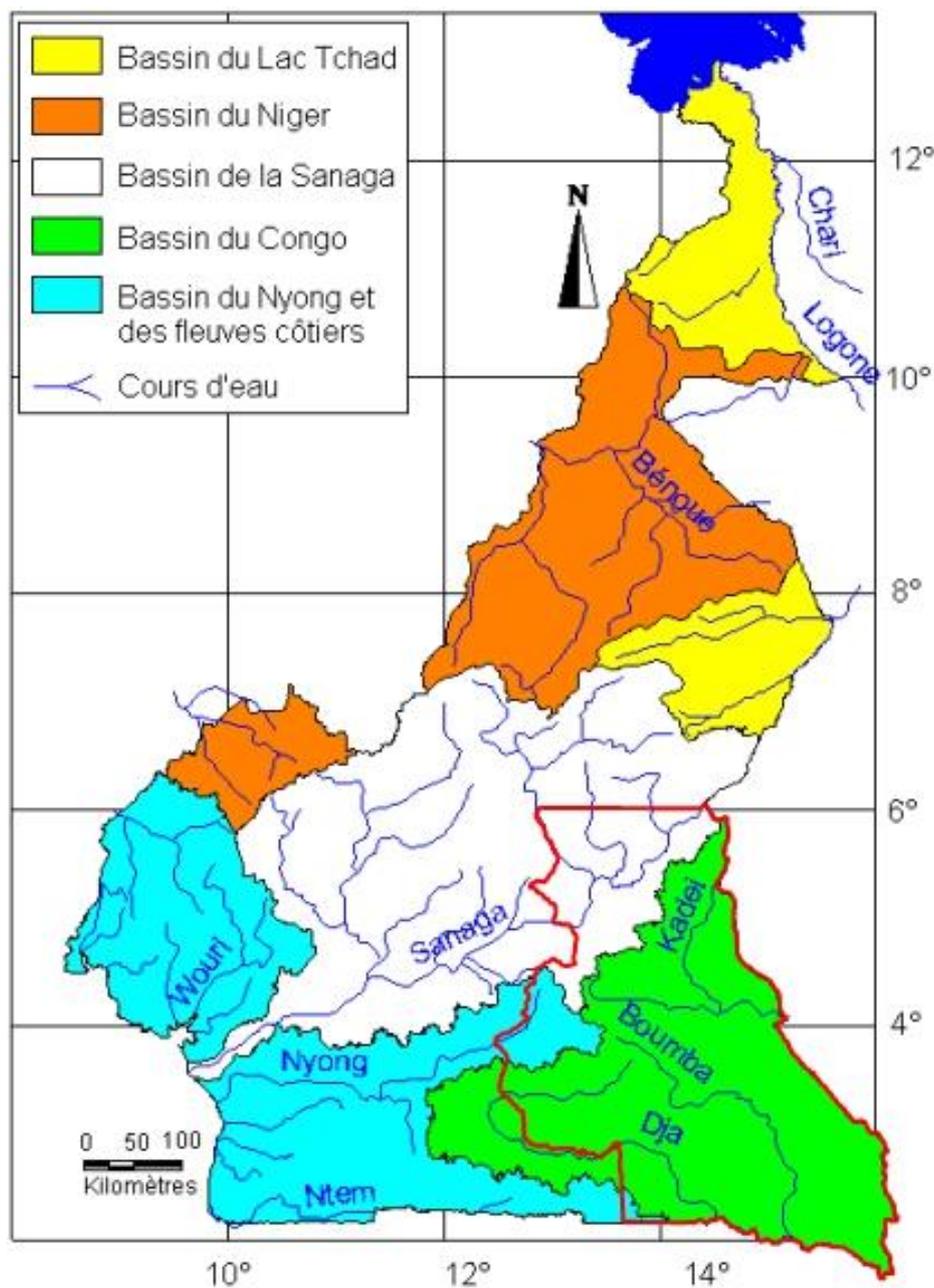


Figure I.6 : Principaux bassins versants du Cameroun (Olivry, 1986 ; MINEE-GWPCmr, 2009a modifiée)

I.1.5.1. Bassin de la Sanaga

Une partie de la zone d'étude est drainée par les affluents supérieurs de la Sanaga qui est la plus grande et la plus longue fleuve du Cameroun (Olivry, 1986). Ces cours d'eau sont constitués par le Lom et Pangar qui se jettent dans le Djerem pour former la Sanaga dans son cours supérieur ou "Haute Sanaga". Cette dernière prend sa source au flanc de l'Adamaoua vers 1150 m d'altitude près de la route joignant Meiganga à Ngaoundéré. Elle draine ainsi une grande partie du département du Lom et Djérem (72%) et une petite partie du Haut-Nyong (3,6%). La surface totale de la région de l'Est drainée par le Sanaga est d'environ 20 012 km², représentant environ 18,36% de cette région.

I.1.5.2. Bassin des fleuves côtiers

Dans la région de l'Est-Cameroun, le bassin des fleuves côtiers est surtout représenté par la partie amont du fleuve Nyong ou « Nyong amont » caractérisé par un relief mou et des pentes très faibles de l'ordre de 1 % coulant dans des vastes zones marécageuses (Olivry, 1986 ; MINEE/GWP-Cmr, 2009b). On y observe également une infime partie amont du fleuve Ntem (Figure I.6).

I.1.5.3. Bassin du Congo au Cameroun

Etendu sur une superficie d'environ 82 920 km², le bassin du Congo avec son réseau hydrographique dense est le plus grand de la région de l'Est Cameroun soit 76 % de la superficie totale de cette région qui est de 109 002 km². Il est transfrontalier et repartie entre plusieurs pays que sont le Congo, la République Centrafricaine et le Cameroun. On retrouve dans ce sous bassin, les cours d'eau constitués principalement par le système Boumba-Dja-Ngoko et le système Sangha grossi par son principal affluent la Kadey qui draine le bassin versant de la Kadey, site retenu pour la présente étude (Figure I.7).

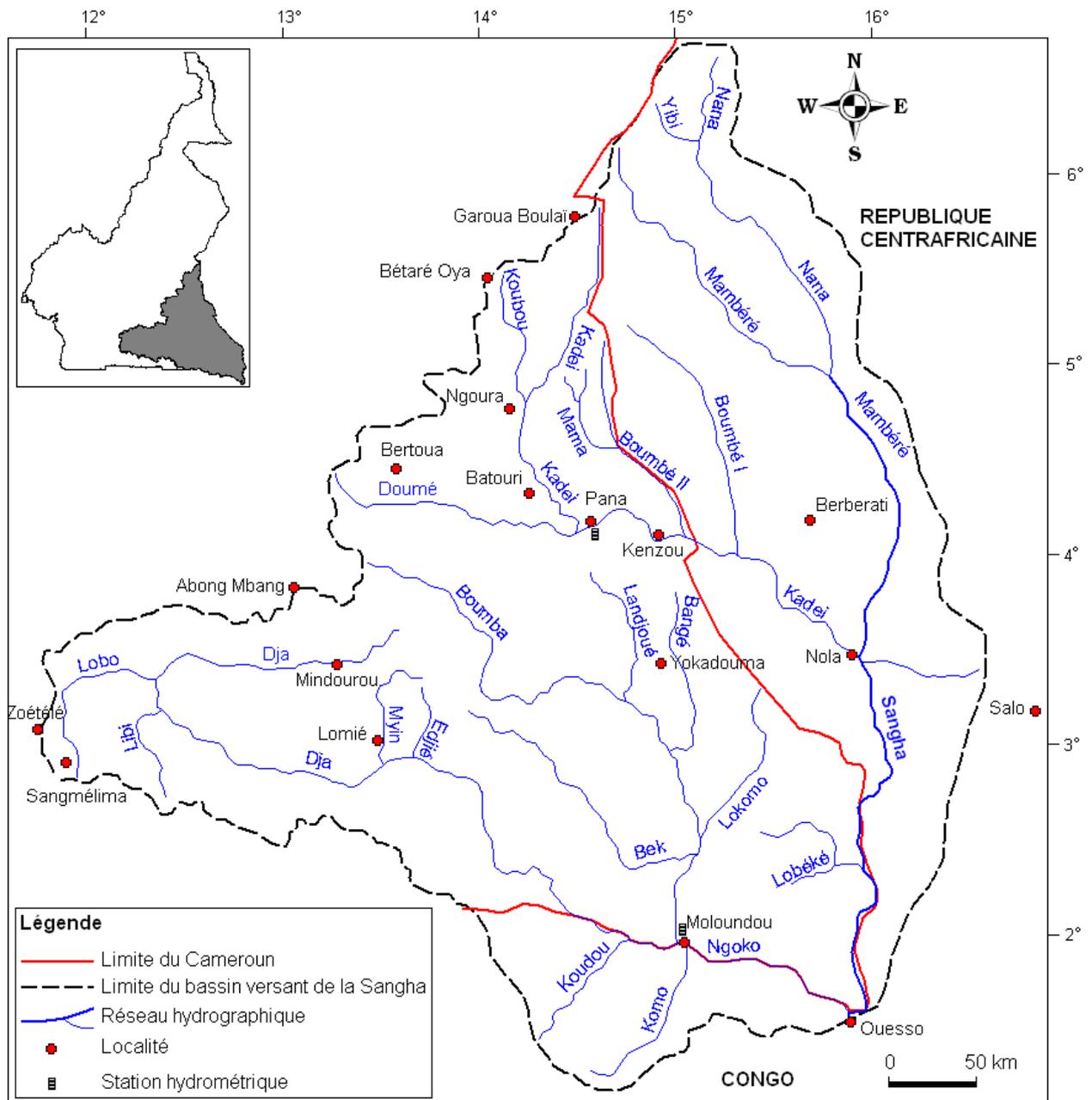


Figure I.7 : Bassin versant du Congo dans ses composantes Camerounaise et Centrafricaine (MINEPAT/SRADDT-Est, 2017)

I.1.6. Contexte géologique

I.1.6.1. Lithologie

La géologie du Cameroun est marquée par quatre grands ensembles (Vicat et *al.*, 1997 ; Nkoubou et *al.*, 2014 ; Tchouankoue et *al.*, 2016 ; Tchakounté et *al.*, 2017) :

- le groupe du Ntem et sa couverture protérozoïque constituant au Sud du Cameroun la terminaison du Craton du Congo (CC) ;

- la Chaîne Panafricaine qui représente l'essentiel des affleurements du Cameroun ;
- la ligne volcanique du Cameroun (LVC) qui s'étend du golfe de Guinée jusqu'au Nord-Cameroun ;
- les bassins phanérozoïques mis en place au Crétacé.

Dans la zone d'étude représentée ici par la région de l'Est-Cameroun, on rencontre surtout les deux (02) premiers ensembles cités ci-dessus. Ces éléments géologiques se présentent sous la forme de trois (03) séries géologiques que sont : la série de l'Adamawa-Yadé (AYD) qui constitue la ceinture panafricaine au Nord du Craton du Congo, la série de Yaoundé (YD) et la série du Dja (SD) (Toteu et *al.*, 2001 ; Asaah et *al.*, 2015 ; Vishiti et *al.*, 2015 ; Tchakounté et *al.*, 2017 ; Vishiti et *al.*, 2017) (Figure I.7).

La série de Yadé s'étend vers l'est depuis le centre du Cameroun jusqu'en République Centrafricaine (RCA) où elle est connue sous le nom du massif de Yadé. Elle est limitée au nord par la faille de Tcholliré-Banyo et au sud par le domaine de Yaoundé. Le domaine de l'Adamawa-Yadé est constitué par des orthogneiss et des granitoïdes donc les âges se situent autour de $750 \text{ à } 500 \pm 50 \text{ Ma}$ et d'autres roches métamorphiques de l'Archéen et du paléoprotozoïque qui ont des âges supérieures à $2\,000 \text{ Ma}$ (Toteu et *al.*, 2001 ; Bouyo et *al.*, 2013 ; Ganwa et *al.*, 2016 ; Tchakounté et *al.*, 2017).

La série de Yaoundé est située au nord du Craton du Congo (Toteu et *al.*, 2001) et constitue le cœur de la nappe panafricaine (Nzenti et *al.*, 1998 ; Toteu et *al.*, 2004 et 2006). Elle comprend des micaschistes à deux micas, grenat, disthène staurotide, quartzites micacés ; des gneiss à deux micas et des migmatites. Ce groupe a été recristallisé dans les conditions de température et de pression du faciès granulite et amphibolite (Vicat, 1998). Du point de vue de la structurale, cette série a été affectée par les événements tectonothermiques panafricains qui se caractérisent par des phases de déformation polyphasées D1 à D4 (Mvondo Ondoa et *al.*, 2003 ; Owona, 2011 ; Mvondo Ondoa et *al.*, 2009 ; Kwékam et *al.*, 2010 ; Njanko et *al.*, 2010 ; Bouyo et *al.*, 2013). Ce domaine est analogue à celui de Gbayas en RCA et celui de la nappe de Sergipano au Brésil (Mvondo Ondoa et *al.*, 2009).

La série du Dja enfin fait partie du Craton du Congo qui affleure au Cameroun. Elle est constituée des séries du Dja supérieur et inférieur. Celle qui est présente dans la région de l'Est-Cameroun est la série du Dja inférieur qui est d'âge Paléoprotozoïque comme le montrent les travaux de Vicat (1998). Cette série est formée d'assemblages lithologiques tels que les

formations gneissiques et orthogneissiques, les filons de dolérites et les basaltes. On y rencontre également par endroits des roches intrusives comme les syénites (Vicat, 1998 ; Vishiti et *al.*, 2015).

Il faut noter que d'autres études géologiques réalisées précédemment dans la zone d'étude mettent également en évidence d'autres séries à l'intérieur des principales suscitées (Soba, 1989 ; Nzenti, 1998 ; Vicat, 1998 ; Kankeu et *al.*, 2009) comme les séries d'Ayos-Mbalmayo-Bengbis, de Nanga-Eboko, de Lom, etc.

I.1.6.2. Pédologie

Selon Segalen (1967) et Olivry (1986), le Cameroun présente des sols variés liés à l'existence de différentes roches-mères, à la nature de la topographie, à l'âge et aux conditions bioclimatiques où ils se sont développés.

Les sols de la région de la zone d'étude dans la région de l'Est du Cameroun (Figure I.8) appartiennent au grand groupe des sols ferrallitiques rouges et/ou jaunes qui couvrent toute la partie du pays au sud du 8^{ème} parallèle (Segalen, 1967).

Les sols rouges sont des sols profonds, meubles, argileux et poreux. Ils sont propices à la végétation de types forêt (Bitom, 1988 ; Ngon Ngon et *al.*, 2009). Leur pédogénèse est faite d'une hydrolyse complète des minéraux de la roche mère. Ce sont des sols pauvres en éléments nutritifs, acides et très vulnérables à l'érosion.

Les sols jaunes quant à eux sont riches en oxydes de fer et d'alumine. Ils ont été lessivés des bases en raison du drainage des profils, facilitant ainsi la formation d'une argile pauvre (kaolinite).

On retrouve également dans cette zone des sols hydromorphes qui sont caractérisés par un excès d'eau en raison d'un engorgement temporaire ou permanent d'une partie ou de la totalité du profil. Pour Olivry (1986), ces sols présentent un horizon gris décoloré avec une argile gonflante. Dans les localités où l'excès d'eau n'est pas permanent, les sols à gley se mutent en sols à pseudogley (Segalen, 1967 ; Bitom, 1988).

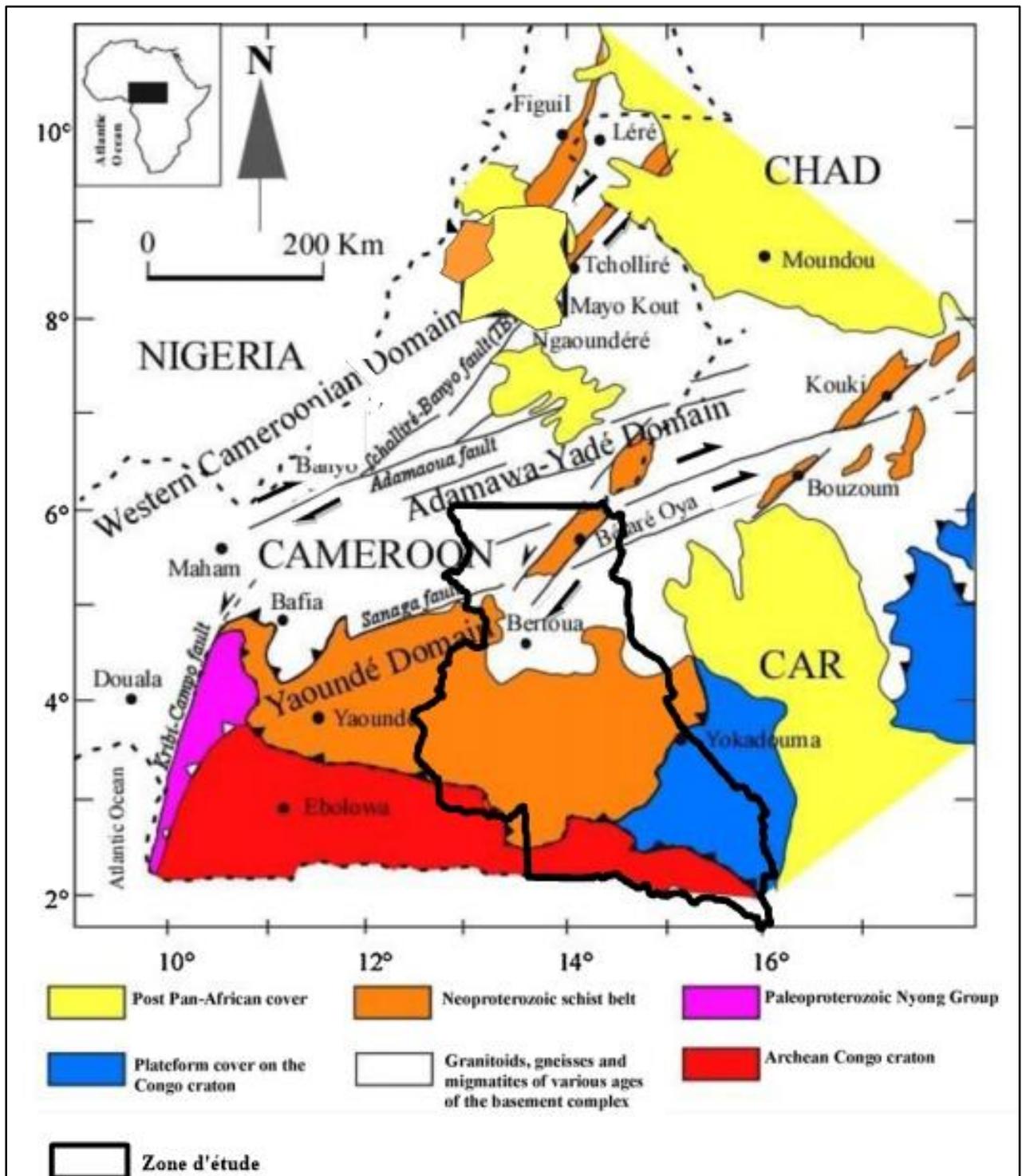


Figure I.7 : Caractéristiques géologiques de la zone d'étude : a) en zone Afrique Centrale en Afrique ; b) au Cameroun et dans la région de l'Est du Cameroun

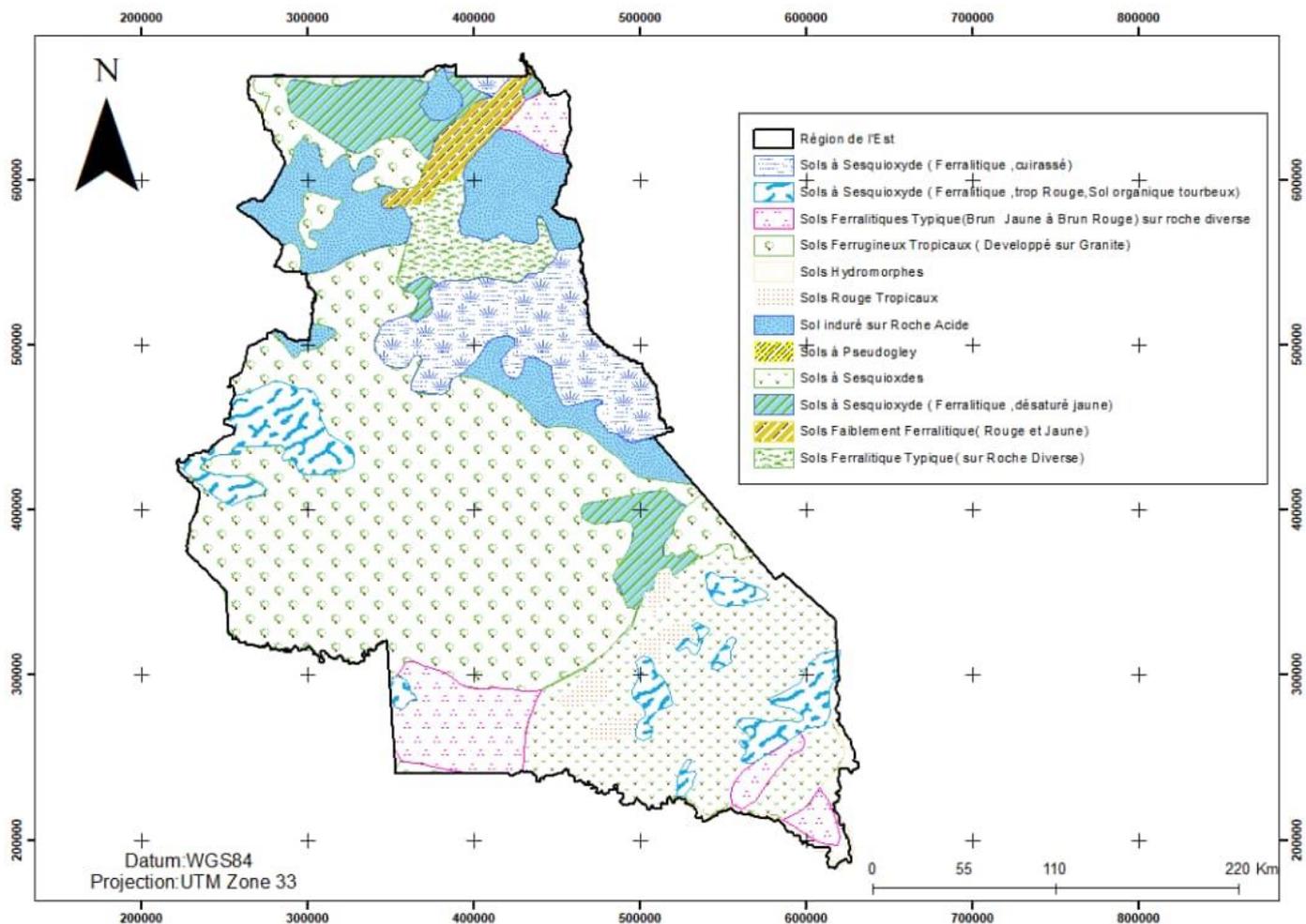


Figure I.8 : Différentes formations pédologiques rencontrées dans la région de l'Est-Cameroun d'après SRADDT-Est/MINEPAT, 2017

I.1.6.3. Hydrogéologie

La zone d'étude est située entièrement dans les formations aquifères du socle (cristallin et cristallophyllien) constituées principalement de roches plutono-métamorphiques (granites, gneiss, migmatites, etc.) (Figures I.7 et I.9).

Dans ce milieu, l'eau souterraine est logée dans deux types d'aquifères superposés ou isolés selon les cas :

- 1) l'aquifère supérieur d'altérites poreux sus-jacent plus ou moins continu, le plus souvent inférieur à 20 m (Djeuda et al., 2003 ; Lachassagne et al., 2015 ; Bon et al., 2016 ; Anaba Onana et al., 2017) ;
- 2) l'aquifère profond fracturé et/ou fissuré discontinu de profondeur généralement supérieure à 20m.

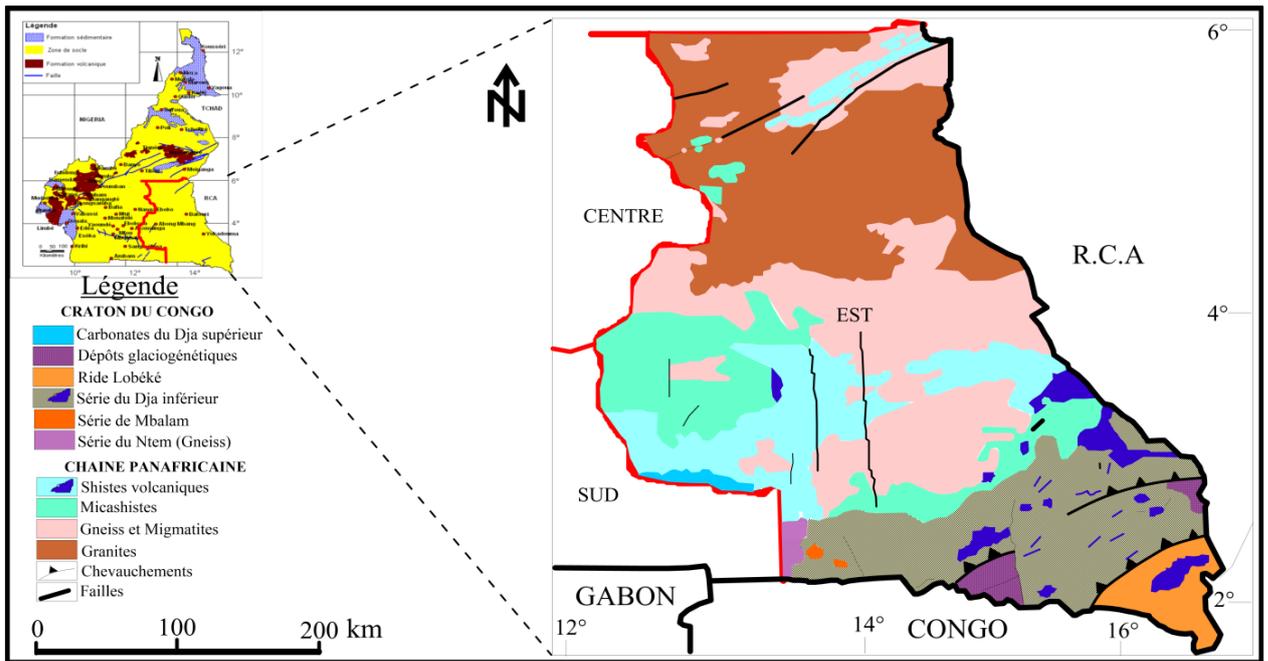


Figure I.9 : Caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'étude : a) au Cameroun avec la région de l'Est du Cameroun ; b) principales formations aquifères de la région de l'Est du Cameroun (Source : Vicat, 1998 ; MINEE/GWP-Cmr, 2009a modifiée)

I.2. Cadre humain et activités socioéconomiques

Selon les estimations du BUCREP (2010), la population de la région de l'Est-Cameroun était d'environ 950 000 habitants pour une densité moyenne de 7,1 habitants au km² en 2005 (Tableau II). Elle est l'une des régions les moins peuplées du pays après celle du Sud (MINEPAT et *al.*, 2017). Les jeunes constituent la tranche de la population la plus active avec environ 52 % de la population totale. La majorité de cette population réside en zone rurale. Cependant, on observe le phénomène d'exode rural qui a gagné en importance au cours de cette décennie. A l'est du Cameroun, la population est composée d'une multitude de groupes ethniques dont les principaux sont : les Maka, Kakô, Mezimé, Vong-vong, Kounabembé, Bangantou, Badjoué, Bikélé et Bizem de souche Bantou, les Yanghérés, Gbaya et Mboum (Figure I.10).



Figure I.10. Répartition des différents groupes ethniques dans la région de l’Est-Cameroun (MINEPAT/SRADDT-Est, 2017)

Tableau II : Répartition de la population de la Région de l’Est par département en 2005

Département	Effectif de population	Superficie en km ²	Densité de population par km ²
Boumba-Ngoko	115 354	30 389	3,8
Haut-Nyong	196 519	36 384	5,4
Kadey	184 098	15 884	11,6
Lom-et-Djérem	275 784	26 345	10,5

Source : BUCREP, RGPH, 2005

Avec un taux d’urbanisation de 36,48 %, la Région de l’Est figure parmi les régions les moins urbanisées du pays (RGPH, 2005). Elle occupe le 7^e rang devant les Régions du Sud (35,76 %), du Nord (27,89 %) et de l’Extrême-Nord (22,75 %). Cette urbanisation varie en fonction des départements. Le Lom-et-Djérem, avec un taux de de 56.4 %, est le département le plus urbanisé tandis que le Haut-Nyong, avec 15,9 %, est le moins urbanisé. Ainsi, le taux

d'urbanisation de la région de l'Est (département par département) est présenté sur le Tableau III et la figure I.11.

Tableau III : Taux d'urbanisation de la Région de l'Est par département par département

Départements	Population totale	Population urbaine	Taux d'urbanisation en %
Bomba et Ngoko	86 033	33 047	38,4
Haut-Nyong	315 995	50 278	15,9
Kadey	199 128	57 921	29,1
Lom-et-Djérem	249 523	140 662	56,4

Source : MINH DU-Est, 2016

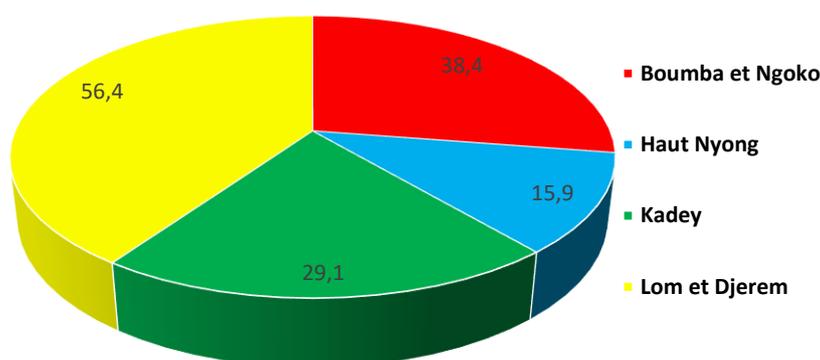


Figure I.11 : Taux d'urbanisation des départements de la Région de l'Est (MINH DU-Est, 2016)

L'économie de zone d'étude tourne autour de l'agriculture, l'exploitation forestière, l'élevage et l'exploitation minière.

L'agriculture est principalement pratiquée dans les départements de la Boumba et Ngoko et du Haut-Nyong. Les produits vivriers phares sont les tubercules, la banane/plantain, le maïs et les arachides. Les produits de rente sont principalement constitués du tabac, cacao, et café.

Le sous-sol de la région de l'Est renferme de nombreux minerais et pierres précieuses encore non exploités pour la majorité ou exploités de manière artisanale (Ntep Gweth, 2001). On peut citer entre autres : le zinc, le cuivre, le plomb, le cobalt, le chrome et le nickel dans la vallée du Dja ; le cobalt et le nickel dans la zone de Lomié ; le fer de Mbalam et l'or du district aurifère de Bétaré-Oya et de la localité de Batouri et ses environs (Ntep Gweth, 2001).

I.3. Travaux antérieurs

Cette partie porte essentiellement sur les travaux menés durant ces dernières années en climatologie, hydrologie, hydrogéologie, hydrodynamique et hydrogéochimie dans la zone d'étude à l'est du Cameroun.

I.3.1. Climatologie

Les travaux antérieurs effectués précédemment dans la zone d'étude montrent que dans l'ensemble, les pluies interannuelles varient en fonction de la longitude et de la latitude et sont généralement comprises entre 1 400 et 1700 mm. Les pluies moyennes interannuelles ainsi enregistrées dans les différentes stations pluviométriques de l'Est-Cameroun sont de 1 627 mm à Abong-Mbang, 1 580 mm à Ayos, 1 520 mm à Bertoua, 1 570 mm à Garoua Boulaï, 1 620 mm à Lomié, 1 400 mm à Moloundou et 1 606 mm à Yokadouma (Olivry, 1986 ; Suchel, 1988 ; Sigha Nkamdjou, 1994 ; Sighomnou, 2004 ; Sighomnou et *al.*, 2005 ; MINEPAT/SRADDT-Est, 2017)

De même ces travaux montrent l'existence de deux types de climats en relation avec les variations mensuelles et saisonnières de pluies (Olivry, 1986 ; Suchel, 1988 ; Sighomnou, 2004 ; Sighomnou, et *al.*, 2005 ; Lienou, 2007 ; MINEPAT/SRADDT-Est, 2017) : le régime équatorial à quatre saisons bien marquées à l'extrême sud-est dans les localités de Moloundou et de Belabo ; un régime tropical de transition au nord de la région de l'Est dans les localités de Bétaré-Oya, Garoua Boulaï. Dans cette dernière zone, la petite saison sèche observée entre juillet et août tend même à disparaître pour donner naissance à un régime climatique de type unimodal à Meiganga (Lienou, 2007 ; MINEPAT/SRADDT-Est, 2017).

On remarque que dans l'ensemble, les mois les plus pluvieux sont généralement observés en octobre et novembre pour la majorité des stations situées dans cette zone d'étude à l'exception de la localité de Meiganga qui est observé au mois d'août (MINEPAT/SRADDT-Est, 2017). Les mois les moins pluvieux sont quant à eux observés pendant les mois de décembre, janvier et février (figure I.12).

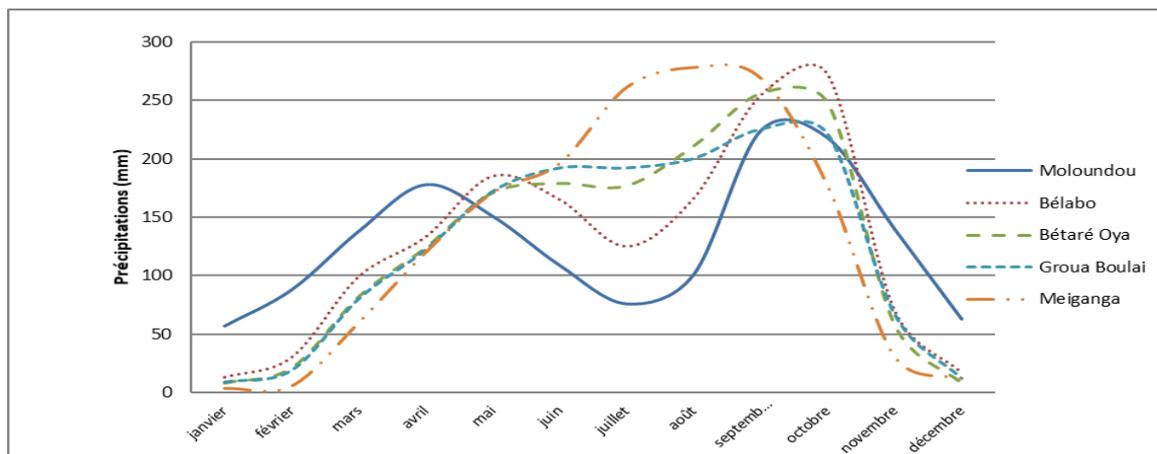


Figure I.12 : Tendances d'évolution de la pluviométrie mensuelle dans la région de l'Est du Cameroun (MINEPAT/SRADDT-Est, 2017)

Les températures interannuelles quant à elles oscillent entre 21 et 26°C dans cette zone (Figure I.13). Mensuellement, on constate que le mois le plus chaud est celui de Mars où le mercure atteint 23°C alors que le mois le plus humide est celui de Juillet où, les valeurs du thermomètre ne dépassent pas 21,3°C dans toutes les stations de la région (Suchel, 1988 ; Sigha Nkamdjou, 1994 ; Sighomnou, 2004 ; Nana Basile et *al.*, 2016 ; MINEPAT/SRADDT-Est, 2017). Les statistiques sur les températures attestent, pour chaque station, la constance des températures moyennes mensuelles. L'amplitude entre le mois le plus chaud et le plus frais de l'année se situe entre 1° 9' et 2° 5'. La moyenne des maxima varie de 11° 4' à 14°. Ces courbes, en outre, montrent bien une corrélation entre la position latitudinale, altitudinale et la fraîcheur ou la sensation de chaleur. Ainsi, il est tout à fait normal que Moloundou, à 2° de latitude et à 373 m d'altitude ait le climat le plus chaud (25° 14') alors que Garoua-Boulai (5° 53' N et 14° 33' E, à 1028 m) ait le climat le plus frais (22° 5'). Entre ces extrêmes, les autres stations occupent des positions intermédiaires en accord avec leur latitude et altitude (Figure I.14).

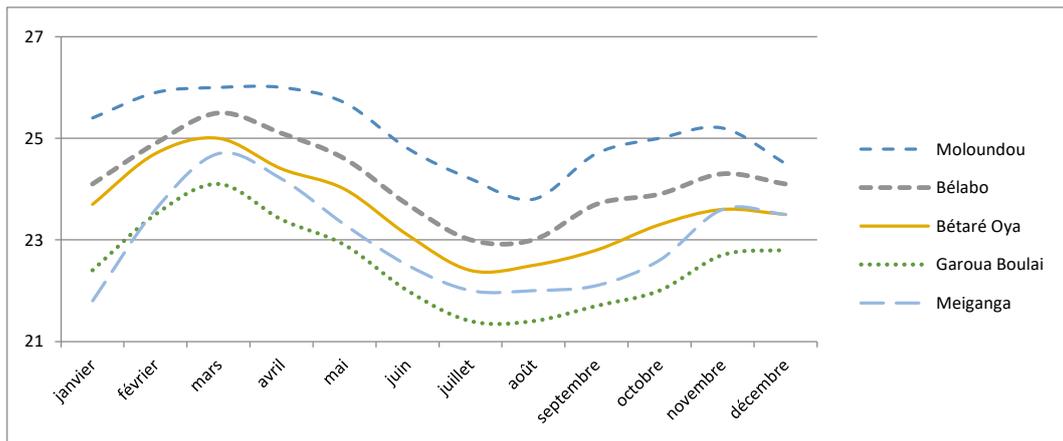


Figure I.13 : Évolution des températures moyennes mensuelles en fonction de la latitude et de l’altitude de Moloundou plus au sud à Meiganga au nord (MINEPAT/SRADDT-Est, 2017)

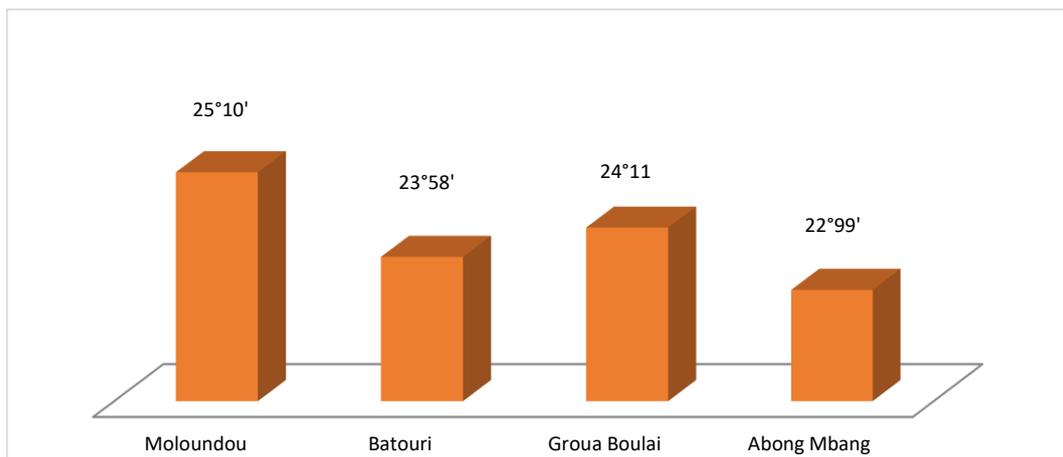


Figure I.14 : Évolution des températures moyennes annuelles en fonction de la latitude et de l’altitude dans la région de l’Est-Cameroun (MINEPAT/SRADDT-Est, 2017)

I.3.2. Hydrologie

Il n’existe pas ou très peu d’études hydrologiques effectuées dans la zone d’étude. On peut citer entre autres ceux d’Olivry (1986) dans fleuves et rivières du Cameroun ; Sigha Nkamdjou, (1994) dans le cadre de sa thèse dans la région de l’Est du Cameroun et qui a permis de réactualiser des données sur les débits des stations de Dja à Bi et Somalomo, Boumba à Biwala et la Ngoko à Moloundou jusqu’en 1992.

Les travaux les plus récents sont ceux effectués dans le cadre de la mise en place du barrage hydroélectrique de Lom Pangar par ENEO et EDC (EDC, 2011) et de Kouassy Kalédjé et al. (2019) sur les inondations sur la Kadey.

Enfin il faut signaler les travaux du suivi hydrométrique de certaines stations de la région de l'Est Cameroun effectué le Centre de Recherche Hydrologique (CRH) de l'Institut de Recherche Géologique et Minière (IRGM) du MINRESI.

En effet, l'évaluation et le suivi des eaux de surface (hydrométrie) au Cameroun est effectué par deux principaux réseaux que sont: le réseau national géré par le Centre de Recherche Hydrologique (CRH) de l'Institut de Recherche Géologique et Minière (IRGM) du MINRESI et le réseau de l'ex AES SONEL géré par la société en charge de la production et de la distribution de l'électricité du Cameroun (ENEO). Le réseau hydrologique national de base du Cameroun comprenait 74 stations en service en 1980, répartis sur l'ensemble des cinq bassins hydrographiques du pays (Tableau IV). Ce réseau hydrométrique a commencé malheureusement à périlcliter au milieu des années 80 et s'est accentué à partir de 1990 avec l'intensification de la crise économique et les restrictions budgétaires que le pays a connues. Depuis 2008, une timide reprise est observée et un réseau optimal d'une trentaine de stations a ainsi pu être réhabilité. En 2014, le CRH a identifié 82 stations pour le réseau minimum hydrologique national : 45 sont actuellement en fonctionnement et 37 sont en cours de réhabilitation ou création (Tableau IV).

Tableau IV : Évolution des stations hydrométriques suivies par le CRH de 1980 à 2014 dans les cinq bassins hydrographiques du Cameroun

Bassins versants	Lac Tchad	Niger	Sanaga	Congo	Fleuves côtiers	Total
Nombre de stations suivies en 1980	10	11	21	7	25	74
Stations suivies en 1993	0	0	0	0	0	0
Stations suivies en 2000	0	0	0	5	4	4
Stations suivies en 2008	0	8	12	5	7	32
Stations suivies en 2014	2	8	10	07	18	45
% de stations fonctionnelles depuis 2014	20	72,7	47.6	100	72	60,8

Source : GWPCaf – CEEAC (2015).

En ce qui concerne la zone d'étude, les sept stations hydrométriques suivies actuellement par le CRH de l'IRGM sont situées dans le bassin du Congo dans la région de l'Est. Il s'agit des

stations de la Ngoko à Moloundou, de la Kadey à Pana et à Batouri, de la Dja à Somalomo et à Bi, de la Boumba à Biwala, et de la Doumé à Doumé.

La synthèse des travaux ainsi cités ci-dessus montre que les modules inter annuels des cours d'eau identifiés dans le bassin du Congo au Cameroun varient entre 756,7 m³/s pour la Ngoko à Moloundou et 241 m³/s pour la Kadey à Pana. La Kadey a un débit moyen annuel de 260 m³/s après Kentzou (22 000 km²) à la frontière avec la RCA. La Boumba et le Dja sont deux principaux affluents de la Ngoko prenant leurs sources respectivement au sud d'Abong – Mbang et au nord de Lomié. La Ngoko a un débit moyen interannuel de 670 m³/s, soit un débit spécifique d'environ 11 l/s.km² et un volume annuel d'eau écoulee de 21,2 km³. Les bassins de la Ngoko et de la Kadey ont des modules d'alimentation comparables avec respectivement 11,28 l/s/km² et 11,83 l/s/km².

Pour ce qui est de la station du Nyong à Abong-Mbang, les modules annuels oscillaient autour d'une valeur centrale (module interannuel) qui est de 428,67 m³/s au cours de la décennie 50, ensuite à 700 m³/s pour l'année hydrologique 1962/1963 (Olivry, 1986 ; Wakuti, 1986 ; Sigha Nkamdjou, 1994 ; Sighomnou, 2004). Cette valeur va par la suite rechuter à 301,4 m³/s en 1965. Cette dernière phase s'est poursuivie jusqu'aux années 80 avec une légère croissance du module annuel ; mais les valeurs enregistrées restent inférieures à la moyenne des modules inter annuels.

De l'état des lieux des ressources en eau de surface au Cameroun, il ressort que les régimes hydrologiques de tous les cours d'eau de la zone d'étude à l'instar de tout le Cameroun, suivent ceux des régimes pluviométriques correspondant. Ils passent ainsi d'un régime équatorial (bimodal) ou tropical humide dans la partie méridionale plus au sud à un régime tropical (unimodal) soudano-sahélien dans la partie septentrionale au nord.

I.3.3. Hydrogéologie et hydrodynamique

Sur le plan hydrogéologique, il n'existe pas dans la zone d'étude à l'instar de tout le Cameroun, des travaux récents en vue de suivre et de quantifier les ressources en eau souterraine. Quelques travaux préliminaires sont généralement effectués en hydraulique villageoise par les bureaux d'études, les organisations non gouvernementales, les organismes internationaux et nationaux, etc. pour l'implantation des points d'eau tels que les forages et / ou les puits aménagés.

On sait néanmoins que la zone de socle qui couvre toute la région de l'Est est présente sur environ 86,5 % de la superficie totale du territoire camerounais. Elle est constituée

majoritairement par des roches plutono-métamorphiques (granites, gneiss et migmatites) d'âges précambriennes (Craton du Congo, complexes du Ntem et du Nyong au Sud du Cameroun et du panafricain pour le reste du Cameroun). Dans ces terrains, l'eau souterraine est généralement logée dans deux types d'aquifères (Djeuda et *al.*, 1988 ; MINEE-GWP, 2009a ; Bon et al., 2016 ; Anaba et al., 2017) (Figure I.15): i) un aquifère supérieur d'altérite poreux et plus ou moins continu (entre 8 et 20 à 30m) ou, ii) un aquifère profond fracturé et / ou fissuré supérieur à 20 m et parfois jusqu'à 100 m et même plus. Les nappes profondes sont exploitées à la faveur des forages alors que les nappes de subsurface sont exploitées à partir des puits.

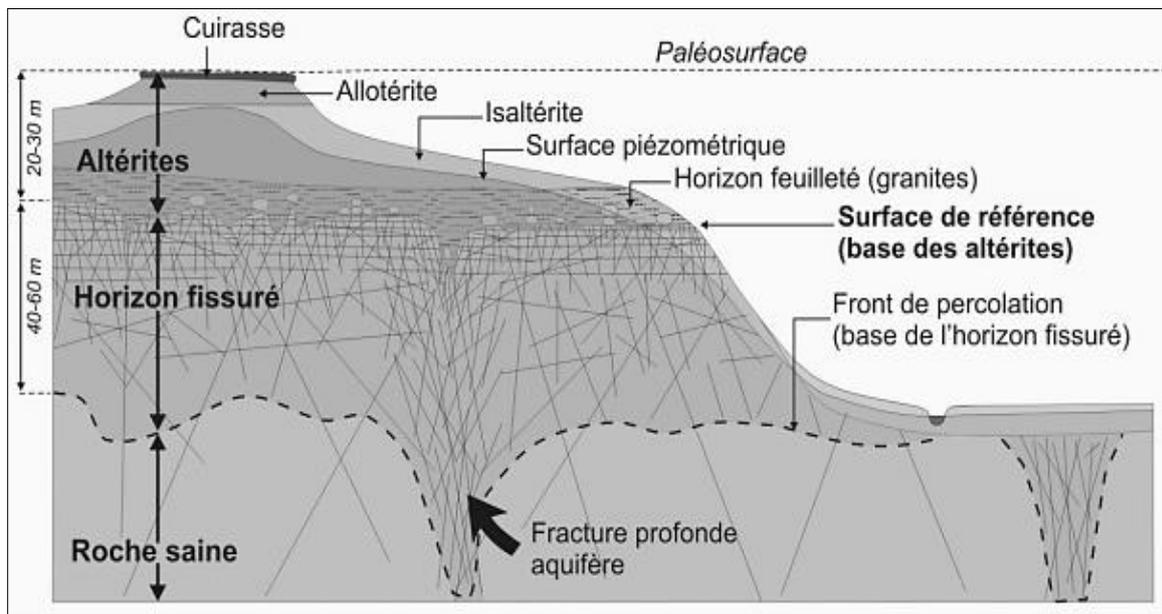


Figure I.15 : Modèle hydrogéologique simplifié de la zone de socle montrant les deux types d'aquifères (Bon et *al.*, 2016)

En ce qui concerne plus spécifiquement la zone d'étude dans la région de l'Est, l'exploitation des eaux souterraines se fait généralement à travers des forages pour les aquifères fracturés/fissurés assez profonds, des puits traditionnels, aménagés et/ou non et des sources pour les aquifères d'altérites. Ces derniers ont des perméabilités qui varient en fonction de la nature et de la structure de la roche mère. Ici, les débits ont des valeurs moyennes de l'ordre de 1,5 m³/h dans les formations géologiques (MINEE-GWP, 2009a). Les aquifères profonds captés au moyen de forages ont quant à eux des débits d'exploitation qui oscillent entre 1,5 et 20 m³/h (MINEE-GWP, 2009a). Les potentialités de tous ces aquifères dépendent des paramètres du bilan hydrologique et de leur configuration géométrique. Les roches qui

constituent ces formations sont caractérisées par une porosité faible et efficace (inférieure à 1% en général, au plus de 1 à 2%) ; l'emmagasinement et la circulation d'eau n'y est donc possible que s'il existe une zone d'altération suffisamment épaisse, de bonne porosité, à rôle capacitif et un réseau de fissures ou de fractures non colmatées, à rôle conducteur. En général, les potentialités de nappes d'aquifères profonds fracturés sont plus importantes que les nappes superficielles se trouvant dans les altérites. Les principaux facteurs de productivité des nappes profondes sont l'ouverture des fractures, leur orientation, leur longueur et la nature géologique des différentes formations affectées. Les valeurs de transmissivités vont de 10^{-2} à 10^{-6} m²/s ; celles du débit spécifique vont de 10^{-3} à 10^{-5} m³/s/m mais se regroupent autour de 10^{-5} ; celles de perméabilités varient de 10^{-3} à 10^{-7} m/s et ne sont pas influencées par les couches d'altérites argileuses de surface.

En termes de bilan quantitatif, la région de l'Est du Cameroun a environ 3,85 km³ d'eau utile ou de réserve d'eau souterraine disponible sur une superficie de 109 002 km². Elle représente environ 25,34 % de la réserve d'eau souterraine du Cameroun située en zone de socle (15,4 km³) et 6,9 % de la réserve d'eau souterraine totale du Cameroun estimée à 55,98 km³.

I.3.2. Hydrogéochimie

De nombreux travaux ont été réalisés dans la zone d'étude et plus spécifiquement dans la région de l'Est du Cameroun sur la qualité des eaux de surface et souterraines en relation avec le substratum rocheux, les activités anthropiques que sont l'exploitation minière, la déforestation et le déboisement pour le bois d'œuvre, l'agriculture et le bois de chauffe, etc.

On peut citer entre autres les travaux de Olivry et Naah (1978) ; Freyssinet et al. (1989) ; Braun et al. (1998) ; Sigha-Nkamdjou (1994) ; Sigha-Nkamdjou et al. (2005) ; Mumbfu et al. (2017) ; Mimba et al. (2017) ; Vishiti et al. (2017) ; Rakotondrabe (2019) sur la qualité des eaux en relation avec la lithologie, les éléments traces, les terres rares et les flux de matières dissoutes ; ceux de Sigha-Nkamdjou, (1994) ; Sigha-Nkamdjou et al., (2005); Liénou, (2007) ; Liénou et al., (2005a), Foumena et Bamenjo (2013) ; Rakotondrabe (2019) sur la qualité des eaux en relation avec les activités anthropiques et les flux de matières en suspension. On remarque que la majorité des travaux menés dans cette zone d'étude s'intéresse plus sur les impacts de l'exploitation minière (artisanale et semi mécanisée) sur la qualité des sédiments et des eaux qui les draine (Salomons, 1995 ; Etame, 2001 ; Biaka, 2014 ; Omang et al., 2014 ; Asaah et

al., 2015 ; Pahimi et *al.*, 2015 ; Tehna et *al.*, 2015 ; Dedzo et *al.*, 2017 ; Rakotondrabe et *al.*, 2017 ; Rakotondrabe et *al.*, 2018 ; 2019).

Il ressort de ces travaux, que les eaux de la zone d'étude sont dans l'ensemble acides, très faiblement à faiblement minéralisées et très peu chargées en matières et éléments en suspension dans les zones non affectées par les activités anthropiques. La qualité de ces eaux devrait surtout être liée au substratum géologique d'âge précambrien, qui repose sous un sol épais et un couvert forestier dense qui limitent ainsi l'altération chimique et l'érosion mécanique. Par contre dans les zones affectées par les activités anthropiques (exploitations minière, forestière et agricole), les eaux sont acides à basiques, plus minéralisées avec des pics de turbidités et de charges solides. On observe également dans ces dernières zones la présence des ETMs (mercure, plomb, arsenic, cyanures etc.) dans les sédiments et les eaux qui proviennent des activités minières. Cette pollution physique pourrait être mise en relation avec la dégradation des sols et l'érosion mécanique qui s'accompagne au niveau des sites miniers alors que la pollution chimique enregistrée quant à elle, résulte des processus d'exploitation des minerais d'or dans les sites miniers semi mécanisés de Bétaré Oya, Batouri, Colomine, Woumbou, etc. qui utilisent déjà pour la plupart des produits chimiques toxiques pour l'amalgamation de l'or.

Conclusion

La région de l'Est-Cameroun est la plus vaste du triangle national. Elle a une superficie de 109 002 km², soit 23% du pays. Elle est située entre le 2^{ème} et le 6^{ème} degré de latitude Nord et le 12^{ème} et le 16^{ème} degré de longitude Est. Le climat qui y règne est du type tropical humide avec passage d'un climat équatorial plus au Sud à un climat équatorial et tropical de transition au Nord. Ces régimes climatiques entretiennent trois (03) types de végétation : une forêt hémio-brophile congolaise, une forêt hémio-brophile à sterculiacées et une savane péri-forestière. L'orohydrographie de la région appartient majoritairement au plateau Sud-Camerounais d'altitudes comprises entre 650 et 900 m. Le réseau hydrographique de la région est très dense avec des cours d'eau qui appartiennent à trois (03) des cinq (05) grands bassins hydrographiques du Cameroun que sont : le bassin du Congo au Sud-Est avec les cours d'eau Kadey, Dja, Boumba et Ngoko ; le bassin de la Sanaga au centre de la région (Lom, Pangar, Djérem) ; le bassin des fleuves côtiers à l'Ouest de la région (les parties amont des fleuves Nyong et le Ntem). La géologie est faite du socle cristallin et cristalloyphyllien avec trois (03) principales séries : l'Adamawa-Yadé qui constitue la ceinture panafricaine au Nord du craton du Congo, la série de Yaoundé et celle du Dja. Le substratum est recouvert par des sols ferrallitiques rouges

et jaunes et avec par endroits des gley ou des pseudogley. L'eau souterraine y est abondante et se trouve dans deux types d'aquifères (l'aquifère supérieur d'altérites plus ou moins continu (< 20 m) et l'aquifère profond fracturé et/ou fissuré discontinu (20-100 m). La région de l'Est est la moins peuplée du pays (7,1 habitants par km²). Les principales activités économiques sont l'agriculture, l'élevage, l'exploitation forestière et l'exploitation minière.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Introduction

Le présent chapitre met en exergue et les matériels d'étude utilisés, mais également l'approche méthodologique adoptée pour acquérir les données tant sur le terrain qu'en laboratoire. Les données prises en compte dans cette étude sont les paramètres : climatiques (précipitations et températures), hydrométriques (hauteurs et débits liquides des cours d'eau), hydrodynamiques (niveaux statiques et variations piézométriques) et hydro chimiques (pH, température, conductivité électrique, matières en suspensions totales, cations et anions majeurs, éléments en traces).

II.1. Identification et présentation du site d'étude

II.1.1. Critères de choix du bassin versant de la Kadey comme site d'étude

A l'issue d'une intense recherche bibliographique et de différentes campagnes d'investigations menées antérieurement sur la zone d'étude, plusieurs critères ont orienté le choix du Bassin Versant de la Kadey (BVK) comme site retenu pour la présente étude. Il s'agit entre autres de sa représentativité aux niveaux spatiale et géographique, climatique, biophysique, de la disponibilité des données climatiques, hydrométriques et des activités socioéconomiques présentes.

Du point de vue spatiale et géographique, le BVK est situé presque au centre de la région de l'Est Cameroun, à cheval entre le Nord, le Sud et l'Ouest et à la limite avec la République Centrafricaine (RCA) à l'Est.

Au niveau climatique et biophysique, le BVK prend en compte (intègre) la zone équatoriale et/ou tropicale de transition où sont déjà ressentis les effets des changements climatiques avec la hausse des températures et des perturbations des pluies, etc.). La végétation observée est celle de la zone de transition forêt – savane en cours de dégradation. Le relief présent est celui du plateau sud camerounais d'altitudes comprises entre 600 et 900 m et drainé par les affluents du grand bassin fluvial du Congo qui couvre majoritairement la région de l'Est-Cameroun.

En ce qui concerne la disponibilité des données, le site possède des stations météorologiques et hydrométriques suivies par la Direction Nationale de la Météorologie (DNM) du Ministère des Transport (MINTRANS) et le Centre de Recherche Hydrologique (CRH) de l'Institut de Recherche Géologique et Minière (IRGM). Ces stations disposent chacune d'une importante chronique de paramètres climatiques et hydrométriques (pluies et débits).

Au niveau des activités socioéconomiques présentes, on retrouve presque dans ce petit bassin versant l'ensemble des activités anthropiques pratiquées dans la région de l'Est-Cameroun (exploitations minières et forestières, agriculture, élevage, pêche) mais également un phénomène d'urbanisation galopante avec ses nombreuses conséquences (dégradation de l'environnement, inondations, déforestation, pollutions diverses, etc.)

II.1.2. Présentation du site d'étude : le bassin versant de la Kadey (BVK)

II.1.2.1. Localisation géographique et administrative

Le BVK, site retenu pour la présente étude, se situe entre les parallèles 4°05'12'' et 5°25'35'' Nord, et les méridiens 13°47'12'' et 14°50'08'' Est (Figure II.1). Il est limité au nord et nord – ouest par une partie des affluents en rive gauche du grand bassin versant de la Sanaga ; à l'ouest et le sud – ouest par la partie amont du bassin du Nyong ; au sud par les affluents de la partie camerounaise du bassin du Congo avec les cours d'eau Boumba, Dja et Ngoko et enfin, à l'est, il est frontalier avec la République Centrafricaine (RCA). Il est à cheval entre les départements du Lom et Djerem, du Haut Nyong et de la Kadey. Les principales villes qu'il couvre entièrement et/ou partiellement sont : Bertoua, Batouri, Ndélélé, Ngoura, Mandjou, Doumé, Dimako, Sibita, Kétté, Pana et Kenzou.

II.1.2.2. Caractéristiques morphométriques (géométriques) et hydrographiques du BVK

Avec une superficie d'environ 20 372 km², le BVK appartient au grand bassin fluvial du Congo dont l'exutoire est situé dans la localité de Pana à la frontière avec la RCA. L'indice de compacité de Gravelius (KG) est de 1,71 lui conférant une forme étirée assimilable à un rectangle équivalent dont la longueur et la largeur sont respectivement de 362,36 km et 57,48 km (Tableau V). Son relief correspond à un plateau d'altitude comprise entre 658 et 1109 m (Olivry, 1986). Les zones les plus hautes sont situées au nord-ouest et à l'ouest (entre 985 et plus de 1100 m), alors que les plus basses se trouvent au sud-est et à l'est du site où coule le cours d'eau Kadey (658 et 712 m). La classe d'altitude la plus représentée (825 – 925 m) est située au centre et au sud du BVK autour du cours d'eau Kadey et de ses affluents comme présenté sur la Figure II.1.

Tableau V : Paramètres morphologiques du bassin versant de la Kadey

Paramètres	Valeurs
Superficie (km ²)	20 372,03
Périmètre (km)	838,12
Coefficient de Gravelius (K _G)	1,71
Longueur équivalente (km)	362,36
Largeur équivalente (km)	57,48
Altitude minimale (m)	658
Altitude moyenne (m)	942
Altitude maximale (m)	1109

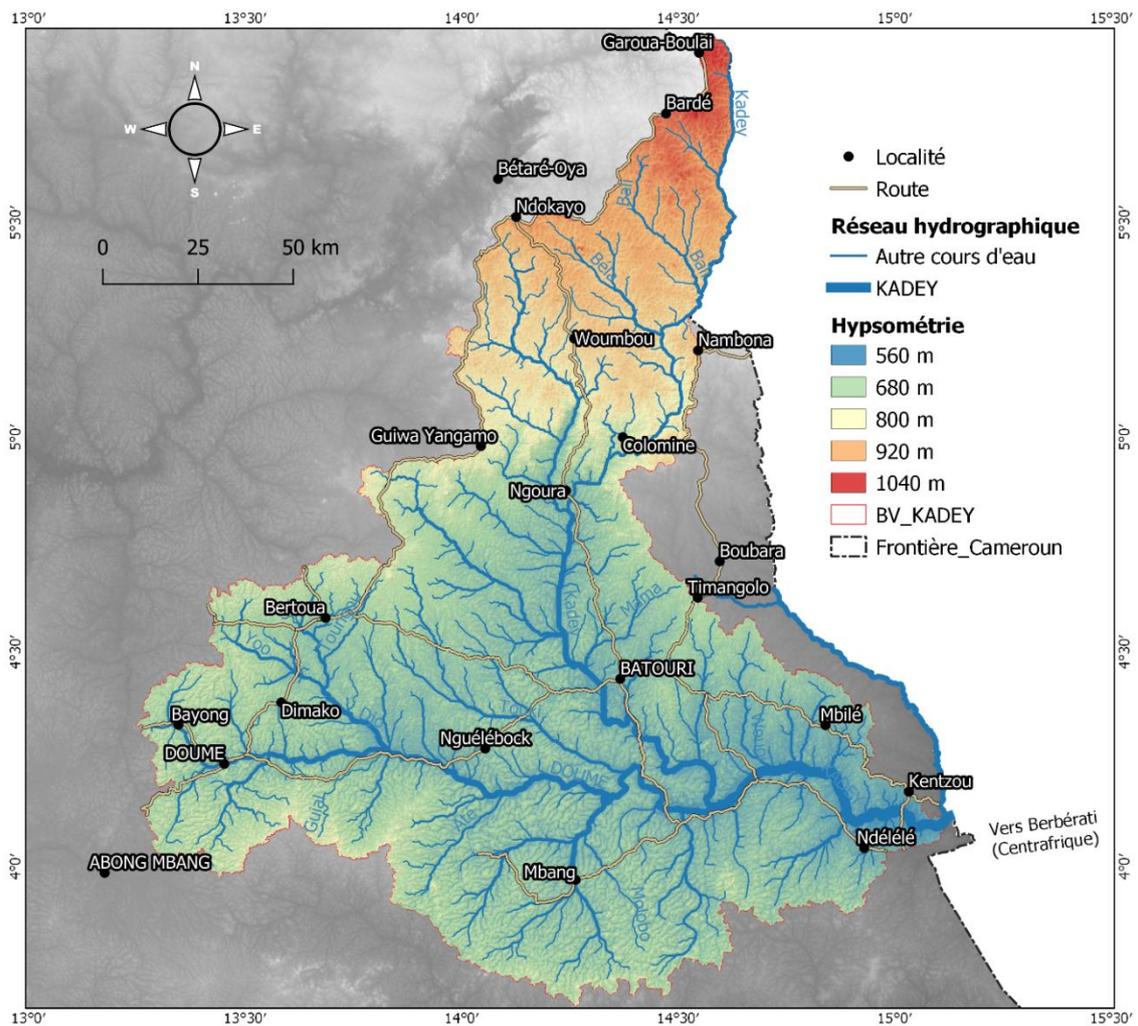


Figure II.1 : Unités géomorphologiques du bassin versant de la Kadey (d'après Image SRTM 30 m de résolution)

Le réseau hydrographique du BVK est dense et de type dendritique. Il se présente en arête de poisson drainé dans son ensemble par la Kadey ainsi que les cours d'eau Doumé et leurs différents affluents inférieurs (Figure II.2). La Doumé est l'affluent le plus important en rive

droite de la Kadey. Il suit une direction W-E en collectant de nombreux petits affluents tels que Guial, Até, Molobo, Sotiki, Yangotoro, Sitoro en rive droite et Djo, Yoo, Touki, Mboum en rive gauche. La Kadey quant à elle reçoit la Doumé et conflue par la suite avec le cours d'eau Boumbé après Kétté, Boubara, Kombo et Kenzou pour se jeter dans la Sangha (Olivry, 1986 ; MINEE-GWP, 2009a).

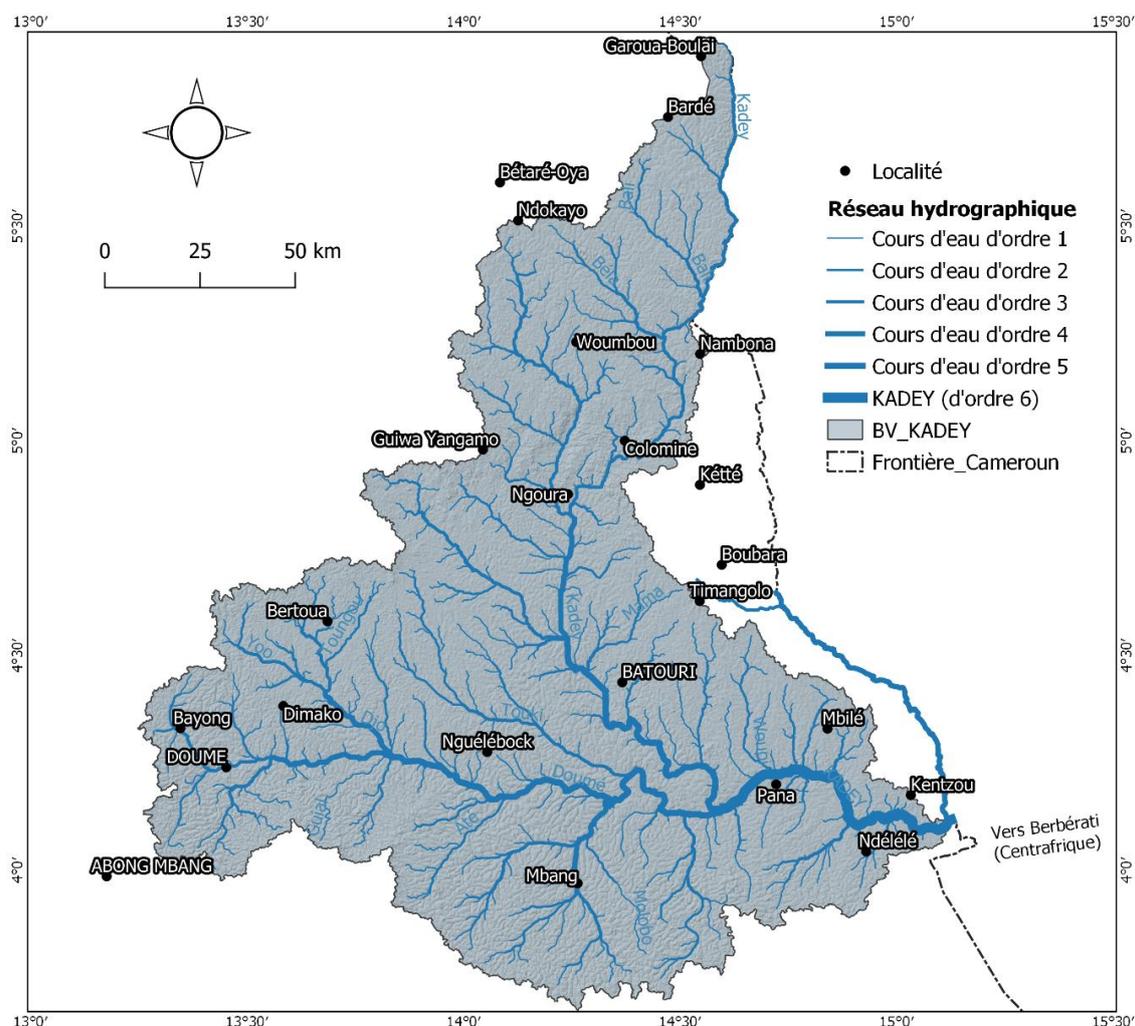


Figure II.2 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Kadey (d'après Image SRTM 30 m de résolution)

II.1.2.3. Caractéristiques géologiques

Le bassin versant de la Kadey appartient à la Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale (CPNE) du Cameroun encore appelée Chaîne mobile. Cet ensemble est délimité au nord par la zone de Cisaillement de l'Adamaoua et au sud, par la bordure nord du Craton du Congo (Ngako et al., 2003 ; Kankeu, 2008 ; Kankeu et al., 2009). Les formations géologiques sont constituées dans ce bassin, par des roches méta-sédimentaires, des méta-volcanites et des granites intrusifs

(Penaye et *al.*, 2000 ; Toteu et *al.*, 2006 ; Kankeu, 2008 ; Léopold et *al.*, 2016). On rencontre aussi des micaschistes, orthogneiss, les quartzites et les conglomérats de Kenzou, le granite post-tectoniques de Kongolo (Soba, 1989). Ces unités lithologiques présentent une foliation régionale NE-SW reflétant un sens de cisaillement dextre et senestre qui est lié à la zone de cisaillement central du Cameroun (Ngako et *al.*, 2003 ; Kankeu et *al.*, 2009 ; Vishiti et *al.*, 2017). Le prolongement de la série du Lom dans le Nord et jusqu'au Centre du bassin de la Kadey en fait une zone non seulement aurifère mais aussi riche en minéraux associés à des intrusions granitiques telles que le Pb, Bi, Mo (Freyssinet et *al.*, 1989 ; Toteu et *al.*, 2006) (Figure II.3). En effet, deux types de minéralisations aurifères sont connus à Kambélé : (1) une minéralisation sous forme de veines de quartz associée à des pyrites et (2) les dépôts alluvionnaires qui font l'objet d'une intense exploitation dans le BVK (Vishiti et *al.*, 2017).

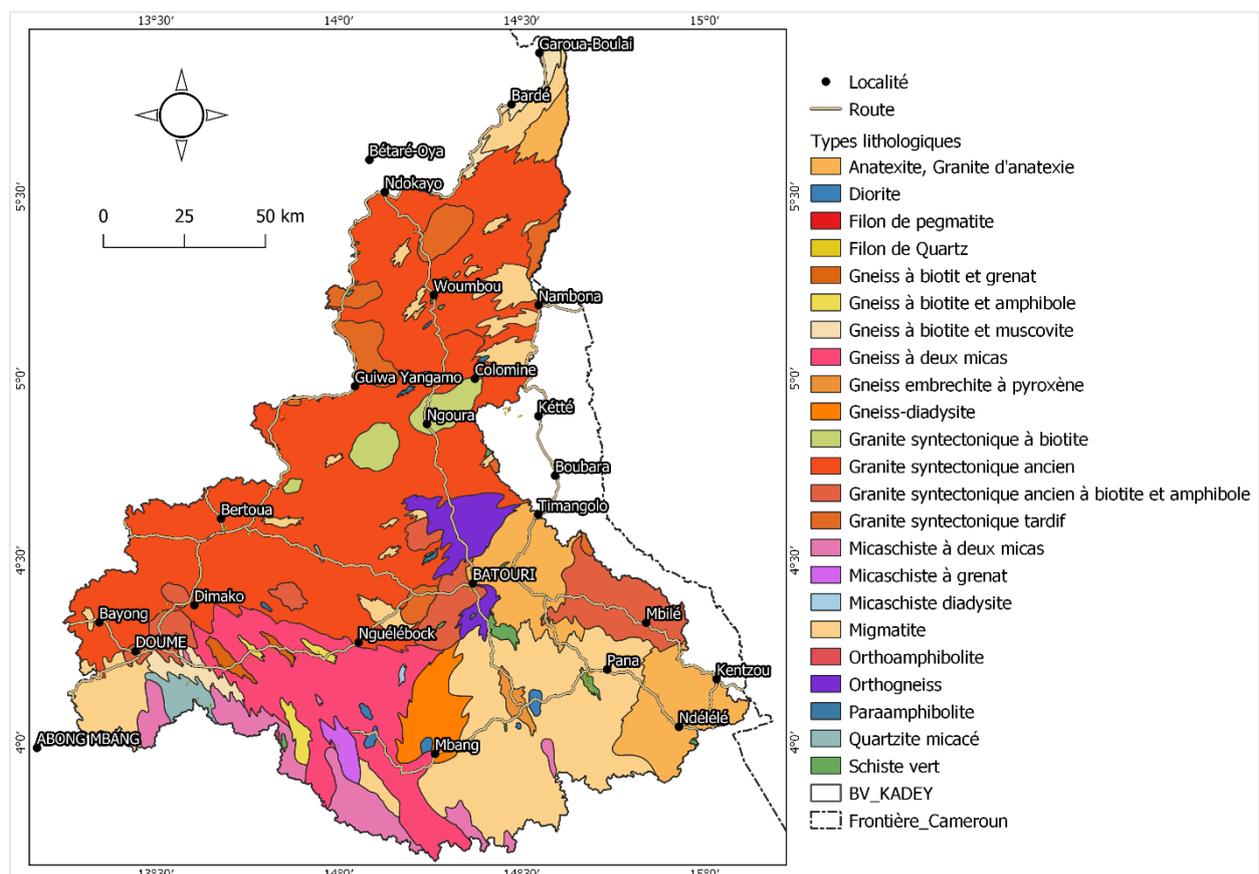


Figure II.3 : Formations géologiques identifiées dans le bassin versant de la Kadey (modifiée d'après Penaye et *al.*, 2000 ; Toteu et *al.*, 2006 ; Léopold et *al.*, 2016)

II.1.2.4. Activités socioéconomiques

L'économie du bassin versant de la Kadey repose principalement sur l'agriculture, l'élevage, l'exploitation forestière et l'exploitation minière.

II.1.2.4.1. Agriculture

L'agriculture est principalement pratiquée dans les localités de Kagnol, Mbang, Kétté et Djampiel où les principaux produits vivriers exploités sont : les tubercules (manioc, macabo, ignames etc.), la banane/plantain, le maïs et l'arachide. Les produits agricoles de rente sont essentiellement le tabac, le cacao et le café (Zebsa et *al.*, 2014 ; Bring 2015). Pour booster le potentiel économique du département de la Kadey, principale aire géographique du site d'étude, la culture de la canne à sucre a été introduite dans le bassin versant avec la création et le début de l'installation d'une société sucrière au début de l'année 2015 (Tenha et *al.*, 2015 ; Anonyme, 2018 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2019). Dans cette même optique, les pouvoirs publics ont redynamisés les filières cacao-café en réorganisant les producteurs en Groupement d'Initiatives Communes (GIC) et en coopératives (Zebsa et *al.*, 2014).

II.1.2.4.2. Elevage

Au nord du BVK et grâce à sa proximité avec la région de l'Adamaoua (sur le tronçon Garoua Boulaï - Meiganga) la pratique de l'élevage des bovins et des caprins est propice du fait de la présence de nombreux pâturages et de la culture sahélienne qui domine dans la zone. On compte dans cette partie du bassin versant plusieurs ranches. Le plus important est celui de la Société de Développement des Pâturages Animaliers (SODEPA) qui couvre les zones de Ngoura, Garga Sarali, Guiwa, Yangamo, Tongo Gadima et Ndokayo pour une taille d'environ 75 547 têtes de bœufs (Bring, 2015 ; Anonyme, 2018).

La savane guinéenne qui part de l'Adamaoua et se prolonge en savane basse qui occupe le centre du BVK, est idoine à l'élevage des bovins (à + 80% transhumant). Elle regroupe avec la partie méridionale du plateau de l'Adamaoua et la plaine Tikar dans le bassin versant de la Sanaga, plus de 50% du cheptel national (Bring, 2015). Les autres localités du bassin se limitent à un élevage de type traditionnel et plus à caractère familial (élevage du petit bétail).

II.1.2.4.3. Exploitation forestière

Les activités forestières les plus importantes du site d'étude se localisent dans les localités de Mbang, Dimako, Batouri et Kétté. Le plus gros du trafic est assuré par la Compagnie Forestière

de l'Est (CFE), la Société Forestière et Industrielle de Dimako (SFID), la Société de Transformation du Bois de la Kadey (STBK) avec un flux de plus de 10 000 m³ de grumes exportées par mois et environ 230 000 m³ de débités par mois (GIZ/Plan, 2009 ; Wasseige et *al.*, 2012 ; Bring, 2015 ; MINEPED/MINFOF, 2016).

II.1.2.4.4. Exploitation minière

L'exploitation de sable est également une activité minière qui de jour en jour se développe sur le cours d'eau Kadey et, cela dure déjà presque une décennie. Les sites les plus prisés sont Djang, Pana, Tripano, Nbounou, à cause de leur proximité des voies de communications et donc des villes de Batouri, Mbang, Mindourou et Bertoua où ce matériau est très utilisé dans les ouvrages de génie civil. Il est également exploité dans le département du Haut-Nyong dans le cours de la Doumé au niveau du village Longtimbi à l'entrée de la ville de Dimako. Les périodes les plus importantes d'extraction artisanale du sable se font lors des périodes d'étiage quand les eaux sont au niveau le plus bas et coulent avec un très faible débit.

De nombreux travaux à l'instar de Campbell (2009), CAPAM (2016), Rakotonrabé et *al.* (2018), Vishiti et *al.* (2019), présentent le sous-sol de la zone comme étant l'un des plus riches du triangle national. Plusieurs études de prospection ont révélées la présence de l'or, du cobalt, du nickel, du fer, etc. Ces substances utiles sont pour la plupart au stade de gîte. Mais on note l'exploitation artisanale et/ou semi mécanisée de l'or dans de nombreuses localités comme Woumbou, Bétaré-Oya, Colomine, Tikondi, Batouri, Mbang etc. (MINEPAT, 2013 ; CAPAM, 2016 ; MINMIDT, 2017).

II.2. Travaux de terrain

Les travaux de terrain effectués dans le BVK entre 2011 et 2018 ont consisté à la reconnaissance des différents sites d'étude et à l'acquisition des paramètres météorologiques, hydrologiques, piézométriques et hydrochimiques.

II.2.1.1. Acquisition de paramètres météorologiques

II.2.1.1.1. Reconnaissance des stations météorologiques

Les campagnes de reconnaissance des différentes stations météorologiques effectuées sur l'ensemble du BVK et ses environs ont permis de se faire une idée sur le fonctionnement effectif

ou non des stations météorologiques synoptiques et pluviométriques existantes mais aussi, d'identifier et de retenir les différentes stations sur la base des critères définis ci-dessous.

II.2.1.1.2. Choix et présentation des stations météorologiques retenues pour la présente étude

Compte tenu de la faible disponibilité des données météorologiques existantes dans toute la région de l'Est en général et dans le BVK en particulier, mais aussi, de la difficulté d'accès à celles qui existent même déjà, de nombreux critères sont entrés en ligne de compte pour le choix de différentes stations météorologiques retenues dans le cadre de ce travail.

On peut citer entre autres critères :

- ✓ la taille de l'échantillon et / ou la disponibilité et la durée des observations. En effet, les stations disposant d'au moins une trentaine d'années d'observations au minimum ont été retenues afin de répondre aux normes et exigences de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) ;
- ✓ la qualité des données existantes (absence et/ou faiblesses des lacunes) et ou la facilité à reconstituer celles qui manquent. Il faut noter ici, que la qualité et la durée des données utilisées sont variables selon les stations ;
- ✓ l'homogénéité et la quasi-représentativité spatiale de stations retenues par rapport aux tendances climatiques identifiées dans cette partie méridionale du sud du Cameroun forestier ;
- ✓ la disponibilité des paramètres climatiques récents pour prendre en compte la variabilité et / ou le changement climatiques récents dans le dit bassin.

En tenant ainsi compte des critères ci-dessus présentés, cinq stations du réseau météorologique camerounais, situées au sein et/ou même au voisinage immédiat du BVK sont retenues pour la présente étude. Il s'agit des stations de Batouri et de Bertoua dans le BVK, de Meïganga, Abong-Mbang et Yokadouma au voisinage immédiat du BVK (Tableau VI).

II.2.1.1.3. Origines et méthodes d'acquisition des paramètres météorologiques sur le terrain

Les données météorologiques utilisées dans le présent travail ont été collectées simultanément : dans les différentes stations météorologiques et/ou pluviométriques ci-dessus retenues (Tableau V) ; à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) du Ministère des Transports (MINT) ; dans les centres de recherches spécialisés tels que l'IRAD ou le CRH de l'IRGM et enfin, dans

les annales de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA).

Il faut surtout signaler ici que l'ensemble de paramètres climatiques mensuels (précipitations et températures) les plus anciens sur l'ensemble du réseau camerounais et donc des cinq (05) stations climatologiques retenues pour cette étude, proviennent en partie du recueil des pluies journalières pour les pays francophones publiées par le Centre International d'Expertise Hydrologique (CIEH). Pour ce qui est des paramètres climatiques beaucoup plus récents, ils proviennent de la compilation des notes des archives de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), du Ministère des Transports (MINTRANS) à Douala et du Ministère de la Recherche Scientifiques et de l'Innovation (MINRESI). En ce qui concerne plus spécifiquement les données actuelles pour les stations de Bertoua et de Batouri dans le BVK, elles proviennent des carnets de notes de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar (ASECNA).

Tableau VI : Stations météorologiques identifiées dans le BVK et ses environs

Station	Indice OMM	Latitude (degrés)	Longitude (degrés)	Altitude (m)	Période de couverture	N
Meiganga	64 882	N06°27,17	E14°08,42	1027	1949-2008	60
Bertoua	64 930	N04°34,55	E13°43,29	668	1939-2013	75
Batouri	64 932	N04°35,03	E14°58,05	689	1942-2008	67
Abong-Mbang	64 937	N03°59,07	E13°10,57	693	1939-2007	69
Yokadouma	64 948	N03°37,01	E15°00,09	731	1951-2005	54

OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie ; **n** : Nombre total d'années d'observations.

Source : Annales de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (2015)

II.2.1.2. Acquisition des paramètres hydrologiques

II.2.1.2.1. Reconnaissance et identification des stations hydrométriques

La reconnaissance et l'identification des stations hydrométriques se sont faites concomitamment lors des campagnes de terrain effectuées dans le BVK durant la période allant de mars 2015 à mai 2015. Au cours de cette campagne, on a identifié, sur le réseau hydrographique du BVK et de ses environs, plusieurs stations hydrométriques équipées des échelles limnimétriques très peu entretenues pour les unes et fonctionnelles pour les autres (Figure II.4 et II.5).

II.2.1.2.2. Choix et présentation de stations hydrométriques retenues dans la présente étude

Plusieurs critères ont guidé le choix des stations hydrométriques dans la présente étude. On peut citer entre autres :

- ✓ la disponibilité et la qualité des données hydrométriques sur une longue chronique ;
- ✓ la quasi-représentativité des stations sur les principaux affluents de la Kadey, ce qui n'a pas toujours été évident ;
- ✓ l'importance de certaines stations dans le suivi et la gestion des ressources en eau de surface dans ledit bassin versant ;
- ✓ l'envie d'une réactualisation des résultats sur des stations antérieurement suivies ;
- ✓ le désir de publication des résultats sur le maximum de stations ayant de longues chroniques de données utilisables par la communauté scientifique et même les décideurs politiques.



Figure II.4 : Batterie verticale d'échelles limnimétriques en palier à la station de Pana sur la Kadey (Cliché Kouassy Kalédjé, 11 septembre 2015)

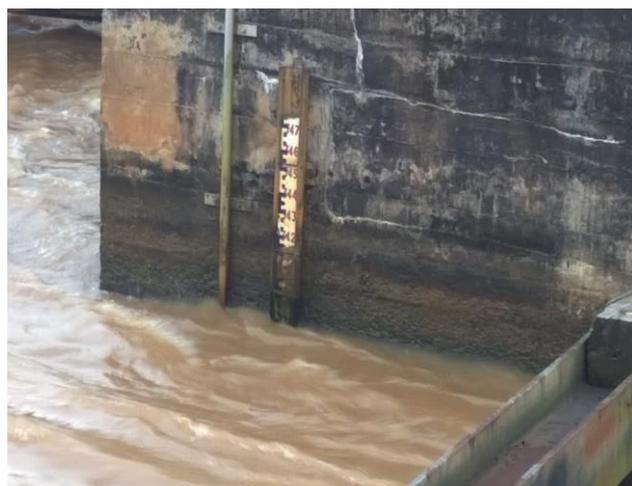


Figure II.5 : Echelle limnimétrique fixée sur un pilier du pont au niveau de la station de Batouri sur la Kadey (*Cliché Kouassy Kalédjé, 14 octobre 2015*)

Les différentes stations opérationnelles inventoriées sur l'étendue du bassin versant de la Kadey peuvent ainsi être réparties en deux groupes : i) les stations nouvelles et/ou réhabilitées au nombre de cinq (05) et, ii) les stations en projet de construction au nombre de deux (02) ; soit un total de sept (07) stations hydrométriques retenues pour la présente étude (Tableau VII).

Tableau VII : Stations hydrométriques du BVK retenues pour la présente étude

Stations	Kadey à Batouri	Kadey à Pana	Doume à Sibita	Boumbé II à Kenzou
Latitudes	N04°35,03	N04°17,09	N04°34,31	N04°38,27
Longitudes	E14°45,05	E14°59,02	E13°48,07	E14°46,28
Altitudes	691	676	813	789
Surface contrôlée (km ²)	191	217	141	209
Périodes d'observations	07/03/2015 au 27/02/2016	21/03/1990 au 14/08/1993 06/02/2015 au 27/02/2016	17/03/2010 au 26/02/2012 06/02/2015 au 27/02/2016	07/03/2015 au 27/02/2016
Nombre mois	12	64	37	12
Sources	*	1 et 2	3 et 2	2

Légende : *: Cette étude ; 1 : Sigha Nkamdjou (1994) ; 2 : études complémentaires ; 3 : Mouankou et *al.*, (2013).

II.2.1.2.3. Méthodes d'acquisition de données hydrométriques sur le terrain

Les différentes stations hydrométriques ainsi retenues dans le BVK sont équipées par des échelles limnimétriques à lecture directe pour le suivi des hauteurs d'eau. Il faut noter que la station de Pana est pourvue d'un dispositif limnimétrique implanté en batteries d'échelles verticales qui permettent d'effectuer une bonne lecture des hauteurs d'eaux lorsque le débit du cours d'eau devient de plus en plus important (Figure II.4 et II.5). Aucune station

hydrométrique de ce bassin versant n'est pour l'instant équipée des limnigraphes enregistreurs, ni des capteurs d'enregistrement des hauteurs d'eaux. Les niveaux d'eau sont généralement lus une (01) fois par jour pour les grands cours d'eau à trois (03) fois par jour pour les petits cours d'eau à savoir : d'abord le matin à 6 heures, ensuite à midi (12 heures) et enfin le soir à 18 heures. Ces hauteurs d'eau seront transformées par la suite en laboratoire en débits journaliers à partir d'une courbe expérimentale appelée courbe de tarage ou courbe d'étalonnage.

Les paramètres hydrométriques utilisés donc pour cette étude sont constitués des débits journaliers des différentes stations ci-dessus retenues. Ce sont des paramètres qui couvrent des périodes d'observation assez longues.

II.2.1.3. Acquisition des paramètres hydrodynamiques et piézométriques

II.2.1.3.1. Reconnaissance des ouvrages hydrauliques

Durant la période d'étude, une descente effectuée dans le bassin versant de la Kadey a permis d'identifier plus d'une centaine de points d'eau constitués de puits, forages, sources et cours d'eau.

II.2.1.3.2. Choix et description des ouvrages hydrauliques retenus dans la présente étude

La sélection des ouvrages s'est faite sur la base d'une fiche d'enquêtes (questionnaires) élaborée à cet effet. Ces questionnaires ont permis de ressortir les informations sur les ouvrages hydrauliques étudiés et les populations riveraines.

Sur les cent quarante-sept (147) points d'eau répertoriés, seuls les puits et forages ayant une fréquence d'utilisation comprise entre 75 et 250 personnes par jour ont été retenus et suivis durant une année hydrologique complète.

On a ainsi identifié et retenu soixante-douze (72) points d'eau constitués de soixante (60) puits et de douze (12) forages dans la ville de Batouri et de ses environs, mais aussi dans d'autres grandes agglomérations du BVK à l'instar de Kambélé, Kenzou, Sibita, Kétté, Ngoura et Pana. A ces ouvrages hydrauliques, il faut ajouter six points (06) d'eau identifiés le long du tracé du lit du cours d'eau Kadey ainsi que deux (02) sources.

Au total, ce sont quatre-vingts (80) points d'eau qui ont été retenus pour la réalisation de ce travail (Figure II.6).

II.2.1.3.3. Méthode d'acquisition des données piézométriques sur le terrain

Elle a consisté à relever les niveaux statiques (hauteurs d'eaux) des 80 points d'eau constitués de 72 puits et forages, des 06 points sur le tracé du lit de la Kadey et des 02 sources durant l'année hydrologique 2015 de façon hebdomadaire. C'est ainsi que durant la période d'étude, plus de 4160 mesures ont ainsi été réalisées à l'aide d'une sonde lumineuse et sonore (Figure II.7). Les différentes mesures ont été faites, pour la plupart de cas très tôt avant que les ouvrages ne soient mis en service. Il faut noter que quelques ouvrages témoins constitués de puits abandonnés et/ou se trouvant dans des concessions privées avec un volume d'exploitation inférieur au mètre cube par jour ont été également identifiés.

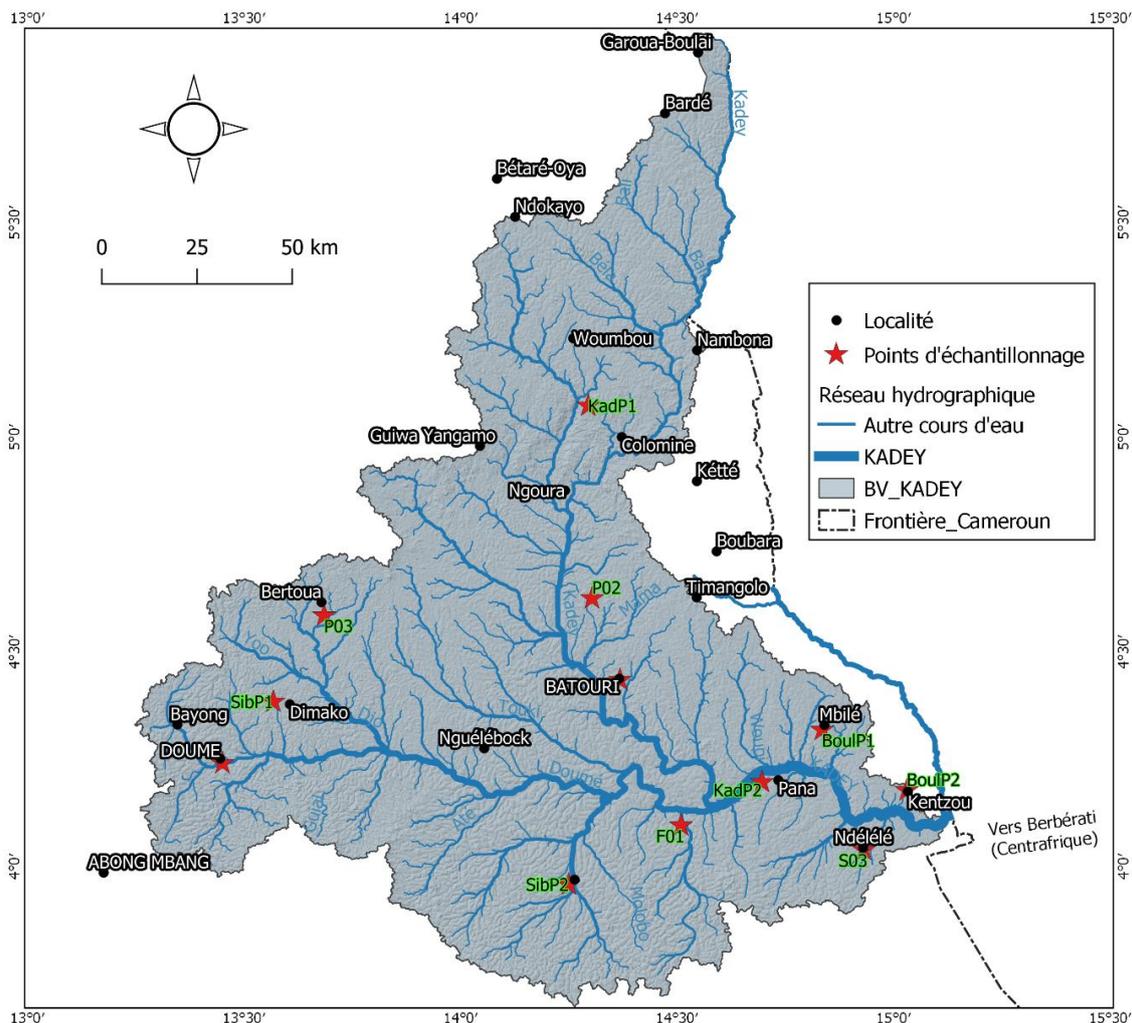


Figure II.6 : Localisation de différents ouvrages et points d'eau suivis dans le BVK



Figure II.7 : Opérations de mesures des niveaux statiques de la nappe d'eau en vue de la détermination des niveaux piézométriques : a) Sonde électrique et sonore ; b) Opération de la mesure des niveaux statiques (*Clichés Kouassy Kalédjé, 24 novembre 2015*).

II.2.1.4. Acquisition de paramètres hydrogéochimiques sur le terrain

Cette étape prend en compte l'identification et la sélection des points d'échantillonnage, les prélèvements des eaux et les mesures de certains paramètres physico chimiques in situ que sont le pH, la Température ($T^{\circ}\text{C}$), la conductivité électrique (C.E).

II.2.1.4.1. Choix et présentation des sites d'échantillonnages des eaux de surface et souterraines dans le BVK

II.2.1.4.1.1. Eaux de surfaces

Sur les douze points qui ont été identifiés au cours de la campagne de terrain pour le suivi hydrométrique des cours d'eau du BVK, six (06) cours d'eau ont été retenus pour un échantillonnage en vue des analyses hydrochimiques.

Il s'agit des cours d'eau :

- Kadey à Batouri avec les points C01 et C04 à Batouri, C03 à Kambélé, et C05 à Pana ;
- Doumé à Sibita avec le point C02 ;
- Boumbé II à Kenzou avec le point C06.

Ces sites ont été choisis pour les raisons suivantes (Tableau VIII) :

- la caractérisation du cours d'eau ;
- la proximité d'une source de pollution (chantier minier ou autres activités anthropiques) ;
- la présence d'anomalies physiologiques et ou de pathologies liées à l'ingestion de métaux lourds.

II.2.1.4.1.2. Eaux souterraines

Sur les soixante-douze (72) points d'eau suivis précédemment pour la collecte des données piézométriques, dix-neuf (19) points au total constitués de onze (11) puits, six (06) forages et deux (02) sources ont été retenus pour les échantillonnages en vue d'une analyse hydrogéochimique.

Les principaux critères de sélection de ces ouvrages hydrauliques sont les suivants :

- la répartition spatiale sur l'ensemble du BVK ;
- la recherche d'une source éventuelle de contamination de la nappe souterraine (dépôt des déchets domestiques et des produits chimiques) ;
- la sollicitation du point d'eau par les habitants environnant pour diverses activités (agriculture, élevage, blanchissement des vêtements, cuisson, boisson, etc.).

Tableau VIII : Présentation et description des points d'eau du BVK retenus dans la présente étude pour les analyses hydrogéochimiques

Types d'eau	Codes	Latitude	Longitudes	Altitude	Localité	Observation
Forages	F01	N04°36,57	E13°43,39	662	Bertoua	Altérites
	F02	N04°33,31	E13°42,33	660	Bertoua	Altérites
	F03	N04°23,37	E14°27,39	644	Batouri	Argilo-sableux
	F04	N04°31,37	E14°31,47	676	Batouri	Argilo-sableux
	F05	N04°10,32	E14°32,17	640	Pana	Altérites
	F06	N04°15,36	E15°02,28	731	Kenzou	Altérites
Puits	P 24	N04°23,39	E14°26,83	659	Batouri	Argilo sableux
	P 32	N04°27,12	E14°29,39	656	Batouri	Argilo sableux
	P 43	N04°33,34	E14°30,29	650	Batouri	Argilo sableux
	P 45	N04°32,49	E14°32,26	659	Batouri	Argilo sableux
	P 47	N04°32,54	E14°28,54	657	Kambélé	Argilo sableux
	P 50	N04°33,74	E14°27,29	639	Kambélé	Argilo sableux
	P 59	N04°14,87	E13°30,93	698	Sibita	Altérites
	P 65	N04°52,50	E14°31,28	799	Kétté	Altérites
Sources	P 54	N04°11,43	E14°31,20	629	Pana	Altérites
	S 01	N04°15,24	E13°32,37	690	Doumé	Elle est située à l'Ouest du BVK
	S 02	N05°33,34	E14°32,49	893	Nadoungué	Elle est située au NE du BVK
Cours d'eau	C 01	N04°34,51	E13°42,28	635	Batouri	Sur la Kadey
	C 02	N04°14,87	E13°30,93	686	Sibita	Sur la Doumé
	C 03	N04°33,70	E14°27,35	630	Kambélé	Sur la Kadey
	C 04	N04°32,55	E14°32,43	627	Batouri	Sur la Kadey
	C 05	N04°10,31	E14°30,35	622	Pana	Sur la Kadey
	C 06	N04°15,29	E15°02,37	721	Kenzou	Sur la Boumbé II

II.2.1.4.2. Prélèvements et conditionnement des échantillonnages d'eau

II.2.1.4.2.1. Eaux de surface

Le protocole d'échantillonnage adopté pour les prélèvements des eaux de surface est celui de la technique de la verticale effectuée dans les cours d'eau du réseau hydrographique du Nyong, de la Sanaga et de la Ngoko au Cameroun (Olivry et Naah, 1978 ; Sigha Nkamdjou et *al.*, 1998 ; Ndam Ngoupayou, 1997 ; Liéno, 2007 ; Kpoumié, 2015 ; Ndam Ngoupayou et *al.*, 2016 ; Rakotondrabe, 2018).

Les différents échantillonnages d'eau ont été réalisés sur la même verticale et au milieu du cours d'eau à une profondeur généralement inférieure à 50 centimètres et préférentiellement là où les

vitesses des filets d'eau sont suffisamment importantes pour permettre une bonne homogénéisation des particules solides et dissoutes. Ces prélèvements ont été effectués soit :

- à partir d'un pont et à l'aide d'un seau de dix (10) litres, manœuvré avec une corde, préalablement bien lavé et rincé à l'eau distillée et plusieurs fois à l'eau d'échantillonnage (Figure II.8) ;
- par immersion directe du flacon à une certaine profondeur dans le cours d'eau comme présenté sur la figure II.5 (Ndam Ngoupayou, 1997).

Les échantillons d'eau ainsi prélevés sont par la suite transférés dans des bouteilles en polyéthylène de 1,5 litre, préalablement lavées au laboratoire avec de l'acide nitrique ultra pure (HNO_3) et rincées ensuite avec de l'eau distillée. Sur le terrain, elles sont lavées au moins trois (03) fois avec l'eau à échantillonner et remplies avec précaution jusqu'au bord conformément aux protocoles et procédures standard en matière de prélèvements des eaux pour analyses physicochimiques (Leo Nollet, 2007 ; Rodier, 2009 ; Ndam Ngoupayou et *al.*, 2016 ; Rakotondrabe et *al.*, 2018).

Il faut noter qu'en ce qui concerne plus spécifiquement les échantillonnages effectués et destinés pour la détermination des Matières et Eléments en Suspension (MES) totales, plusieurs campagnes hebdomadaires de prélèvement ont été effectués. Le tableau IX résume la fréquence des prélèvements des échantillons d'eau pour l'analyse des MES totales sur les trois stations de la Kadey durant l'année hydrologique 2015 – 2016 pour les quatre (04) stations sur l'ensemble de BVK.



Figure II.8 : Technique de prélèvements des eaux d'écoulement : (a) Sur une même verticale ; (b et c) par immersion d'un flacon directement dans le lit du cours d'eau (*Cliché Kouassy Kalédjé, 17 mars 2015*)

Tableau IX : Fréquence des prélèvements des échantillons d'eau destinées à la détermination des matières en suspension totales (MES_T) sur les trois stations de la Kadey entre mars 2015 et février 2016

Cours d'eaux et Stations	Année hydrologique	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev
Kadey à Batouri	2015-2016	6	5	2	2	2	2	2	2	4	4	2	2
Kadey à Pana	2015-2016	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Doumé à Sibita	2015-2016	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Total		10	9	6									

MES_{Tot} : Matières en Suspension totales

II.2.1.4.2.2. Eaux souterraines

Les échantillons des eaux souterraines (forages, puits et sources) du BVK ont été recueillis directement dans les flacons destinés à cet effet, soit par pompage ou extraction manuelle pour ce qui est des forages (pompe à motricité humaine) et des puits ou, soit au niveau des siphons pour les sources en prenant les mesures de précaution pour éviter que ces échantillons d'eau ne soient pas asujetties à des contaminations quelconques lors du processus et conformément aux indications de Rodier (2009) sur le prélèvement des eaux souterraines (Figure II.9)



Figure II.9 : Technique de prélèvements des eaux souterraines : (a) au niveau d'un forage à Batouri (Cliché Kouassy Kalédjé, 17 mars 2015) ; (b) Au niveau d'un puits (Cliché Kouassy Kalédjé, 22 mai 2016)

Pour ce qui concerne les échantillons destinés, plus spécifiquement, aux analyses des éléments traces métalliques (métaux lourds), ils ont été filtrés directement sur le site à travers des filtres en acétate de cellulose de 0,45 µm de porosité. Les filtrats obtenus étaient conditionnés dans

des bouteilles polyéthylènes de 250 ml et acidifiés à un pH < 2 à l'aide de l'acide nitrique ultra pure.

Les différents échantillons d'eau de surface (cours d'eau) ou souterraines (puits, sources et forages) ont été minutieusement étiquetés et conservés à 4°C dans une glacière avant d'être transportés dans les différents laboratoires pour analyses dans un délai de dix (10) jours environ.

II.2.1.4.3. Mesures des paramètres physico - chimiques des eaux in situ

Immédiatement après le prélèvement des échantillons d'eau sur le terrain, trois paramètres hyper sensibles aux conditions du milieu (pH, C.E et turbidité) ont été mesurés *in situ*.

II.2.1.4.3.1. pH

Les pH des différents échantillons ont été mesurés directement sur le terrain à l'aide d'un pH mètre de marque WTW pH 315i dont l'électrode est en permanence conservée dans une solution de chlorure de potassium (KCl) de 3 mol/l (Figure II.10). Il faut noter qu'avant chaque campagne de terrain, le pH-mètre est calibré (étalonné) à l'aide des solutions tampons standard de pH=4,01 ; pH=7,00 et de pH = 10,00.

II.2.1.4.3.2. Conductivité Electrique (CE)

Les conductivités électriques ont été mesurées sur le terrain à l'aide d'un conductimètre de marque HANNA type HI 8033 Centrifuge (Figure II.11). Ici également, il faut noter que l'appareil a aussi été préalablement calibré avant toutes les mesures pour chacune des campagnes de terrain.

II.2.1.4.3.3. Turbidité

La turbidité est un paramètre qui caractérise la limpidité d'une eau ou encore son opalescence par l'effet Tyndall (Beaux, 1997 ; Bouelet Ntsama et *al.*, 2018). Elle exprime donc la quantité de matières en suspension (microorganismes, macromolécules organiques, etc.) qui sont à l'origine du trouble de l'eau (Ngatcha et *al.*, 2005 ; Rodier, 2009 ; Daiwé et Ngatcha, 2010 ; Bouelet et *al.*, 2018). Sur le BVK, ce paramètre a été mesuré à l'aide d'un turbidimètre à compression de marque 2100N/HCAH (Figure II.12). La turbidité est mesurée en « Nephelometric Turbidity Unit » ou NTU.



Figure II.10 : Dispositif de mesure de pH avec un pH-mètre de marque WTW pH 315i



Figure II.11 : Conductimètre de marque HANNA type HI 8033



Figure II.12 : Turbidimètre à compression de type 2100N/HCAH

II.3. Travaux de Laboratoire

Ils ont consisté aux dépouillements, traitements et analyses des paramètres météorologiques (pluies et températures), hydrologiques (hauteurs d’eau et débits liquides), hydrodynamiques (niveaux piézométriques) et hydrogéochimiques (pH, T°C, C.E, Turbidité, Matières particulaires et dissoutes, éléments majeurs et en traces).

II.3.1. Traitement et analyse de paramètres météorologiques

Cinq étapes ont guidé le traitement et l’analyse des paramètres météorologiques (pluies et températures) dans cette étude afin de les rendre fiables et utilisables. On peut citer entre autres : la critique et la validation de données, le traitement statistique des paramètres climatiques par stations ; la spatialisation des données météorologiques à l’échelle du BVK ; l’estimation de la pluie moyenne à l’échelle du BVK et les méthodes d’études de la variabilité et/ou du changement hydro climatiques par stations.

II.3.1.1. Critiques et validation des paramètres climatiques

Les pluies et les températures acquises dans la présente étude ont été testées et validées par l’examen des courbes des valeurs cumulées ou courbes de simple masse (Figure II.13).

Dans cette méthode, les données cohérentes se traduisent par un alignement suivant des droites dont les coefficients de corrélation sont très significatifs. Les points qui s’écartent ainsi de cet alignement sont supprimés et/ou corrigés. En ce qui concerne les pluies annuelles obtenues dans les différentes stations du BVK, les différents coefficients varient de 0,9814 à la station de

Yokadouma à 0,9887 à la station de Meiganga et, entre 0,9912 à la station de la Kadey à Batouri à 0,9991 à la station de la Doumé à Sibita. De plus, ces droites ne présentent pas de cassure encore moins de flexure très importante pouvant marquer une hétérogénéité secondaire. Les données sont donc exploitables et donnent d'ailleurs de bons résultats qui seront présentés dans le prochain chapitre de ce travail.

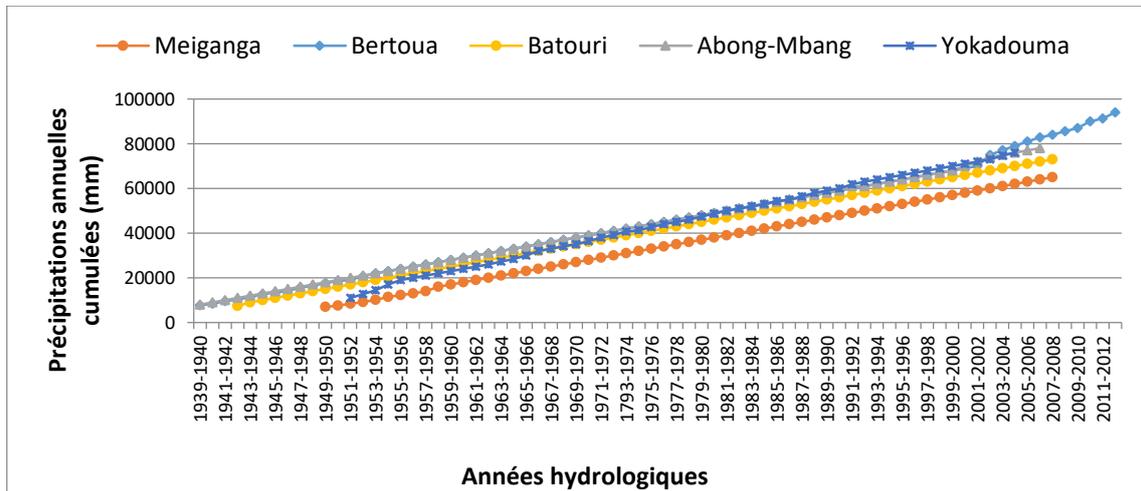


Figure II.13 : Evaluation de la fiabilité des pluies moyennes annuelles par simple cumul aux différentes stations météorologiques du bassin versant de la Kadey au Cameroun

II.3.1.2. Traitements statistiques des paramètres météorologiques

L'ensemble des pluies et des températures obtenues au cours de la présente étude, forment une vaste série de données statistiques assez difficile à manipuler. Pour ce faire, il est indispensable de résumer et de coordonner cette multitude de chiffres en quelques éléments synthétiques en nombre aussi faible que possible que sont les moyennes arithmétique, médiane, écart type, coefficient de variation, quartile, valeurs extrêmes, etc. Toutes les données ont ainsi subi des traitements statistiques descriptifs et comparatifs à partir des logiciels XLSTAT 2016 et Origin8.

II.3.1.3. Méthode de spatialisation des paramètres météorologiques

Afin de mieux comprendre l'évolution spatiale des pluies sur l'ensemble du BVK d'une part, et de déterminer le sens de migration de ces dernières d'autre part, il a fallu introduire dans ce travail le concept d'isohyètes ou ligne d'égale hauteur de précipitations. La spatialisation des précipitations annuelles s'est alors effectuée à l'aide de la méthode du triangle d'interpolation de points par krigeage « ou *kriging* » sphérique du logiciel Surfer 15.0. Cette méthode est plus adaptée au nombre réduit de point d'observation après une homogénéisation des données pour

colmater les brèches produites par les différentes lacunes observées lors de la collecte des informations sur le terrain.

La période 1960 – 2010, soit cinquante (50) ans de données, a été retenue comme période de référence du fait de la régularité et de la concordance des données à digitaliser pour la majorité des stations pluviométriques prise en compte dans la présente étude.

II.3.1.4. Estimation des pluies moyennes à l'échelle du BVK par la méthode des polygones de THIESSEN

De nos jours, de nombreuses méthodes permettent d'estimer les précipitations moyennes d'un bassin versant à savoir la méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des isohyètes, la méthode des polygones de Thiessen (Remenieras, 1960 ; 1976 ; Roche, 1963 ; Ward et Robinson, 1990 ; Musy et Higy, 1998 ; Kpoumié, 2015 ; Kouassy et *al.*, 2016 ; Ndam et *al.*, 2016). Compte tenu de la superficie du BVK pas assez très grand et de sa facilité d'utilisation, la méthode des polygones de Thiessen a été retenue par rapport à celle des Isohyètes malgré que ces deux méthodes ne donnent pas des résultats avec des différences significatives (0 à 2%). Pour y parvenir la formule utilisée est la suivante :

$$P_{BV} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \quad \text{avec} \quad (1)$$

$$\alpha_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

Avec : P_i : Pluie tombée à la station i couvrant la portion du bassin versant de superficie S_i ; S_i : Surface d'influence de la station i

II.3.1.5. Méthodes d'étude de la variabilité et/ou du changement hydroclimatologiques

Les données hydroclimatologiques (pluies et débits) pour les longues séries ont été traitées par analyse statistique descriptive, analyse des droites de tendance et par application des tests statistiques de détection des ruptures que donnent les résultats du logiciel Khronostat 1.01 développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et, qui est accessible et entièrement gratuit pour téléchargement sur le site <http://www.hydrosciences.org/>. Les résultats de ce logiciel ont déjà prouvés leurs robustesses dans de nombreuses études. En effet, ce dernier a été largement utilisé pour réaliser des tests dans le cadre d'études de la stationnarité des séries chronologiques et les méthodologies ont fait leurs preuves aussi bien sur le continent africain

qu'en hexagone (Gautier et *al.*, 1998 ; Servat et *al.*, 1998 ; 1999 ; Ardoïn et *al.*, 2003 ; Ardoïn, 2004 ; Dao Amidou et *al.*, 2010 ; Djoufack-Manetsa, 2011 ; Ndam Ngoupayou et *al.*, 2014 ; Kpoumié, 2015 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016).

Deux méthodes ont été ainsi retenus : Il s'agit du :

- Principe de calcul du Filtre pass-bas de Hanning d'ordre 2 ;
- Tests de détection des ruptures dans les séries hydropluviométriques.

II.3.1.5.1. Principe de calcul du Filtre pass-bas de Hanning d'ordre 2

Encore appelée méthode des moyennes mobiles pondérées, la méthode du filtre pass-bas de HANNING d'ordre 2 a été utilisée pour pondérer les totaux pluviométriques. En effet, le filtre non récursif pass-bas de Hanning d'ordre 2 permet de filtrer les variations saisonnières par le calcul des totaux pluviométriques pondérés.

D'utilisation assez simple, son principe de calcul englobe à la fois différentes formules en fonction de la position de l'année pour laquelle on calcule la moyenne mobile pondérée dans la série. L'équation mathématique de cette application est la suivante (Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016) :

$$x(t) = 0,06x(t - 2) + 0,20x(t - 1) + 0,38x(t) + 0,25x(t + 1) + 0,06x(t + 2) \quad (2)$$

avec : $3 \leq t \leq (n - 2)$

où $x(t)$ est le total pluviométrique pondéré du terme t , $x(t - 1)$ et $x(t - 1)$ sont les totaux observés de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t , $x(t + 2)$ et $x(t + 1)$ sont les totaux observés de deux termes qui suivent immédiatement le terme t .

Les totaux pondérés des deux premiers [$x(1)$, $x(2)$] et les deux derniers [$x(n - 1)$, $x(n)$] termes de la série sont déterminés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

$$x(1) = 0,54x(1) + 0,46x \quad (3)$$

$$x(2) = 0,25x(1) + 0,50x(2) + 0,25x \quad (4)$$

$$x(n-1) = 0,25x(n-2) + 0,50x(n-1) + 0,25x(n)$$

$$x(n) = 0,54x(n) + 0,46x(n-1)$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent à l'échelle interannuelle, les moyennes mobiles calculées ont été centrées et réduites à partir de la formule suivante :

$$Vcr = \frac{(P-\bar{P})}{\sigma} \quad (5)$$

Avec : **Vcr** = Variable centrée réduite (Indice pluviométrie ou hydrométrique selon la variable étudiée), **P** = cumul de la variable sur une période t donnée, \bar{P} = moyenne de la série chronologique sur la période d'étude et σ = écart type de la série sur la période d'étude (Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016)

II.3.1.5.2. Tests de détection des ruptures dans les séries pluviométriques

En hydroclimatologie, des tests sont effectués pour mettre en évidence les différentes ruptures qui sont survenues dans une série pluviométrique afin de mieux déterminer les années excédentaires et celles déficitaires. Pour ce faire, plusieurs méthodes peuvent être employées. Il s'agit entre autres de la méthode de segmentation d'Hubert, du principe du test de Pettit et de la détermination des déficits hydropluviométriques.

a) Méthode de segmentation d'Hubert

Selon Hubert (1989), la procédure de segmentation des séries chronologiques est appropriée à la recherche des multiples changements de la moyenne. Elle fournit au moyen d'un algorithme spécifique une ou plusieurs dates de rupture qui sépare les segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes.

b) Principe du test de Pettit

Le principe du test de Pettit consiste à diviser la série étudiée d'effectif **N** en deux sous échantillons de taille **m** et **n** respectivement. On peut alors calculer la somme des rangs des éléments de chaque sous échantillon dans l'échantillon total. Ensuite, on réalise une étude statistique à partir des deux sommes ainsi obtenues. Enfin, on effectue un test selon l'hypothèse d'aucune appartenance des deux sous échantillons à la même population. Il faut noter que le test de Pettit est non paramétrique car, il est une dérivée de celui de Mann Whitney. Ici, l'absence de rupture dans la série (X_i) de taille n constitue l'hypothèse nulle. Sa mise en œuvre suppose que pour tout instant « t » compris entre 1 et n, les séries chronologiques (X_i)_{i-1} à t et t+1 à n appartiennent à la même population. (Dao Amidou, 2010 ; Kpoumié, 2015 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016). Dans ce cas, la variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,n}$ définie par la formule qui suit :

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^n \times \sum_{i=t+1}^n \text{Dij} \quad (6)$$

$\text{Dij} = \text{Sgn}(X_i - X_j)$, avec $\text{Sgn}(X) = 1$ ssi $X > 0$ et -1 ssi $X < 0$.

Dans le cas où l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de la rupture est faite par l'instant définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,n}$.

Les données acquises ainsi soumises au test de Pettit indiquent les grandes périodes d'évolution de la pluviométrie ou des débits. La rupture peut donc se définir comme le point à partir duquel un changement intervient dans la série chronologique (Sigha Nkamdjou, 1994 ; Sanavé et al., 2001 ; Kouakou et al., 2007 ; Dao Amidou, 2010 ; Sigha Nkamdjou et al., 2005 ; Kpoumié, 2015 ; Kouassy Kalédjé et al., 2016).

c) Détermination des déficits hydropluviométriques

La méthode mise en application dans ce cas est faite lorsqu'une rupture existe. Il s'en suit donc la détermination du pourcentage de variations de la moyenne de la série considérée (pluie ou débit) d'une sous période T_i autour de la période T concernée. Pour les variables hydropluviométriques dont la série chronologique présente une rupture (Liéno, 2007 ; Kpoumié, 2015), cette méthode précise le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture et permet de suivre aussi l'évolution des variations de précipitations et des débits au cours du temps sur une période de référence prédéfinie. Elle s'obtient par la formule suivante (Ardoin et al., 2003 ; Ardoin, 2004 ; Kouakou, 2007 ; Sigha Nkamdjou et al., 2005 ; Kpoumié, 2015 ; Kouassy Kalédjé et al., 2016 ; Brunet et al., 2018 ; Gelier et al., 2019) :

$$D = \frac{x_j}{x_i} - 1 \quad (7)$$

Où D est le déficit hydropluviométrique ; x_j est la moyenne de la période après la rupture et, x_i est la moyenne de la période avant la rupture.

Ces différentes méthodes sont appliquées à chacune des séries pluviométriques ou hydrométriques dans le cadre des études de la variabilité climatique.

II.3.2. Traitement et analyse des paramètres hydrométriques

Cette étape a consisté à la transformation des hauteurs des différents lames d'eau en débits journaliers et au traitement de ces derniers par les méthodes classiques (Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, traitement statistiques, etc.)

II.3.2.1. Transformation des hauteurs d'eau en débits

Les hauteurs des niveaux d'eau lues quotidiennement ($H = f(t)$) par les observateurs sont transformées régulièrement en débits ($Q = f(t)$) grâce à la courbe de tarage ou courbe d'étalonnage ($Q = f(H)$). Pour cela, il est nécessaire d'effectuer plusieurs mesures ponctuelles de débits (jaugeages) à différentes périodes (basses, moyennes et hautes eaux).

Les débits liquides ponctuels sont obtenus au moyen de plusieurs méthodes de jaugeage qui varient en fonction des moyens disponibles et du type des cours d'eau. On distingue ainsi :

- le jaugeage par capacité ou volumétrique qui se fait par mesure du temps de remplissage d'un récipient de volume connu pour les petits cours d'eau;
- le jaugeage au flotteur qui est une méthode d'évaluation des débits basée sur la détermination de la vitesse d'écoulement du cours d'eau à sa surface à l'aide d'un flotteur (Figure II.14) ;
- le jaugeage chimique qui consiste en l'injection dans un cours d'eau d'une quantité d'un produit chimique non toxique et facilement dissoluble (Roche, 1963). Le débit est obtenu par une formule mathématique incluant la concentration et le volume du produit dans l'échantillon prélevé et dosé ;
- le jaugeage au moulinet hydrométrique qui consiste en la mesure du débit liquide par exploration du champ de vitesse des courants sur une section du cours d'eau (Figure II.15).

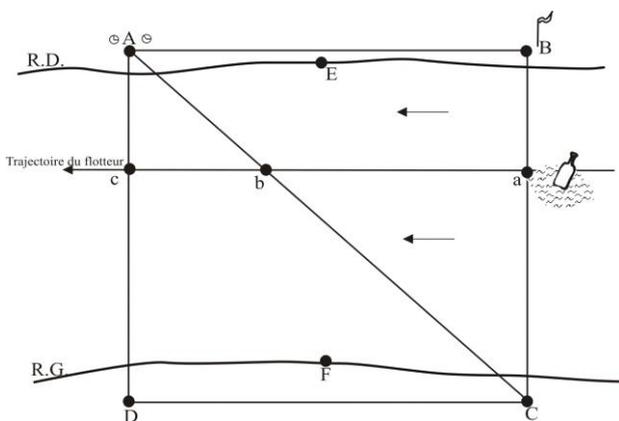


Figure II.14 : Jaugeage aux flotteurs

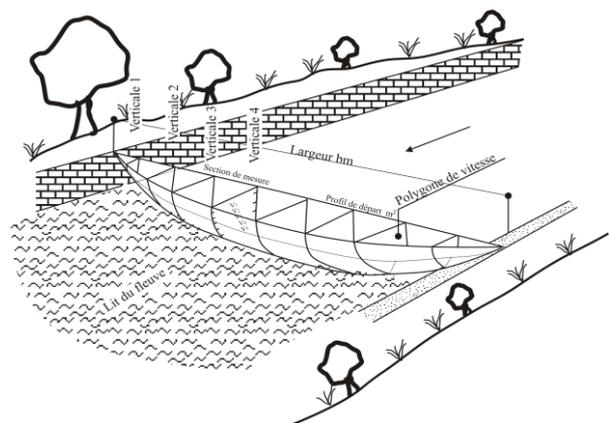


Figure II.15 : Représentation stéréométrique du jaugeage au moulinet

Le moulinet hydrométrique permet la détermination du débit d'un cours d'eau en mesurant, dans une section droite, la vitesse du courant en un certain nombre de points dont on mesure également la profondeur. On fait ensuite la somme des produits des vitesses moyennes par les

aires élémentaires auxquelles elles s'appliquent. En fonction de l'importance du cours d'eau, la section de jaugeage peut être parcourue soit à pied, dans ce cas on parle de jaugeage à gué ou à la perche coulissante, soit à partir d'un bateau, on parle alors de jaugeage au câble.

On distingue également les méthodes à l'ADCP « *Acoustic Doppler Current Profiler* » (ou profileur de courant à effet Doppler) qui mesure les profils verticaux de la vitesse de l'eau en utilisant l'énergie acoustique et **au cercle topographique** qui sont actuellement utilisées pour les grands cours d'eaux comme l'Amazonie, le Congo, la Sanaga, l'Ogoué, etc.

Dans la présente étude, les débits utilisés proviennent majoritairement du Centre de Recherche Hydrologique (CRH) de l'Institut de Recherche Géologique et Minière (IRGM). Ils ont été obtenus à l'aide des méthodes de jaugeage au Moulinet et à l'ADCP. Le dépouillement dans ce contexte a consisté à la détermination du débit liquide par les logiciels « HYDROM » développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ou « TIDYP » développé par le CRH de l'IRGM.

II.3.2.2. Traitement et analyse des débits

Cette étape a constitué en la critique puis à la validation des débits mensuels et annuels d'une part à l'aide de la méthode de simple cumul (Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2) et, d'autre part, au traitement statistique des débits des différentes stations hydrométriques.

II.3.2.2.1. Critiques et validation des débits mensuels et annuels

Les débits obtenus, après transformation des hauteurs d'eau à l'aide de la courbe de tarage dans la présente étude, ont été testés et validés par l'examen des courbes des valeurs cumulées ou courbes de simple masse (Figure II.16).

Dans cette méthode, les données cohérentes se traduisent par un alignement suivant des droites dont les coefficients de corrélation sont très significatifs. Les points qui s'écartent ainsi de cet alignement sont supprimés et/ou corrigés. En ce qui concerne les débits annuels obtenus dans les différentes stations hydrométriques du BVK, les différents coefficients varient de 0,9910 à la station de la Doumé à Sibita à 0,9833 à la station de la Kadey à Batouri et, entre 0,9882 à la station de la Boumbé à Kenzou à 0,9997 à la station de la Kadey à Pana (Figure II.16). Il faut noter que ces droites ne présentent pas de cassure encore moins de flexure très importante pouvant marquer une hétérogénéité secondaire. Les données sont donc exploitables et donnent d'ailleurs de bons résultats qui seront présentés dans le prochain chapitre de ce travail.

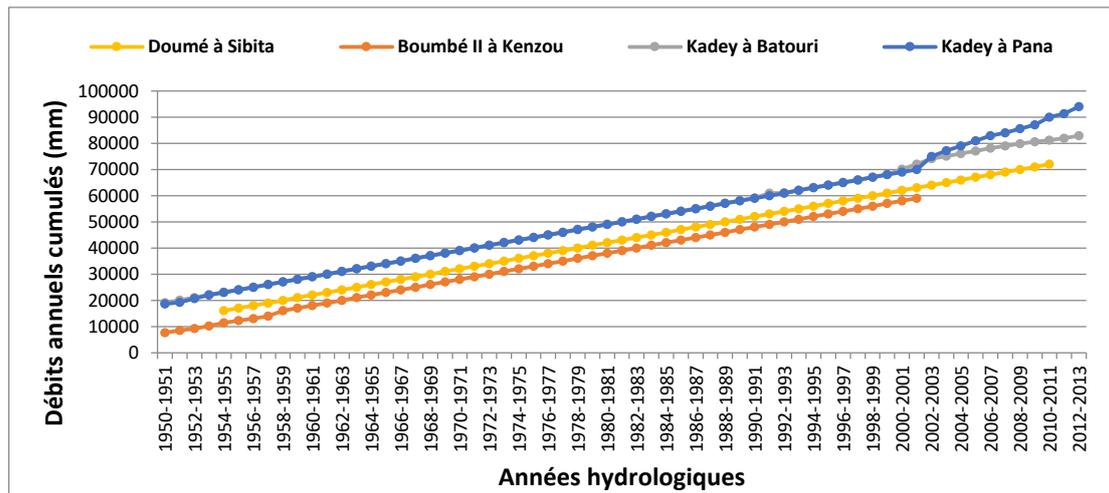


Figure II.16 : Evaluation de la fiabilité des débits moyens annuels par simple cumul aux différentes stations hydrométriques du BVK au Cameroun

II.3.2.2. Traitements statistiques des débits

L'ensemble des débits journaliers, mensuels et annuels relevés au cours de la présente étude, forment une vaste série de données statistiques assez difficile à manipuler. Il a été donc indispensable de résumer et de condenser cette multitude de chiffres en quelques éléments synthétiques (nombre aussi faible) que possible que sont les moyennes arithmétiques, les médianes, les écarts types, les coefficients de variation et les valeurs extrêmes des différentes séries ainsi obtenues.

II.3.3. Traitement et analyse des paramètres hydrodynamiques

II.3.3.1. Mesures et suivis piézométriques

Cette étape a consisté à l'étude des fluctuations des niveaux d'eau souterraine dans le bassin versant de la Kadey. Elle s'est effectuée grâce à la détermination du gradient hydraulique et l'établissement des cartes piézométriques mensuelles.

II.3.3.1.1. Détermination du gradient hydraulique

Par comparaisons entre le dispositif expérimental du laboratoire de Darcy (Castany, 1998) et le terrain, le gradient hydraulique est la différence de niveau piézométrique entre deux points de la surface, par unité de longueur, mesurée le long d'une ligne de courant (sens d'écoulement des eaux souterraines ou axe d'écoulement des eaux souterraines). Le gradient hydraulique, « i », est alors assimilable à la pente de la surface piézométrique (Castany, 1998 ; Djeuda et *al.*, 2004 ; Feumba, 2015).

Dans la pratique, le gradient hydraulique est calculé sur le terrain, à l'aide des niveaux piézométriques mesurés dans deux ouvrages d'observation, alignés sur une ligne de courant, l'un en amont H_1 , l'autre en aval H_2 , séparés d'une distance L (Alaerts, 1990 ; Castany, 1998). Le gradient hydraulique peut aussi être évalué à partir des puits d'observations. Dans ces conditions, on mesure d'abord la profondeur à laquelle se trouve l'eau dans les différents ouvrages, ensuite on effectue la différence de niveau d'eau ΔH , entre deux puits voisins et, on divise le résultat par la distance entre les deux puits.

II.3.3.1.2. Etablissement de la carte piézométrique

La cartographie de l'aquifère a pour but de représenter sa configuration, sa structure et de schématiser les fonctions et le comportement hydrodynamique du réservoir (Musy, 2004). Elle permet également de mieux comprendre le mode d'alimentation et d'écoulement de l'eau souterraine (Djeuda et *al.*, 1999 ; Feumba, 2015). Ainsi, la réalisation de cette carte consiste à distribuer des courbes de niveaux piézométriques d'égales dimensions encore appelées courbes hydroisohypses ou isopièzes. La méthode utilisée ici est celle du triangle d'interpolation circulaire classique proposée par le logiciel Surfer 15.0 couplée aux prétraitements effectués par Arcgis 9.0 et Mapinfo 7.1.

Cette méthode présente moins de zones d'incertitudes dans la représentation des courbes et une bonne lisibilité facilitant l'interprétation. Les axes de drainages indiquent le sens d'écoulement des cours d'eau. Cependant, les lignes de courant matérialisent les directions de l'alimentation ou celles de la dépression.

II.3.3.2. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite

Le système hydrologique auquel on se réfère est celui du bassin versant de la Sangha, auquel appartient le BVK. La période prise en compte est l'année hydrologique 1969-2016 (soit 47 années). Le bilan hydrique de Thornthwaite (1954) permet d'évaluer le déficit d'écoulement mensuel et tient compte de la réserve du sol d'un mois à l'autre (Remenieras, 1960). La méthode de Thornthwaite consiste d'abord à calculer pour chaque mois, par une formule et des abaques, une évapotranspiration potentielle (ETP) que l'on peut assimiler au pouvoir évaporant de l'atmosphère. Cette évapotranspiration potentielle est fonction de la température moyenne mensuelle par le moyen des indices thermiques mensuels (i) calculés par la formule $i = (t/5)^{1,514}$, et la durée astronomique du jour. L'évapotranspiration potentielle est calculée par la formule suivante :

$$ETP_i = 16(16t_i/I)^\alpha \quad (9)$$

Avec $\alpha = 0,0161+0,5$ selon la simplification de Serra, et $I = \sum_{i=1}^{12} i_i = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1,514} t_i$: température moyenne mensuelle (en °C) ; i_i : indice thermique mensuelle.

L'évapotranspiration ainsi calculée est ensuite confrontée aux précipitations (P). Les paramètres suivants du bilan hydrologique sont calculés : l'évapotranspiration réelle (ETR), la réserve facilement utilisable (RFU), la variation de la réserve facilement utilisable (Δ RFU), l'excédent pluviométrique (WS), l'écoulement total (S), l'écoulement de surface (QS) et le déficit agricole (DA). Le calcul de ces paramètres est effectué suivant l'organigramme présenté sur la Figure II.17. Une fois l'évapotranspiration évaluée par la méthode de Thornthwaite, l'infiltration est calculée à partir de la formule ci-dessous :

$$I = P - (ETR + H_e) \quad (10)$$

Avec : I : infiltration moyenne annuelle (en mm) ; P : précipitations moyennes mensuelles (en mm) ; ETR : évapotranspiration réelle moyenne annuelle (en mm) ; H_e : lame d'eau écoulée moyenne annuelle (en mm).

La lame d'eau écoulée moyenne annuelle est ensuite déduite de la relation proposée par Olivry (1986). Selon cet auteur, pour les cours d'eau du Cameroun, elle est liée à la précipitation moyenne annuelle par la relation suivante :

$$H_e = 0,973P - 1047 \quad (11)$$

Avec : H_e : lame d'eau écoulée moyenne annuelle (en mm) ; P : précipitations moyennes annuelles (en mm).

Cette relation, établie avec un coefficient de corrélation de 0,980, doit être considérée avec une certaine prudence du fait essentiellement des variables des bassins versants et de la diversité des pentes. Elle semble vérifiée pour les régions à précipitations supérieures à 1500 mm du bassin de la Sangha, du climat tropical de transition, et des bassins côtiers (Sighomnou, 2004).

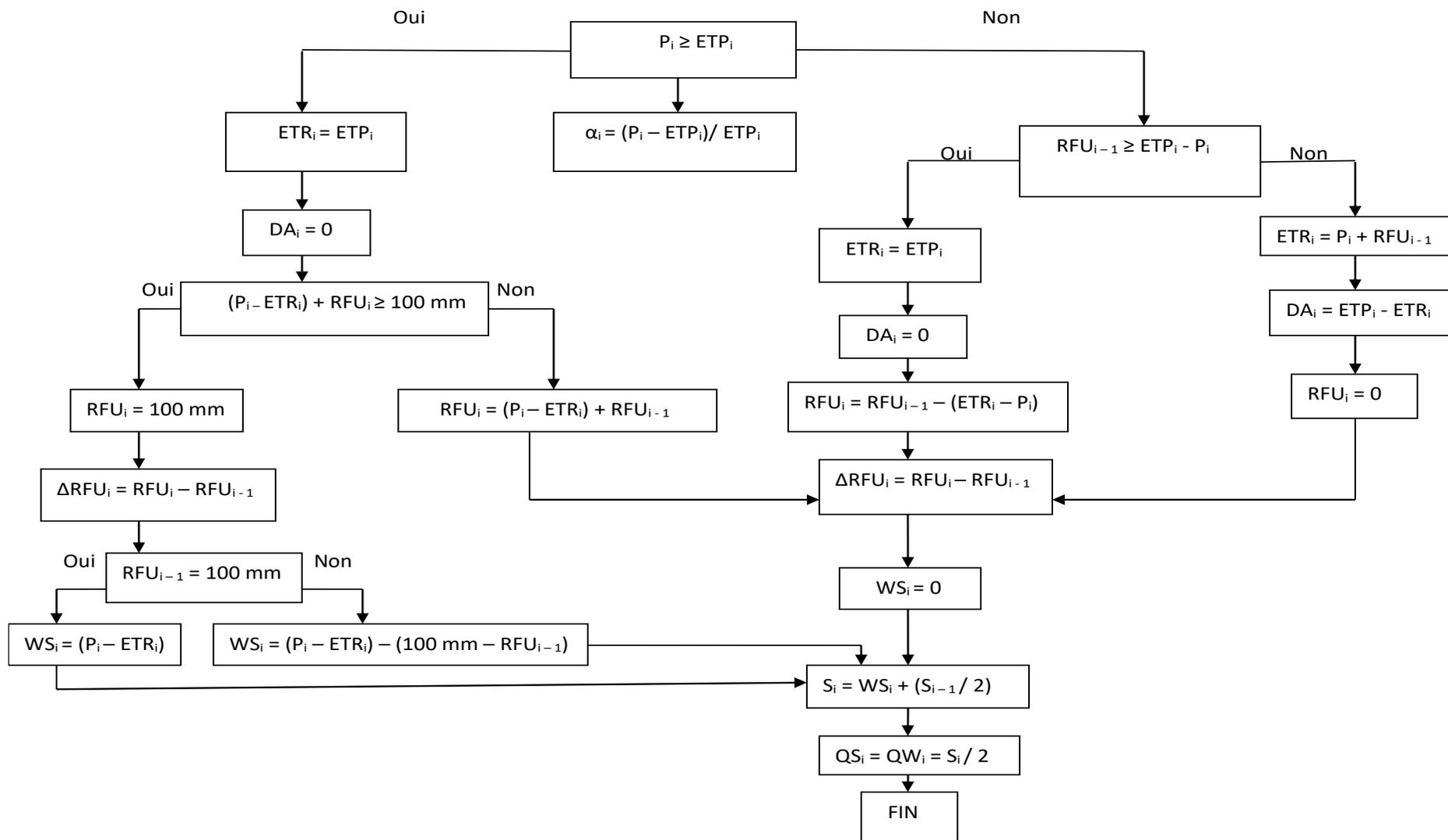


Figure II.17 : Organigramme de calcul du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (1954)

II.3.4. Acquisition et traitement de paramètres physicochimiques

II.3.4.1. Mesures des paramètres physiques

La mesure des paramètres physiques (pH, CE, turbidité), préalablement mesurés sur le terrain est reprise dès l'arrivée au laboratoire dans de meilleures conditions avec un matériel d'excellente qualité et plus stable. Lesdites mesures sont effectuées pour apprécier leur évolution temporelle, contrôler et valider les résultats de terrain et éventuellement donner des résultats plus précis. Dans l'ensemble, les résultats obtenus au laboratoire pour les paramètres physiques (pH, CE et turbidité) sont très proches de ceux obtenus sur le terrain.

II.3.4.2. Quantification des Matières en suspension totales (MES) totales

La détermination des teneurs en MES totales se fait par différence de poids du filtre chargé (m_1) et du filtre vierge (m_0) sur le volume d'eau prélevée ramené à 1 000 ml comme l'indique la formule suivante :

$$MES\ totales\ (mg.l^{-1}) = \frac{m_1 - m_0}{V} \times 1000 \quad (12)$$

Où m_0 (mg) : la masse du filtre avant la manipulation ; m_1 (mg) : la masse du filtre après la filtration et le séchage à l'étuve ; V (ml) : le volume d'eau filtré.

En application de cette formule, il faut noter que Maneux (1998) a calculé une erreur théorique de 5%, lorsque au plus 10 mg. L⁻¹ de MES recueillies sont utilisés, et de 3% pour les concentrations de plus de 10 mg. L⁻¹.

II.3.4.3. Analyses des cations et anions majeurs

Ces analyses ont principalement portés sur les anions : HCO₃⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, PO₄³⁻, etc. mais, également sur des ions des groupes I, II, III et IV comme Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, CO₂⁺, Fe³⁺, Pb²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺ pour ne citer que ceux-là. Elles ont été effectuées par chromatographie ionique HPLC au Laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux (LAGE) à Nkolbisson d'une part et au Laboratoire du Centre de Recherche et de Conseil (CERECO) de Valenciennes d'autre part.

Les teneurs des différents ions majeurs dosés ont été obtenus grâce à l'utilisation de nombreux procédés industriels.

II.3.4.4. Analyses des éléments traces ou métaux lourds

Les éléments traces métalliques pris en compte ici sont Cr, Cd, Fe, Cu, Pb, Mn et le mercure, le cyanure et l'arsenic. Ils ont été analysés au Cabinet d'Etude SOS Environnementale de Soa à Yaoundé au Cameroun et au Laboratoire du Centre de Recherche et de Conseil (CERECO) de Valenciennes. Pour le mercure, le cyanure et l'arsenic la méthode utilisée est celle de la « photométrie » de Macherey-Nagel. Les éléments Cu, Zn, Cr, Mn, Fe et CN⁻ ont été analysés quant à eux par la méthode Visocolor ECO alors que le Pb quant à lui, a été analysé par la méthode Quantofix.

Pour les différentes analyses décrites ci-dessus, on a utilisé de l'eau ultra pure avec 18,2 MQ.cm comme échantillon standard.

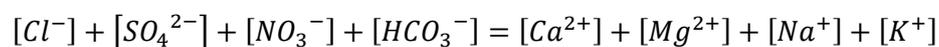
II.3.4.5. Validation des données et traitement hydrochimiques

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour la validation et le traitement des paramètres physicochimiques obtenus. Il s'agit du calcul de la balance ionique, de la détermination des faciès hydrochimiques à partir des diagrammes de Piper et de Camembert, du calcul de l'indice de saturation des eaux, de l'indice de qualité de l'eau (IQE), de l'indice de pollution métallique (IPM) et de l'analyse statistique multivariée (ASM).

II.3.4.5.1. Calcul de la Balance Ionique (BI)

Cette opération est effectuée dans le but de vérifier la qualité et la fiabilité des résultats d'analyses obtenus. Il s'agit d'évaluer l'erreur relative sur le degré de neutralité électrique des ions en solution par la détermination de l'équilibre ionique suivante :

$TZ = TZ^+$ avec $TZ^- =$ Somme des équivalents anions et $TZ^+ =$ Somme des équivalents cations



Le calcul de la balance ionique (BI) est obtenu par l'équation suivante :

$$BI = \frac{[(TZ^+) - (TZ^-)]}{[(TZ^+) + (TZ^-)]} \times 200 \quad (13)$$

Dans la présente étude, les résultats d'analyses chimiques seront considérés comme acceptables lorsque les valeurs de la balance ionique sont inférieures à $\pm 10\%$ (Schoeller, 1962 ; Boeglin et al., 2003 ; Fouépé et al., 2012 ; Kouassy Kalédjé et al., 2016 ; Rakotondrabe, 2019).

II.3.4.5.2. Détermination des faciès des eaux

Afin d'identifier les différents faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours :

- au diagramme de Piper qui est constitué de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global. Ce type de diagramme est particulièrement adapté pour étudier l'évolution du faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente ;
- au diagramme de Camembert qui est constitué d'un disque partagé en portions montrant les différents ions. Ce diagramme est bien indiqué pour présenter les types des ions dominants et / ou pour distinguer des groupes d'échantillons.

II.3.4.5.3. Calcul de l'Indice de Saturation (IS) des eaux par le modèle de PHREEQC

C'est le rapport du produit des activités ioniques PAI à la constante d'équilibre K_s à une température donnée. Il montre ainsi la tendance des phases minérales à se dissoudre ou à se précipiter. L'IS permet de suivre ou de connaître le degré de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents ou ceux susceptibles de se précipiter dans les réservoirs de surface et souterrain (Servat et al., 1998 ; Abdou Babaye, 2012). De façon pratique, on a :

$$IS = \log\left(\frac{PAI}{K_s}\right) \quad (14)$$

Avec IS : indice ou index de saturation ; PAI : produit de l'activité ionique et K_{sp} : produit de solubilité d'un minéral.

Si $IS = 0$, l'eau est en équilibre avec le minéral ;

Si $IS < 0$, l'eau est sous saturée et capable de dissoudre le minéral ;

Si $IS > 0$, l'eau est sursaturée et capable de précipiter le minéral.

II.3.4.5.4. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE)

Communément appelé WQI (Water Quality Index) en anglais, l'indice de qualité de l'eau (IQE) est un paramètre qui permet d'évaluer la qualité de l'eau afin de communiquer au grand public ses possibilités d'usage, en particulier sa convenance à la consommation humaine. Dans le cadre de la présente étude, le calcul de l'indice de qualité de l'eau a été calculé uniquement

pour les eaux d'écoulement. Les paramètres pris en compte sont les éléments majeurs et les paramètres physiques (pH, CE, MES et turbidité). Il est obtenu par la formule suivante :

$$IQE = \sum_{i=1}^n SI \quad (16)$$

Avec $SI_i = W_i \times q_i$ et où $q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100$; $W_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$

Les valeurs du poids relatif calculées (W_i) de chaque paramètre sont données dans le tableau X.

Tableau X : Poids relatifs de chaque paramètre

Paramètres	Unité	Standard de l'OMS	Poids (wi)	Poids relatifs (Wi)
pH		6,5 – 8,5	4	1,105
EC	µS/cm	1400	4	0,105
MES	mg/L	25 – 40	2	0,053
Turbidité	NTU	5	2	0,053
Na ⁺	mg/L	200	2	0,053
K ⁺	mg/L	12	1	0,026
Mg ²⁺	mg/L	125	2	0,053
Ca ²⁺	mg/L	75	2	0,053
F ⁻	mg/L	1,5	4	0,105
Cl ⁻	mg/L	250	3	0,079
NO ₃ ⁻	mg/L	50	5	0,132
SO ₄ ²⁻	mg/L	250	4	0,105
HCO ₃ ⁻		125 – 130	3	0,079

Les valeurs IQE calculées sont quant à eux classées en cinq catégories et présentées dans le tableau XI.

Tableau XI : Différentes catégories de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE)

Gamme	Qualité
< 50	Bonne
50 – 100	Excellente
100 – 200	Douteuse
200 – 300	Mauvaise
> 300	Très Mauvaise

II.3.4.5.5. Calcul de l'indice de pollution métallique (IPM)

L'indice de pollution métallique (IPM) ou communément appelé « Heavy metal pollution index (HPI) » en anglais est un paramètre qui permet d'évaluer le niveau de pollution des eaux par les métaux lourds. Cette méthode consiste à attribuer un poids ou un indice (W_i) à chaque métal selon sa contribution au processus de dégradation de la qualité de l'eau (Prasad et Sangita, 2008 ; Singh et Rakesh, 2016).

$$IMP = \frac{\sum_{i=1}^n w_i Q_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (17)$$

II.3.4.5.6. Analyse statistique multivariée (ASM)

Cette méthode a pour but de résumer les informations issues de plusieurs variables tout en minimisant la déperdition des informations principales de plusieurs unités d'échantillonnages et des variables. Elles visent donc à structurer et à simplifier les données issues de plusieurs variables, sans privilégier l'une d'entre elles particulièrement (Gournay, 2012 ; Glèlè Kakaï et *al.*, 2016).

Il existe plusieurs étapes et/ou techniques dans la chaîne d'analyses hydrochimiques par la méthode d'Analyse Statistique Multivariée (ASM). On peut citer entre autres :

- la matrice de corrélation ;
- l'analyse en composante principale ;
- la classification ascendante hiérarchique.

Pour faciliter ce type d'analyse, les ASM sont réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT 2016 disponible sur le site <https://www.xlstat.com/fr>.

Conclusion

Dans le cadre de la présente étude, les investigations bibliographiques ont permis de retenir un site d'étude sur la base de sa représentativité dans le plateau sud camerounais, son accessibilité et l'existence d'une intense activité d'exploitations forestière et minière. Il s'agit du bassin versant de la Kadey situé en zone tropicale et ou équatoriale de transition sur roches métamorphiques appartenant à la chaîne Panafricaine (ou chaîne mobile). Les travaux de terrain ont consisté quant à eux en identification du site, la localisation des points de prélèvement et la collecte des données climatologiques (précipitations et température), hydrologiques (débits des cours d'eau), hydrogéologiques (niveaux piézométriques) et hydrogéochemie. Les différentes chroniques pluviométriques et hydrométriques ont été traitées puis validées par la méthode de double cumul. Les échantillons prélevés ont été transportés directement dans différents laboratoires assermentés du Cameroun (Laboratoire d'Analyse Géochemie des Eaux (LAGE) de Nkolbisson et le Laboratoire du Centre de Recherche et de Conseil (CERECO) de Valenciennes pour les analyses physicochimiques (pH, C.E, Turbidité, MES totales, alcalinité, cations et anions majeurs, éléments en trace et cyanures). Les différentes techniques et/ou appareils utilisés sont la chromatographie ionique HPLC avec les modèles ICS 1000 pour les

anions et ICS 90 pour les cations, la spectrophotométrie et la spectrométrie pour les cations et anions et, enfin la photométrie de Macherey-Nagel pour les éléments en traces métalliques et les cyanures. Les résultats d'analyses physico chimiques obtenus ont fait par la suite l'objet de test de validation par le calcul de la balance ionique et traités simultanément par plusieurs méthodes et/ou techniques que sont : i) la détermination des faciès hydro chimiques par l'utilisation du diagramme de Piper ; ii) les calculs des indices de saturation des eaux par le modèle de PHREEQC, de qualité de l'eau (IQE) et de pollution métallique (IPM) ; iii) l'analyse statistique Multivariée (ASM).

CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE LA KADEY

Introduction

L'objectif du présent chapitre est de faire une réactualisation de la climatologie actuelle du bassin versant de la Kadey (BVK) et de ses environs, puis d'analyser son évolution dans le temps et dans l'espace aux pas de temps annuels, mensuels et saisonnières. Les paramètres pris en compte ici sont les pluies et les températures aux pas des temps annuels, mensuels et saisonniers pour les stations de Bertoua et Batouri situés dans le BVK, mais également celles d'Abong-Mbang et de Yokadouma situés aux alentours immédiats de ce bassin d'étude.

III.1. Variations spatio-temporelles des pluies dans le BVK et ses environs

Cette partie réactualise tout d'abord les pluies annuelles, mensuelles et saisonnières et par la suite, analyse les fluctuations dans l'espace et le temps de ces pluies aux pas de temps annuels, mensuels et saisonnières à Bertoua, Batouri dans les stations du BVK et à Abong-Mbang et Yokadouma situées aux alentours de ce bassin versant.

III.1.1. Pluies annuelles

III.1.1.1. Domaine de variations des pluies annuelles dans le BVK et ses environs

a) Station pluviométrique de Bertoua

Durant la période comprise entre 1935 et 2015 (80 ans), la pluie annuelle varie entre 908 mm enregistrée en 1995 et 2210 mm (1969) à la station de Bertoua soit une pluie moyenne interannuelle de 1506 ± 190 mm et une médiane de 1480 mm. Le coefficient de variation est de 14 % (Tableau XI). Cette moyenne est dans l'ensemble inférieure par rapport aux moyennes interannuelles proposées par Olivry, (1986), Djoufack-Manetsa, (2011) et Kpoumié, (2015) qui proposent des moyennes respectives de 1580 mm, 1515 mm et 1520 mm dans la dite station (Tableau XII).

b) Station pluviométrique de Batouri

Au cours de la période comprise entre 1942 et 2015 (73 ans), la pluie annuelle à la station de Batouri varie entre 1321 mm (1995) et 2754 mm (1979), soit une pluie moyenne interannuelle de 1761 ± 190 mm, une médiane de 1761 mm et un coefficient de variation de 13% (Tableau XII). Cette moyenne est dans l'ensemble supérieure par rapport aux moyennes interannuelles proposées par Olivry (1986) qui trouve 1572 mm, Sigha-Nkamdjou (1994) qui donne 1539 et Sighomnou (2004) qui propose 1523 mm pour la période 1953-2002 (Tableau XIII).

A l'échelle du bassin versant de la Kadey (Bertoua et Batouri), la pluie moyenne interannuelle est comprise entre 908 mm enregistrée à Bertoua en 1995 et 2754 mm (1979) à Batouri pour une pluie moyenne interannuelle de 1633 mm obtenue par la méthode arithmétique et de, 1657 mm par la méthode des polygones de Thiessen (Figure III.1).

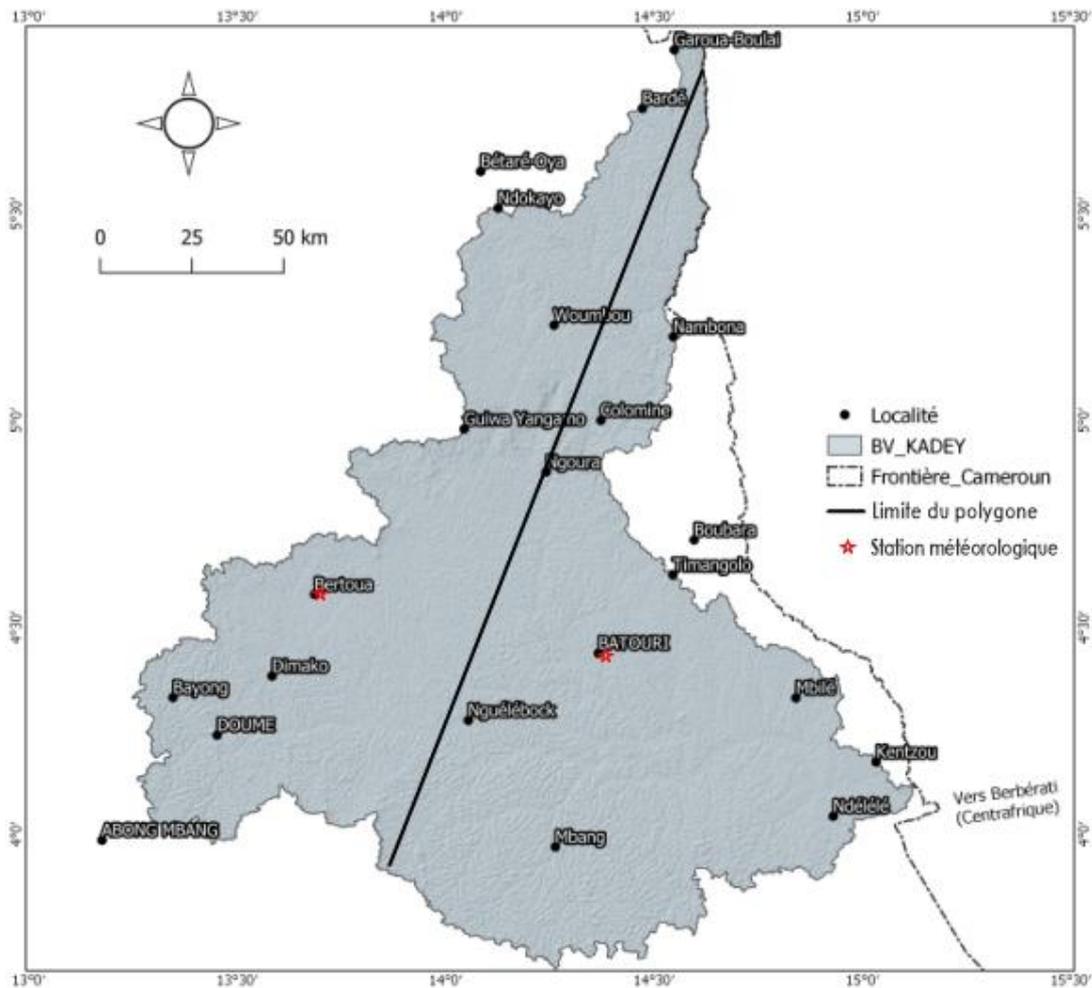


Figure III.1 : Découpage des polygones de Thiessen à partir des différentes stations pluviométriques exploitées dans le Bassin Versant de la Kadey

c) Station pluviométrique d'Abong - Mbang

Pour la période allant de 1931 à 2015 (85 ans), la pluie annuelle à la station d'Abong-Mbang fluctue entre 863 mm (1934) pour les plus faibles valeurs et 2136 mm (1969) pour les fortes valeurs. La moyenne interannuelle obtenue pour cette période de référence est de 1627 ± 228 mm et la médiane est de 1776 mm (Tableau XII). On note que cette moyenne interannuelle à la station d'Abong-Mbang est inférieure à celles trouvées respectivement par Olivry (1986),

Sigha-Nkamdjou (1994) et Sighomnou (2004) qui sont de 1694 mm, 1682 mm et de 1667 mm (Tableau XIII).

d) Station pluviométrique de Yokadouma

Pendant la période comprise entre 1951 et 2013 (62 ans), les pluies annuelles à Yokadouma varient entre 1687 mm (1992) et 2304 mm (1966) pour une pluie moyenne interannuelle de 1895 ± 225 mm (Tableau XII). On note dans l'ensemble que cette moyenne interannuelle est supérieure à celles trouvées par Olivry (1986) qui est de 1670 mm et de Sigha-Nkamdjou (1994) qui propose 1606 mm à la même station (Tableau XIII).

Tableau XII : Domaine de variation des pluies annuelles dans les stations du BVK et celles environnantes

Stations	Min	Max	Moy	ET	Med	CV	Périodes	n
Bertoua	908	2 210	1 506	237,11	1 484,05	14	1935-2015	80
Batouri	1 321	2 754	1 761	224,34	1 760,75	13	1942-2015	73
Abong –Mbang	863	2 136	1 627	223,67	1 776,31	14	1931-2014	84
Yokadouma	1 687	2 704	1 870	375,57	1 933, 24	17	1951-2013	62

Légende : Moy : Moyenne ; Med : Médiane ; ET=Ecart-type ; Min : Minimum ; Max : Maximum ; CV : Coefficient de variation ; n : nombre d'année de la période d'étude.

Tableau XIII : Evolution comparative des pluies interannuelles dans les stations du BVK et celles voisines

Stations Pluviométriques	Olivry, (1986)	Sigha Nkamdjou, (1994)	Sighomnou, (2004)	Cette étude* (2020)
Bertoua	1625	1562	1535	1 506
Batouri	1572	1569	1523	1 761
Abong - Mbang	1694	1682	1667	1 627
Yokadouma	1670	1606	-	1 870

A l'échelle régionale du BVK et des stations voisines, on remarque que dans l'ensemble, la pluviométrie décroît progressivement du sud vers le nord (Figure III.2) comme c'est le cas observé dans la quasi-totalité des bassins versants du Plateau Sud camerounais (Hiez, 1977 ; Sigha-Nkamdjou, 1994 ; Ndam Ngoupayou et al., 1998 ; Sighomnou et al., 2005 ; Kpoumié et al., 2012 ; Kpoumié, 2015). Cette pluie annuelle augmente également de l'ouest vers l'est contrairement aux travaux de Sigha-Nkamdjou (1994) ; Paturel et al. (1998a, 1998b) ; Philippon et al. (2002) ; Sighomnou (2004) ; Sighomnou et al. (2007) qui observaient plutôt une

décroissance de l'ouest vers l'est, c'est-à-dire de l'océan atlantique (côte) vers l'intérieur du continent avec l'effet de continentalité.

On observe ainsi deux grands mouvements de la pluie annuelle dans le BVK (Figure III.2) :

- une diminution de la pluviométrie annuelle dans la partie avale (inférieure) du BVK qui passe de 1 740 mm à 1 520 mm sur l'axe Pana – Dimako et de 1 580 mm à 1 510 mm sur l'axe Batouri – Bertoua
- des variations latitudinales dans la partie supérieure du BVK marquées par une chute des isohyètes caractérisée par une sécheresse plus marquée au niveau de la zone de la savane péri-forestière de la zone d'étude (Figure III.2).

III.1.1.2. Evolution des pluies annuelles et recherche des ruptures

III.1.1.2.1. Station de Bertoua

L'analyse des variations de la pluie annuelle à Bertoua (Figure III.3) entre 1935 et 2015 montre une alternance d'années sèches et humides difficile à interpréter.

La courbe de tendance des précipitations annuelles durant cette période indique une tendance à la baisse.

Les variations des pluies annuelles et le calcul des indices pluviométriques pour cette période de référence 1935-2015 mettent en exergue deux grandes périodes climatiques (Figure III.4):

- 1935-2000 : période d'alternance d'années sèches et d'années humides ;
- 2001-2015 : période déficitaire alternant avec quelques années humides (2002,2009).

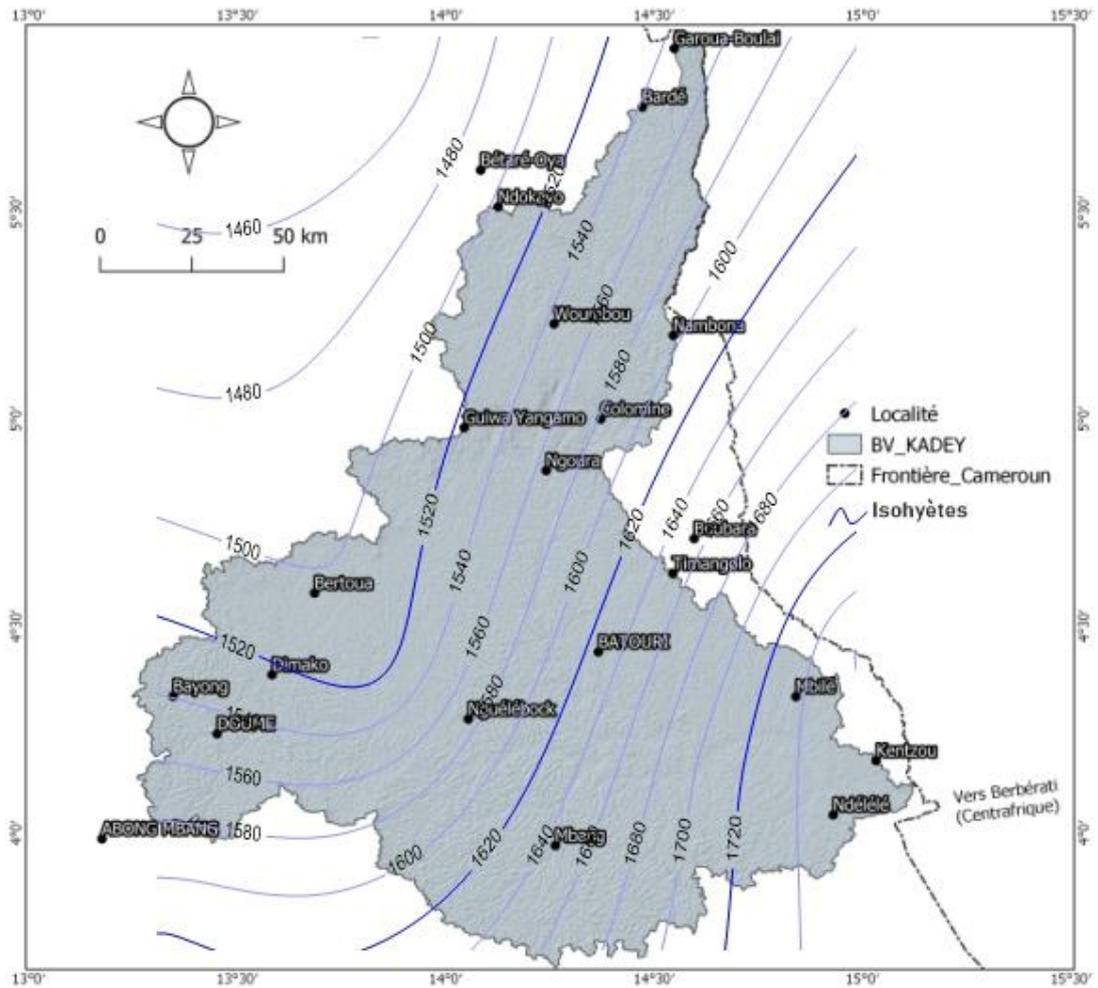


Figure III.2 : Esquisse des isohyètes interannuelles du bassin versant de la Kadey

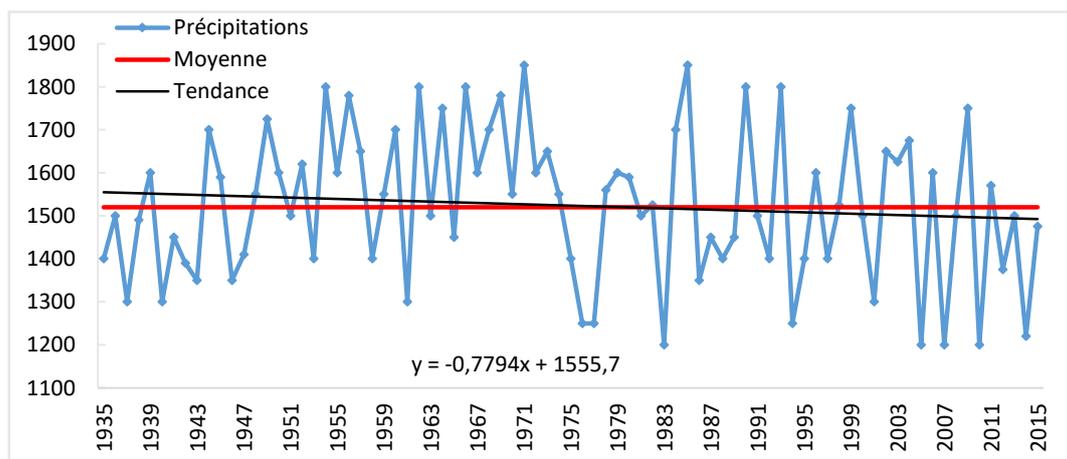


Figure III.3 : Variations des précipitations annuelles de Bertoua

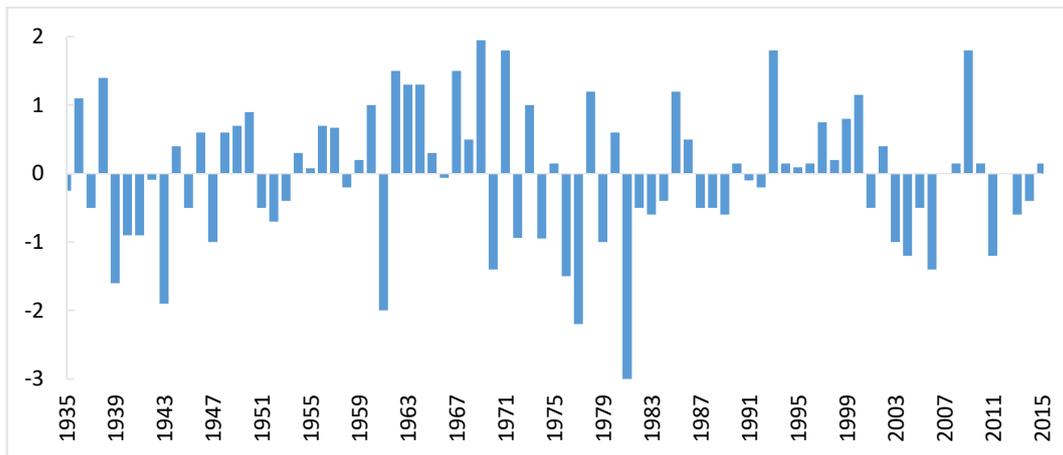


Figure III.4 : Variations des indices pluviométriques annuelles de Bertoua

L'application du test de Pettit à la variable pluie annuelle à la station de Bertoua révèle une rupture majeure entre 1980 / 1981. Durant cette période la pluie moyenne annuelle obtenue avant la rupture est de 1661 mm contre 1437 mm après la rupture. Celle-ci correspond à une diminution de la pluie annuelle de 224 mm représentant environ -13,50% de la baisse de la pluie annuelle durant cette période (Tableau XIV).

III.1.1.2.2. Station de Batouri

L'analyse des variations de la pluie annuelle à la station de Batouri entre 1942 et 2015 présente une alternance d'années sèches et humides (Figure III.5) assez difficile à interpréter. La courbe de tendance des précipitations annuelles durant cette période indique une tendance à la baisse.

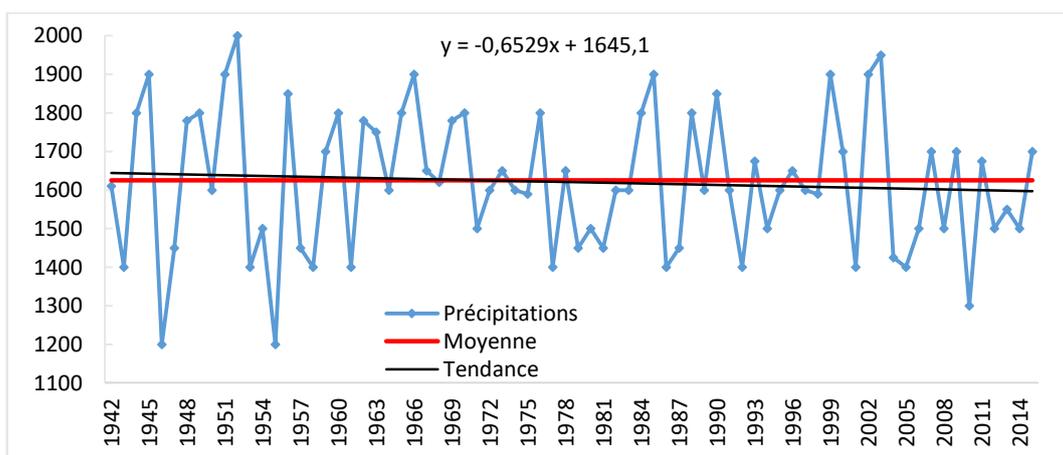


Figure III.5 : Variations des précipitations annuelles de Batouri

Le calcul des indices pluviométriques pour la période de référence 1942-2015 met en exergue trois périodes climatiques (Figure III.6) :

- 1942-1961: période d'alternance d'années sèches et humides ;
- 1962-1976 : période humide avec quelques années exceptionnellement sèches (1971, 1975) ;
- 1977 - 2015 : période déficitaire présentant des (04) années humides (1985, 1988, 1990, 1999, 2002 et 2003).

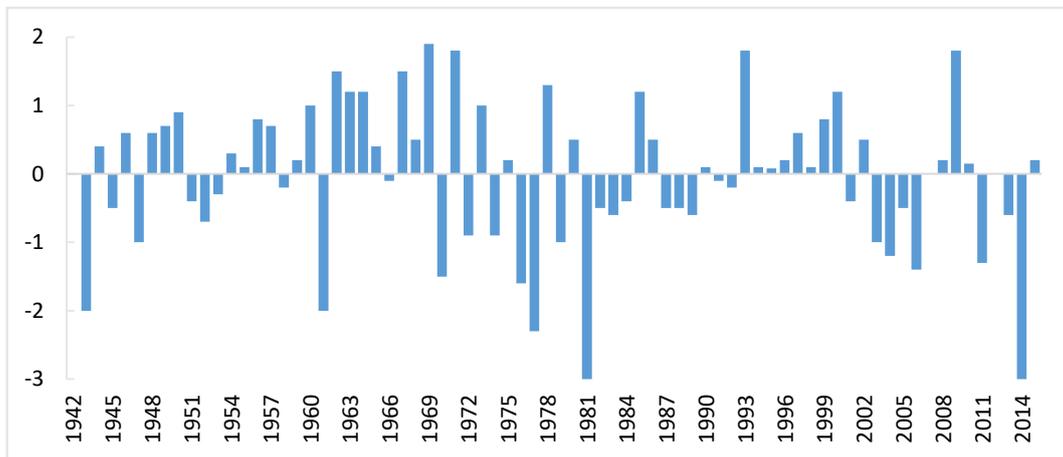


Figure III.6 : Variations des indices pluviométriques annuelles de Batouri

L'application du test de Pettit à la variable pluie annuelle à la station de Batouri révèle une rupture majeure au cours de l'année hydrologique 1980/1981.

La pluie moyenne annuelle obtenue avant la rupture est de 1603 mm contre 1397 après la rupture ; soit une diminution de la pluie annuelle de 206 mm représentant environ une baisse de -12,89% (Tableau XIV).

A l'échelle du BVK, on note dans l'ensemble une baisse des précipitations comprise entre -13,50 à Bertoua et -12,89 % à Batouri. Celle-ci correspond à une baisse d'environ 13,2% de la pluie annuelle.

III.1.1.2.3. Station d'Abong-Mbang

L'évolution des pluies annuelles enregistrées à la station météorologique d'Abong-Mbang pour la période de référence (1931-2015) montre une oscillation autour de la normale avec quelques successions de périodes sèches et humides (Figure III.7).

La droite de tendance générale des précipitations interannuelles est légèrement décroissante traduisant ainsi une baisse des précipitations au niveau de la station d'Abong-Mbang.

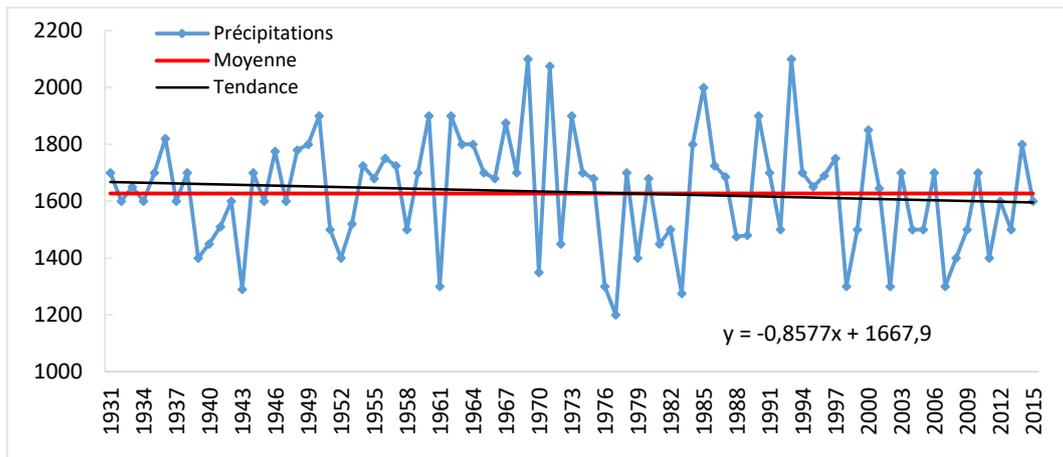


Figure III.7 : Variations des pluies annuelles d’Abong-Mbang

Le calcul et l’analyse des indices pluviométriques à cette station mettent en évidence trois (03) périodes climatiques bien distinctes (Figure III.8) :

- 1931-1947 qui correspond à une période relativement sèche avec présence de quelques années humides notamment 1932, 1936, 1939, 1944 et 1946 ;
- 1948-2000 qui est une période caractérisée par une alternance d’années humide et d’années sèches;
- 2001-2015 est une période relativement sèche avec néanmoins la présence des années humides (2002 et 2009).

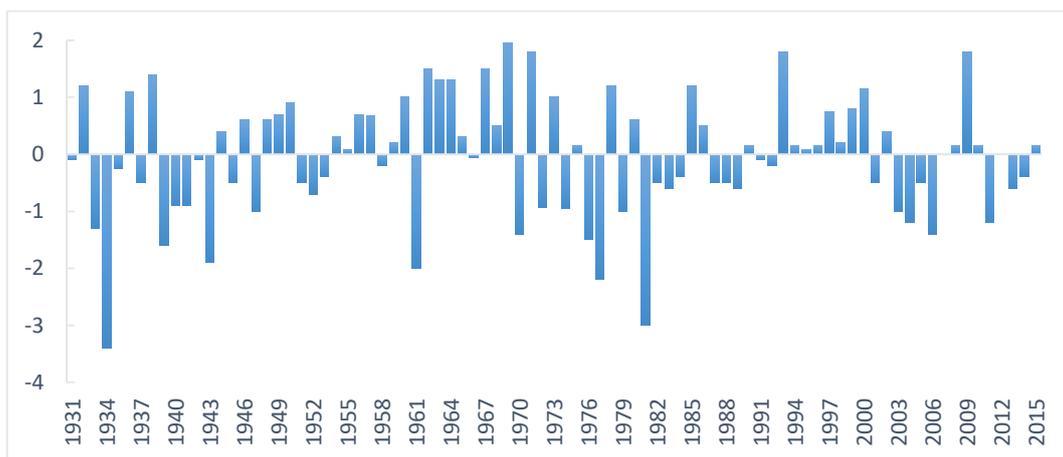


Figure III.8 : Variations des indices pluviométriques d’Abong-Mbang

L’application du test de Pettit à la variable pluie annuelle sur la longue chronique de données révèle une rupture durant l’année hydrologique 1969/1970.

La pluie moyenne annuelle obtenue avant la rupture est de 1645 mm contre 1491 après la rupture. On note ainsi une baisse de la pluie annuelle de 154 mm qui représente environ -9,32 % de diminution (Tableau XIV).

III.1.1.2.4. Station de Yokadouma

L'examen de la variation des pluies annuelles à la station de Yokadouma (Figure III.9) permet d'observer une alternance d'années humides et sèches au cours de la période de références 1951 - 2013.

La droite de tendance générale des précipitations interannuelles qui donne l'évolution de la pluie est légèrement décroissante durant cette période ; ce qui est synonyme d'une légère baisse des pluies comme le montrent les travaux de Sigha-Nkamdjou (1994).

Le calcul des indices pluviométriques annuels à la station de Yokadouma indiquent quatre périodes climatiques distinctes (Figure III.10) :

- 1951-1973 : qui se traduit par une période relativement humide avec plusieurs années sèches (1951, 1961, 1963 et 1970) ;
- 1974-1985 : période caractérisée par une alternance d'années sèches et humides ;
- 1986-2005 : période relativement sèche avec quelques années humides notamment 1999, 2002 et 2004;
- 2006-2013 : période actuelle relativement humide.

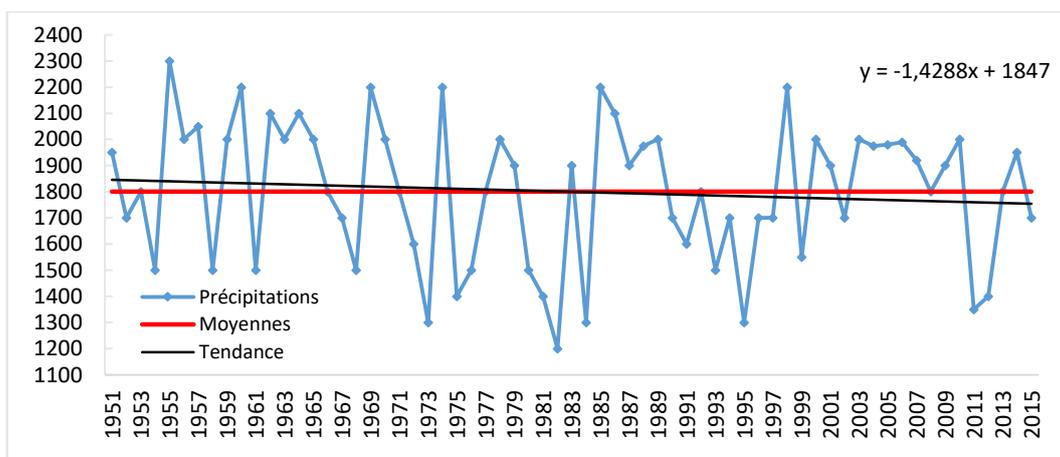


Figure III.9 : Variations des précipitations annuelles de Yokadouma

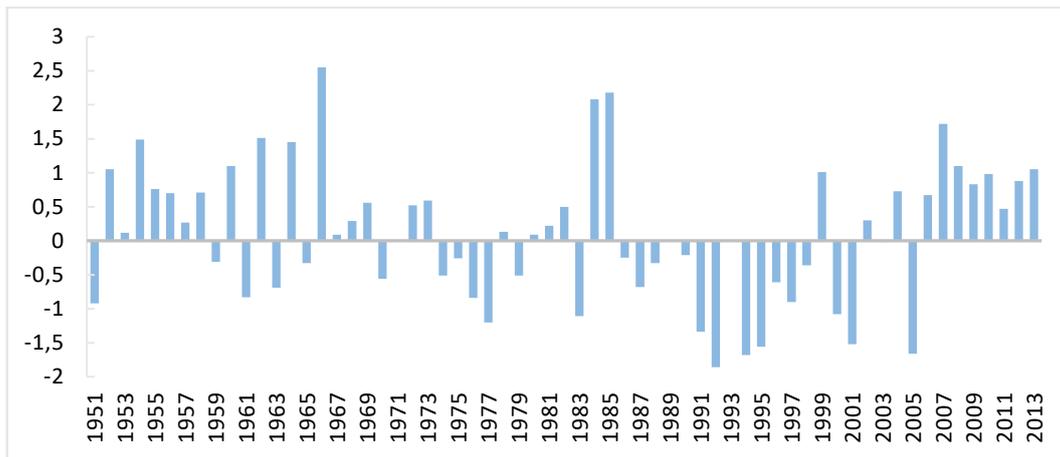


Figure III.10 : Variations des indices pluviométriques de Yokadouma

L'application du test de Pettit à la variable pluie annuelle sur la longue chronique de pluies annuelles révèle une rupture significative durant l'année hydrologique 1983/1984.

La pluie moyenne annuelle obtenue avant la rupture est de 2035 mm contre 1837 après la rupture. La baisse de la pluie annuelle ainsi enregistrée est de 198 mm correspondant à une perte d'environ -9,75 % (Tableau XIV).

Tableau XIV : Taux de variation des précipitations annuelles dans le bassin de la Kadey et ses environs avant et après ruptures en appliquant les tests de Pettit (1979) et d'Hubert et *al.* (1989)

Stations	Années de rupture	Précipitation Avant-rupture (mm)	Précipitation Après-rupture (mm)	Taux de variation (%)
Bertoua	1975-1976	1 660,96	1 436,76	-13,50
Batouri	1975-1976	1 603,90	1 397,19	-12,89
Abong-Mbang	1987-1988	1 645,03	1 491,79	-9,32
Yokadouma	1982-1983	2 035,61	1 837,12	-9,75

De façon générale, on remarque dans l'ensemble une baisse des précipitations annuelles comprise entre -9,32% (Abong-Mbang) à -13,50% (Bertoua) dans cette zone forestière de l'Est du Cameroun. Lesdits résultats s'insèrent dans l'intervalle de baisse de -10% à -20% proposée respectivement par Sighomnou (2004) et GWP-MINEE (2009b) sur l'ensemble du pays.

En le comparant aux résultats obtenus à l'échelle des différents grands bassins versants du Cameroun, on remarque que cette ampleur de diminution de la pluie annuelle est moins

importante que celle enregistrée en zone sahélienne dans le bassin de lac Tchad qui est de -36% (Liéno et *al.*, 1999 ; Liéno, 2001 ; UICN et CBLT, 2007) ; légèrement supérieure à celle du bassin du Niger qui est comprise entre -6% et -12% (Sighomnou, 2004). Ce déficit pluviométrique reste dans le même ordre de grandeur que celui du bassin de la Sanaga qui est d'environ -12% (Sighomnou, 2004 ; Sighomnou et *al.*, 2007 ; Dzana et *al.*, 2009) et du bassin des fleuves côtiers qui varie entre -20% à -2% (Liéno et *al.*, 2008 ; Ndam Ngoupayou et *al.*, 2009).

III.1.2. Pluies mensuelles et saisonnières

III.1.2.1. Domaine de variations des pluies mensuelles et saisonnières dans le BVK et ses environs

a) Station de Bertoua

Tout au long de la période comprise entre 1935 et 2015, les variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station pluviométrique de Bertoua montrent quatre (04) saisons inégalement réparties caractéristiques du climat équatorial de transition (Tableau XV et la Figure III.11) :

- une grande saison sèche allant de décembre à février avec le mois de janvier comme étant le plus sec avec 20 mm de pluie ;
- une grande saison de pluie qui s'étale sur la période allant de septembre à novembre avec le mois d'octobre comme le plus humide (287 mm) ;
- une petite saison sèche allant de juillet à août ; le mois le plus sec est celui de juillet avec 71 mm de pluie ;
- 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 (211 mm).

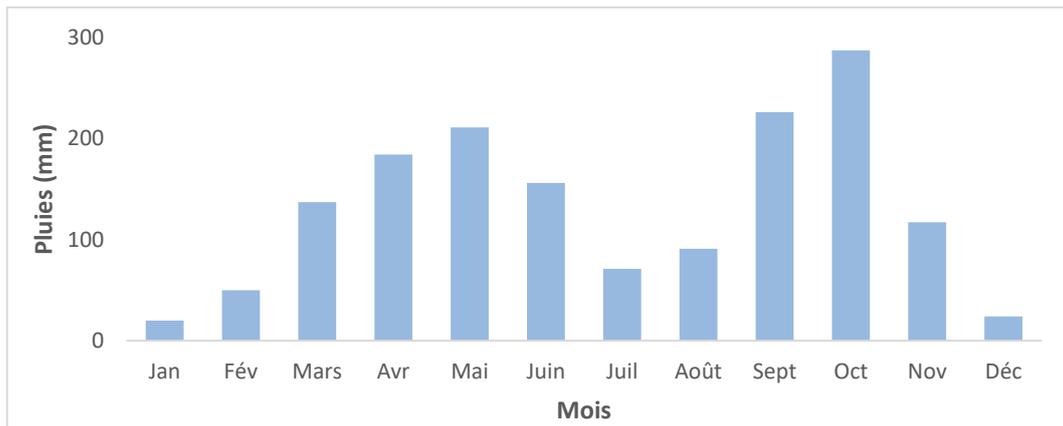


Figure III.11 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station de Bertoua (1935-2015)

L'analyse des hauteurs de pluies saisonnières à Bertoua montre que durant la petite saison de pluies (mars à juin), la moyenne des précipitations est estimée à 172 ± 63 mm alors que celle de la petite saison sèche (juillet et août) est estimée à 81 ± 56 mm. On note également que la pluie moyenne durant la grande saison sèche (décembre à février) est de $31 \pm 2,6$ mm contre 210 ± 95 mm durant la grande saison de pluie (septembre à novembre).

Durant cette période de référence, on remarque :

- 6 % des précipitations sont apportées au cours de la grande saison sèche ;
- 19 % durant la petite saison sèche ;
- 34 % lors de la petite saison des pluies ;
- 41 % pendant la grande saison des pluies.

b) Station de Batouri

Au cours de la période allant de 1942 à 2015, les variations des pluies mensuelles et saisonnières dans la station de Batouri présentent deux (02) saisons d'inégales importances caractéristiques du climat tropical de transition (Tableau XV et Figure III.12) :

- une saison sèche qui couvre cinq (05) mois de novembre à mars. Le mois le moins pluvieux est celui de décembre avec 6 mm de précipitations ;
- une saison de pluie comprise entre avril et octobre (07 mois) avec le mois d'août comme étant le plus pluvieux avec 289 mm de pluie.

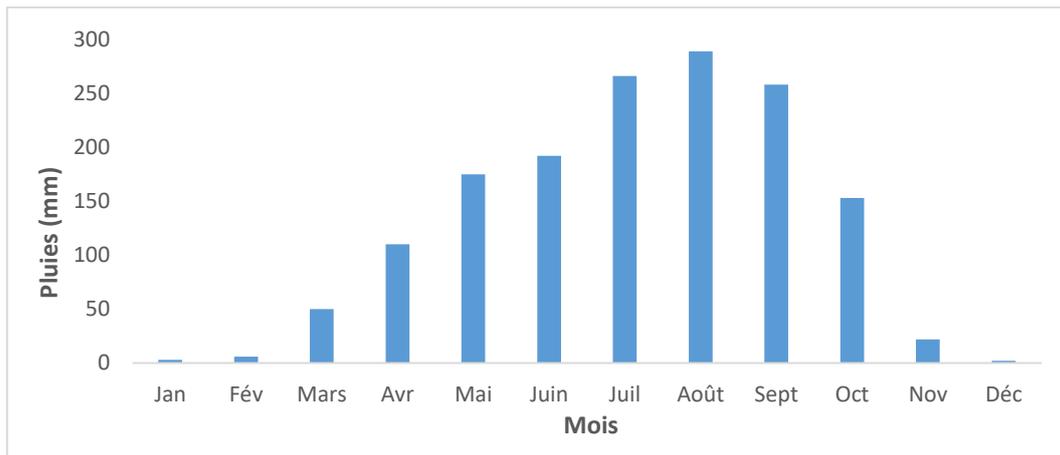


Figure III.12 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station de Batouri (1942-2015)

L'analyse de hauteurs de pluies saisonnières à la station de Batouri montre qu'au cours de la saison des pluies, la moyenne de la pluviométrie saisonnière est de 206 ± 18 mm contre $17 \pm 2,1$ mm pour la saison sèche.

Durant la période de référence qui se situe entre 1942 et 2015 à Batouri, la fluctuation des pluies saisonnières montre que :

- 94,37 % des précipitations sont apportées au cours de la saison des pluies ;
- 5,63 % pendant la saison sèche.

A l'échelle du BVK prenant en compte les stations pluviométrique de Batouri et de Bertoua, on note l'existence de deux (02) régimes climatiques assez différents. Un régime équatorial de transition (bimodal) à quatre (04) saisons à Bertoua qui passe à un régime tropical de transition (unimodal) à deux (02) saisons à Batouri (Figure III.13). Dans cette dernière station, les pics de pluies sont enregistrés durant les mois de juillet, août (289 mm) et septembre contre octobre (287 mm) et mai à la station de Bertoua (Figure III.13). Le mois de décembre reste le moins pluvieux dans les deux stations avec 6 mm à Batouri et 20 mm à Bertoua.

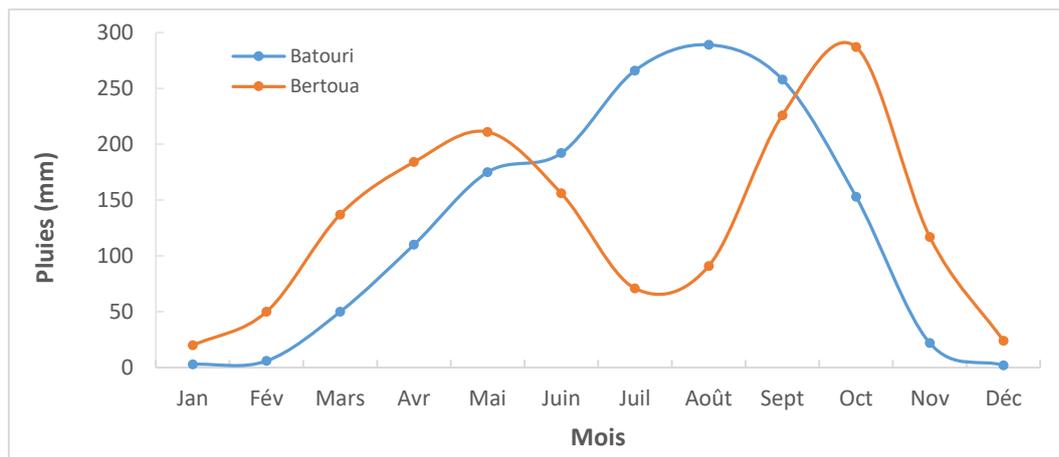


Figure III.13 : Variation des pluies mensuelles et saisonnières à l'échelle du BVK (Bertoua et de Batouri)

c) Station d'Abong-Mbang

De 1931 à 2015, les variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station d'Abong-Mbang montrent quatre (04) saisons inégalement réparties caractéristique du climat équatorial de transition comme à Bertoua (Tableau XV et la Figure III.14.).

On observe :

- une grande saison sèche couvrant les mois de décembre, janvier et février ; le mois le moins pluvieux est celui de janvier (23 mm) ;
- une grande saison de pluies qui s'étend de septembre à novembre avec le mois d'octobre (294 mm) comme étant le plus pluvieux ;
- une petite saison sèche (juillet et août) au cours de laquelle le mois de juillet (106 mm) est le moins pluvieux ;
- une petite saison de pluie qui dure de mars à juin et dont le mois le plus pluvieux est celui de mai avec 211 mm de pluie.

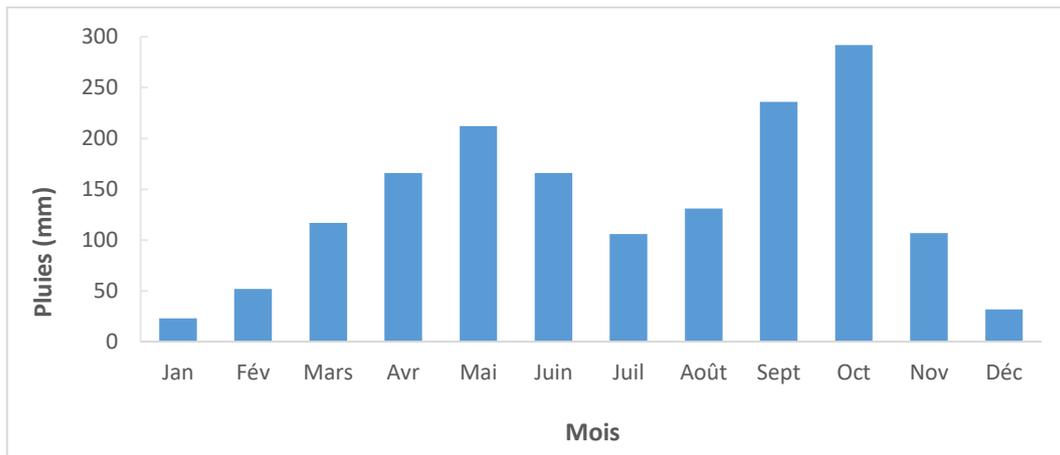


Figure III.14 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station d'Abong-Mbang (1931-2015)

L'analyse des pluies saisonnières à cette station indique que la moyenne de pluies de la petite saison des pluies est de 165 ± 69 mm et seulement de 118 ± 73 mm pour la petite saison sèche. En ce qui concerne la grande saison sèche, la moyenne de pluies saisonnières enregistrée est de 36 ± 39 mm et celle de la grande saison des pluies est de 211 ± 82 mm.

Ainsi, durant la période de référence comprise entre 1931 et 2015, l'étude des pluies saisonnières indique que :

- 38% des précipitations sont apportées pendant la petite saison des pluies ;
- 15% pendant la petite saison sèche ;
- 40% pendant la grande saison de pluie ;
- 7% pendant la grande saison sèche.

d) Station de Yokadouma

Pour la période comprise entre 1951 et 2015, l'examen des variations des pluies moyennes mensuelles et saisonnières à la station de Yokadouma montre deux saisons de pluie et deux saisons sèches inégalement réparties.

Ces quatre (04) saisons d'inégales importances sont caractéristiques du climat équatorial de transition (Olivry, 1986 ; Suchel, 1987) (Tableau XV et Figure III.15) avec :

- une grande saison sèche qui part de décembre à février avec le mois de janvier (27,8 mm) qui est le moins pluvieux ;

- une grande saison de pluies qui couvre les mois d'août, septembre, octobre et novembre. Le mois le plus pluvieux pour cette dernière est celui de septembre avec 237 mm de pluviométrie ;
- une petite saison sèche qui couvre les mois de juin et de juillet avec le mois de juin qui est le moins pluvieux avec 105,5 mm de pluie ;
- une petite saison de pluie qui dure de mars à mai et dont le mois le plus pluvieux est celui de mai avec 182 mm de pluie.

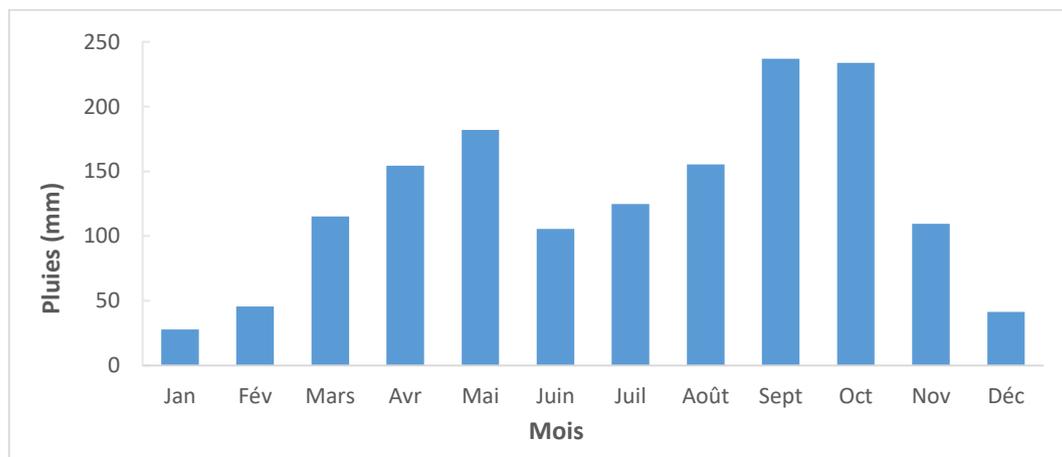


Figure III.15 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières à la station de Yokadouma (1951-2013)

L'examen des pluies saisonnières à cette station montre que les valeurs moyennes des pluies sont respectivement de $150,5 \pm 63$ mm pour la petite saison des pluies et $105,5 \pm 54$ mm pour la petite saison sèche. En ce qui concerne la grande saison sèche et la grande saison des pluies, elles sont respectivement de 38 ± 26 mm et de 172 ± 48 mm.

L'étude de ces pluies saisonnières à Yokadouma montre que :

- 29% des précipitations sont enregistrées durant la petite saison des pluies ;
- 8% au cours de la petite saison sèche ;
- 56% au cours de la grande saison de pluie ;
- 7% pendant la grande saison sèche.

L'analyse des variations de pluies mensuelles et saisonnières à l'échelle régionale du BVK et de ses environs montre l'existence de deux (02) régimes climatiques que sont : le régime équatorial de transition et le régime tropical de transition (Figure III.16). Ainsi, on note le

passage d'un climat équatorial de transition du sud (Yokadouma, Bertoua et Abong-Mbang) à un climat tropical de transition au nord de la région (Batouri).

Ces différents résultats sont de façon générale en conformité avec ceux proposés par Olivry (1986) ; Sigha-Nkamdjou (1994) ; Sighomnou (2004) et Liéno (2007) dans le plateau du sud Cameroun qui prend en compte la zone forestière du centre, du sud et de l'est du Cameroun.

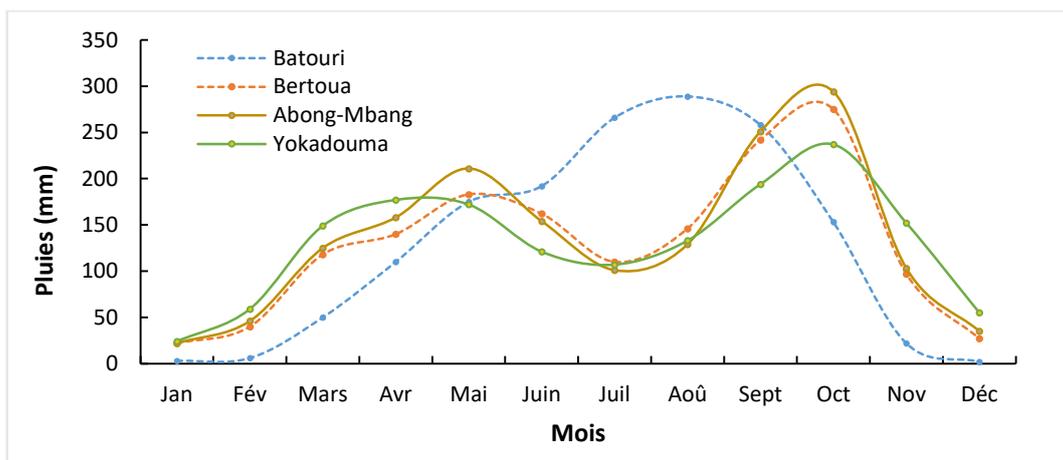


Figure III.16 : Variations des pluies mensuelles et saisonnières dans les différentes stations du BVK et ses environs

Ces résultats corroborent ceux trouvés sur l'ensemble du territoire par Kpoumié (2015) dans le bassin de la Sanaga et ses environs, Liéno (2007) dans les bassins de la Kienké, du Nyong, du Lom et du Mayo-Tsanaga, Ndam Ngoupayou et *al.* (1998) dans les bassins fluviaux et de la Sanaga. Ils s'intègrent également dans ceux enregistrés à l'échelle de l'Afrique Centrale et de l'Ouest (Figure III.17) où les différents auteurs mentionnent le passage du climat équatorial au climat tropical du sud vers le nord (Orange, 1992 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Bigot, 1997 ; Gautier et *al.*, 1998 ; Paturel et *al.*, 1996 et 1998 ; Servat et *al.*, 1998 ; Sultan et *al.*, 2001 et 2005 ; Lebel et Vischel, 2005 ; Liéno, 2007 ; Soro et *al.*, 2011 ; Otchoumou et *al.*, 2012).

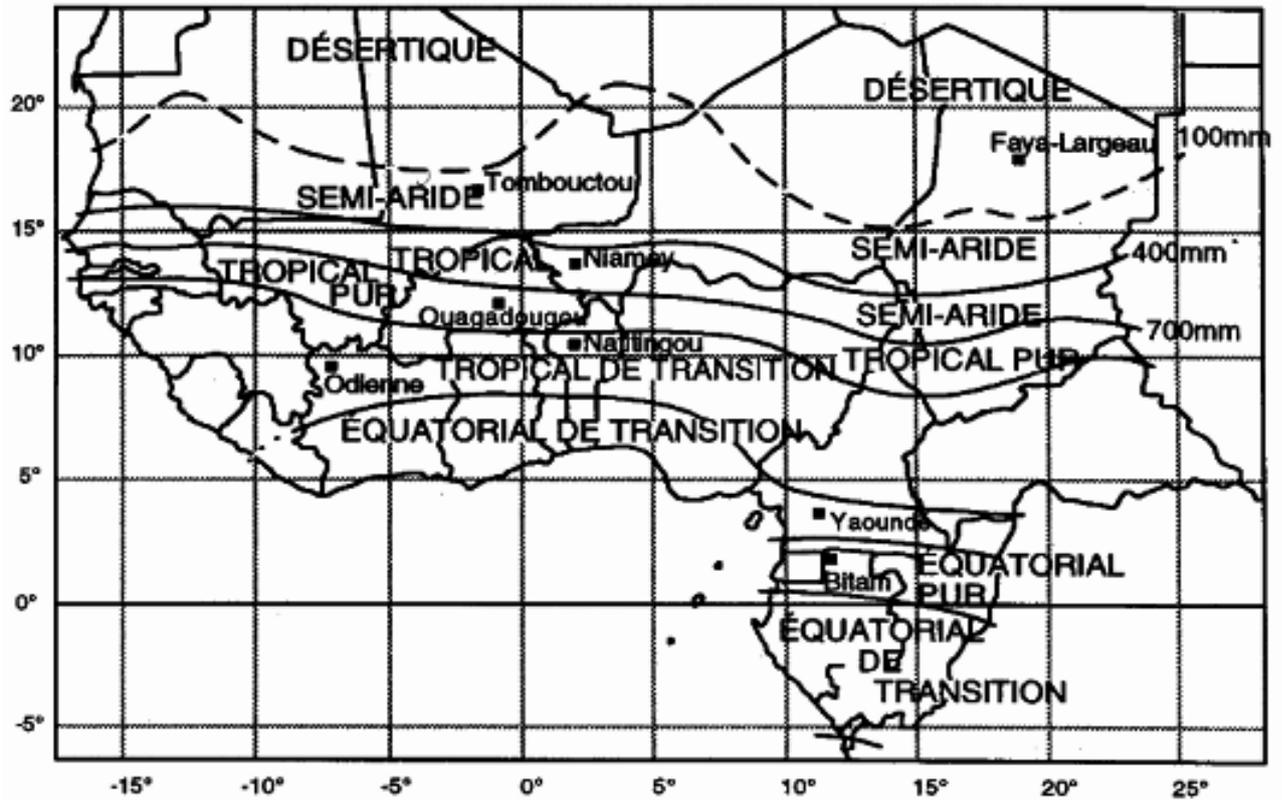


Figure III.17 : Répartition géographique des types de climats en Afrique de l’Ouest et du Centre (d’après Liéno, 2007, modifiée)

III.1.2.2. Evolution des pluies mensuelles et recherche des ruptures dans le BVK et ses environs

III.1.2.2.1. Station de Bertoua

L’application du test de Pettit à la variable pluie mensuelle à cette station indique des ruptures caractérisées par des hausses et/ou des baisses pendant les mois de février 1976, avril 2010, mai 1991 et août 1979.

Les hausses des précipitations sont enregistrées en février 1976 et Avril 2010 avec des augmentations respectives de 19 mm (20%) et de 85 mm (54%) de la pluie mensuelle. Les ruptures de mai 1991 et d’août 1979 quant à elles indiquent des baisses respectives des pluies mensuelles de 28 mm (- 10%) et de 44,82 mm (-22%) (Figure III.18). On remarque que le pic de la petite saison de pluies a augmenté et passe du mois de mai à celui d’avril.

Tableau XV : Variations des pluies mensuelles et saisonnières dans les stations pluviométriques du BVK et de celles avoisinantes

Stations	Varia.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Bertoua (1935-2015)	Min	3	5	32	60	89	41	5	5	87	203	9	0	40
	Max	99	197	314	382	353	328	169	287	433	501	273	98	293
	Moy	20	50	137	184	211	156	71	91	226	287	117	24	152
	Med	14	41	128	178	212	151	66	83	221	278	110	17	129
	ET	23	42	55	67	60	63	46	59	73	71	57	23	53
	N	80												
Batouri (1942-2015)	Min	0	0	7	53	63	58	16	5	95	54	6	0	32
	Max	134	182	234	289	353	248	231	300	397	407	282	105	264
	Moy	75	84	118	154	176	127	113	128	204	223	110	75	126
	Med	102	108	129	160	195	132	121	136	217	226	137	103	132
	ET	21	37	51	57	56	44	45	58	63	74	53	24	50
	N	73												
Abong-Mbang (1931-2015)	Min	0	0	11	30	88	56	0	13	18	27	14	0	21
	Max	98	184	304	326	389	379	434	375	525	514	289	134	329
	Moy	23	52	117	166	212	166	106	131	236	292	107	32	137
	Med	16	32	113	160	206	.	98	121	222	287	102	24	128
	ET	24	48	60	56	66	60	66	78	95	85	57	35	61
	N	84												
Yokadouma (1951-2013)	Min	31	46	87	102	127	149	165	174	202	189	198	72	155
	Max	86	97	311	332	419	429	434	475	525	514	289	134	329
	Moy	42	66	134	199	255	301	317	333	237	327	209	81	172
	ET	25	44	62	57	66	59	69	77	99	87	54	36	63
	Med	41	52	113	160	208	215	249	231	222	217	101	82	128
	N	47												
BVK (1935-2015)	Min	0	0	34	81	118	75	20	11	74	123	17	0	48
	Max	84	154	259	267	338	302	207	270	442	398	240	117	257
	Moy	20	47	119	164	205	155	99	125	229	267	109	28	131
	Med	15	38	117	168	184	152	95	114	231	284	105	26	127
	ET	18	34	44	41	41	34	44	52	63	52	43	0	48
	N	80												

Légende : Varia. : Variations ; Min : Minimum ; Max : Maximum ; Moy : Moyenne ; Med : Médiane ; ET : Ecart-type ; n : Nombre d'année

Les autres mois de décembre, janvier et mars durant la grande saison sèche ; juin et juillet durant la petite saison sèche et septembre, octobre et novembre durant la grande saison de pluie, ne présentent pas de rupture significative.

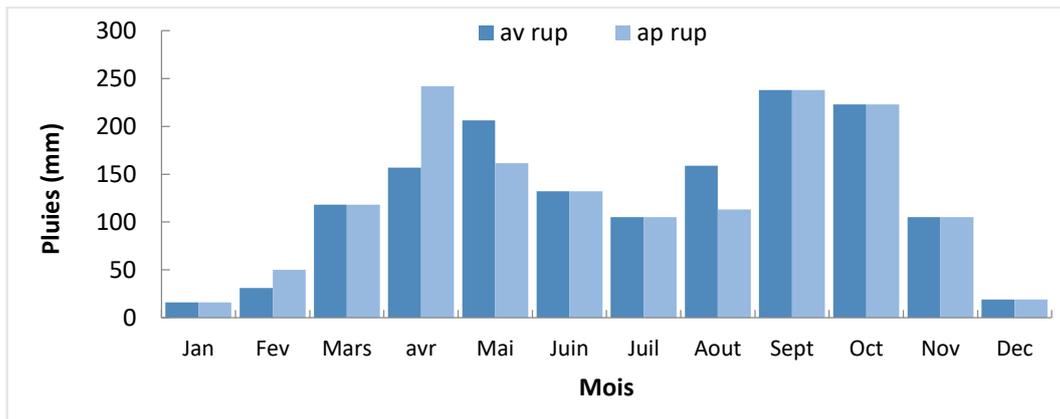


Figure III.18 : Histogramme des pluies mensuelles observées avant la rupture (Av rup) et après la rupture (Ap rup) à Bertoua

III.1.2.2.2. Station de Batouri

L'application du test de Pettit à la variable pluie mensuelle à cette station présente des ruptures en avril 2011, juin 1991 et d'août 1979. Les hausses des précipitations sont enregistrées en Avril 2011 et août 1979 avec des hausses respectives de 20 mm (18%) et de 144 mm (57%) de la pluviométrie. La rupture de juin 1991 quant à elle indique une baisse des pluies de 25 mm soit de - 11% (Figure III.19).

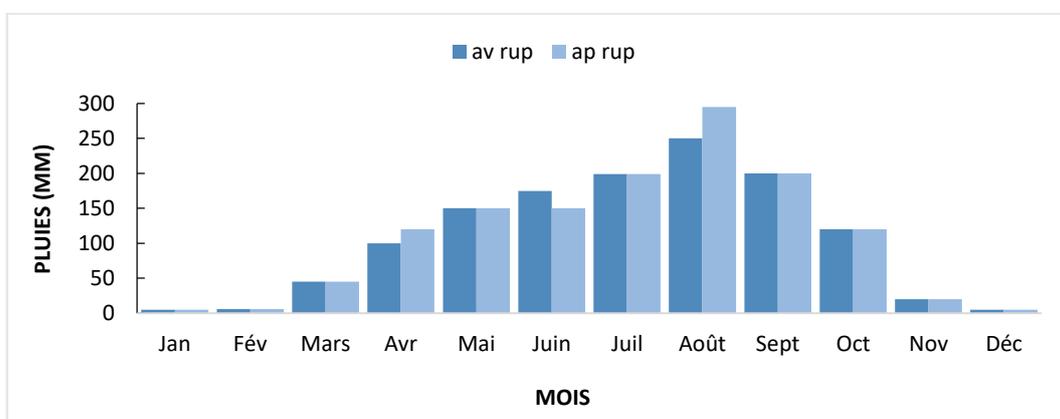


Figure III.19 : Histogramme des précipitations mensuelles avant la rupture (Av-rup) et après la rupture (Ap-rup) à Batouri.

III.1.2.2.3. Station d'Abong-Mbang

L'application du test de Pettit à la variable pluie mensuelle à la station d'Abong-Mbang laisse observer des ruptures en février 1979, juin 1956 et novembre 1954. Des baisses respectives de pluies mensuelles de l'ordre de 57 mm (-66%), de 39 mm (-14%) et de 25 mm (-10%) sont

enregistrées pour les mois de février, juin et novembre. Les ruptures de juillet 1967 et août 1976 indiquent quant à elles des hausses importantes de pluies mensuelles de 61 mm (59%) et de 73 mm (69%) respectivement (Figure III.20). Les mois de décembre, janvier, mars, avril mai, septembre et octobre ne présentent aucune rupture.

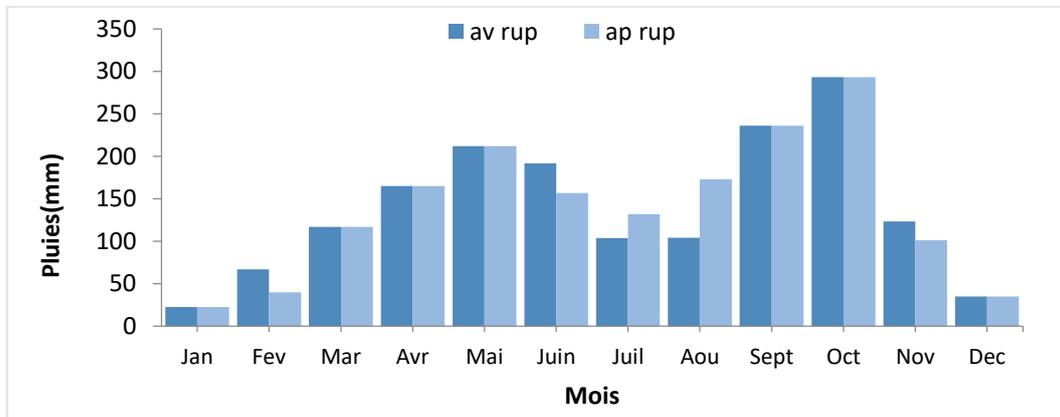


Figure III.20 : Histogramme des précipitations mensuelles enregistrées à Abong-Mbang avant la rupture (Av-rup) et après la rupture (Ap-rup).

III.1.2.2.4. Station de Yokadouma

L'application du test de Pettit à la variable pluie mensuelle dans cette station montre des ruptures pendant les mois d'avril 2005, de juin 1951 et août 1998. La comparaison des valeurs de pluies mensuelles avant et après rupture permet d'observer des hausses de 64 mm (41%) et de 73 mm (67%) respectivement pour les mois d'avril 2005 et de juin 1951 et une baisse des pluies d'environ 45 mm, soit -35% durant le mois d'août 1998 (Figure III.21).

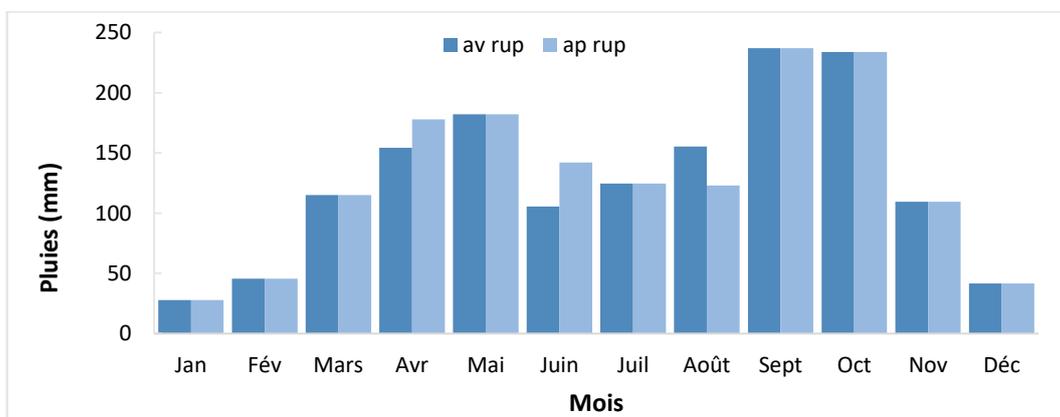


Figure III.21 : Histogramme des précipitations mensuelles observées à Yokadouma avant la rupture (Av-rup) et après la rupture (Ap-rup).

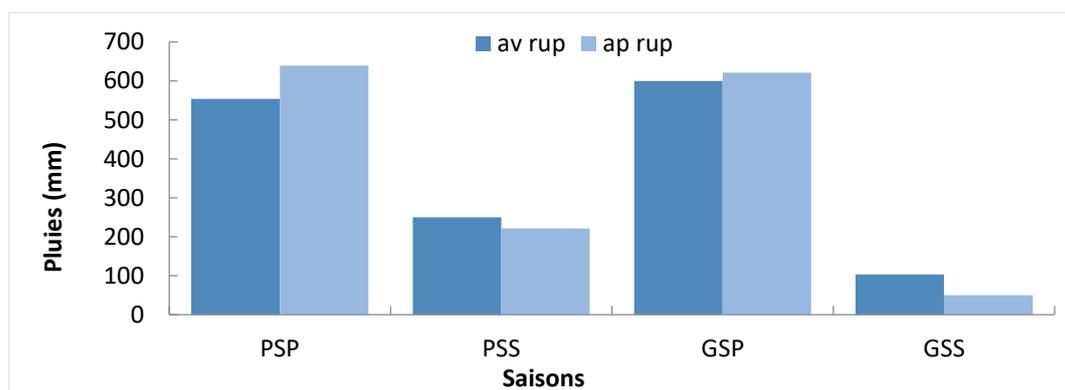
Ces résultats sont comparables à ceux effectués dans la plupart des travaux sur le régime des précipitations au Cameroun par Ndam Ngoupayou et *al.* (1998), Sighomnou (2004), Liéno (2007), Sighomnou et *al.* (2007), Ndam Ngoupayou et *al.* (2008), Mfochivé (2011), Kpoumié (2012). Les déficits des pluies sont de l'ordre de 43% dans bassin du Ntem, 48% dans le Nyong, 42% dans la Kienké, 54% dans le Mayo Tsanaga (Liéno, 2007) et de 24% dans le Lom (Sighomnou et *al.*, 2007). L'accroissement des pluies est encore plus important avant et après la date de rupture. On enregistre des taux de 52 % dans le bassin versant du Nyong (Mfochivé, 2011 ; Kpoumié, 2015), 83 % dans le Ntem (Liéno, 2007), et de 31% dans le Lom (Sighomnou et *al.*, 2007).

III.1.3. Evolution des pluies saisonnières et recherche des ruptures dans le BVK et ses environs

III.1.3.1. Station de Bertoua

L'application du test de Pettit à la variable pluie saisonnière révèle une rupture pendant la petite saison des pluies en 1963, la petite saison sèche en 1961 et durant la grande saison sèche en 1946.

La rupture de la petite saison de pluies en 1963 montre une hausse pluviométrique d'environ 85 mm (18%). Celles de 1961 et de 1946 montrent quant à elles des baisses de la pluviométrie mensuelles d'environ 32 mm (-13%) au cours de la petite saison sèche et de 53 mm (-22%) pendant la grande saison sèche (Figure III.22).

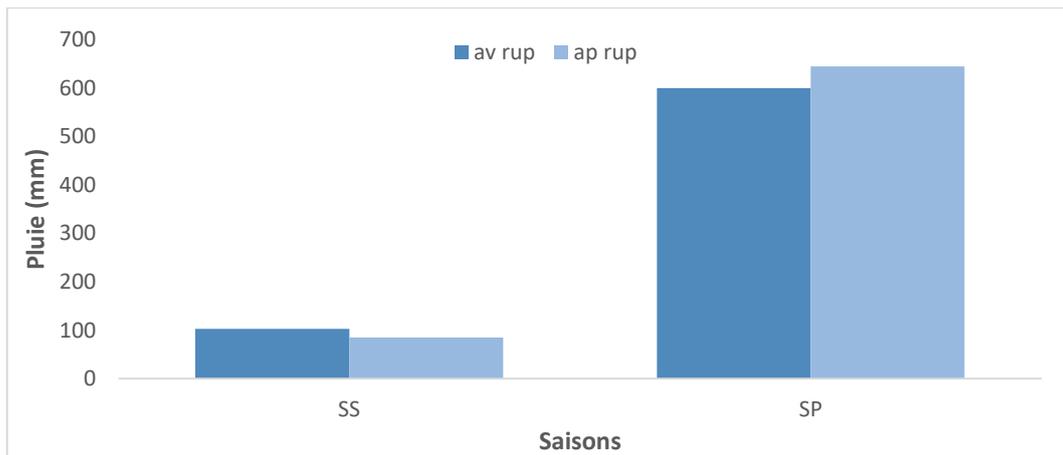


Légende : GSS : Grande Saison Sèche ; PSS : Petite Saison Sèche ; PSP : Petite Saison des Pluies ; GSP : Grande Saison des Pluies ; (Av-rup) : Avant la rupture ; (Ap-rup) : Après la rupture

Figure III.22 : Evolution des pluies à saisonnières à Bertoua avant et après rupture de 1935 à 2015

III.1.3.2. Station de Batouri

L'application du test de Pettit à la variable pluie saisonnière révèle une double rupture pendant la saison des pluies en 1960 et en 1971 et une rupture en 1966 durant la saison sèche. Les ruptures de 1960 et 1971 montrent une hausse pluviométrique de 45 mm (19%) et de 63 mm (25%) pendant la saison des pluies. Il existe également une rupture en 1966 montrant une baisse de la pluviométrie de 18 mm (-17%) au cours de la saison sèche (Figure III.23).

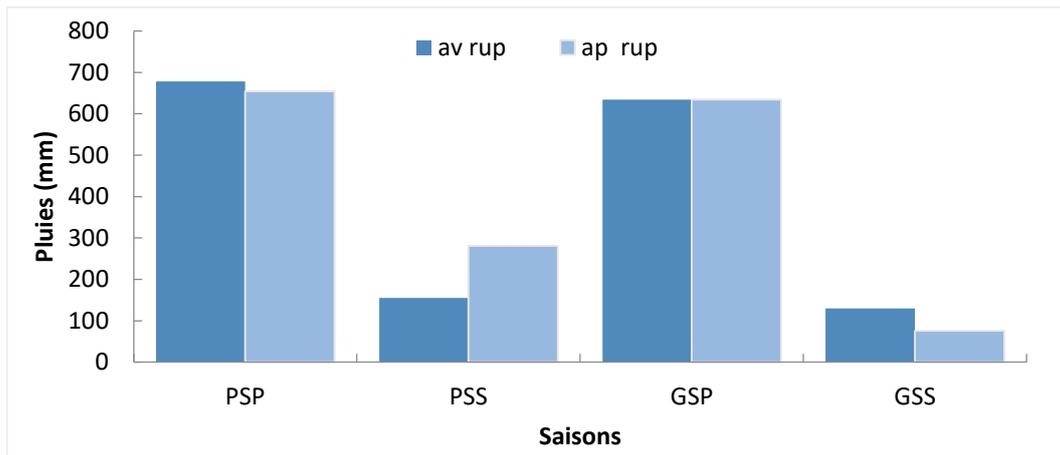


Légende : SS : Saison Sèche ; SP : Saison des Pluies ; (Av rup) : Avant la rupture ; (Ap rup) : Après la rupture

Figure III.23 : Evolution des pluies à saisonnières à Batouri avant et après rupture de 1942 à 2015

III.1.3.3. Station d'Abong-Mbang

L'application du test de Pettit à la variable pluie saisonnière montre qu'il existe des ruptures pendant la petite saison des pluies en 2002, la petite saison sèche en 1968 et la grande saison sèche en 1978. La rupture survenue en 2002 indique une baisse des pluies de 27 mm (-11%) au cours de la petite saison des pluies. Cette baisse est encore plus accentuée pendant la grande saison sèche et repérable par la rupture de 1978. Ce déficit pluviométrique est de 54 mm, soit -42% (Figure III.24). En revanche, la petite saison sèche connaît un accroissement de sa pluviométrie de 69 mm correspondant à environ 38% marquée par la rupture de 1968.



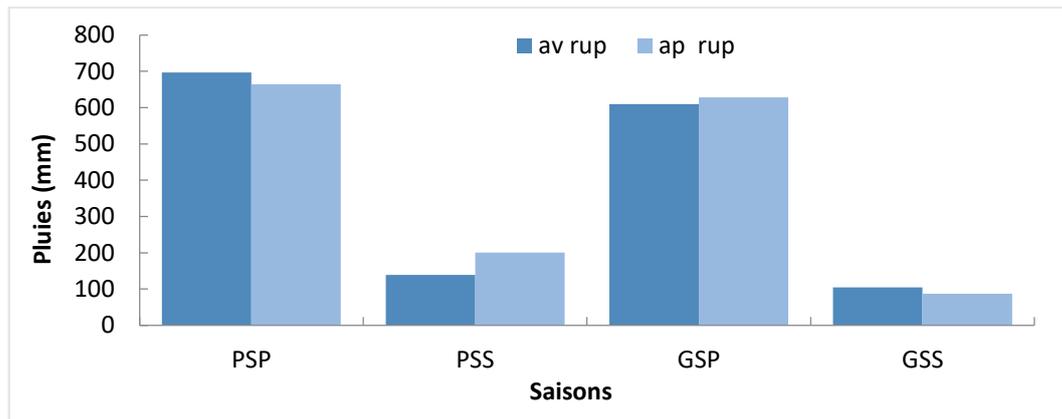
Légende : GSS : Grande Saison Sèche ; PSS : Petite Saison Sèche ; PSP : Petite Saison des Pluies ; GSP : Grande Saison des Pluies ; (Av-rup) : Avant la rupture ; (Ap-rup) : Après la rupture

Figure III.24 : Evolution des pluies à saisonnières à Abong-Mbang avant et après rupture de 1931 à 2015

III.1.3.4. Station de Yokadouma

L'application du test de Pettit à la variable pluie saisonnière montre des ruptures pendant la petite saison des pluies de l'année 1990, pendant la petite saison sèche de 1983, au cours de la grande saison sèche de l'année 1956 et enfin durant la grande saison de pluie de l'année 1978.

Lorsqu'on compare les pluies saisonnières avant et après rupture pendant ces années, on remarque que la rupture survenue en 1990 est caractérisée par une baisse des précipitations de 33 mm (- 12%) pendant la petite saison de pluie tandis que celle survenue en 1983 pendant la petite saison sèche montre une augmentation des pluies d'environ 62 mm (18%). La rupture de la grande saison sèche de 1956 traduit ainsi un déficit pluviométrique de 18 mm (- 17%) alors que celle de la grande saison de pluie en 1978 montre une augmentation des précipitations de 20 mm, soit + 8% (Figure III.25).



Légende : GSS : Grande Saison Sèche ; PSS : Petite Saison Sèche ; PSP : Petite Saison des Pluies ; GSP : Grande Saison des Pluies ; (Av-rup) : Avant la rupture ; (Ap-rup) : Après la rupture

Figure III.25 : Evolution des pluies à saisonnières à Yokadouma avant et après rupture de 1951 à 2013

Au cours de la présente étude, les différents tests statistiques de rupture sur les séries saisonnières des précipitations à l'échelle pluriannuelle et consignés dans le tableau XVI montrent que, dans l'ensemble, sur 16 séries étudiées, il ressort que seule une série ne présente pas de rupture appréciable. La station d'Abong-Mbang au régime bimodal ne présente pas de rupture significative pendant la grande saison de pluie. La station de Yokadouma présente une rupture du test d'Hubert en 1960/61 ou 1962/63 et 1964/65 pour la série de la saison sèche. Les stations de Bertoua et Batouri présentent à leur tour des ruptures plus tardives en ce qui concerne la grande saison sèche. Elles sont respectivement obtenues en 1975/1976 et 1972/1973. Les précipitations de la saison sèche contrairement à la saison de pluie sont les plus affectées par des ruptures dans les séries des données.

III.2. Variations spatio-temporelles des températures dans le BVK et ses environs

III.2.1. Températures annuelles

III.2.1.1. Domaines de variations des températures annuelles dans le BVK et ses environs

A la station de Bertoua, pendant la période 1939-2015 (76 ans), la température annuelle fluctue entre 24°C (2010) et 26 °C (2013). La température moyenne interannuelle est de $25 \pm 0,42^\circ\text{C}$ (Tableau XVII).

La variation de la température à la station de Batouri au cours de la période comprise entre 1966-2014 (48 ans), tourne autour de 23°C (2010) et 24 °C (2011). La température moyenne interannuelle est de $23 \pm 0,55^\circ\text{C}$ (Tableau XVII).

Tableau XVI : Résultats des tests Buishand, Pettit, Lee et Heghinian et Hubert dans les séries pluviométriques saisonnières du bassin versant de la Kadey entre 1935 et 2015

Stations	Saison	Buishand	Pettit	Lee et Heghinian	Hubert
Yokadouma	GSP	A à 99 et 95%, R à 90%	1983/84	PR	PR
	PSP	A à 99% et R à 95 et 90%	1975/76	1975/76	1975/76
	GSS	NV	1972/73	1975/76	1972/73
	PSS	NV	PR	PR	PR
Abong-Mbang	GSP	PR	PR	PR	PR
	PSP	A à 99 et 95%, R à 90%	PR	1989/90	1989/90
	GSS	NV	1983/84	1983/84	1983/84
	PSS	NV	1978/79	1978/79	2001/02
Bertoua	GSP	NV	1972/73	1979/80	1975/76
	PSP	A à 99 et 95%, R à 90%	1976/77	PR	PR
	GSS	NV	1975/76	1975/76	1975/76
	PSS	V	PR	1999/00	PR
Batouri	SP	A à 99% et R à 95 et 90%	1982/83	1982/83	1982/83
	SS	NV	1981/82	1960/61	1962/63

SP : Saison des Pluies ; **SS** : Saison Sèche ; **GSP** : Grande Saison des Pluies ; **GSS** : Grande Saison Sèche ; **PSP** : Petite Saison des Pluies ; **PSS** : Petite Saison Sèche ; **NV** : Hypothèse de test Non Validée ; **V** : Hypothèse de test Validé ; **PR** : Pas de Rupture confirmée par les tests.

Le BVK présente une température interannuelle (1939 - 2015) de $25 \pm 0,63^\circ\text{C}$ pour un minimum de $23,5^\circ\text{C}$ en 1948 et un maximum de 26°C en 2010 (Figure III.26).

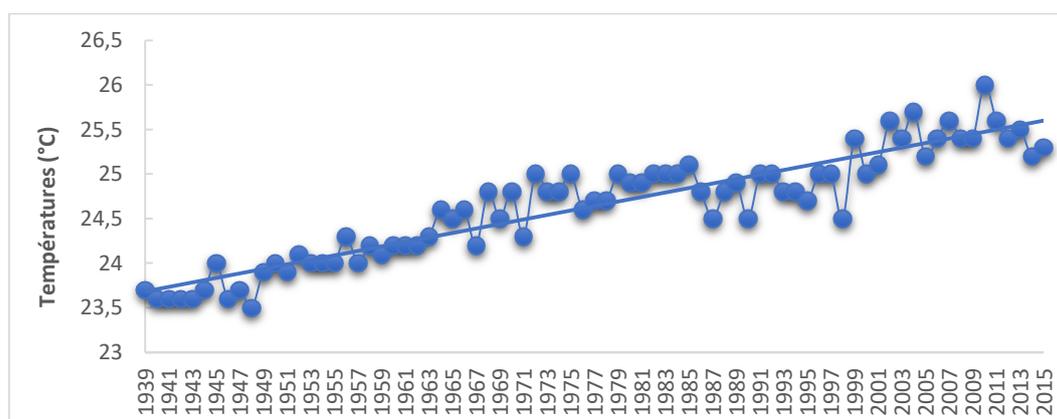


Figure III.26 : Evolution des températures interannuelles dans le BVK au cours de la période allant de 1939 à 2015

La température interannuelle de la station d'Abong-Mbang pour la période 1980-2010 (31 ans) est de $24 \pm 0,59^{\circ}\text{C}$ (Tableau XVII) ; les valeurs extrêmes sont respectivement de 22°C (1981) et 25°C (2010).

Durant la période 1971-2013 (42 ans), la température annuelle à la station de Yokadouma varie entre 22°C (1971) et 25°C (2013) pour une température moyenne interannuelle de $24 \pm 0,42^{\circ}\text{C}$ (Tableau XVII). Le coefficient de variation est de 2 %.

Tableau XVII : Domaine de variation des températures annuelles dans les stations du BVK et celles environnantes

Stations	Min	Max	Moy	ET	Med	CV	Périodes	n
Bertoua	24	26	25	3,87	25,05	1,98	1939-2012	73
Batouri	24	26	25	4,34	25,75	2	1966-2014	48
Abong -Mbang	22	25	24	3,81	23,31	2	1980-2010	31
Yokadouma	22	25	24	4,01	23,45	2	1971-2013	42

III.2.1.2. Evolution temporelle des températures annuelles et recherche des ruptures

Les températures annuelles enregistrées dans les quatre (04) stations étudiées présentent dans l'ensemble, une augmentation de l'ordre $0,5^{\circ}\text{C}$. On passe en moyenne de 24°C (Olivry, 1986) à $24,45^{\circ}\text{C}$, soit environ une hausse de 1,7 %. Ces résultats sont comparables à ceux trouvés par Sighomnou (2004) qui sont de $+ 0,2^{\circ}\text{C}$ depuis les années 1970 et de $+ 0,4^{\circ}\text{C}$ durant la dernière décennie (2010), par rapport à 1961-1990 dans tout le territoire du Cameroun (Lebel et Vischel, 2005 ; Liéno, 2007 ; Kpoumié, 2015).

L'application du test de Pettit (1979) à la variable température annuelle sur une longue chronique de données (76 ans) ne révèle pas la présence d'une rupture significative pour les quatre (04) stations susmentionnées.

III.2.2. Températures mensuelles

Pendant la période 1939 - 2012, la température mensuelle à la station de Bertoua se situe entre 24°C (juillet) et 26°C (mars) pour une moyenne mensuelle de $25 \pm 0,33^{\circ}\text{C}$. Le coefficient de variation est de 1,98% pour une amplitude diurne de 2°C .

La station de Batouri quant à elle, présente un maximum de températures mensuelles de 26°C (février) et un minimum de 24°C (juillet) pour une moyenne mensuelle de $25 \pm 0,59^\circ\text{C}$ durant la période 1966 à 2014.

Dans le BVK, les températures moyennes mensuelles (1939 et 2015) les plus faibles sont généralement enregistrées pendant les mois de juillet (23°C) alors que les plus élevées sont observées en mars et février (26°C). La moyenne des températures mensuelles est de $24,5 \pm 0,62^\circ\text{C}$ pour un coefficient de variation de 2,5 % (Figure III.27).

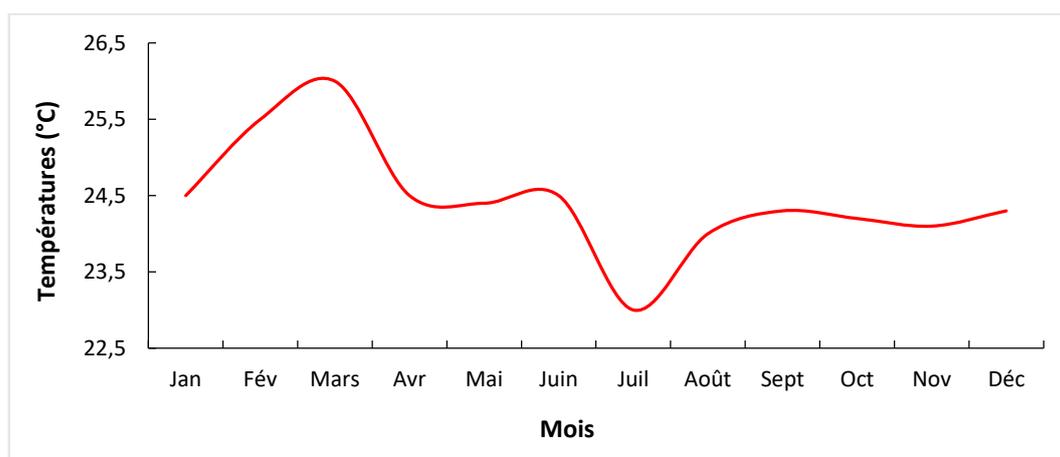


Figure III.27 : Evolution des températures moyennes mensuelles dans le BVK au cours de la période allant de 1939 à 2015

Elles fluctuent généralement entre 23°C (juillet) et 25°C (mars) à Abong-Mbang durant la période qui s'étale entre 1980 et 2010. La moyenne mensuelle de $24 \pm 0,59^\circ\text{C}$ pour un coefficient de variation de 2 %.

Durant la période comprise entre 1971-2013 (42 ans), les températures moyennes mensuelles varient entre 23°C (juillet) et 25°C (février) pour une moyenne mensuelle est de $24 \pm 0,64^\circ\text{C}$ à la station de Yokadouma.

Conclusion

Le but de ce chapitre a été de réactualiser tout d'abord les paramètres climatiques (pluies et températures) annuelles, mensuelles et saisonnières et par la suite, faire une analyse des fluctuations dans l'espace et le temps de ces paramètres à différents pas de temps dans les stations du BVK (Bertoua et Batouri) et dans celles situées aux alentours (Abong-Mbang et Yokadouma) de ce bassin versant. Il ressort donc de cette étude que durant la période d'étude,

la pluie annuelle varie entre 908 et 2210 mm à la station de Bertoua pour un coefficient de variation est de 14 %. A la station de Batouri, cette fluctuation oscille entre 1321 et 2754 mm pour un coefficient de variation de 13%. A l'échelle du bassin versant de la Kadey (Bertoua et Batouri), la pluie moyenne interannuelle obtenue par la méthode arithmétique est de 1633 mm alors qu'elle est de 1657 mm pour la méthode des polygones de Thiessen. L'analyse des variations de la pluie annuelle montre une alternance d'années sèches et humides difficile à interpréter pour l'ensemble des stations du bassin. L'application du test de Pettit à la variable pluie annuelle révèle une rupture majeure entre 1980 / 1981 à la station de Bertoua et de Batouri ; entre 1969/1970 à la station d'Abong-Mbang et durant l'année hydrologique 1983/1984 à la station de Yokadouma. Dans l'ensemble, on note une baisse des précipitations annuelles comprise entre -9,32% (Abong-Mbang) à -13,50% (Bertoua) dans cette zone forestière de l'Est du Cameroun. L'analyse des variations de pluies mensuelles et saisonnières à l'échelle régionale du BVK et de ses environs indique l'existence de deux (02) régimes climatiques que sont : le régime équatorial de transition et le régime tropical de transition. L'application du test de Pettit à la variable pluie mensuelle indique des ruptures caractérisées par des hausses et/ou des baisses pendant les mois de février 1976, avril 2010, mai 1991 et aout 1979 à la station de Bertoua ; en avril 2011, juin 1991 et d'août 1979 à celle de Batouri ; en février 1979, juin 1956, juillet 1967, août 1976 et novembre 1954 à Abong-Mbang et, pendant les mois d'avril 2005, de juin 1951 et août 1998 au niveau de Yokadouma. On note par contre que, lorsqu'on applique le test de Pettit à la variable pluie saisonnière, il révèle une rupture pendant la petite saison des pluies en 1963, la petite saison sèche en 1961 et durant la grande saison sèche en 1946 à Bertoua avec une hausse pluviométrique d'environ 85 mm (18%) de la petite saison des pluies et des baisses de la pluviométrie mensuelles d'environ 32 mm (-13%) au cours de la petite saison sèche et de 53 mm (-22%) pendant la grande saison sèche. Au niveau de Batouri, l'application du test de Pettit à la variable pluie saisonnière révèle une double rupture pendant la saison des pluies en 1960 et en 1971 et une rupture en 1966 durant la saison sèche. Concernant les températures, à échelle annuelle, elle fluctue respectivement entre 24 et 26 °C à Bertoua ; entre 23 et 24 °C à Batouri ; entre 22 et 25°C à Abong-Mbang et à Yokadouma. L'application du test de Pettit à la variable température annuelle sur une longue chronique de données (76 ans) ne révèle pas la présence d'une rupture significative pour les quatre (04) stations susmentionnées. Enfin, de façon mensuelle, les températures extrêmes se situent entre juillet (mois le plus frais pour les cinq stations) et mars à Bertoua et Abong-Mbang puis février à Batouri et Yokadouma.

**CHAPITRE IV : FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE
DU BASSIN VERSANT DE LA KADEY**

Introduction

L'objectif de ce chapitre, est de réactualiser les débits de la Kadey à Batouri et à Pana, de présenter la réponse hydrologique du bassin versant de la Kadey à partir des séries pluie-débits à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière d'une part et, d'autre part d'évaluer le processus de la recharge de la nappe souterraine en se basant sur l'analyse de la variation de l'eau des ouvrages dans le temps et l'espace.

IV.1. Hydrologie du bassin versant de la Kadey

L'étude du fonctionnement hydrologique du BVK ci-dessous présenté prend successivement en compte les variations et les fluctuations dans l'espace et le temps des débits du cours d'eau Kadey aux stations hydrométriques de Batouri et de Pana, les relations pluies - débits aux pas de temps annuels, mensuels et journaliers et enfin prend en compte l'analyse de basses eaux (étiage) et de hautes eaux (crues).

IV.1.1. Réactualisation des données hydrométriques de la Kadey à Batouri et à Pana

Cette section réactualise tout d'abord les débits de la Kadey aux stations hydrométriques de Batouri et de Pana et par la suite, analyse les fluctuations de ces débits aux pas de temps annuels, mensuels et journaliers.

IV.1.1.1. Domaines de variations des débits interannuels de la Kadey à Batouri et à Pana

- Kadey à Batouri

Au cours des différentes périodes d'observation comprises entre 1954 à 1977 et 1998 à 2015 (42 ans en excluant la longue lacune enregistrée entre 1978 et 1997), les débits annuels de la Kadey à Batouri varient entre 97,9 m³/s, pour un module spécifique de 10,9 l/s.km² enregistré durant l'année hydrologique 2001-2002 et, 150 m³/s (16,71 l/s.km²) observé pendant l'année 1966-1967. Le module moyen interannuel obtenu est de 117 ± 25,6 m³/s correspondant à un débit spécifique de 13,03 l/s.km² (Tableau XVIII).

- Kadey à Pana

Pour les périodes comprises respectivement entre 1964 -1981 et 1998 - 2015 (27 ans en excluant la lacune comprise entre 1982 et 1997), les débits annuels de la Kadey à Pana après leur confluence avec le cours d'eau Doumé oscillent entre 148,4 m³/s (7,28 l/s.km²) observé durant

l'année hydrologique 2005-2006 et 286 m³/s (14,03 l/s.km²) enregistré au cours de l'année 1975-1976. Le module moyen interannuel est de 224 ± 28,1 m³/s et correspond à un débit spécifique de 10,99 l/s.km² (Tableau XVIII).

Tableau XVIII : Domaine de variation des débits interannuels en m³/s de la Kadey à Batouri et de la Kadey à Pana

Stations	Min	Max	Moy.	E.T	Med	CV	Périodes	n
Batouri	97,9	150	117	25,6	114	0,12	1954-2015	42
Pana	148,4	286	224	28,1	201	0,19	1964-2015	27

On remarque dans l'ensemble que ces débits sont légèrement inférieurs à ceux trouvés antérieurement sur la Kadey aux mêmes stations par Olivry (1986) dont les modules spécifiques étaient respectivement de 11,7 et 13,4 l/s.km². Ils sont également inférieurs par rapport aux résultats de Sigha-Nkamdjou (1994) qui quant à lui a trouvé un débit liquide de 120 m³/s pour un débit spécifique de 13,4 l/s.km² sur la Kadey à Batouri.

Ces résultats sont néanmoins situés dans la gamme des valeurs des débits spécifiques que l'on trouve généralement dans les cours d'eau de la zone forestière du sud Cameroun comme la Doumé et le Dja dans la région de l'Est Cameroun, le Ntem dans le Sud du Cameroun et le Nyong dans sa partie amont dans la région du Centre du Cameroun (Nana Tchoudja, 1979 ; Liéno et *al.*, 2005 ; Liéno et *al.*, 2008 ; Mfochivé, 2011 ; Kpoumié, 2015). Ces débits sont par contre en deçà des débits spécifiques enregistrés dans la zone de contact forêt/savane par Kpoumié (2015) qui trouve des valeurs de 13,19 l/s.km², 13,25 l/s.km² et de 14,21 l/s.km² respectivement pour le fleuve Sanaga à Goyoum, Songmbengué et Edéa, et de 14,97 l/s.km² pour le cours d'eau Mbam à Goura.

IV.1.1.2. Domaine de variations des débits mensuels de la Kadey à Batouri et à Pana

- Kadey à Batouri

Durant la période comprise entre 1954 et 2015, les variations des débits moyens mensuels de la Kadey à Batouri présentent un minimum qui est observé au mois de mars (65,8 m³/s) et un maximum que l'on enregistre durant le mois d'octobre. Sa valeur est de 262 m³/s (Tableau XIX et Figures IV.1).

Tableau XIX : Domaine de variation des débits mensuels (m³/s) de la Kadey à Batouri de 1954 à 2015

Mois	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F
Min	46,4	47,2	56,8	57,6	61,3	46,6	113	194	106	80,3	59,3	48,3
Max	129	89,1	101	124	157	175	158	378	285	158	111	91,4
Moy	65,8	68,3	73,2	87,4	96,2	109	185	262	204	124	90,1	65,8
Med	61,7	68,6	71,6	82,8	86,8	103	181	258	209	128	92,4	61,7
ET	17,5	8,8	11,3	17,5	26,7	31,6	43	40	39	19	11,6	17,5
CV	0,64	0,43	0,35	0,27	0,31	0,31	0,30	0,22	0,18	0,21	0,23	0,93

Légende : Min : Minimum, Max : Maximum, Moy : Moyenne, Med : Médiane, ET : Ecart-Type, CV : Coefficient de Variation

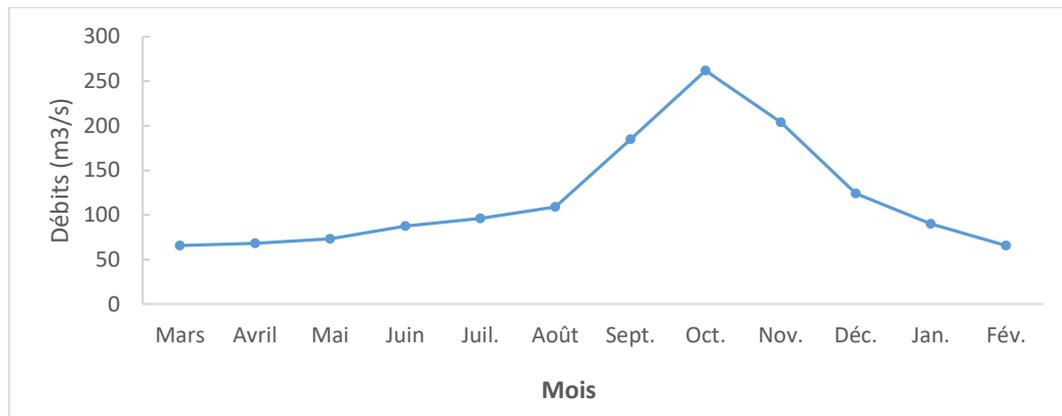


Figure IV.1 : Variation des débits mensuels de la Kadey à Batouri (1954– 2015)

- **Kadey à Pana**

Au cours des périodes 1965 à 2015, les débits moyens mensuels de la Kadey à Pana présentent également un minimum et un maximum. Durant ces périodes, la valeur des débits la plus faible est enregistrée au cours du mois de février (112 m³/s). Celle des débits la plus importante est observée pendant le mois d’octobre et atteint le pic de 553 m³/s (Tableau XX et Figure IV.2).

Tableau XX : Domaine de variation des débits mensuels (m³/s) de la Kadey à Pana (1965-2015)

Mois	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F
Min	50,0	55,5	94,1	128	120	174	253	344	323	151	70,6	46,2
Max	251	175	216	255	332	334	472	800	797	365	220	194
Moy	113	119	143	185	210	233	370	553	495	257	168	112
Med	86,9	115	143	182	141	186	369	612	556	259	153	100
ET	51,1	42,9	22	40	63	36	69	126	154	71	60	64,1
CV	0,63	0,33	0,36	0,29	0,4	0,35	0,32	0,19	0,16	0,22	0,19	0,45

Min : Minimum, Max : Maximum, Moy : Moyenne, Med : Médiane, ET : Ecart-Type, CV : Coefficient de Variation

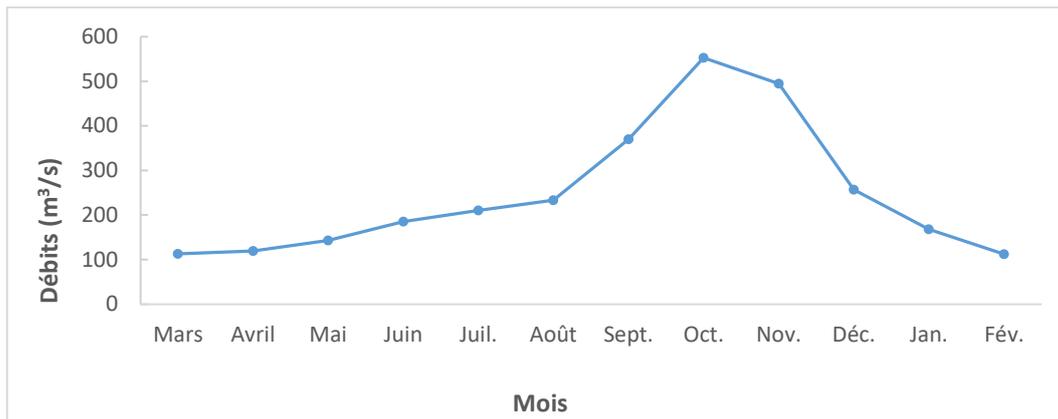


Figure IV.2 : Variation des débits mensuels de la Kadey à Pana (1965 – 2015)

De ce qui précède, on constate que toutes ces variations suivent dans l'ensemble celui du régime équatorial et/ou tropical de transition avec quatre saisons inégalement réparties dans le temps comme celui des pluies. Ces variations mensuelles sont semblables à celles d'autres études menées antérieurement dans la même zone région même si les débits mensuels actuels sont légèrement plus faibles que ceux d'Olivry (1986) qui présente, en débits spécifiques, des valeurs médianes de 36,1 et 32 l/s.km² respectivement pour la Kadey à Batouri et à Pana et de 32,5 l/s.km² pour la Dja à Salo. Nonobstant ces différences, la répartition mensuelle des débits montre une influence équatoriale marquée pour le petit bassin de la Doumé (Sigha Nkamdjou, 1994) avec un premier maximum en juin et un second maximum en octobre. C'est également le cas pour le Nyong, le Lom (Liéno, 2007) et la Sanaga (Kpoumié, 2015). Par contre, pour la Kadey à Batouri et à Pana, on a déjà tendance à un passage progressif vers un régime tropical de transition qui prend le dessus.

IV.1.1.3. Domaines de variations des débits journaliers et de débits caractéristiques de la Kadey à Batouri et à Pana

IV.1.1.3.1. Kadey à Batouri

- Débits journaliers

L'étude des débits journaliers de la Kadey à Batouri pour la période comprise entre 1954 et 2015, montre des fluctuations qui varient différemment d'une année à une autre. De manière générale, les mois de février et mars durant la grande saison sèche présentent des faibles valeurs de débits journaliers. Les fortes valeurs de débits journaliers sont généralement enregistrées pendant les mois d'octobre et novembre correspondant à la grande saison de pluies (Figure IV.3). On note ainsi que durant la période comprise entre 1954 et 2015, le plus petit débit

journalier obtenu est de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1,11 \text{ l/s.km}^2$). Il a été observé le 21 février 2007. Le plus fort débit journalier enregistré quant à lui est de $378 \text{ m}^3/\text{s}$ ($63,96 \text{ l/s.km}^2$) paru le 12 novembre 2015.

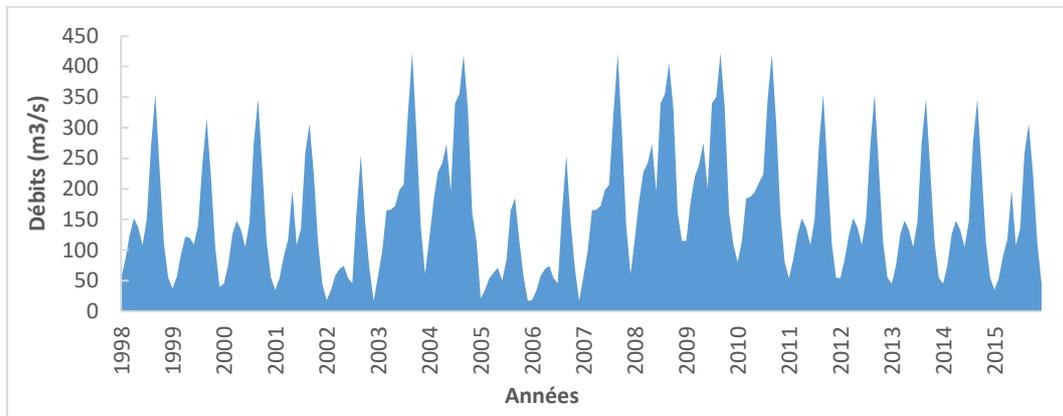


Figure IV.3 : Variations des débits journaliers de la Kadey à Batouri (1998-2015)

- Débits caractéristiques

Les débits caractéristiques (DC) obtenus entre 1954 et 2015 sur la Kadey à Batouri sont les suivants (Tableau XXI et Figure IV.4) :

- DCMax : c'est le débit moyen journalier le plus élevé de l'année hydrologique ou débit caractéristique maximum (DCMax). Durant la période d'étude, ils fluctuent respectivement entre 255 et $428 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une moyenne de $324 \pm 48 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la Kadey à Batouri.

- DCC : c'est le débit caractéristique de crue ou débit moyen journalier non dépassé pendant 10 jours au cours de l'année. Il oscille entre 229 et $396 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une moyenne de $294 \pm 36 \text{ m}^3/\text{s}$.

- DC1, DC3, DC6 : ce sont les débits non dépassés pendant 30, 90 et 183 jours de l'année. Ils sont respectivement compris entre 47 et $73,6 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une moyenne de l'ordre de $58 \pm 7,7 \text{ m}^3/\text{s}$; $54,2$ et $86,9 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une moyenne de $64,5 \pm 9,2 \text{ m}^3/\text{s}$; 67 et $131 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une moyenne de $93 \pm 14,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

- DC9, DC11 : débits respectivement atteints non dépassés pendant 276 et 336 jours de l'année. Ils fluctuent respectivement entre $96,6$ et $189 \text{ m}^3/\text{s}$ et 186 et $333 \text{ m}^3/\text{s}$. Les moyennes respectives sont $144 \pm 23 \text{ m}^3/\text{s}$ et $244 \pm 34 \text{ m}^3/\text{s}$.

- DCE : c'est le débit caractéristique de l'étiage ou débit non dépassé pendant 355 jours. A la station de Batouri, les extrêmes de ce débit sont respectivement $37,4$ et $65,4 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une moyenne de $50,5 \pm 7,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

- DCMin : c'est le débit moyen minimum de l'année (Q_{\min}). Ils oscillent entre $35,9$ et $63 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une moyenne arithmétique de $47 \pm 7,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tableau XXI : Débits caractéristiques de la Kadey à Batouri entre 1951 et 2015

Stations		DCMax	DCC	DC11	DC9	DC6	DC3	DC1	DCE	DCMin
Batouri (1951-2015)	Min	255	229	186	96,6	67	54,2	47	37,4	35,9
	Moy	324	294	244	144	93	64,5	58	50,5	47
	Max	428	396	333	189	131	86,9	73,6	65,4	63

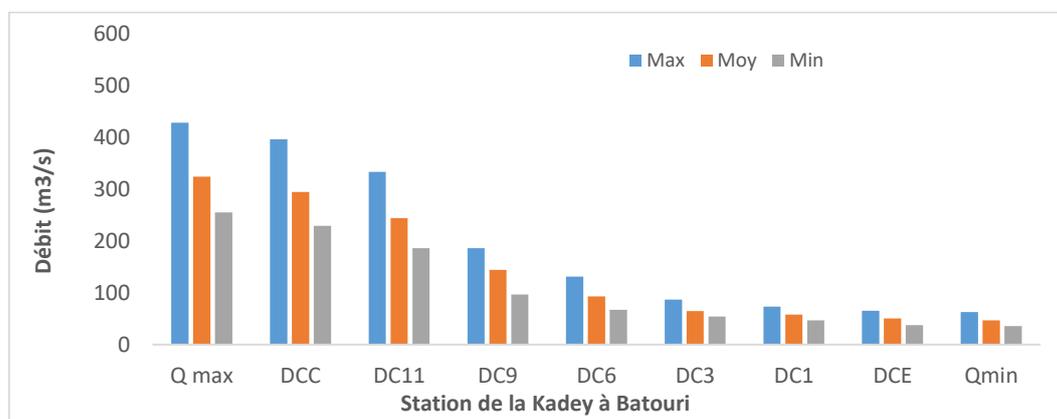


Figure IV.4 : Variations des débits caractéristiques de la Kadey à Batouri entre 1954-2015

IV.1.1.3.2. Kadey à Pana

- Débits journaliers

L'analyse des débits journaliers de la Kadey à Pana montre également des variations différentes d'une année à une autre. Dans l'ensemble, on note que les mois de Février et Mars montrent des faibles valeurs de débits journaliers alors que les débits maxima sont généralement enregistrés pendant les mois d'octobre et novembre (Figure IV.5).

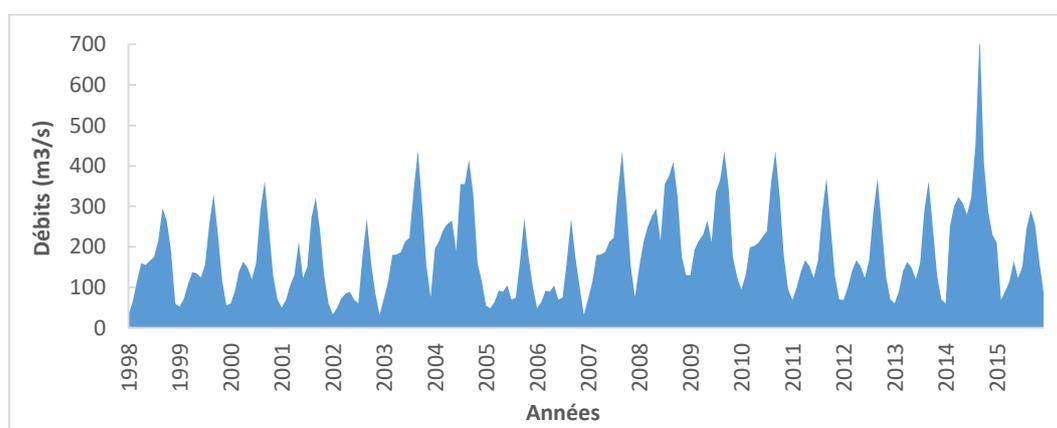


Figure IV.5 : Variations des débits journaliers de la Kadey à Pana (1998-2015)

Au cours la période comprise entre 1965 et 2015 le débit journalier le plus faible observé est de 13,9 m³/s enregistré le 18 mars 2003. Il correspond à un débit spécifique de 0,39 l/s. km². Le plus fort débit journalier enregistré est de 786 m³/s paru le 28 octobre 2014. Ce dernier correspond à un débit spécifique de 42 l/s.km².

- Débits caractéristiques

Les débits caractéristiques étudiés pour la période allant de 1965 à 2015 sont présentés sur le Tableau XXII et la Figure IV.6. Il en ressort que :

- DCmax : Ils fluctuent respectivement entre 410 et 794 m³/s pour une moyenne de 650 ± 137 m³/s.
- DCC : Ils oscillent entre 394 et 776 m³/s. La moyenne est de 593 ± 141 m³/s.
- DC1, DC3, DC6 : Ils sont compris respectivement entre 77,7 et 116 m³/s ; 103 et 146 m³/s et 147 et 238 m³/s. Les débits moyens sont de l'ordre de 94 ± 13 m³/s ; 118 ± 20 m³/s et 205 ± 32 m³/s.
- DC9, DC11 : Les débits sont respectivement compris entre 224 et 372 m³/s et entre 365 et 710 m³/s. les moyennes sont respectivement de 330 ± 58 m³/s et 497 ± 127 m³/s.
- DCE : Les débits extrêmes sont respectivement de 73,3 et 100 m³/s pour une moyenne de 84 ± 8,6 m³/s.
- DCmin : Ils oscillent entre 66,7 et 89,8 m³/s pour une moyenne de 77 ± 8,7 m³/s.

Tableau XXII : Débits caractéristiques de la Kadey à Pana entre 1965 et 2015

Stations		DCmax	DCC	DC11	DC9	DC6	DC3	DC1	DCE	DCmin
Pana (1965-2015)	Min	410	394	365	224	147	103	77,7	73,3	66,7
	Moy	650	593	497	330	205	118	94	84	77
	Max	794	776	710	372	238	146	116	100	89,8

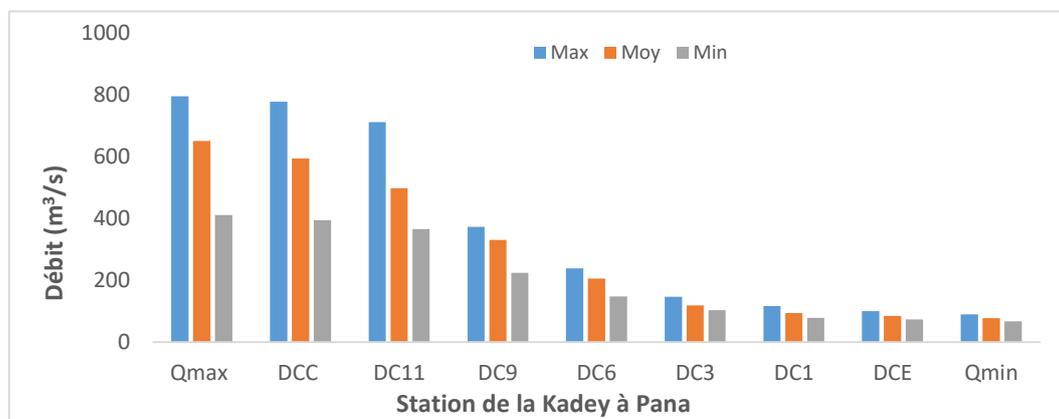


Figure IV.6 : Variations des débits caractéristiques de la Kadey à Pana entre 1965-2015

IV.1.2. Fluctuation des débits de la Kadey à Batouri et à Pana

IV.1.2.1. Evolution des débits moyens interannuels de la Kadey à Batouri et à Pana

- Kadey à Batouri

Durant la période comprise entre 1954-1977 et 1998 - 2015 (42 ans) sans prendre en compte la lacune comprise entre 1978 à 1997, les débits annuels de la Kadey à Batouri évoluent en dents de scie et différemment d'une année à une autre (Figure IV.7). Les débits moyens annuels les plus élevés ont été observés pendant les décennies 60 alors que les plus faibles ont été quant à eux enregistrés durant cette dernière décennie.

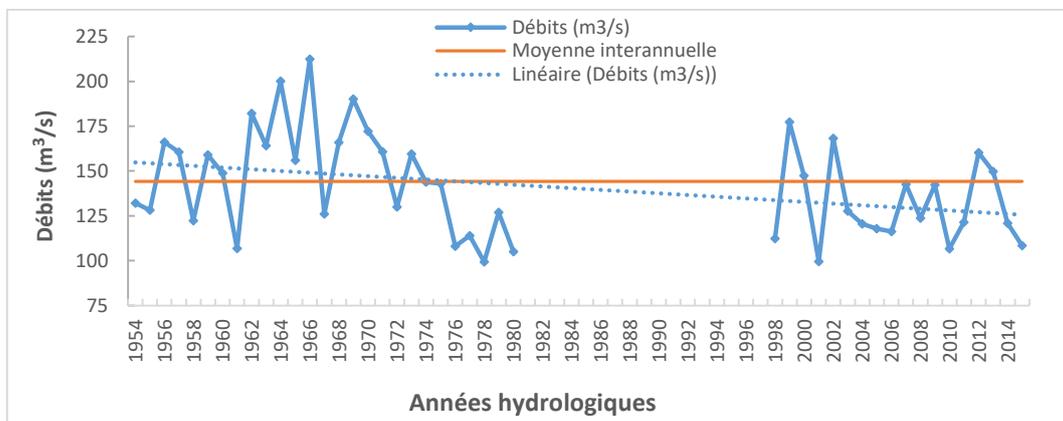


Figure IV.7 : Fluctuations des débits moyens annuels de la Kadey à la station de Batouri de 1954 à 2015

L'analyse des variations des indices des débits interannuels à la station hydrométrique de la Kadey à Batouri (Figure IV.8) montre une succession de périodes suivantes :

- une alternance d'années humides et d'années sèches entre 1954 et 1977 ;
- une alternance d'années sèches et d'années humides entre 1998 et 2002 ;
- une période sèche qui s'étend de 2003 à 2015 avec néanmoins des années humides entre 2013 à 2015.

La droite de tendance générale de l'évolution interannuelle des modules à la station de Batouri est décroissante avec une forte pente qui traduit ainsi une régression générale des écoulements à la dite station (Figure IV.7).

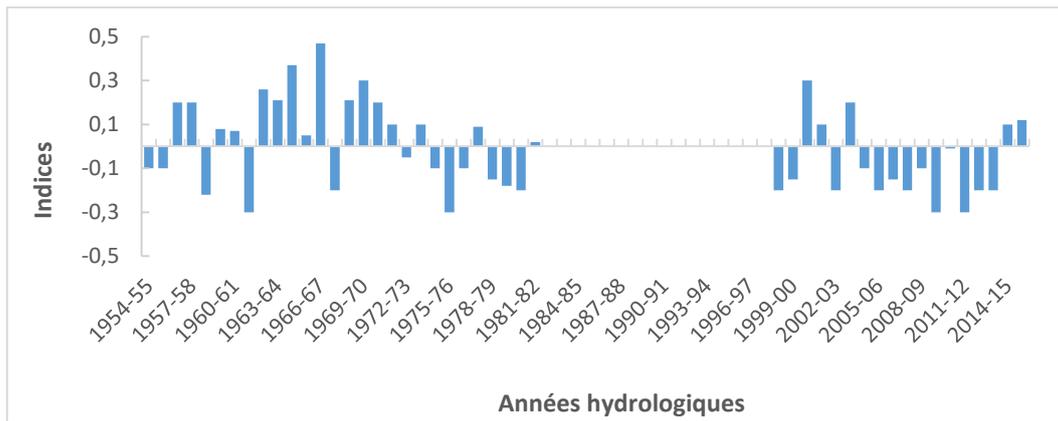


Figure IV.8: Variations des indices des débits annuels de la Kadey à Batouri (1954-2015)

Lorsque l'on compare les deux périodes situées avant et après la lacune d'observation comprise entre 1982 et 1997, on remarque que le débit moyen interannuel enregistré durant la période comprise entre 1954 et 1981, avant la lacune est de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ($13,37 \text{ l/s.km}^2$) alors qu'il n'est plus que de $104,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($11,64 \text{ l/s.km}^2$) pour la période actuelle située entre 1998 et 2015 après la lacune. Cette baisse du module interannuel correspond à un déficit d'environ - 13%.

- **Kadey à Pana**

Les débits évoluent également différemment d'une année à une autre sur la Kadey à la station de Pana après sa confluence avec le cours d'eau Doumé. Les débits moyens interannuels les plus élevées sont observées durant la décennie 1960 alors que les plus faibles sont enregistrées durant la période actuelle. Durant cette période d'étude, le débit maximum a été enregistré au cours de l'année hydrologique 1964-1965 et le minimum durant l'année hydrologique 2002-2003 (Figure IV.9). L'évolution des débits est aussi régressive durant cette période comme le montre la droite de tendance générale qui donne l'évolution des débits dans le temps.

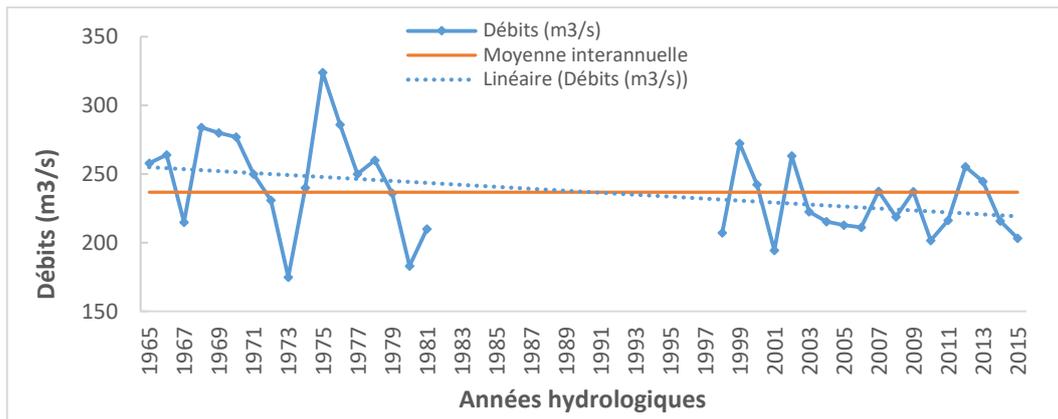


Figure IV.9 : Fluctuations des débits annuels de la Kadey à la station de Pana entre 1964 et 2015

L'analyse des variations des indices des débits annuels de la Kadey à Pana montre (Figure IV.10) :

- une alternance d'années humides et d'années sèches entre 1965 et 1981 avec une forte tendance à une période humide ;
- une alternance d'années sèches et d'années humides entre 1998 et 2003 ;
- une période sèche entre 2004 et 2015 avec néanmoins trois années humides situées entre 2013 et 2015.

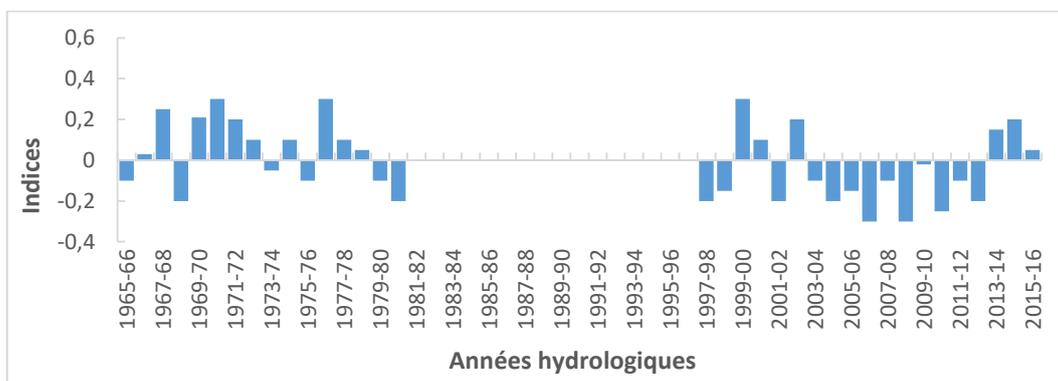


Figure IV.10 : Variations des indices des débits annuels de la Kadey à Pana (1965-2015)

Lorsqu'on compare les deux périodes de suivi des débits de la Kadey à Pana avant et après la lacune d'observation comprise entre 1982 et 1997, on remarque que le débit moyen interannuel enregistré pendant la période 1965-1981 avant la lacune est de $247 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un débit spécifique de $12,12 \text{ l/s.km}^2$ (Olivry, 1986 ; Sigha Nkamdjou, 1994). Pour la période d'observation actuelle comprise entre 1998-2015 après la lacune, le débit moyen interannuel n'est plus que de 215

m³/s, soit un débit spécifique de 10,55 l/s.km². La comparaison des modules de ces deux périodes donne un déficit de -12,95 %.

Dans l'ensemble, on note un déficit de -13% des débits moyens interannuels sur la Kadey à Batouri et à Pana dans la région de l'Est du Cameroun. Cette diminution de l'écoulement est semblable aux déficits enregistrés sur le fleuve Nyong à Mbalmayo et à Olama respectivement par Makuete Tagne (2017) ; Ngo Billong, (2018) ; Taghuo Tuedom (2018) et Mbarga (2018) qui trouvent des valeurs comprises entre -13 et 15%. Ces déficits rentrent également dans la gamme des baisses des débits comprises entre -5 % et -21 % que propose Sighomnou (2004) pour les cours d'eau de la partie sud forestière du Cameroun.

Ces déficits sont par contre moins accentués par rapport aux baisses enregistrées dans les cours d'eau de la partie septentrionale du Cameroun comme pour le Mayo Tsanaga à Minglia, le Mayo Kalliao à Maroua et la Vina à Tchabal qui varient entre -28 et - 45 % pour une moyenne de -35 % (Naah, 1978 ; Olivry, 1986 ; Servat et *al.*, 1998 ; Sighomnou, 2004 ; Liéno et *al.*, 2008).

IV.1.2.2. Evolution pluriannuelle des débits mensuels et saisonniers de la Kadey à Batouri et de la Kadey à Pana

- Kadey à Batouri

Lorsqu'on confronte l'évolution pluriannuelle des débits moyens mensuels de la Kadey à Batouri pour la période 1954-1981 (avant la lacune) à celle de la période 1998-2015 (période actuelle après la lacune), il ressort que les moyennes mensuelles observées durant la période actuelle (1998 à 2015) sont dans l'ensemble inférieures à celles de la période 1954-1981 à l'exception des débits mensuels de la grande saison sèche comprise entre juillet - septembre qui connaissent un accroissement (Figure IV.11).

Dans l'ensemble, l'amplitude de la petite saison de pluie et de la grande saison de pluie baisse au détriment de celle de la petite saison sèche qui quant à elle tend à augmenter. On tend déjà à un passage ou à une évolution du régime équatorial de transition à tendance bimodale (Olivry, 1986, Sigha Nkamdjou, 1994 ; Sighomnou, 2004, Sighomnou et *al.*, 2007) à un régime tropical de transition à tendance unimodale. Des résultats similaires sont obtenus pour le Nyong à Mbalmayo et à Olama (Makuete Tagne, 2017 ; Ngo Billong, 2018 ; Taghuo, 2018 ; Mbarga, 2018).

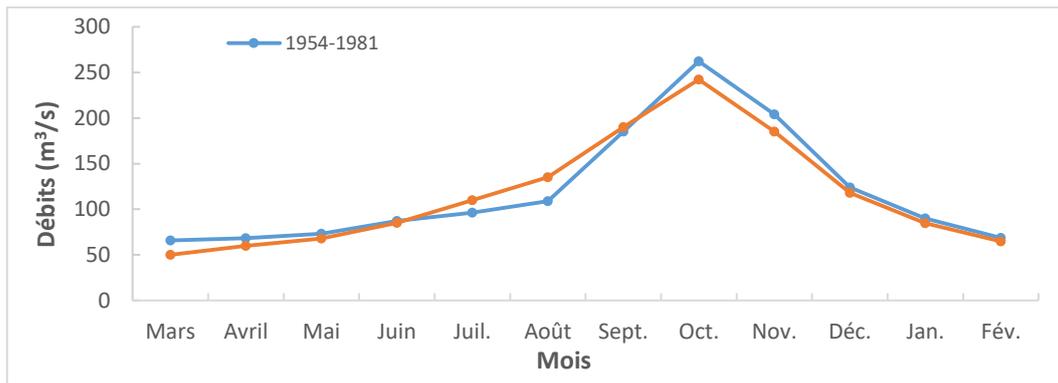


Figure IV.11 : Fluctuations des débits moyens mensuels et saisonniers de la Kadey à Batouri entre 1954 et 1981 et entre 1998 et 2015

- **Kadey à Pana**

En comparant l'évolution des débits moyens mensuels de la Kadey à Pana durant la période comprise entre 1965-1981 (période avant lacune) à celle de 1998 à 2015 après la lacune, il ressort que les débits moyens mensuels de la période 1998-2015 sont inférieurs à ceux la période 1965-1981 en dehors de ceux de l'intervalle comprise entre juillet et septembre (Figure IV.12). Comme pour la Kadey à Batouri, les courbes d'évolution de débits moyens mensuels à Pana présentent également une allure unimodale, caractéristique des zones où règne le climat tropical de transition comme c'est le cas ici.

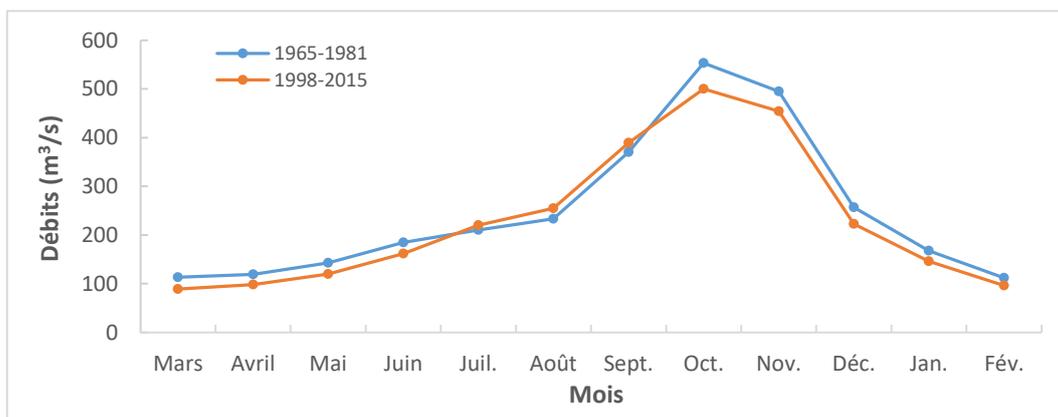


Figure IV.12 : Fluctuations des débits moyens mensuels de la Kadey à Pana de 1965 à 1981 et de 1998 à 2015

IV.1.2.3. Evolution des débits mensuels décennaux de la Kadey à Batouri et à Pana

- Kadey à Batouri

La comparaison des débits mensuels décennaux de la Kadey à Batouri durant la période 1954-1977 avant la lacune à ceux de la période 1998-2015 après la lacune met en évidence l'évolution suivante :

- durant la décennie 1950, les débits des mois de mars, avril, mai et juin sont supérieurs à ceux de la période 1998-2015. En revanche, les mois de juillet, août et septembre ont des débits plutôt inférieurs à ceux de la période 1998-2015. Quant aux mois d'octobre, novembre, décembre janvier et février, les débits des deux périodes sont relativement confondus (Figure IV.13) ;
- tous les débits de la décennie 1960 sont supérieurs à ceux de la période 1998-2015 sans exception ; les débits de la décennie 1970 présentent une évolution similaire à ceux de la décennie 50 exceptés les mois d'octobre et novembre qui ont plutôt des débits supérieurs à ceux de la période 1998-2015.

- Kadey à Pana

La confrontation des débits décennaux de la période 1965-1981 avant la lacune à ceux de la période 1998-2015 après la lacune à la station de Pana montre que les débits évoluent de la manière suivante :

- les débits de la décennie 60 sont tous supérieurs à ceux de la période 1998-2015 ;
- au cours de la décennie 70, les mois de février, mars, avril, mai et juin ont des débits supérieurs à ceux de la période 1998-2015, les mois de juillet et août connaissent un accroissement de débits pendant la période 1998-2015. Les mois de janvier et février ont des débits relativement confondus.

IV.1.2.4. Evolution des débits caractéristiques de la Kadey à Batouri et à Pana

- Kadey à Batouri

La confrontation des différents débits caractéristiques moyens obtenus durant la période 1954-1981 à ceux de la période 1998-2015 montre que les débits de la période 1998-2015 sont tous

inférieurs sans exception à ceux de Olivry (1986) qui les situent entre 35,9 et 428 m³/s pour une moyenne de $147,5 \pm 20,85$ m³/s (Figure IV.14).

- **Kadey à Pana**

L'analyse de l'évolution des débits caractéristiques de la Kadey à Pana montre également que les débits caractéristiques de la période 1965-1981 sont tous supérieurs à ceux de la période actuelle comprise entre 1998-2015. En effet, Olivry (1986) trouve des débits qui sont compris entre 66,7 et 794 m³/s pour une moyenne de $295,45 \pm 60,58$ m³/s, et Sigha-Nkamdjou (1994) qui note des débits qui varient entre 54 et 794 m³/s pour une moyenne de $289,10 \pm 58,26$ m³/s (Figure IV.15).

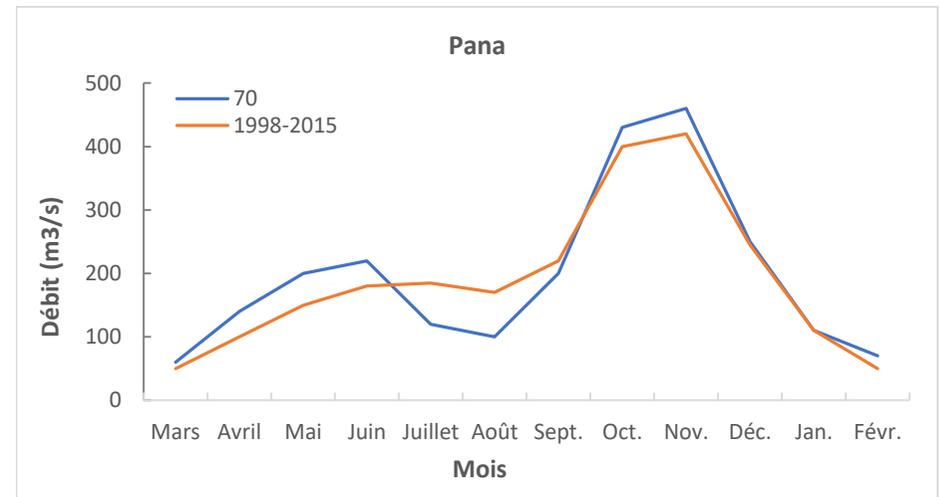
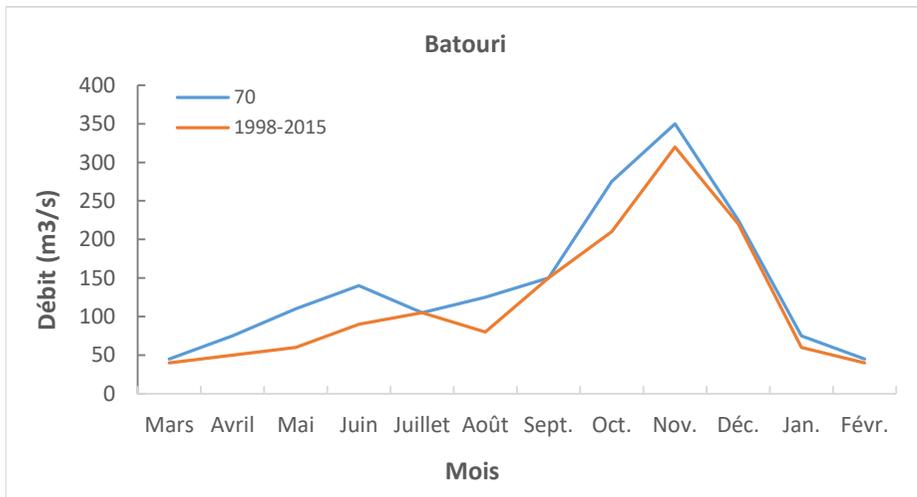
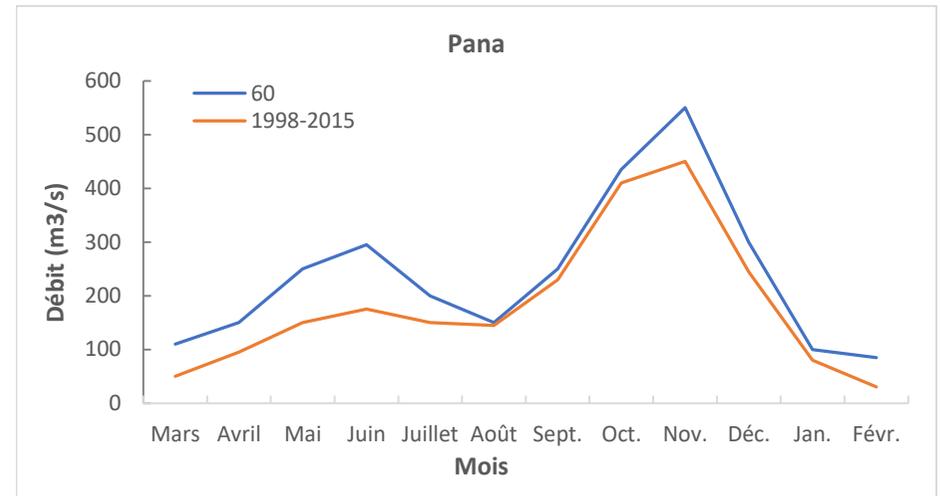
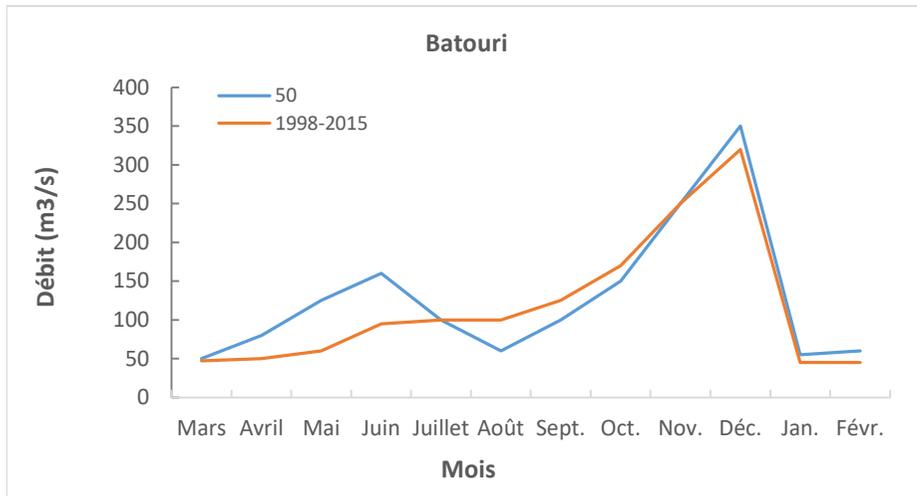


Figure IV.13 : Evolution des débits décennaux de la Kadey à Batouri et à Pana

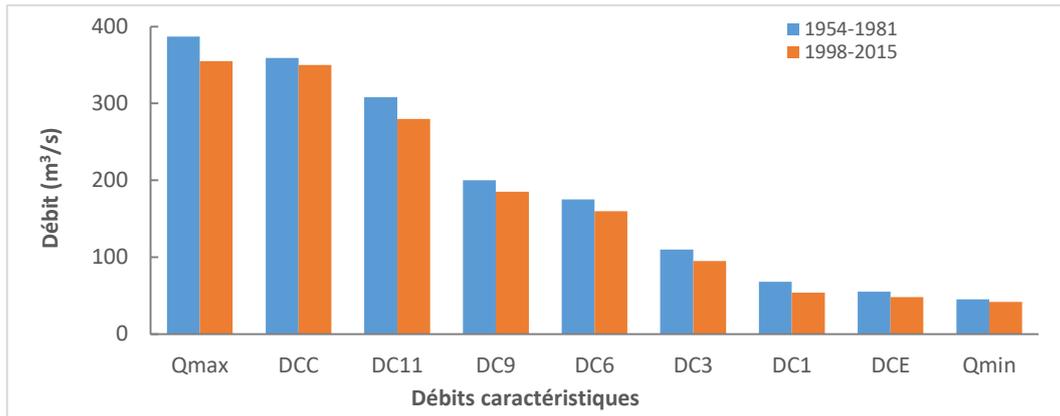


Figure IV.14 : Evolution des débits caractéristiques de la Kadey à Batouri pour les périodes 1954-1977 (Olivry, 1986) et 1998-2015

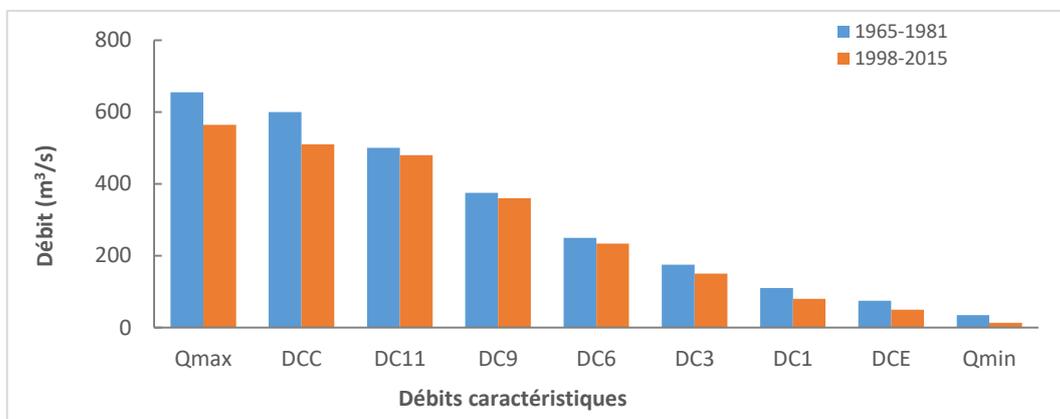


Figure IV.15 : Evolution des débits caractéristiques de la Kadey à Pana pour les périodes 1965-1981 (Olivry, 1986) et 1998-2015

En définitive, l'analyse des débits de la Kadey au niveau des stations de Batouri et Pana à l'exutoire du BVK à différentes échelles de temps annuelles, mensuelles et journalières révèle une baisse générale de ces derniers durant la période actuelle. Cette tendance à la baisse est un phénomène qui est signalé par plusieurs auteurs comme Sighomnou et *al.* (2007) qui notent un déficit -14 % sur la Boumba à Biwala, -17 % sur la Doumé à Doumé, -22 % sur le Nyong à Ayos, -15 % sur le Nkam à Melong ; Liéno (2007) qui signale également une baisse de -18 % sur le Ntem à Nyabessan, -21 % sur le Ntem à Ngoazik et -25 % sur le Mayo Tsanaga à Bogo ; Naah (1978, 1984) qui note -22 % sur le Mayo Tsanaga à Minglia, -24 % sur le Mayo Oulo à Goloza ; Kpoumié (2015) qui indique quant à lui une régression de -17 % sur la Mapé à Magba et de -10 % sur le Lom à Bétaré Oya.

Cette tendance à la baisse est également observée par de nombreux auteurs en Afrique de l'Ouest et Centrale. On peut citer entre autre, Gac et Kane (1986) qui enregistrent -21 % sur le fleuve Sénégal à Thiès ; Laraque et Olivry (1996) qui enregistrent sur le Congo des déficits de -15 % à Goma, -19% à Matadi et -22 % à Kananga ; Droux (1999) qui trouve -27 % et -18% sur le Niger respectivement à Ségou et Djenné ; Laraque et *al.* (2001) qui notent -22 % sur le Congo à Bandundu.

IV.1.3. Relations pluies-débits aux pas de temps annuels et mensuels

La relation pluie-débit est une approche qui consiste à rechercher les relations de cause à effet entre les pluies (sollicitations) et les débits produits (réponses hydrologiques). Elle consiste plus précisément en la confrontation sur une même période des données de pluies qui sont la cause à celles des débits qui sont l'effet.

Dans le cas de la présente étude, cette confrontation a été établie entre les pluies moyennes de la station de Batouri considérées comme pluie moyenne dans le BVK et les débits de la station de Pana considéré ici comme exutoire du BVK.

IV.1.3.1. Relation pluies annuelles - débits annuels dans le BVK

A l'échelle annuelle, les débits moyens annuels correspondant à chaque année hydrologique ont été mis en relation avec les pluies de l'année correspondante (Figure IV.16). Les coefficients de corrélation sont dans l'ensemble très faibles (inférieurs à 0,7), ce qui montre que les corrélations ne sont pas très significatives entre ces deux paramètres.

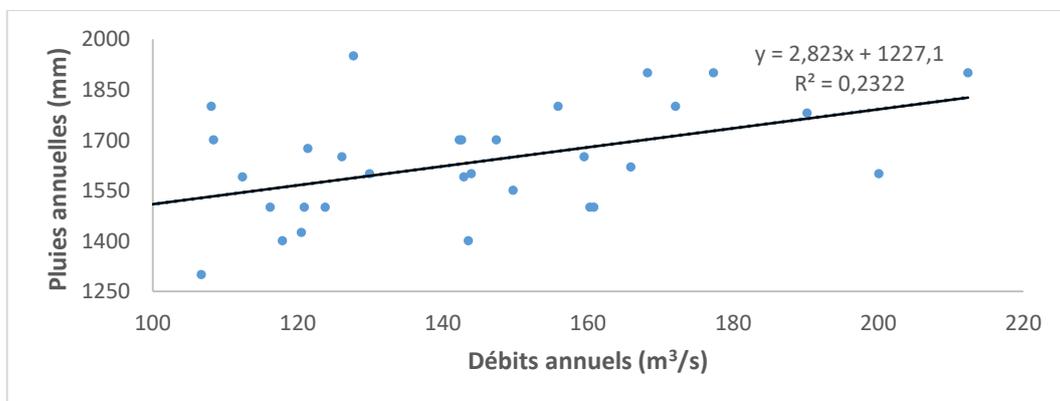


Figure IV.16 : Relations pluies annuelles - débits annuels dans le BVK

Un simple examen de ces coefficients montre qu'il n'aurait pas de synchronisation étroite entre les débits annuels et la pluie annuelles. Il y a bien entendu une certaine dépendance entre les deux termes, mais la liaison reste très lâche. Ceci s'expliquerait probablement par la répartition des pluies au cours de l'année, variant considérablement d'une année à l'autre et suscitant au niveau des débits des réactions différentes comme le signalent Soro et *al.* (2013) ; Kouassy Kalédjé et *al.* (2016). Il est également probable que la faible densité du réseau pluviométrique ne donne pas toujours une image très exacte des pluies reçues par le bassin (Soro et *al.*, 2013 ; Moussa Sidibe et *al.*, 2019 ; Bouteldjaoui et *al.*, 2020).

Par ailleurs l'analyse de l'évolution des pluies annuelles a montré des déficits pluviométriques annuels de la Kadey à Batouri et à Pana qui sont situés autour de -4 % contrairement aux déficits hydrométriques qui sont d'environ -13 % pour les deux stations. En confrontant ces deux déficits, le premier constat que l'on peut faire est que les débits ont beaucoup plus diminué par rapport aux pluies.

On peut donc dire que la baisse des débits d'environ -13 % enregistrée dans le BVK est dû d'une part à la baisse des pluies (-4 %) à laquelle s'ajoute l'intervention de plusieurs autres facteurs tels l'envahissement du lit de la Kadey par les plantes aquatiques qui augmentent les pertes d'eau par sédimentation et par évapotranspiration, les activités humaines telles que la déforestation, l'exploitation minière, l'urbanisation accélérée et anarchique, les rejets divers et les prélèvements des eaux pour les activités socio-économiques. Toutes ces actions ont pour corollaire la diminution de l'infiltration et donc de la recharge de la nappe et de la diminution des débits de cours d'eau en période d'étiage.

IV.1.3.2. Relation pluies mensuelles - débits mensuels

L'analyse comparée de l'évolution des débits mensuels et celle des pluies mensuelles révèle que l'histogramme des pluies moyennes mensuelles et la courbe des débits moyens mensuels de la Kadey à Batouri ont une tendance unimodale qui caractérise le climat tropical de transition (Figure IV.17).

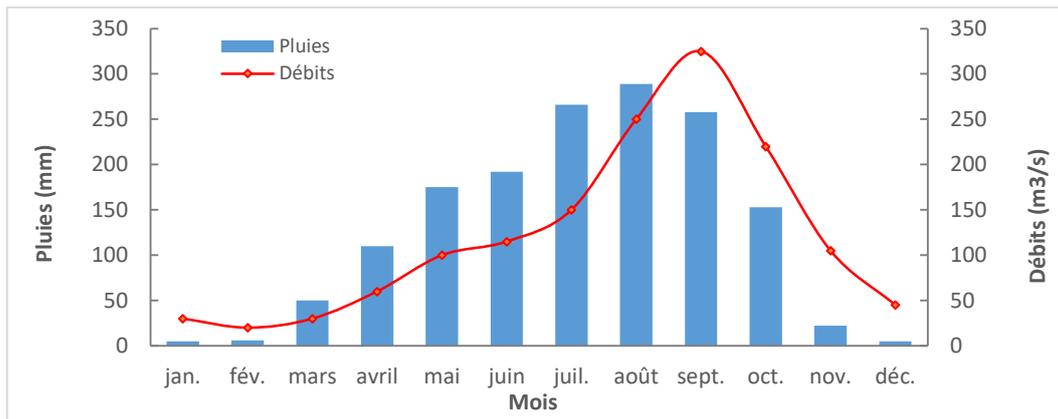


Figure IV.17 : Evolution des débits mensuels en fonction de la pluie mensuelle à Batouri

Le décalage d'un mois observé entre le pic des pluies moyennes mensuelles et celui des débits moyens mensuels est probablement dû à la recharge de la nappe et au temps de séjour des eaux à l'exutoire compte tenu de la taille (20 372 km²) du bassin versant (Dagnachew *al.*, 2003 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016 ; Winkler et *al.*, 2018). On relève cependant, une légère nuance au niveau des mois de Mai et de Juin qui montrent, sans équivoque aucune, une faible mais significative baisse à la station de la Kadey à Batouri. Ce phénomène serait également dû au temps de réponse que doit supporter le cours d'eau au niveau de Batouri avant de laisser percevoir la hausse du niveau d'eau par les échelles limnimétriques présentes par rapport à 1972-1973 année hydrologique de référence pour la station de la Kadey à Batouri (Sigha Nkamdjou, 1994).

La non-diminution des débits de hautes eaux en dépit de la baisse des pluies peut s'expliquer par les changements intervenus sur le plan de l'occupation des sols sur le bassin versant. En effet, la diminution du couvert végétal et l'accroissement des surfaces cultivées en particulier contribue à une augmentation du coefficient de ruissellement sur le bassin. Cette dernière vient compenser la baisse des volumes précipités, d'où l'absence des déficits pour les caractéristiques des hautes eaux. Si cette situation devait persister, toute chose égale par ailleurs, on devrait arriver à la situation où on assiste à un accroissement des débits de crue en dépit de la baisse des pluies. Cette situation, déjà observée dans le contexte sahélien (Mahé et *al.*, 2002), se dessine déjà sur le BVK. Alors que la baisse des pluies est évaluée à environ -12 % dans la région, on y observe un accroissement des débits caractéristiques des hautes eaux de plus de 17 % à partir de 1998.

A l'échelle mensuelle, les corrélations hydropluviométriques sont disparates, certainement pour des raisons évoquées plus haut. Les coefficients de corrélation sont également non significatifs nonobstant le fait qu'ils soient positifs (Figure IV.18).

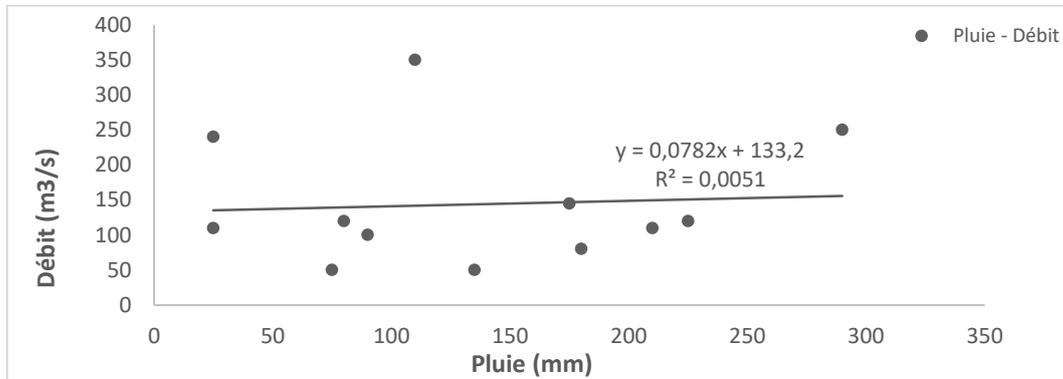


Figure IV.18 : Corrélations pluies mensuelles - débits mensuels de la Kadey à Pana

IV.1.3.3. Relation pluies journalières-débits journaliers

Les débits journaliers suivent dans l'ensemble les variations de pluies journalières. L'hydrogramme de crue (Figure IV.19) présente une forte sensibilité et une réponse rapide quelle que soit la période de l'année (saison de pluie ou saison sèche), ce qui veut dire que les débits réagissent aux averses.

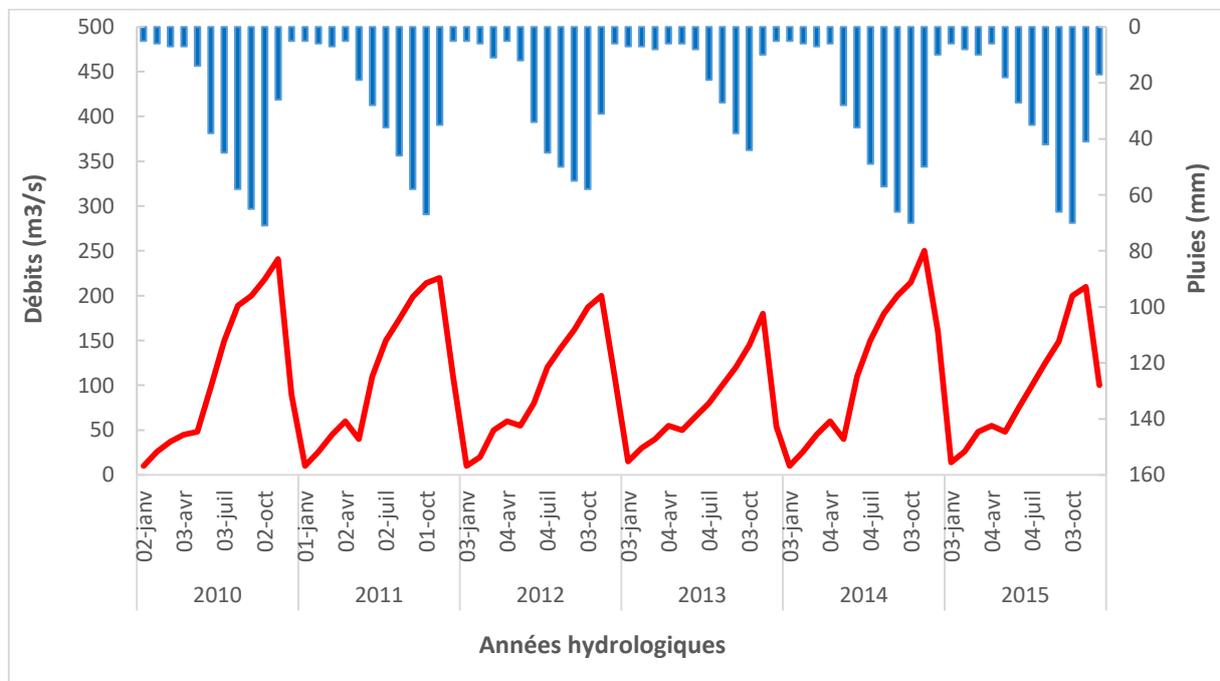


Figure IV.19 : Débits et pluies journaliers du bassin de la Kadey (1998-2015)

IV.1.4. Etude des basses et des hautes eaux du bassin versant de la Kadey

IV.1.4.1. Etudes de basses eaux ou étiage

Les périodes de basses eaux (période d'étiage) sont les périodes où les écoulements sont les plus faibles et sont essentiellement dus à une alimentation des cours d'eau par les nappes phréatiques. Dans le BVK, on observe une période d'étiage (Figure IV.20) allant de décembre à mars (saison sèche), pendant laquelle on enregistre un tarissement considérable d'une durée moyenne de 67 jours.

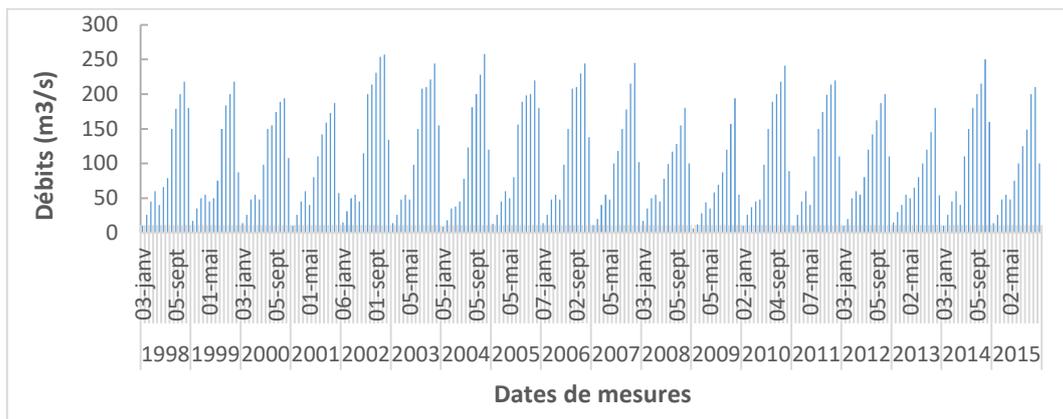


Figure IV.20 : Hydrogramme interannuel du bassin versant de la Kadey (1998-2015)

Durant cette période, la décroissance des débits suit généralement une loi de tarissement appelée loi de Maillet (Olivry, 1986) qui est de la forme $Q_t = Q_0 e^{\alpha(t-t_0)}$;

Q_0 est le débit initial à l'instant t_0 ;

$t-t_0$ = temps exprimé en jours entre l'observation du débit Q_0 et celle du débit Q_t ;

α = coefficient de tarissement qui a pour dimension l'inverse du temps.

Durant la période comprise entre mars 1998 et février 2015, le coefficient de tarissement minimal est de 0,035 (2004-2005) et le coefficient de tarissement maximal est de 0,071 (2008-2009). Pour l'année hydrologique 2015-2016, le coefficient de tarissement minimal est de 0,042 et le coefficient de tarissement maximal est de 0,048 pour une moyenne de 0,045 (Tableau XXIII).

On constate une augmentation du coefficient de tarissement entre la période avant la lacune (1965-1981) et celle après la lacune (1998-2015). En effet, il n'existe pas de tarissement pur avant la lacune car durant la période de basses eaux on assiste à des sursauts de pluies dans le bassin versant de la Kadey (Olivry, 1986). On passe alors de 0,015 à 0,042 ; soit une augmentation de + 180%.

Tableau XXIII : Coefficients de tarissement de la Kadey (mars 1998-février 2016)

Années	Saison sèche	
	Kt	N
1998-1999	0,044	76
1999-2000	0,038	80
2001-2002	0,038	89
2002-2003	0,044	76
2003-2004	0,046	78
2004-2005	0,037	81
2005-2006	0,035	89
2006-2007	0,039	87
2007-2008	0,044	66
2008-2009	0,071	77
2009-2010	0,039	65
2010-2011	0,044	46
2011-2012	0,046	45
2012-2013	0,038	62
2013-2014	0,041	72
2014-2015	0,039	73
2015-2016	0,045	70

Légende : Kt : Coefficient de tarissement ; N : Nombre de jour

Ces coefficients sont plus élevés que ceux trouvés par Olivry (1986) sur le fleuve Nyong ($\alpha = 0,023$ à Kaya, $\alpha = 0,024$ à Mbalmayo, $\alpha = 0,026$ à Ayos) ; ceux de Ndentsoa (2009) sur le Nyong ($\alpha = 0,035$) à So'o. Il en va de même pour les valeurs également trouvées par Olivry (1986) sur le Ntem à Ngoazik (0,025 pour la petite saison sèche et 0,035 pour la grande saison sèche) ; celles de Guemou (2008) sur le Mfoundi ($\alpha = 0,007$) à Yaoundé et enfin celles de Apouamoun (2006) sur la Mefou ($\alpha = 0,0169$) à Nsimalen.

IV.1.4.2. Etudes de hautes eaux ou crues

Les périodes de hautes eaux (crues) sont observées pendant les saisons de pluies. Ce sont des périodes de l'année où les débits de la rivière sont dus à trois écoulements différents : le ruissellement superficiel, le ruissellement hypodermique et l'écoulement souterrain ou de base (Ndentsoa, 2009).

Dans le bassin versant de la Kadey, on note à Pana l'existence de deux périodes de crues :

- la première, de moindre importance, apparaît au mois de mai. Elle est le résultat des débits mensuels atteignant les $60 \text{ m}^3/\text{s}$;
- la seconde, bien plus impressionnante, est enregistrée durant les mois d'octobre et novembre. Les débits avoisinent les $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Elles sont généralement responsable de la sortie du cours d'eau de son lit (Kouassy Kalédjé et al., 2019).

Le coefficient de variation de la Kadey à Pana oscille entre 0,202 et 0,228. Cette valeur est sensiblement la même dans toutes les stations le bassin versant de la Sangha sauf à Ouesso où elle est de 0,129 (Olivry 1986). Ce coefficient de variation est légèrement supérieur à ce que l'on connaît sur le Nyong ; il est comparable au coefficient de variation du Ntem et de fait semblent augmenter lorsque le caractère équatorial du bassin s'accroît (Olivry 1986).

IV.1.5. Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique permet de comparer les apports ou entrées (pluies) par rapport aux pertes en eau, après une estimation de la quantité d'eau disponible en réserve. La réalisation du bilan hydrologique consiste ainsi à équilibrer les entrées aux sorties en tenant compte des variations de stocks des différents compartiments.

Ainsi, à partir des estimations des modules pour les grands bassins (Olivry, 1986) et de celles qui ont été faites dans les stations de Batouri et de Pana, les lames écoulées interannuelles (LE) ont été calculées (350,5 mm) pour un coefficient d'écoulement de 29,78 %. La hauteur moyenne de précipitations (P) sur le bassin versant de la Kadey permet de déduire le déficit d'écoulement (De) correspondant à 1410,5 mm. Au niveau du bilan interannuel, on s'accorde pour estimer que le déficit d'écoulement correspond à l'évapotranspiration réelle (ETR). Les termes du bilan hydrologique du bassin sont résumés dans le Tableau XXIV. On se retrouve déjà dans des conditions comparables à celles de la Sanaga supérieure.

Tableau XXIV : Termes du bilan hydrologique du BVK à Batouri pour la période d'étude (1965-2015)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Tot.
P	39	59,1	126,1	160,9	195,4	189,8	157,1	162	268,2	280,2	136,3	58,6	1761
Q	168	112	113	119	143	185	210	233	370	553	495	257	247
Qs	8,24	5,49	5,54	5,84	7,02	9,08	10,30	11,43	18,16	27,14	24,29	12,15	13,17
LE	6,5	5,8	6,9	15,8	33	35,2	27,7	15,8	45,1	89,2	92,2	26	350,5
DE	32,5	53,3	119,2	145,1	162,4	154,6	129,4	146,2	223,1	191	44,1	32,6	1410,5

IV.1.5. Comparaison avec ceux des autres bassins du Cameroun

Les écoulements enregistrés dans le BVK à Pana (29,78%) sont comparables à ceux des bassins situés en zone de contact forêt-savane (Tableau XXV). C'est ainsi que dans la Sanaga à Edéa (Ndam Ngoupayou, 1997), le Mbam à Goura (Kpoumié, 2007), le Noun à Bayomen (Njinwoua,

2015) ont un coefficient d'écoulement de 29,5 % et de 32,74 % respectivement. On remarque également que les précipitations et les déficits d'écoulement des bassins de la zone de contact forêt-savane sont sensiblement du même ordre de grandeur que ceux de la Kadey à Pana. Par contre, l'écoulement est moins important sur la Kadey à Pana que sur les bassins de la zone forestière dégradée soit 78,2 % dans le Mfoundi à Cami Toyota (Geumou, 2008), 149 % dans la Mefou à Etoud (Tchamagan Touko, 2013), et 112 % dans le Nkié à Mvan (Nteuga Njike, 2012). Mais dans la zone forestière humide l'écoulement est inférieur à celui de la Kadey à Pana avec 25,4 % dans le So'o au pont So'o (Ndentsoa Nouna, 2009), et 17,8 % dans le Nyong à Mbalmayo (Kohoun, 2005) malgré le fait que les précipitations de ces différentes zones ont des valeurs presque semblables.

Tableau XXV : Comparaison des écoulements de la Kadey a d'autre cours d'eau du Cameroun

Station	P (mm)	LE (mm)	DE (mm)	Ke (%)	Zone
Kadey à Pana*	1761	345	1416	29,78	
Noun à Bayomen¹	1566,7	513	1053,7	32,74	Contact forêt-savane
Sanaga à Edéa²	1686	498	1188	29,5	
Mapé à Magba³	1727	889	838	31,47	
Mbam a Goura⁴	1886,6	595,6	1293	31,2	
Mefou à Nsimalen⁵	1729,4	634,6	1094,8	36,7	Forêt dégradée
Mfoundi à Cami Toyota⁶	1714	1338,5	375,5	78,2	
Mefou à Etoud⁷	1678	2507	-829	149	
Nkié à mvan⁸	1673,6	1883,2	-210,4	112	
So'o au pont So'o⁹	1688	413	1278,3	25,4	Forêt humide
Nyong à Mbalmayo¹⁰	1765	352	1413	17,8	
Ntem à Ngoasik¹¹	1721	574	1147	33,4	

Légende : P : Précipitations ; LE : Lame d'eau écoulée ; DE : Déficit d'écoulement ; Ke : Coefficient d'écoulement ; * : présente étude ; 1 : Njinwoua (2015) ; 2 : Ndam Ngoupayou (1997) ; 3 : Tapon Nsandamou (2011) ; 4 : Kpoumié (2007) ; 5 : Apouamoun (2006) ; 6 : Geumou (2007) ; 7 : Tchamagan Touko (2013) ; 8 : Nteuga Njike (2012) ; 9 : Ndentsoa Nouna (2009) ; 10 : Kohoun (2005) ; 11 : Ouafu Mendo (2006).

IV.2. Fonctionnement Hydrodynamique du bassin versant de la Kadey

Les travaux réalisés dans cette partie ont pour objectif de comprendre le fonctionnement hydrodynamique du BVK. Pour cela, une analyse dans l'espace et le temps des variations des nappes d'eau souterraine, des relations entre la pluviométrie et la piézométrie et du bilan hydrique dans ce bassin versant devient indispensable.

IV.2.1. Variations spatiotemporelles des niveaux statiques dans le BVK

IV.2.1.1. Domaines de variations des niveaux statiques

Durant la période d'étude située entre 2014 - 2015, les battements des nappes d'eau souterraine de soixante-douze ouvrages (15 forages et 57 puits) suivis dans le BVK fluctuent de façon générale entre 3,71 et 8,26 m pour une moyenne arithmétique de $4,66 \pm 0,49$ m et une médiane de 4,74 m au niveau des puits et, entre 7,18 et 10,54 m pour une moyenne de $7,89 \pm 0,15$ m et une médiane de 7,62 m en ce qui concerne les forages (Tableau XXVI).

Tableau XXVI : Variations des niveaux statiques des puits et forages dans le BVK

Types d'ouvrages	Min (m)	Moy. (m)	Max (m)	Méd. (m)	Amplitude de variation (m)	Nombre d'ouvrages (n)
Forages	7,18	7,89	10,54	7,62	3,36	15
Puits	3,71	4,66	8,26	4,51	4,55	57

Légende : Min : Minimum ; Moy. : Moyenne ; Max : Maximum ; Méd. : Médiane ; n : Nombre d'ouvrage.

On remarque que les puits pour lesquels les battements de la nappe varient très peu (inférieurs à 3 mètres) sont pour la plupart du temps situés au niveau des zones basses du relief et dans les zones de ruptures de pentes où les altitudes sont en générale inférieures à 700 m. Il s'agit respectivement des puits P05 ; P07 ; P35 ; P51 et P56. En revanche, dans les zones de haut-relief, où les côtes sont supérieures à 1000 m, les fluctuations du niveau de la nappe peuvent atteindre jusqu'à 11 mètres à l'instar des puits P11 ; P28 et P46. Entre ces deux altitudes pour les ouvrages situés à mi pente entre 700 et 1000 m d'altitude, les niveaux statiques varient généralement entre 3 et 11 m (P17 ; P38 et P40) (Figure IV.22).

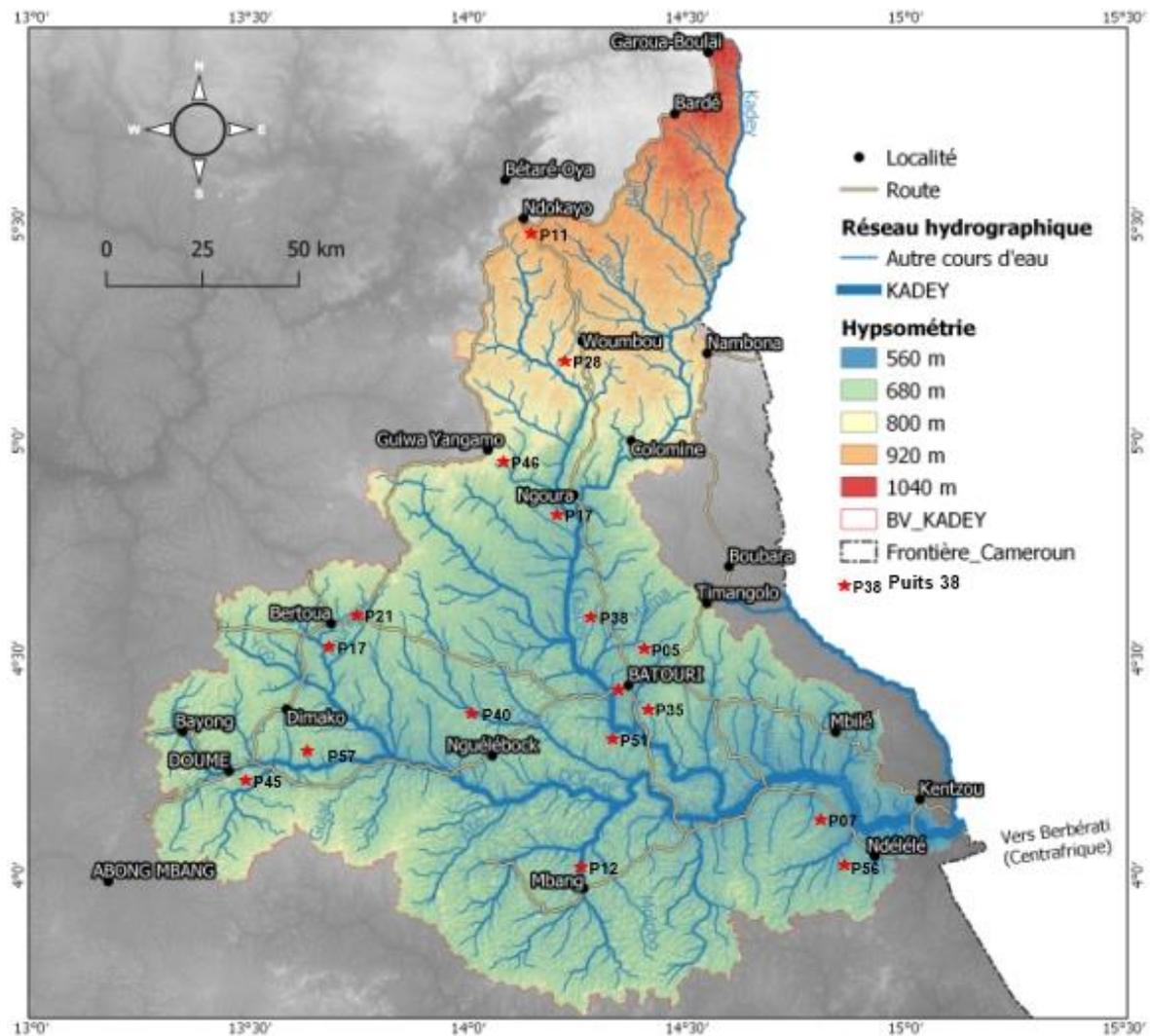


Figure IV.22 : Répartition spatiale des ouvrages hydrauliques suivis dans le BVK entre 2014 et 2015

IV.2.1.2. Evolution spatiotemporelle des niveaux statiques dans le BVK

Pendant la période 2014-2015, les niveaux statiques varient dans le temps et l'espace en fonction de la pluviométrie et/ou du relief. On remarque généralement quatre niveaux d'évolution des battements de la nappe (Figure IV.23) :

- une légère hausse des niveaux statiques qui correspond déjà au début de la recharge de la nappe ; elle commence au mois de mai après que les premières pluies efficaces se sont infiltrées pour atteindre la nappe (fin de la saison sèche et début de la saison des pluies) ;
- une grande augmentation (hausse très sensible) des niveaux d'eau dans les ouvrages (puits, forages) qui correspond à la recharge complète de la nappe. Durant cette période

qui correspond au maximum des pluies entre août et septembre, les niveaux statiques atteignent leur niveau le plus haut avec respectivement 81,47% et 17,53% de recharge ;

- une légère baisse des niveaux statiques correspondant au début de la décharge de la nappe. Celle-ci commence juste avant la fin de la saison des pluies c'est-à-dire au mois d'octobre ;
- une période pendant laquelle les niveaux statiques baissent de façon progressive pour atteindre leurs valeurs les plus basses pendant les mois de janvier pour 17% des ouvrages, février (72, 20 % des ouvrages) et mars (8,15 % des ouvrages).

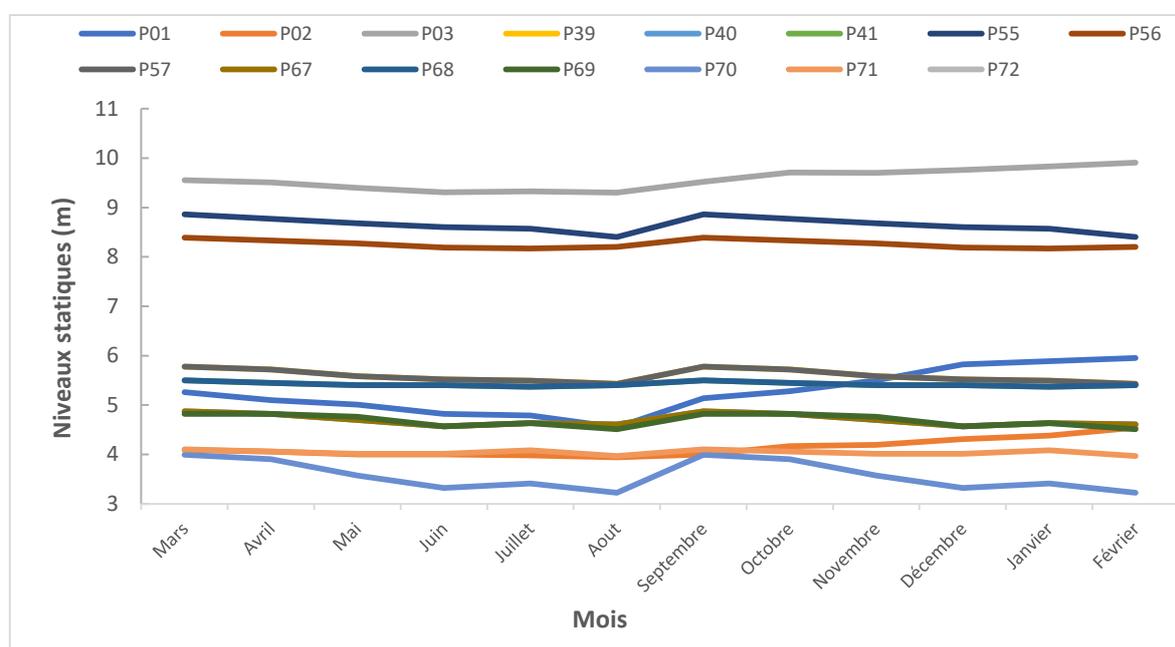


Figure IV.23 : Variations des niveaux statiques dans quelques ouvrages témoins (représentatifs) dans le bassin versant de la Kadey

Les courbes des variations des niveaux statiques peuvent être ainsi réparties en quatre (04) groupes (Figure IV.24) :

- le groupe caractérisé par les variations des niveaux statiques compris entre 9 et 11 mètres ; il est observé dans deux (02) ouvrages, soit 2,78% de la répartition des ouvrages hydrauliques suivis dans le BVK,
- le groupe des ouvrages ayant des niveaux statiques variant entre 6 et 9 mètres pour 15 ouvrages (20,83%) ;
- la catégorie des ouvrages dont les niveaux statiques oscillent entre 3 et 6 mètres avec 31 ouvrages (43,06%) ;

- les ouvrages présentant des niveaux statiques dont les variations sont en dessous de 3 mètres (24 ouvrages, soit 33,33%).

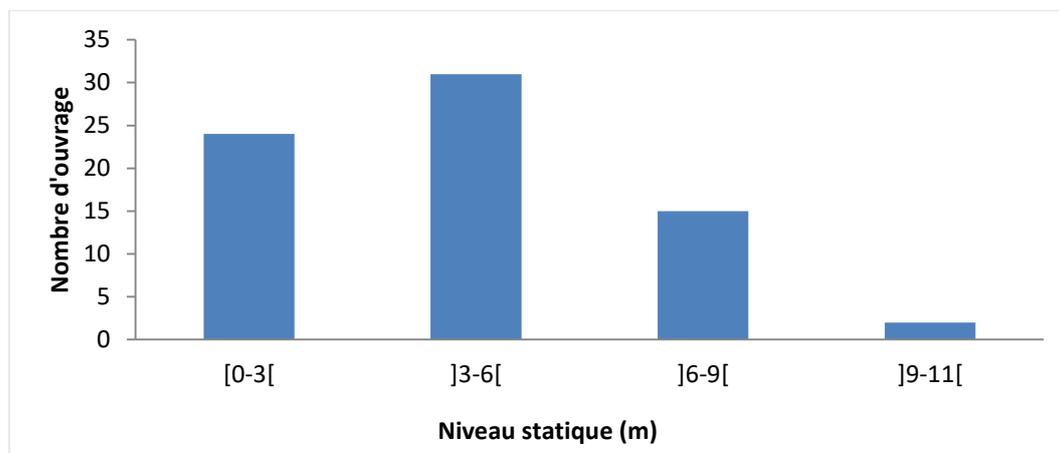


Figure IV.24 : Histogramme de la répartition des ouvrages hydrauliques en fonction de la variation du niveau statique dans le BVK au cours de la période d'étude (2014-2015).

IV.2.2. Variations spatiotemporelles des niveaux piézométriques

IV.2.2.1. Domaines de variations des niveaux piézométriques

Entre 2014 et 2015, la variation des niveaux piézométriques des puits, forages, sources et cours d'eau suivis dans le bassin versant oscille entre 626,54 et 991,90 m pour une moyenne arithmétique de $682,10 \pm 74,15$ m et une médiane de 654,85 m (Tableau XXVII). Ces variations se situent respectivement entre 621,85 et 720,90 m pour une moyenne de $653,16 \pm 37,46$ m et une médiane de 631,96 m pour ce qui est des sources et, entre 689,72 et 892,99 m pour une moyenne de $791,37 \pm 106,10$ m et une médiane de 791,35 m pour les cours d'eau (Tableau XXVII).

Tableau XXVII : Domaine de variation des niveaux piézométriques dans le BVK durant la période d'étude 2014-2015

Ouvrages hydrauliques	Min. (m)	Moy. (m)	Max. (m)	Méd. (m)	ET	CV (%)
Puits et Forages	626,54	682,10	991,90	654,85	74,15	3
Sources	621,85	653,16	720,90	631,96	37,46	1
Cours d'eau	689,72	791,37	892,99	791,35	106,10	1

IV.2.2.2. Evolution des niveaux piézométriques dans l'espace et le temps

L'analyse des fluctuations des niveaux piézométriques durant la période d'étude dans le BVK montre une évolution synchrone de la surface piézométrique dans les différents ouvrages de captages suivis (Figure IV.25). Cette uniformité de la variation de la surface piézométrique peut-être la résultante et l'expression de l'existence d'un aquifère de sub-surface unique et continu dans tout le bassin versant de la Kadey comme c'est souvent le cas en zone de socle cristallin fracturé (Djeuda et al., 1999 ; Ngounou Ngatcha et al., 2005 ; Ngounou et Daiwé, 2010 ; Fouépé et al., 2012 ; Ewodo, 2009 ; Tabue et al., 2015 ; Bon et al., 2017 ; Ewodo et al., 2017 ; Mfonka, 2019).

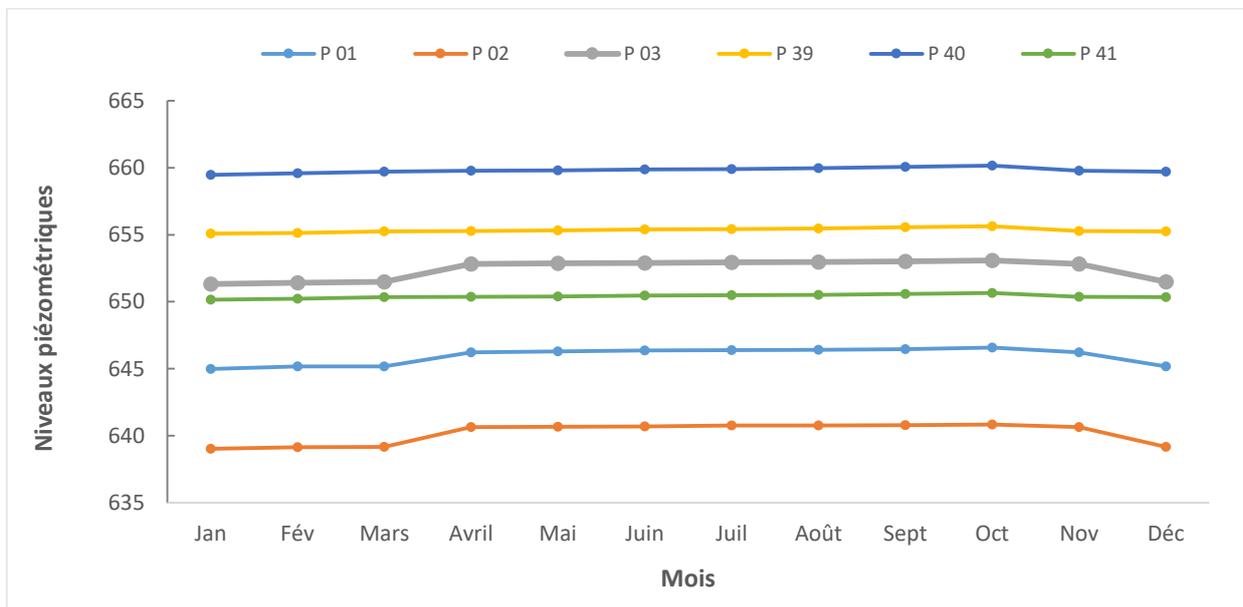


Figure IV.25 : Evolution spatiotemporelle des niveaux piézométriques dans le BVK durant la période d'étude 2014-2015

Durant la période d'étude, on remarque qu'au cours des cinq (05) mois que dure la saison sèche (novembre à mars), le niveau piézométrique dans la localité décroît et atteint 697,22 m en janvier. Par contre, pendant la saison des pluies (avril à octobre), le niveau piézométrique dans les ouvrages monte et culmine à 697,90 m en août.

IV.2.3. Elaboration et interprétation des cartes piézométriques

IV.2.3.1. Elaboration et analyse des cartes piézométriques

L'établissement de la carte piézométrique dans un bassin versant a pour but de déterminer les principales directions de l'écoulement souterrain, les aires d'alimentation de la nappe et éventuellement les sources et le devenir des pollutions dans ledit bassin. Ces cartes

piézométriques sont construites en courbes d'iso valeurs représentant, à une date ou période donnée, la distribution des charges et des potentiels hydrauliques. Elles schématisent d'une part les fonctions capacitatives et conductrices du réservoir, et d'autre part le comportement hydrodynamique de l'aquifère (Castany, 1998).

Les courbes hydro isohypses réalisées pour les périodes correspondant à la saison sèche et celle de la saison de la pluie au cours de l'année hydrologique 2014-2015 dans le BVK matérialisent la morphologie de la surface de la nappe. Elles donnent ainsi un aperçu de l'évolution spatiale et temporaire de cette forme de la surface piézométrique (Figures IV.26 et IV.27).

L'analyse des cartes obtenues montre que les lignes de courant sont subparallèles à la direction des cours d'eau (Figures IV.26 et IV.27). Ceci suppose donc une alimentation préférentielle de la nappe libre par les eaux météoriques au détriment des eaux du cours d'eau. Comme la majorité des aquifères rencontrés en zone de socle cristallin fissuré, ces résultats corroborent ceux obtenus par Anonyme GWP Caf, (2011) dans la zone affectée à la construction du port en eau profonde de Kribi où on identifie un écoulement qui est uniforme avec, un module d'espacement généralement constant (0,048) dans tout le domaine. Ce premier constat indique vraisemblablement l'existence d'une nappe qui présente un profil linéaire avec un gradient hydraulique et un débit constant.

Cette analyse met également en exergue l'existence de deux zones aux caractéristiques distinctes dans le BVK. Il s'agit des aires d'alimentation et des zones de dépression piézométrique qui sont présentés ci-dessous dans les lignes qui suivent.

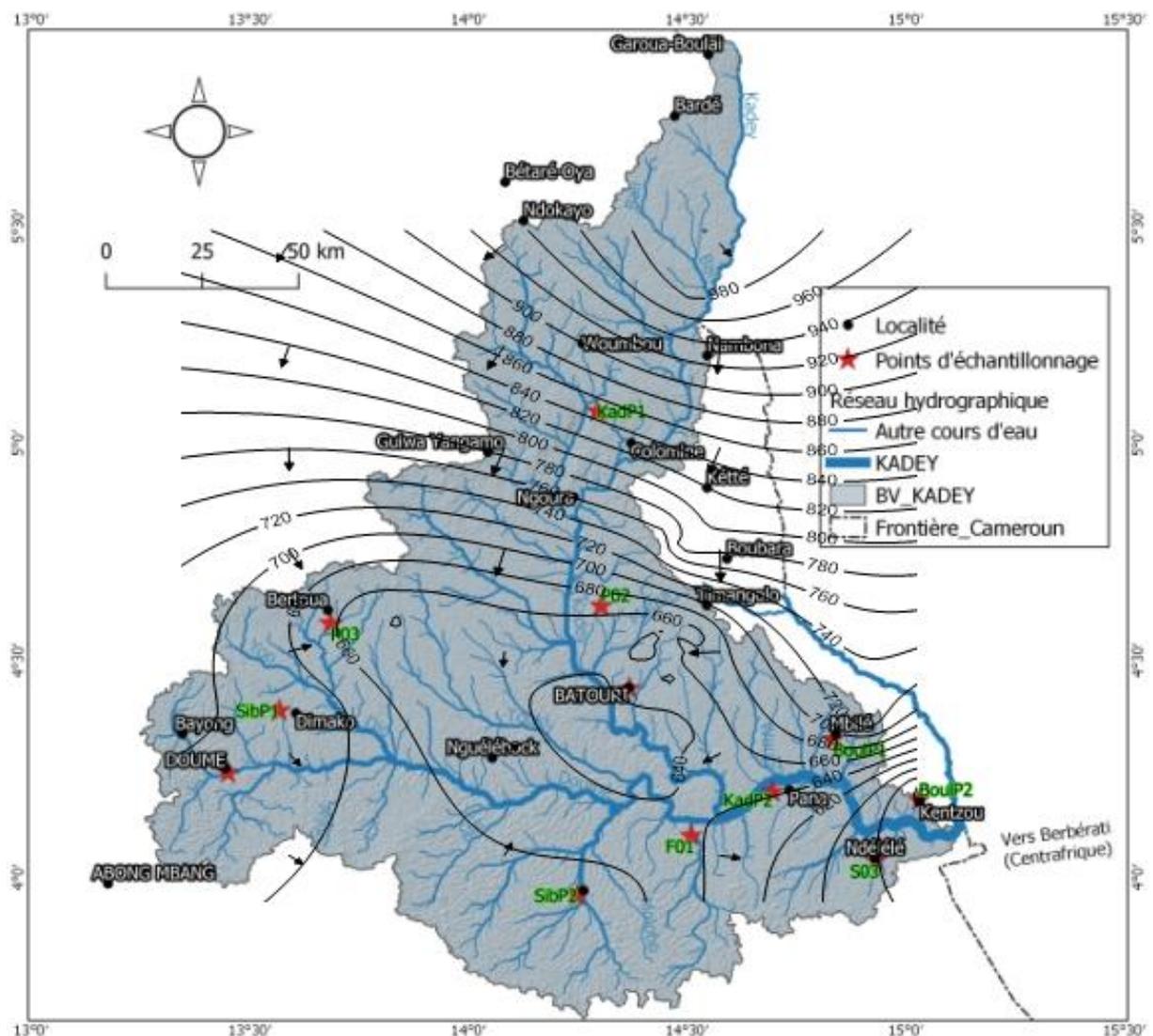


Figure IV.27 : Fluctuations de la surface piézométrique du BVK durant la saison de pluies (Juillet 2015)

IV.2.3.2. Identification des zones d'alimentation des eaux souterraines dans le BVK

L'existence des axes d'écoulement divergents sur une carte piézométrique matérialisent des dômes qui sont des lieux de « départ » des eaux souterraines dans un bassin versant. Dans le cas spécifique du bassin versant de la Kadey, on constate que les lignes de courant partent du nord dans les localités de Ndokayo, Colomine, Garoua Boulai, de l'ouest (Bertoua, Dimako,

Doumé) et de l'est dans les localités de Timangolo, Mbilé pour converger toutes vers le centre du bassin (Batouri) d'une part et vers l'exutoire à Pana d'autre part (figures IV.26 et IV.27).

Quel que soit la saison (pluvieuse ou sèche), ces différentes zones de départ des eaux ou points d'alimentation des eaux souterraines restent les mêmes car la chute du niveau d'eau est générale. L'analyse des données piézométriques du bassin du 23 au 30 septembre montre que l'allure générale des courbes croît légèrement pour redescendre à partir d'octobre. Ce phénomène pourrait être la preuve d'une alimentation des eaux souterraines par les eaux de pluies par infiltration d'une part et par les écoulements souterrains d'autre part. En effet, les ouvrages hydrauliques identifiés dans ces zones présentent les côtes qui sont les plus élevées du secteur et montrent de ce fait même, l'uniformité de l'alimentation de la nappe du BVK. On constate également une baisse générale du niveau des eaux souterraines due à l'arrêt prolongé des pluies pendant la quasi-totalité du quatrième trimestre de cette année hydrologique comprise entre octobre 2015 et début janvier 2016.

IV.2.3.3. Identification des Zones de drainages des eaux souterraines dans le BVK

Les zones de dépression identifiées à partir de l'analyse de la morphologie de la surface piézométrique s'observent d'août à novembre au centre du BVK dans les localités de Batouri et Nguélébock et vers le sud-est à l'exutoire du BVK à Pana (figures IV.26 et IV.27). On note une convergence des lignes de courant au niveau de la Kadey qui draine la quasi-totalité des eaux du bassin vers l'exutoire. Cette distribution des axes de courant (alimentation de la nappe souterraine) se fait de manière homogène et uniforme sur l'ensemble du bassin versant.

Il ressort de tout ce qui précède que la fluctuation de la surface piézométrique dans le BVK voire dans la région est dépendante non seulement du régime des pluies mais aussi des venues d'eau souterraines comme le montrent les travaux de Mfoutou (1996) ; Feumba (2005) ; Ewodo et *al.* (2012 ; 2017) ; Tabari et *al.* (2015) ; Tabue et *al.* (2015) sur ces types de bassins situés sur socle cristallin fracturé et/ou fissuré. Par ailleurs, le fait que les niveaux d'eau souterraine soient bas dans les ouvrages pendant le début du mois de septembre et, qu'ils remontent à partir de fin juillet avec le retour d'intenses pluies qui rechargent les nappes par le phénomène d'infiltration reste la preuve d'une nappe unique plus ou moins continue. En somme, le niveau de la surface piézométrique reste toujours plus élevé que les côtes du cours d'eau que ce soit au niveau des dômes qu'à ceux des dépressions piézométriques. C'est là encore, un autre élément qui milite en faveur de l'existence d'une seule et même nappe dans le bassin versant dont les différentes poches sont interconnectées par des fissures et ou des fractures du socle cristallin

qui domine l'ensemble du sud et centre forestier camerounais (Nzenti et Tchoua, 1996 ; Owona et *al.*, 2013b ; Ntep, 2005 ; Kouam et *al.*, 2006 ; Ndong et *al.*, 2012).

IV.2.4. Relations entre les variations des niveaux d'eau souterraine du BVK avec la pluviométrie et le relief

IV.2.4.1. Relation pluies-variation des niveaux statiques

Durant l'année hydrologique, les fluctuations des niveaux d'eau dans les différents ouvrages hydrauliques suivent celles des saisonnalités pluviométriques (Figure IV.28). On remarque toutefois, que la réponse des variations de ces niveaux statiques n'est pas synchrone pour tous les ouvrages hydrauliques de la zone d'étude. Ce décalage serait probablement dû au temps de séjour que l'eau met pour traverser l'aquifère, mais également à la taille du bassin versant qui demande un certain temps pour que la réponse hydrogéologique du bassin puisse être perçue après un épisode pluvieux (Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016 et 2019).

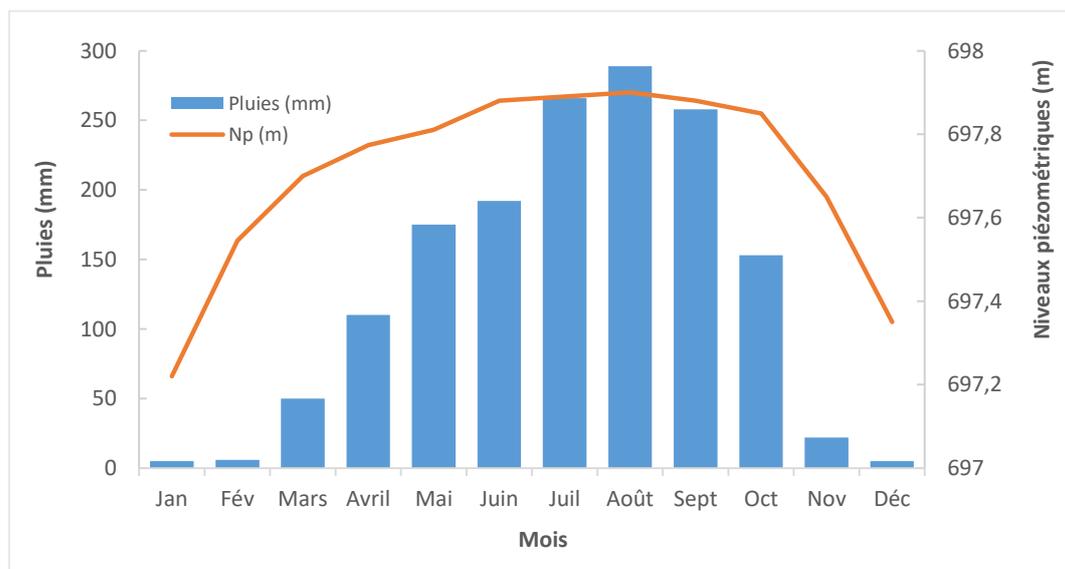


Figure IV.28 : Comparaison de la variation du niveau piézométrique à celle des pluies mensuelles dans la localité de Batouri et de ses environs

On note aussi dans l'ensemble du BVK que les puits et forages se trouvant dans les zones basses du relief à l'instar des puits P05, P07, P35, P51 et P56 sont plus assujettis à l'influence des pluies, contrairement à ceux situés au niveau des altitudes hautes du relief comme P11, P28 et P46. Ce phénomène serait lié aux caractéristiques physiques et hydrodynamiques des formations aquifères et de nappe identifiées dans la zone d'étude que sont : la perméabilité de la

zone située au-dessus de la zone saturée ; la profondeur de la surface libre de la nappe ; la capacité de stockage des ouvrages ; la structure locale de l'aquifère qui joue un rôle déterminant dans l'écoulement souterrain ; l'état initial de la nappe et la topographie (Kamagaté, 2006 ; Yihdego et Webb, 2011 ; Bon et *al.*, 2016 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016 ; Mfonka, 2019). En effet, entre le moment où l'eau s'infiltré dans le sol et celui où elle parvient à la nappe, il existe un certain temps « retard » dont l'importance est nécessairement liée aux paramètres cités ci-dessus.

IV.2.4.2. Relation topographie – surface piézométrique

La confrontation et l'analyse de la variation topographique et/ou de la répartition spatiale du relief de la zone d'étude par rapport aux variations de la surface piézométrique montre des tendances et des similitudes. On observe ainsi des dômes sous les plateaux et des dépressions au niveau des vallées. Ces dômes piézométriques situés au niveau des zones de hautes altitudes constituent également des lignes de crêtes souterraines. Ils montrent un type d'aquifère à nappe radiale divergente traduisant généralement des aires d'alimentation par infiltration des précipitations efficaces comme le souligne Castany (1998). Les zones de dépressions, quant à elles, définissent un type d'aquifère à nappes radiales convergentes qui sont des lieux idéaux pour le captage des eaux souterraines.

L'examen des cartes piézométriques durant les saisons sèche et pluvieuse ne révèle aucune différence, tant du point de vue morphologique que de l'allure des courbes piézométriques. Cette uniformité structurelle traduit le même régime d'écoulement où les eaux de l'aquifère alimentent les eaux de surface et vice versa selon la période.

IV.2.4.3. Relations entre les systèmes : pluies – sources – forages et cours d'eau

L'analyse de toutes les cartes piézométriques et topographiques réalisées dans le BVK montre une variation identique de la morphologie de la surface piézométrique. On constate ainsi que cette variation ne se fait pas indépendamment par rapport au régime pluviométrique. Les différents niveaux piézométriques atteignant tous leurs maxima durant la saison sèche et leurs minima pendant la saison de pluies. On pense à une recharge des eaux souterraines par percolation et infiltration des apports atmosphériques (pluies efficaces) et par des eaux de surface (cours d'eau) par écoulements souterrains.

IV.2.4. Bilan hydrique

Le bilan hydrique permet de comparer les apports ou entrées (pluies) par rapport aux pertes en eau, après une estimation de la quantité d'eau disponible en réserve. La réalisation du bilan hydrique consiste ainsi à équilibrer les entrées aux sorties en tenant compte des variations de stocks des différents compartiments.

Dans la présente étude, le bilan hydrique de Thornthwaite (1954) sera utilisé pour établir le bilan hydrique dans le BVK pour l'année hydrologique 2014-2015. Il permet d'évaluer le déficit d'écoulement mensuel et prend en compte la réserve du sol d'un mois à l'autre. L'évapotranspiration potentielle est fonction de la température moyenne mensuelle par l'entremise des indices thermiques mensuels (i), calculés par la formule $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$ et de la durée astronomique du jour. L'évapotranspiration potentielle (ETP) de Thornthwaite est obtenue par la formule suivante :

$$\mathbf{ETP}_{(\text{mm})} = 16 \times \left(\frac{10T}{I}\right)^\alpha \times F(\lambda) ; \quad \mathbf{I} = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$\alpha = 0,492 + 1,7 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 ;$$

Avec **T** : température moyenne mensuelle ; **I** : indice annuel de température ; **i** : indice mensuel de température ; λ : facteur de correction qui dépend de la latitude et varie entre 0,94 et 1,04 pour la ville de Batouri.

A partir donc des précipitations mensuelles (P) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP), les paramètres du bilan hydrique suivants : l'évapotranspiration réelle (ETR), la réserve facilement utilisable (RFU), la variation de la réserve facilement utilisable (Δ RFU), l'excédent pluviométrique (Ws), le déficit agricole (DA) et le coefficient mensuel d'humidité (α) sont déduits grâce à l'organigramme de Thornthwaite.

Il ressort donc du bilan hydrique calculé dans le BVK pour l'année hydrologique 2014-2015, que la pluie obtenue est de 1761 mm ; l'ETP est de 1211,7 mm ; l'ETR est de 1086,10 mm et l'infiltration est de 187,50 mm. La période d'excédent pluviométrique est observée de mars à juin puis de septembre à novembre (Tableau XXVIII) ; l'aquifère se recharge grosso modo de mars à novembre durant la saison de pluies.

Tableau XXVIII : Termes du bilan hydrique du bassin versant de la Kadey (2015)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Total
P	27	63	127	184	188	141	113	129	217	271	139	28	1761
ETP	115,1	100	119,2	107,9	104,1	96,8	89	92,5	89,8	99,6	93,2	104,6	1211,7
ETR	37	68	105,1	101,7	100,5	90,1	75	86,4	82,3	96,1	85,6	95,3	1086,1
RFU	0	0	37,8	100	100	100	50,1	48,6	100	100	100	38,4	-
ΔRFU	0	0	37,8	62,2	37,8	62,2	-12,1	60,7	39,3	60,7	39,3	-0,9	-
WS	0	0	119,2	101	112	106,9	0	0	123	186	60	4,6	812
D.A	78,1	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101,1
P-ETP	-78,1	-32	37,8	93,1	107,9	60,2	-19	-1,5	133,2	186,4	66,8	-61,6	549,3
α (%)	-0,68	-0,32	0,31	0,86	1,03	0,63	-0,21	-0,02	1,48	1,87	0,71	-0,58	-

P (mm) = pluie ; **ETP (mm)** = évapotranspiration potentielle ; **ETR** = évapotranspiration réelle ; **RFU** = la réserve facilement utilisable ; **ΔRFU** = la variation de la réserve facilement utilisable ; **WS** = l'excédent pluviométrique ou water surplus ; **DA** = le déficit agricole ; **α (%)** = le coefficient mensuel d'humidité.

Conclusion

Plusieurs points sont à retenir au terme de ce chapitre. Les débits annuels de la Kadey varient entre 97,9 m³/s et 218 m³/s à Batouri, et entre 148,4 m³/s et 317 m³/s à Pana pour des module moyen interannuel de 147±25,6 m³/s et 224±28,1 m³/s respectivement. L'analyse de l'évolution de ces débits monte une succession de périodes humides et sèches, et indique une baisse de ces derniers -13% à Batouri et de -12,95% à Pana. Les débits moyens mensuels de la Kadey oscillent d'une part entre 50,2 m³/s (mars) et 342,8 m³/s (novembre) à Batouri, et entre 65 m³/s (février) et 489,6 m³/s (novembre) à Pana. De la confrontation des débits moyens mensuels de la Kadey à Batouri et à Pana avant et après la lacune, il ressort que les moyennes mensuelles observées durant la période actuelle sont dans l'ensemble inférieures à celles de la période 1951-1977 à l'exception des débits mensuels de la grande saison sèche comprise entre juillet - septembre qui ont connus un accroissement. Sur le plan journalier, les débits de la Kadey à Batouri montrent des fluctuations qui varient différemment d'une année à une autre. On note ainsi que durant la période comprise entre 1951 et 2015, le plus petit débit journalier obtenu est de 10 m³/s (0,34 l/s.km²), tandis que le plus fort débit journalier enregistré est de 574 m³/s (35

l/s.km²). L'analyse des coefficients de corrélation pluies annuelles-débits annuels suggère qu'il n'aurait pas de corrélation étroite entre les deux paramètres mais une simple dépendance. Dans le BVK, on constate une augmentation de + 180% du coefficient de tarissement entre les périodes pré et post. Par contre, le coefficient de variation des crues de la Kadey à Pana oscille entre 0,202 et 0,228. Dans le Bassin versant de la Kadey, les battements de la nappe fluctuent entre 3,71 et 10,54 mètres pour une moyenne de $5,5 \pm 0,49$ mètres. Les puits sont classés en trois groupes en fonction de leurs positions altitudinales (< 700 m ; entre 700 et 1000 m et, > 1000 m. La variation des niveaux piézométriques indique une fluctuation comprise respectivement entre 621,85 et 720,90 m pour ce qui est des sources ; et entre 689,72 et 892,99 m pour les cours d'eau. La cartographie piézométrique montre (1) une alimentation préférentielle de la nappe libre par les eaux météoriques au détriment des cours d'eau et ceci avec un écoulement uniforme dont le module d'espacement est constant (0,048) dans tout le domaine ; (2) une fluctuation des niveaux de l'eau qui épouse les saisonnalités pluviométriques même-ci, la réponse des variations des niveaux piézométrique n'est pas synchrone pour tous les ouvrages hydrauliques de la zone d'étude ; (3) qu'il n'existe aucune différence, tant du point de vue morphologique que de l'allure des courbes piézométriques et (4) qu'il existe un échange continu entre les eaux de surface et celles souterraines au moyen de l'infiltration et ou de l'écoulement souterrain. Le bilan hydrique calculé montre que pour une lame d'eau précipité de 1761 mm, l'ETP et l'ETR correspond à 68,81%, l'infiltration tourne autour de 10,65% et le déficit d'écoulement avoisine les 19,60%. Ce travail mériterait d'être approfondi en intégrant les paramètres tels que les perméabilités, les transmissivités pour mieux rendre compte du fonctionnement hydrodynamique de cet aquifère.

CHAPITRE V : HYDROGEOCHIMIE DU BASSIN VERSANT DE LA KADEY

Introduction

Le présent chapitre restitue, les résultats sur la qualité physicochimique des eaux d'écoulement et souterraines du bassin versant de la Kadey à Batouri, présente l'analyse des variations dans l'espace et le temps de ces paramètres dans les eaux de cette zone d'étude, donne les principales origines des différents éléments analysés ainsi que les facteurs environnementaux qui les contrôlent.

V.1. Domaine de variations des paramètres physicochimique dans les eaux du Bassin versant de la Kadey

Les éléments pris en compte dans la présente étude statistique sont les paramètres physiques (pH, Conductivité Electrique : CE, Matières et Eléments en Suspension totales : MES tot, et la Turbidité), les paramètres chimiques (anions et cations majeurs, somme des équivalents cations : TZ^+ et somme des équivalents anions TZ^-), la balance ionique : BI, les éléments en traces métalliques : ETMs et cyanures tel que consigné dans le tableau XXIX. Il faut surtout noter que cette analyse est faite ici de façon globale sans tenir compte des différents types d'eau (souterraine ou d'écoulement) rencontrées dans le bassin versant de la Kadey à Batouri.

V.1.1. Paramètres physiques (pH, CE, Turbidité et MES)

Dans le bassin versant de la Kadey à Batouri, les eaux ont des pH compris entre 5,72 et 6,08 pour une moyenne arithmétique de $6,05 \pm 0,07$ et une médiane de 6,01 (Tableau XXIX). Ce sont des eaux acides selon les classifications données par Detay (1993), Rodier (2009).

Les conductivités électriques (CE) enregistrées évoluent de 18 à 140 $\mu S/cm$ pour une moyenne arithmétique de $80,22 \pm 12,45 \mu S/cm$ et une médiane de 62,12 $\mu S/cm$ (Tableau XXIX). Ce sont des eaux très faiblement à faiblement minéralisées (Detay, 1993 ; Rodier, 2009 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016 ; Rakotondrabe et *al.*, 2017).

Les turbidités des eaux présentent des concentrations oscillant entre 17 et 4 012 NTU pour une moyenne arithmétique de $944,88 \pm 1022,86$ NTU et médiane de 439,53 NTU (Tableau XXIX).

Enfin, les MES totales connaissent une variation allant de 3,93 et 1 108,27 mg/L pour une moyenne arithmétique de $606 \pm 187,17$ mg/L et une médiane de 339,38 mg/L (Tableau XXIX).

Pour la plupart de ces paramètres physiques dosés, de nombreux échantillons d'eaux présentent des valeurs supérieures aux normes de l'OMS (2011) pour ce qui est des eaux destinées à la consommation humaine à l'instar de la turbidité (5,00 NTU) et des matières et éléments en suspension totales (25-40 mg/L) comme consigné dans le tableau XXIX.

Tableau XXIX : Domaine de variation de certains paramètres physiques dans les eaux de Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
pH		25	5,72	6,0116	6,08	6,011	0,07	6,5<pH<8,5
CE	µS/cm	25	18	80,22	140	69,12	12,45	1500
Turbidité	NTU	25	17	944,88	4012	439,53	1022,86	5,00
MES totales	mg/L	25	3,93	606,1	1108,27	338,38	187,17	25 - 40

Légende : CE = Conductivité électrique ; MES totales = Matières et éléments en suspension totales ; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé

V.1.2. Paramètres chimiques (Eléments majeurs et ETMs et cyanures)

V.1.2.1. Cations majeurs et TZ⁺

Les concentrations en magnésium (Mg²⁺) oscillent entre 0,48 et 28,61 mg/L. Ceci pour moyenne arithmétique de 8,18 ± 2,07 mg/L et une médiane de 3,59. Les différentes teneurs en calcium (Ca²⁺) quant à elles sont comprises entre 4 et 105,85 mg/L pour une moyenne arithmétique de 18,45 ± 27,60 mg/L et une médiane de 9,30. Pour ce qui est du sodium (Na⁺) et du potassium (K⁺), ils varient respectivement entre 2,76 et 70,58 mg/L pour une moyenne arithmétique de 23,75 ± 22,29 mg/L et entre 0,09 et 16,89 mg/L pour une moyenne arithmétique de 3,87 ± 5,12 mg/L. Ici, les ions ammonium (NH₄⁺) pour terminer sont compris entre 0,27 et 117,01 mg/L pour une moyenne arithmétique de 34,97 ± 37,28 mg/L (Tableau XXX).

Les eaux du bassin versant de la Kadey à Batouri présente une somme des équivalents cations (TZ⁺ = Ca²⁺ + Mg²⁺ + Na⁺ + K⁺ + H⁺) qui est comprise entre 49,44 et 1252,14 éq/L pour une moyenne arithmétique de 302,57 ± 278,25 éq/L et une médiane de 201,67 (Tableau XXX).

On constate que tous ces cations majeurs ont des teneurs qui sont bien en deçà des concentrations admissibles par l'OMS (2011) en matière pour ce qui est des eaux destinées à la consommation humaine à l'exception des ions Ca²⁺ ; K⁺ et NH₄⁺.

Tableau XXX : Domaine de variation de certains paramètres chimiques (Cations) dans les eaux de Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
Ca²⁺	mg/L	25	4	18,45	105,85	9,30	27,60	100
Mg²⁺	mg/L	25	0,48	8,18	28,61	3,59	2,07	125
Na⁺	mg/L	25	2,76	23,75	70,58	15,32	22,29	200
K⁺	mg/L	25	0,09	3,87	16,89	1,63	5,12	12,00
NH₄⁺	mg/L	25	0,27	34,97	117,01	20,60	37,28	0,50
TZ⁺	µéq/L	25	49,44	302,57	1252,14	201,67	278,25	-

Légende : $TZ^+ = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+ + H^+)$; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé

V.1.2.2. Anions majeurs et TZ⁻

Dans les eaux du bassin versant de la Kadey à Batouri, l'alcalinité évolue de 20,52 à 952 µéq/L pour une moyenne arithmétique de $345,11 \pm 157,48$ µéq/L et une médiane de 204,03 µéq/L.

Les ions bicarbonates (HCO_3^-) ont des concentrations qui fluctuent quant à elles entre 42,10 et 366 mg/L pour une moyenne arithmétique de $104,42 \pm 34,17$ mg/L et une médiane de 85,86 mg/L. Les concentrations en ions nitrates (NO_3^-) sont comprises entre 0 et 30 mg/L avec une moyenne arithmétique de $9,52 \pm 7,02$ mg/L et une médiane de 0,51 mg/L. Les teneurs des ions chlorures (Cl^-) et sulfates (SO_4^-) quant à elles oscillent respectivement entre 9,88 et 50,25 mg/L pour une moyenne arithmétique de $17,28 \pm 8,02$ mg/L pour une médiane de 16,04 mg/L et entre 0,9 et 5 mg/L avec une moyenne arithmétique de $1,61 \pm 0,08$ mg/L et une médiane de 1,45 mg/L. Pour ce qui est des ions phosphates (PO_4^{3-}) et Fluorure (F^-), ils présentent des valeurs qui sont très faibles. Les concentrations sont toutes inférieures à 2,2 mg/L (Tableau XXX).

La variation de la somme des équivalents anions ($TZ^- = Cl^- + NO_3^- + SO_4^{2-} + Alc$) se fait entre 37,89 et 1580,8 µéq/L pour une moyenne arithmétique de $428,17 \pm 341,85$ µéq/L et une médiane de 258,01 µéq/L (Tableau XXX).

On note de ce qui précède que ces anions majeurs présentent des concentrations qui sont toutes en deçà des valeurs recommandées pour des eaux destinées à la consommation humaine par l'OMS (2011) à l'exception des ions hydrogénocarbonates.

Tableau XXX : Domaine de variation de certains paramètres chimiques (Anions) dans les eaux de Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
Alc.	mg/L	25	20,52	345,11	952	139,76	157,48	.
HCO₃⁻	mg/L	25	24,10	104,42	366	85,85	34,17	125 - 130
Cl⁻	mg/L	25	9,88	17,28	50,25	16,04	8,02	250,00
NO₃⁻	mg/L	25	0	9,52	30	0,51	7,02	50,00
SO₄⁻	mg/L	25	0,9	1,61	5	1,45	0,08	250,00
F⁻	mg/L	25	BLD	0,06	0,18	0,03	0,02	2,00
PO₄³⁻	mg/L	25	BLD	0,04	2,19	1,08	0,09	5,00
TZ⁻	μéq/L	25	37,89	428,17	1580,8	258,01	341,85	-
BI	%	25	13,22	-17,18	-11,60	-12,25	-17,02	-

Légende : Alc = Alcalinité ; TZ⁻ = (Cl⁻ + NO₃⁻ + SO₄⁻ + Alc) ; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; BI = Balance Ionique ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé.

V.1.2.3. Eléments en trace métalliques (ETMs) et cyanures

Les différentes valeurs des éléments trace (Fe, Mn, Pb, Cr, Cu, Zn, Cd, Hg et As) et des cyanures (CN⁻) présentes et analysées dans les eaux du bassin versant de la Kadey à Batouri sont consignées dans le tableau XXXI et la figure IV.1.

Les concentrations en Fe qui sont les plus importantes se situent entre les traces (0,1) et 2,99 mg/L pour une moyenne arithmétique de 1,55 mg/L et une médiane de 1,05 mg/L. Celles du Mn varient entre 0 et 1,75 mg/L (0,74 mg/L ; 0,17). Le Pb a des concentrations qui oscillent entre 0,008 et 0,015 mg/L (0,01 mg/L ; 0,01). Les concentrations du Cu varient entre 0,005 et 0,8 mg/L (0,18 mg/L ; 0,1). Pour ce qui est des ions Cd, As, Cr, Hg et Zn, ils présentent tous de très faibles teneurs en deçà de 0,3 mg/L alors que les ions cyanures (CN⁻) sont inférieurs à 0,15 mg/L (Tableau XXXI et Figure IV.1).

Des différents éléments traces dosés, les ions Fe, Mn, Pb, Cr et Cd présentent des teneurs largement supérieures pour des eaux destinées à la consommation humaine telles qu'indiquées par les normes prescrites par l'OMS (2011).

Tableau XXXI : Domaine de variation des éléments en traces métalliques et des cyanures (mg/L) dans les eaux de la localité de Batouri en 2016

	Min.	Moy.	Max.	Méd.	OMS
Pb	0,008	0,01	0,015	0,01	0,01
Cd	BDL	0,03	0,05	0,05	0,003
As	BDL	0,01	0,028	0,01	0,01
Cu	0,005	0,18	0,8	0,1	2
Zn	BDL	0,12	0,4	0,1	3
Cr	BDL	0,03	0,1	0,02	0,05
Mn	BDL	0,74	1,75	0,17	0,4
Fe	0,1	1,55	2,99	1,05	0,3
CN	BDL	0,01	0,14	0,03	0,07

Légende : Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; BDL = en deçà de la limite de détection ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé.

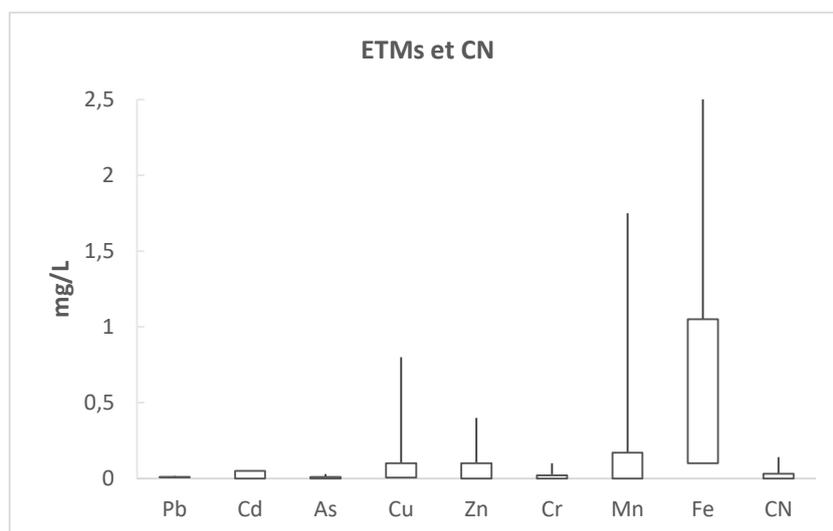


Figure IV.1 : Niveau de variations des ETMs et des cyanures dans les eaux de la localité de Batouri dans le bassin versant de la Kadey en 2016

IV.1.3. Balance ionique (BI)

Dans les eaux du bassin versant de la Kadey à Batouri, les différentes valeurs de la balance ionique obtenue évolue de -17,18 à 13,22% pour une moyenne arithmétique de $-11,60 \pm 17,02$ % et une médiane de -12, 25%. De manière générale, 67% des échantillons présentent un résultat inférieur à 10 % et le reste soit 33% ont des valeurs qui sont supérieure à 10%. Ce résultat est l'expression de ce que la majorité des eaux du bassin versant de la Kadey au niveau de Batouri présente un sérieux déficit cationique dans leur composition chimique.

IV.1.4. Faciès hydrogéochimiques des eaux de Batouri

Quatre faciès hydrogéochimiques ont été mis en évidence dans les eaux de la Kadey par le diagramme (Figure IV.2). On a ainsi :

- 70,20% des échantillons d'eau de la zone d'étude se situent au niveau du faciès bicarbonaté calcique et magnésien ($\text{HCO}_3 - \text{Ca} - \text{Mg}$) ;
- le faciès bicarbonaté sodique et potassique ($\text{HCO}_3 - \text{Na} - \text{K}$) compte pour 24,17% ;
- environ 4,45 % est attribué au faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien ($\text{Cl} - \text{SO}_4 - \text{Ca} - \text{Mg}$) ;
- le faciès chloruré sodique et sulfaté (NaCl-SO_4) comptant pour 1,18% de ces eaux.

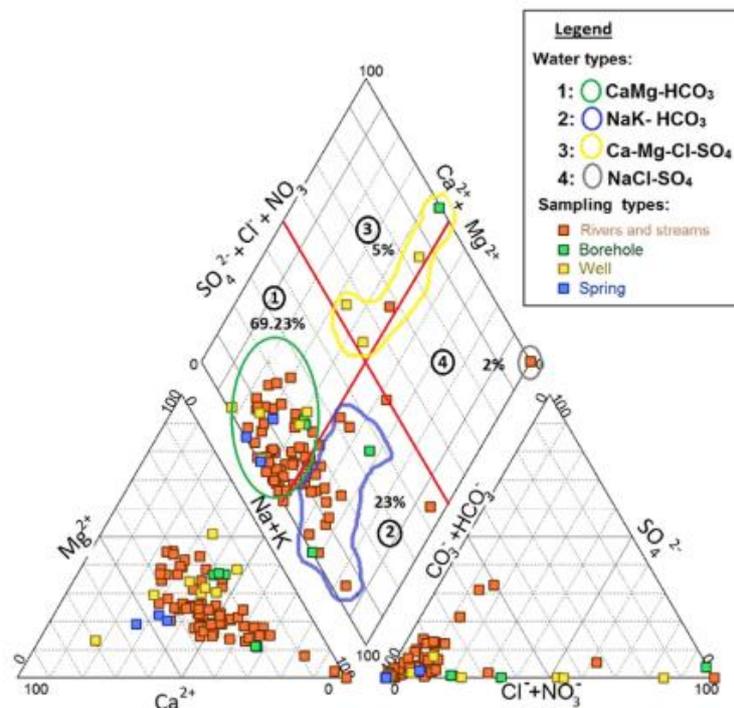


Figure IV.2 : Digramme de Piper (1944) montrant les différents faciès hydrochimiques identifiés dans les eaux de la localité de Batouri au cours de l'année 2016

V.2. Niveaux de variations des paramètres physicochimiques dans les eaux de surface et souterraines du BVK à Batouri

L'analyse statistique prend en compte les deux types d'eau échantillonnés et étudiées que sont les eaux d'écoulement composées des fleuves et rivières (Kadey et ses affluents en rive gauche et droite), les eaux souterraines qui contiennent les sources, les puits et les forages.

Les paramètres physicochimiques pris en compte dans cette étude sont :

V.2.1. Domaines de variations des Paramètres physiques (pH, conductivité électrique, Turbidité et Matières en suspension totales) dans les eaux du bassin versant de la Kadey

V.2.1.1. pH

Les pH des eaux d'écoulement du BVK obtenus durant la période d'étude comprise entre 2015 et 2016 sont compris entre 6,03 et 6,08 pour une moyenne de $6,05 \pm 0,07$ et une médiane de 6,05. Ce sont des eaux acides (Tableau XXXI et Figure V.3). Les eaux souterraines sont légèrement plus acides ($5,72 < \text{pH} < 6,05$) avec une moyenne de $6,02 \pm 0,40$ et une médiane de 6,03 (Tableau XXXII).

V.2.1.2. Conductivité électrique

Les conductivités électriques des eaux de surface varient entre 20,14 et 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour une moyenne de $75,80 \pm 37,86 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une médiane de 80,12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau XXXI). Quant aux eaux souterraines, elles ont des valeurs qui oscillent entre 18 et 117 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour une moyenne de $75 \pm 30,86 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une médiane de 80,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau XXXII et Figure V.3).

Ce sont des eaux très faiblement à faiblement minéralisées (Detay, 1993) (Tableau XXXIII).

V.2.1.3. Turbidités et MES totales

Les turbidités et les Matières en suspensions (MES) totales des eaux de surface du BVK fluctuent respectivement entre 28,02 et 4012 NTU et de 130,01 à 1108,27 mg/L pour des moyennes respectives de $950,11 \pm 1022,86 \text{ NTU}$ et $620,78 \pm 158,01 \text{ mg/L}$. Les valeurs des médianes sont de 621,09 mg/L pour les MES totales et de 955 NTU pour la turbidité (Tableau XXXI et Figure V.3).

Les matières et éléments en suspensions totales (MES tot) et les turbidités sont très peu représentées dans les eaux souterraines de la localité de Batouri. Elles fluctuent respectivement entre 3,93 et 18,90 mg/L pour une moyenne arithmétique de $5,74 \pm 11,19 \text{ mg/L}$ et une médiane de 6,47 pour les MES et de 0,37 à 17,68 NTU, soit une moyenne de $3,10 \pm 10,56 \text{ NTU}$ et une médiane de 3,17 NTU. Les médianes ici, sont respectivement de 6,47 mg/L pour les MES totales et de 3,17 NTU pour les turbidités (Tableau XXXII et Figure V.3).

Tableau XXXI : Domaine de variations des paramètres physiques dans les eaux d'écoulement du BVK à Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
pH		15	6,03	6,05	6,08	6,05	0,07	6,5<pH<8,5
CE	μS/cm	15	20,14	75,80	140	80,12	37,86	1500
Turbidité	NTU	15	28,02	950,11	4012	955	1022,86	5,00
MES totales	mg/L	15	130,01	620,78	1108,27	621,09	158,01	25 - 40

Légende : CE = Conductivité électrique ; MES totales = Matières et éléments en suspension totales ; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé

Tableau XXXII : Domaine de variations de paramètres physiques (pH, CE, Turbidité et MES) dans les eaux souterraines du BVK à Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
pH		10	5,72	6,02	6,05	6,03	0,40	6,5<pH<8,5
CE	μS/cm	10	18	75	117	80,07	30,86	1500
Turbidité	NTU	10	0,37	3,10	17,68	3,17	10,56	5,00
MES totales	mg/L	10	3,93	5,74	18,90	6,47	11,19	25 - 40

Légende : CE = Conductivité électrique ; MES totales = Matières et éléments en suspension totales ; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé

Tableau XXXIII : Relation entre conductivité et minéralisation (Detay 1993).

Conductivité électrique (μS/cm) :	Minéralisation :
<100	Très faible
100 à 200	Faible
200 à 400	Peu accentuée
400 à 600	Moyenne
600 à 1000	Importante
>1000	Excessive

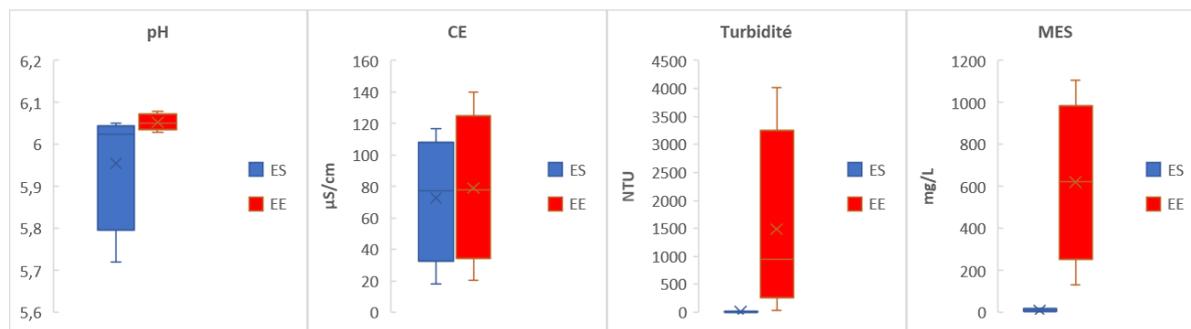


Figure V.3 : Domaine de variations des paramètres physiques dans les eaux souterraines et de surface de la localité de Batouri

V.2.2. Domaine de variations de cations majeurs et de la somme des équivalents cations (TZ⁺)

V.2.2.1. Cations majeurs

Dans les eaux du BVK à Batouri, les teneurs des ions Ca²⁺ évoluent entre 4,01 et 105,85 mg/L pour une moyenne de $20,04 \pm 27,60$ mg/L dans celles de surface (Tableau XXXIV et Figure V.4). Par contre, elles oscillent entre 4 et 8,75 mg/L pour une moyenne de $5,01 \pm 2,21$ mg/L dans les eaux souterraines (Tableau XXXV et Figure V.4).

La variation des ions Mg²⁺ dans les eaux de surface est comprise entre 0,8 et 28,61 mg/L pour une moyenne de $8,10 \pm 8,37$ mg/L (Tableau XXXIV et Figure V.4). En revanche, celle des eaux souterraines oscille entre 0,48 et 7,60 mg/L pour une moyenne de $3,19 \pm 2,54$ mg/L (Tableau XXXV et Figure V.4).

La fluctuation des ions Na⁺ est comprise entre 3,87 et 70,58 mg/L pour une moyenne de $24,06 \pm 22,29$ mg/L dans les eaux d'écoulement (Tableau XXXIV et Figure V.4), alors qu'elle se situe entre 2,76 et 10,60 mg/L pour une moyenne de $5,71 \pm 3,47$ mg/L dans les eaux souterraines (Tableau XXXV et Figure V.4).

Dans les eaux de surface, les ions K⁺ ont une évolution comprise entre 0,7 et 16,88 mg/L pour une moyenne de $3,90 \pm 5,12$ mg/L (Tableau XXXIV et Figure V.4). Cette évolution est par contre comprise entre 0,09 et 3,50 mg/L pour une moyenne de $1,80 \pm 0,23$ mg/L dans les eaux souterraines (Tableau XXXV et Figure V.4).

Les ions NH₄⁺ quant à eux sont peu abondants aussi bien dans les eaux de surface (entre 0,01 et 117,01 mg/L) que dans les celles souterraines (entre 0 et 0,27 mg/L).

V.2.2.2. Somme des équivalents cations TZ⁺

La somme des équivalents dans les eaux de surface varie ici entre 73,48 et T, soit une moyenne de 250,87 ± 104,13 µéq/L. Dans les eaux souterraines, cette variation se situe entre 49,44 et 817,74 µéq/L pour une moyenne de 571 ± 71,14 µéq/L

Tableau XXXIV : Domaine de variation de cations dans les eaux d'écoulement du BVK à Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
Ca²⁺	mg/L	15	4,01	20,04	105,85	19,88	27,60	100
Mg²⁺	mg/L	15	0,8	8,10	28,61	7,98	8,37	125
Na⁺	mg/L	15	3,87	24,06	70,58	24,07	22,29	200
K⁺	mg/L	15	0,7	3,90	16,88	5,03	5,12	12,00
NH₄⁺	mg/L	15	0,01	34,80	117,01	27,8	37,28	0,50
TZ⁺	µéq/L	15	73,48	250,87	864,70	252,18	104,13	-

Légende : TZ⁺ = (Ca²⁺ + Mg²⁺ + Na⁺ + K⁺ + H⁺) ; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé

Tableau XXXV : Domaine de variation de cations dans les eaux souterraines de la localité Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
Ca²⁺	mg/L	10	4	5,01	8,75	5,10	2,21	100
Mg²⁺	mg/L	10	0,48	3,19	7,60	4,01	2,54	125
Na⁺	mg/L	10	2,76	5,71	10,60	5,80	3,47	200
K⁺	mg/L	10	0,09	1,80	3,50	1,87	0,23	12,00
NH₄⁺	mg/L	10	BDL	0,05	0,27	0,07	0,02	0,50
TZ⁺	µéq/L	10	49,44	571	817,74	589	71,14	-

Légende : TZ⁺ = (Ca²⁺ + Mg²⁺ + Na⁺ + K⁺ + H⁺) ; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé

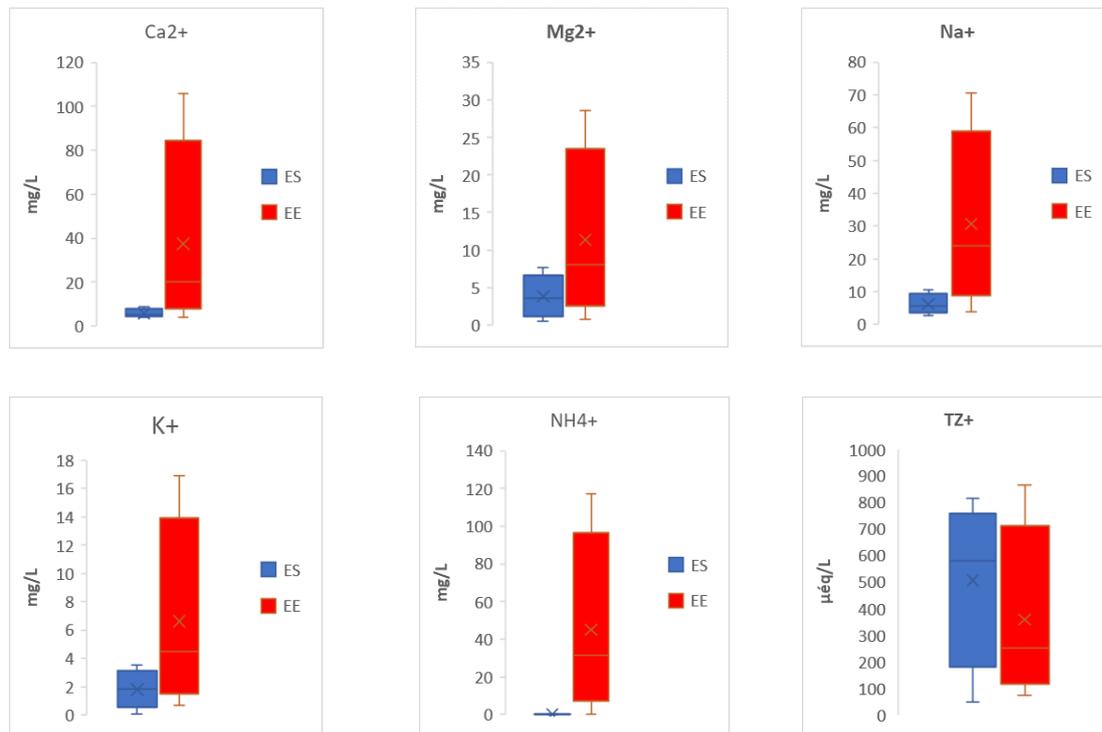


Figure V.4 : Domaine de variations de cations majeurs et de la TZ⁺ dans les eaux de surface et souterraines du BVK à Batouri

V.2.3. Domaine de variations des anions majeurs et de la somme des équivalents anions (TZ⁻)

V.2.3.1. Anions majeurs

Dans les eaux de surface, les concentrations en hydrogencarbonates fluctuent entre 25,10 et 366 mg/L pour une moyenne arithmétique de $105,10 \pm 79,96$ mg/L (Tableau XXXVI et Figure V.5). Ces concentrations en HCO₃⁻ dans les eaux souterraines varient 24,10 et 58,17 mg/L pour une moyenne de $35,78 \pm 10,63$ mg/L.

Pour ce qui est des ions nitrates et sulfates, ils présentent des concentrations 30 et 5 mg/L respectivement dans les eaux de surface (Tableau XXXVI et Figure V.5). Dans les eaux souterraines, les nitrates et les sulfates ont des teneurs comprises respectivement entre 0 et 5,70 mg/L et 0 et 0,07 mg/L (Tableau XXXVII et Figure V.5).

Les teneurs en Cl⁻ varient entre 10,28 et 50,25 mg/L pour une moyenne de $20,11 \pm 8,23$ mg/L dans les eaux d'écoulement. Elles sont par contre comprises entre 9,88 et 10,05 mg/L pour une moyenne de $9,99 \pm 0,01$ mg/L dans les eaux souterraines (Tableau XXXVII et Figure V.5).

Les ions F^- ont des concentrations inférieures à 2,8 mg/L et les ions PO_4^{3-} présentent des teneurs inférieures à 0,18 mg/L dans les eaux du bassin versant de la Kadey au niveau de la localité de Batouri.

V.2.3.2. Somme des équivalents anions TZ-

Les sommes des équivalents anions TZ^- oscillent entre 36,71 et 971,08 $\mu\text{éq/L}$ pour une moyenne arithmétique de $337,08 \pm 341,85 \mu\text{éq/L}$ pour ce qui est des eaux de surface (Tableau XXXVI et Figure V.5). En revanche, ces sommes des équivalents anions TZ^- se situent entre 34,40 et 570,99 $\mu\text{éq/L}$ pour une moyenne arithmétique de $307,78 \pm 42,18 \mu\text{éq/L}$ dans les eaux souterraines (Tableau XXXVII et Figure V.5).

Tableau XXXVI : Domaine de variation des anions dans les eaux d'écoulement de la localité de Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
HCO_3^-	mg/L	15	25,10	105,10	366	95,01	79,96	125 - 130
Cl^-	mg/L	15	10,28	20,11	50,25	17,88	8,23	250,00
NO_3^-	mg/L	15	BDL	10,70	30	11,08	8,67	50,00
SO_4^-	mg/L	15	BDL	2,81	5	2,05	0,91	250,00
F^-	mg/L	15	BDL	1,05	2,8	0,99	0,02	2,00
PO_4^{3-}	mg/L	15	BDL	0,09	0,18	0,1	0,09	5,00
TZ⁻	$\mu\text{éq/L}$	15	36,71	337,08	971,08	207,46	341,85	-
BI	%	15	13,22	-17,18	-11,60	-12,25	-10,25	-

Légende : Alc = Alcalinité ; $TZ^- = (Cl^- + NO_3^- + SO_4^- + Alc)$; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; BI = Balance Ionique ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé.

Tableau XXXVII : Domaine de variation des anions majeurs dans les eaux souterraines de la localité de Batouri entre 2015 et 2016

Paramètres	Unités	N	Min.	Moy.	Max.	Méd.	E.T.	OMS
HCO ₃ ⁻	mg/L	10	24,10	35,78	58,17	37	10,63	125 - 130
Cl ⁻	mg/L	10	9,88	9,99	10,05	10	0,01	250,00
NO ₃ ⁻	mg/L	10	BDL	2,77	5,70	3,01	0,04	50,00
SO ₄ ⁻	mg/L	10	BDL	0,04	0,07	0,05	0,01	250,00
F ⁻	mg/L	10	BDL	0,05	0,11	0,07	0,02	2,00
PO ₄ ³⁻	mg/L	10	BDL	0,08	0,18	0,1	0,09	5,00
TZ ⁻	μéq/L	10	34,40	307,78	570,99	310,7	42,18	-
BI	%	10	13,22	-17,18	-11,60	-12,25	-10,25	-

Légende : Alc = Alcalinité ; TZ⁻ = (Cl⁻ + NO₃⁻ + SO₄⁻ + Alc) ; N = nombres d'échantillons ; Min. = minimum ; Moy. = moyenne arithmétique ; Max. = Maximum ; Méd. = médiane ; E.T. = Ecart-type ; BI = Balance Ionique ; OMS = Organisation Mondiale de la Santé.

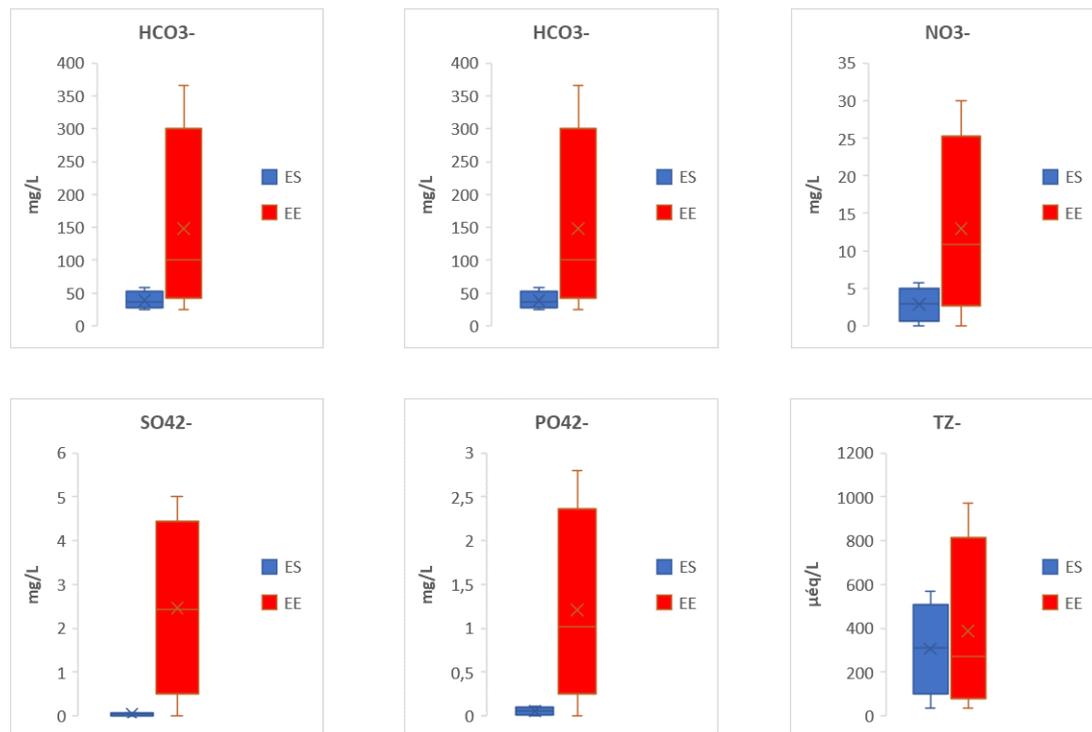


Figure V.5 : Domaine de variations des paramètres chimiques (anions et TZ⁻) dans les eaux souterraines et les eaux d'écoulement de la localité de Batouri

V.3. Analyse de l'évolution spatiotemporelle des paramètres physicochimiques dans les eaux du bassin versant de la Kadey

Les paramètres physicochimiques observés dans l'espace et dans le temps dans les eaux du BVK au niveau de la localité de Batouri prennent en compte l'alternance des différentes saisons (humide et sèches) rencontrées dans la zone d'étude.

V.3.1. Evolution spatiotemporelle des paramètres physiques (pH, CE, Turbidité et MES totales) dans les eaux du BVK

V.3.1.1. pH

Au cours de l'année hydrologique 2015-2016, les pH varient de l'amont vers l'aval du bassin avec un coefficient de variation de 8,6 %. On constate que les eaux souterraines sont dans l'ensemble bien plus acides que celles d'écoulement.

Dans les eaux souterraines, les valeurs du pH les plus élevées sont enregistrées dans le puits P02 en fin février durant la saison sèche. Alors que dans les eaux d'écoulement, les valeurs du pH varient très peu dans l'espace et même dans le temps (6,01 à 6,08). Les pH les plus élevés sont enregistrés en février pour la majorité des mesures (KadP1, KadP2) et au début de la saison de pluie pour les autres (KadP3, BouP1). On constate également que les valeurs les plus importantes sont toutes celles des points de prélèvements situées vers l'aval de la zone d'étude (BouP2, SibP1 et SibP2) comme illustré par la figure V.6.

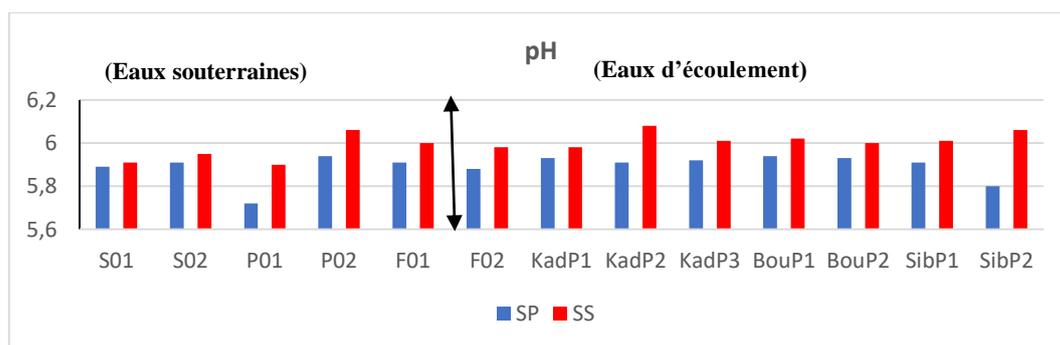


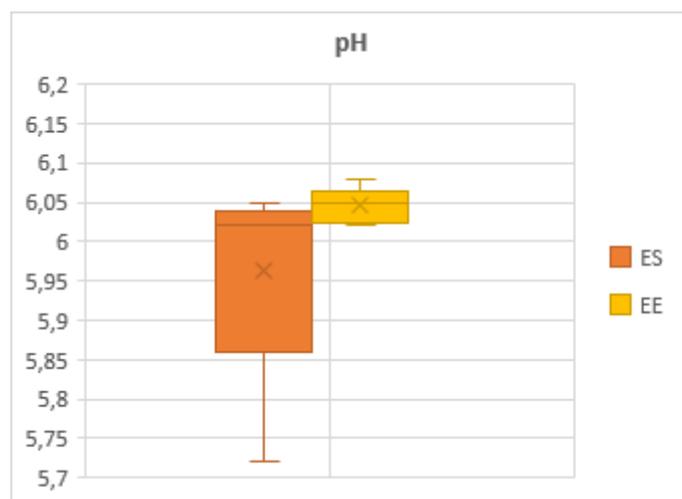
Figure V.6. Variations spatiotemporelles du pH dans les eaux (Ecoulement et Souterraine) de la localité de Batouri

Selon Nollet (2007), le pH mesure la concentration des ions H^+ d'une eau et permet de cette façon de mesurer son acidité, son alcalinité et/ou sa basicité.

De ce qui précède, on constate que les eaux (souterraines et d'écoulement) de Batouri sont acides ($5,72 < \text{pH} < 6,08$). Cette acidité est plus prononcée dans les eaux souterraines que dans celles d'écoulement (Figure V.7). Les pH ainsi rencontrés à Batouri sont dans l'ensemble moins acides pour les eaux souterraines ($4,95 < \text{pH} < 5,40$) et les eaux des cours d'eaux ($4,8 < \text{pH} < 6,6$) de la zone forestière du Sud-Cameroun (Sigha Nkamdjou, 1994 ; Viers *et al.*, 2000 ; Boeglin *et al.*, 2003 ; Braun *et al.*, 2005 ; 2012). Mais, ces pH sont plus légèrement plus acides que ceux trouvés par Gountié *et al.* (2017) dans les eaux drainant les sites aurifères de Meiganga dans la région de l'Adamaoua ($5,4 < \text{pH} < 8,12$) et par Rakotondrabe *et al.* (2018) dans les eaux du district aurifère de Bétaré-Oya dans la région de l'Est ($5,40 < \text{pH} < 8,84$). En revanche, ils sont dans les mêmes ordres de grandeurs que les valeurs trouvées par Nana *et al.* (2015) dans les localités de Tikondi et de Tripano dans le département de la Kadey région de l'Est ($5,85 < \text{pH} < 6,12$).

La distribution spatiale des pH dans la localité de Batouri montre que les valeurs les plus élevées sont celles des eaux d'écoulement (Figure V.8). Mais de façon générale cette acidité peut être mise en relation avec deux facteurs principaux :

- les drainages miniers acides (DMA) provenant des sites miniers (Kouassy Kalédjé *et al.*, 2016) ;
- la géologie de la région constituée par des sols et roches acides (Vishiti *et al.*, 2017) et la présence de la matière organique issue de décomposition de végétation de la zone.



Légende : ES = eaux souterraines ; EE = eaux d'écoulement

Figure IV.7 : Niveau de variation de pH dans les eaux souterraines et d'écoulement de la localité de Batouri

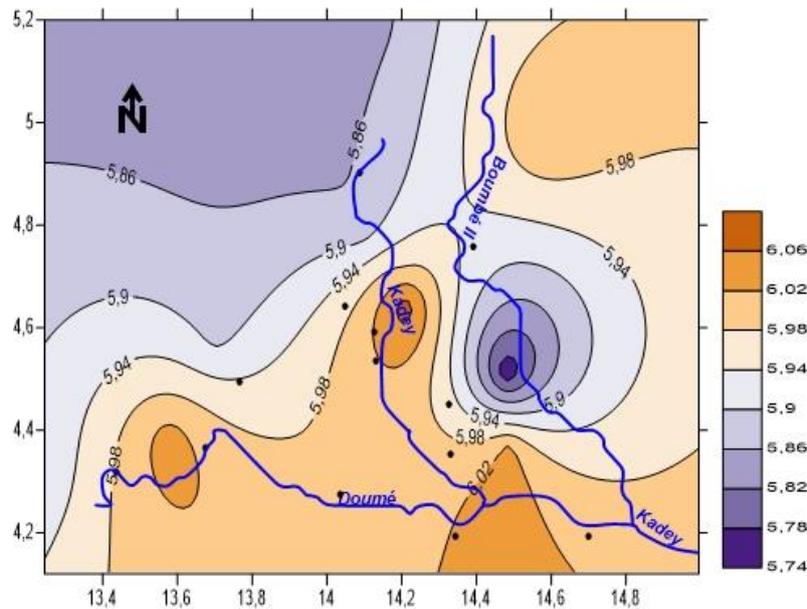


Figure IV.8 : Variations spatiales des pH dans les eaux de la localité de Batouri

V.3.1.2. Conductivité Electrique

Les conductivités électriques sont dans l'ensemble plus élevées dans les eaux souterraines que dans les eaux d'écoulement. Mais on note également que certains échantillons d'eaux d'écoulement (KadP3 et BouP2) ont des teneurs très élevées (140 $\mu\text{S}/\text{cm}$) surtout dans la Kadéy et certains de ses affluents. De façon saisonnière, les eaux souterraines et celles d'écoulement ont de fortes minéralisations durant la saison sèche jusqu'en avril au début de la saison de pluie ($18 < \text{CE} < 140 \mu\text{S}/\text{cm}$). Pour ce qui est des eaux d'écoulement, elles ont des teneurs légèrement élevées pendant la saison de pluie surtout dans les eaux de KadP3, BouP2. On constate aussi que les eaux de la Doumé ont des valeurs de conductivité électrique qui varient très peu dans le temps et dans l'espace (Figure V.9).

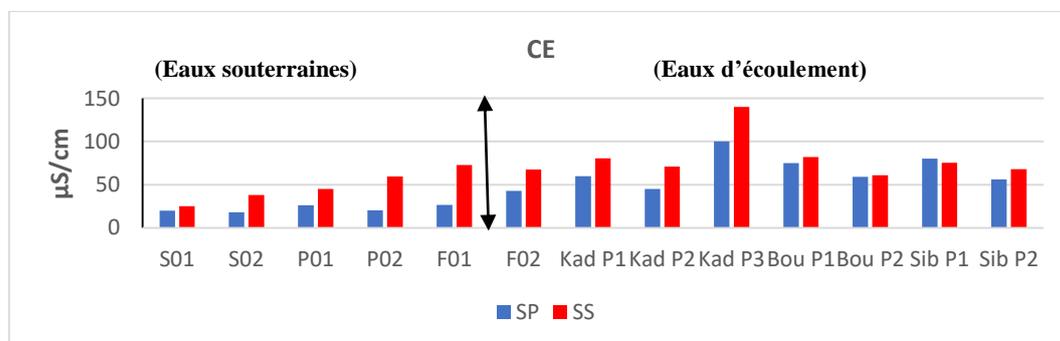
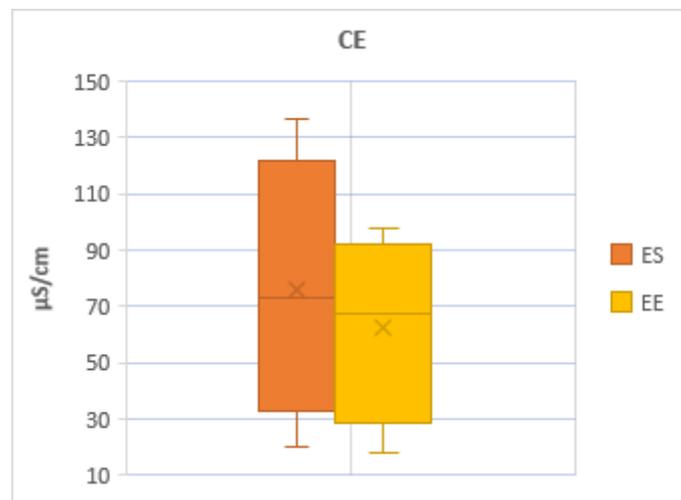


Figure V.9. Variations spatiotemporelles de la conductivité électrique dans les eaux (Ecoulement et Souterraine) de la localité de Batouri

La conductivité électrique est une valeur proportionnelle au degré de minéralisation d'une eau (Derwich et *al.*, 2010). Dans la localité de Batouri (Figure V.10), les eaux sont faiblement minéralisées ($18 < CE < 140 \mu\text{S/cm}$ pour une moyenne arithmétique de $75,18 \pm 17,58 \mu\text{S/cm}$ et une médiane de $80,11 \mu\text{S/cm}$) comme pour la majorité des eaux du Sud Cameroun forestier qui drainent un socle pluto-métamorphique d'âge précambrien (Braun et *al.*, 1998 ; Boeglin et *al.*, 2003 ; Braun et *al.*, 2005 ; Kringel et *al.*, 2016 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016 ; Rakotondrabe et *al.*, 2018). Ces variations spatiotemporelles de la conductivité électrique sont liées au temps de séjour élevé de ces eaux dans les formations géologique encaissantes comme l'affirment les travaux de Sigha Nkamdjou (1994) ; Li et *al.* (2014) ; Mfonka et *al.* (2015) ; Kringel et *al.* (2016) ; Ntonga et *al.* (2017) mais aussi aux phénomènes d'évaporation présents en saison sèche et ceux de dilution observés lors de la saison pluvieuse.



Légende : **ES** = eaux souterraines ; **EE** = eaux d'écoulement

Figure IV.10 : Niveau de variations de la conductivité électrique dans les eaux de Batouri

En somme, les variations montrent que la conductivité électrique des eaux de Batouri dépend étroitement des formations géologiques qu'elles drainent (Huang et *al.*, 2010 ; Kamtchueng et *al.*, 2016 ; Ntonga et *al.*, 2017) et des fluctuations climatiques de la zone (Braun et *al.*, 2005 ; Fantong et *al.*, 2016 ; Kouassy Kalédjé et *al.*, 2016 ; Singh and Rakesh, 2016).

V.3.1.3. Matières et éléments en suspension totales (MES tot) et Turbidité (Turb.)

Les matières et éléments en suspension totales et la turbidité ont une évolution similaire dans les eaux de la localité de Batouri. Elles sont plus faibles dans les eaux souterraines (Turb < 17,68 NTU et MES tot < 18,90 mg/L) que dans les eaux d'écoulement toute l'année.

On observe que 64% des eaux d'écoulement ont une turbidité et des MES totales supérieures respectivement à 85,71 NTU et 102 mg/L. Les valeurs maximales de la turbidité et de MES totales sont enregistrées dans le cours d'eau Kadey, plus exactement au niveau des points KadP5 et KadP7 qu'on retrouve en aval de la zone d'étude où les valeurs cumulent à 4012 NTU et 1108,27 mg/L respectivement (Figures V.11 et V.12). Sur le plan saisonnier, les concentrations maximales sont observées depuis le début des pluies et jusqu'à la fin de celles-ci à l'exception des points BouP2, SibP3 et KadP4 où l'on a enregistré une légère augmentation durant la saison sèche.

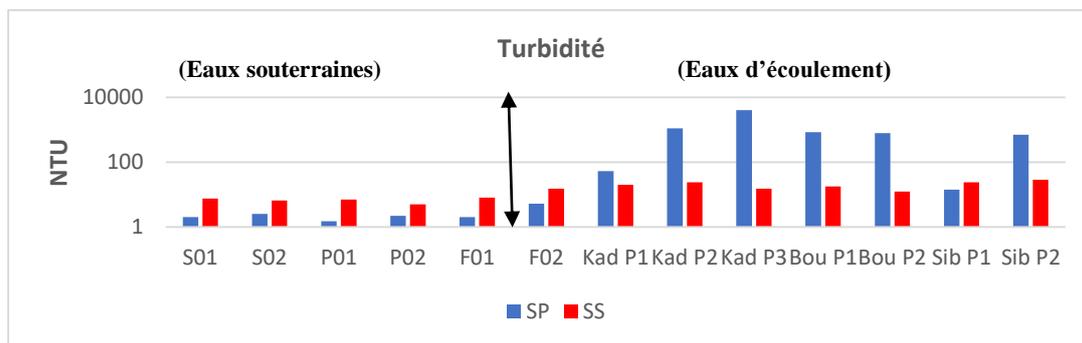


Figure V.11. Variations spatiotemporelles de la turbidité dans les eaux (Écoulement et Souterraine) de la localité de Batouri

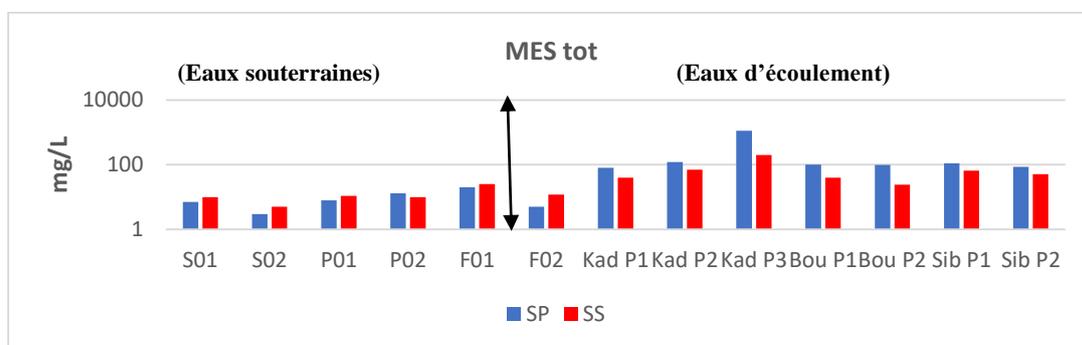
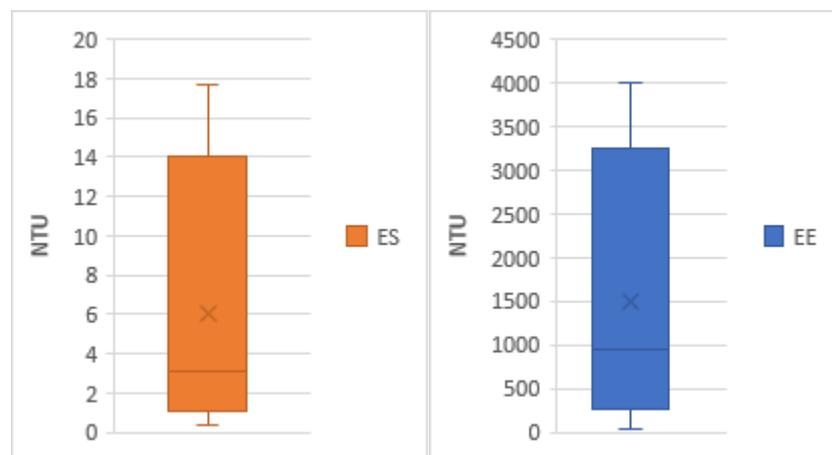


Figure V.12. Variations spatiotemporelles des matières et éléments en suspension totales dans les eaux (Écoulement et Souterraine) de la localité de Batouri

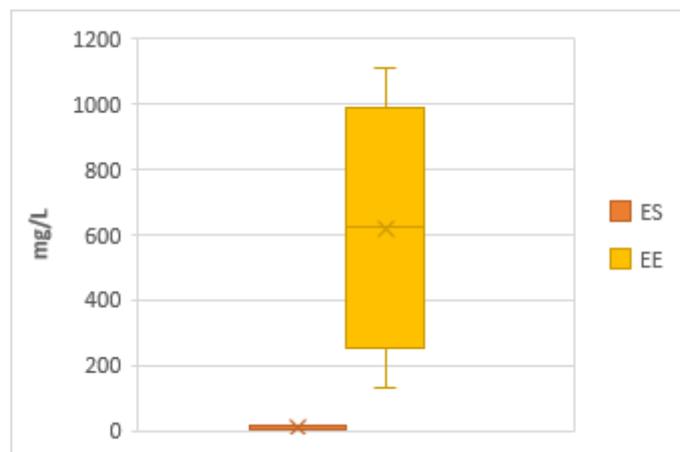
De façon générale, ces deux paramètres sont relativement liés. En effet, si pour Taiwo et Awomeso (2017) les matières et éléments en suspension totales sont des particules solides minérales ou organiques qu'on retrouve dans les eaux à la suite de l'érosion des sols, pour Beaux (1997) la turbidité est la caractéristique de la limpidité d'une eau ou de son opalescence par l'effet Tyndall.

Les résultats ont montré que les turbidités des eaux dans la localité de Batouri oscillent entre 0,37 et 4012 NTU pour une moyenne arithmétique de $918 \pm 210,57$ NTU et une médiane de 910,43 NTU ; les MES totales pour leurs part fluctuent entre 3,93 et 1108,27 mg/L pour une moyenne arithmétique de $540,01 \pm 187,10$ mg/L et une médiane de 107,22 mg/L. On note que les concentrations des turbidités et des MES sont très faibles dans les eaux souterraines alors qu'elles ont des valeurs très élevées dans les eaux d'écoulement (Figure V.13 et V.14). Les valeurs de MES totales de la localité de Batouri sont dans l'ensemble supérieures à celles rencontrées dans les cours d'eau de la zone forestière du Sud Cameroun comme le Nyong (Olivry, 1977 ; Ndam Ngoupayou, 1997 ; Braun *et al.*, 2005 ; Liéno et *al.*, 2005 ; Sigha Nkamdjou et *al.*, 2005) ; le Ntem (Liéno et *al.*, 2005 ; Sigha Nkamdjou et *al.*, 2005) ; le Dja, la Boumba et la Ngoko (Sigha Nkamdjou, 1994 ; Liéno et *al.*, 2005) qui ont des valeurs de MES totales qui varient de 3 à 40 mg/L. On peut également citer les cours d'eau de la zone de contact forêt / savane comme la Sanaga (5 à 82 mg/L) le Mbam (6 à 350 mg/L) comme le montrent les travaux de Ndam Ngoupayou et *al.* (1997 ; 2016), Liéno et *al.* (2005).



Légende : ES = eaux souterraines ; EE = eaux d'écoulement

Figure V.13 : Niveau de variation des turbidités dans les eaux (souterraines et d'écoulement) de la localité de Batouri



Légende : ES = eaux souterraines ; EE = eaux d'écoulement

Figure V.14 : Niveau de variation des MES totales dans les eaux (souterraines et d'écoulement) de la localité de Batouri

V.3.2. Evolution spatiotemporelles des paramètres chimiques dans les eaux du BVK

V.3.2.1. Cations majeurs

Les concentrations en cations majeurs dans l'ensemble sont plus élevées dans les eaux souterraines que dans les eaux d'écoulement à l'exception de quelques points (S01, S02 et P01) qui sont situés en amont du BVK.

De façon générale, les eaux souterraines présentent des concentrations cationiques les plus élevées durant la saison sèche. Les ions Na^+ et K^+ ont leurs pics au niveau des puits P02 et les forages F01 et F02 durant la saison sèche (Figure V.15 et Figure V.16). Les cations majeurs présentent dans l'ensemble, au niveau des eaux d'écoulement, une évolution similaire dans l'espace et dans le temps. Cependant, on note des pics au niveau de certains points comme KadP3 et SibP1. Sur le plan saisonnier, on note que les variations sont non significatives malgré la présence de quelques points d'exception (KadP3) pour les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} au cours de la saison sèche (Figure V.17 et Figure V.18).

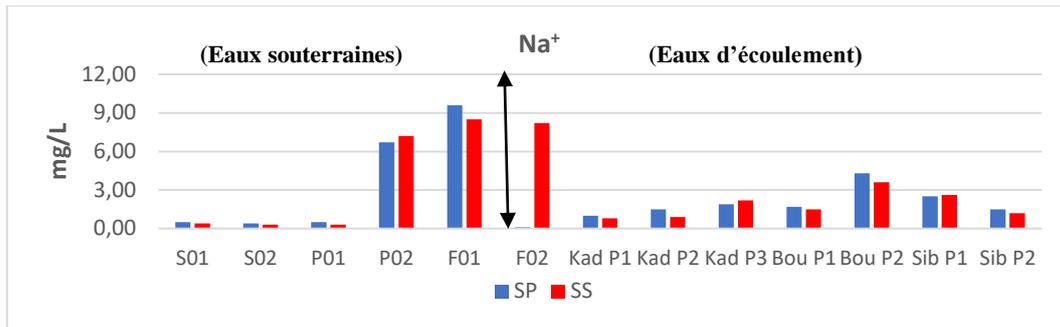


Figure V.15 : Variations spatiotemporelles des ions Na⁺ dans les eaux de la localité de Batouri

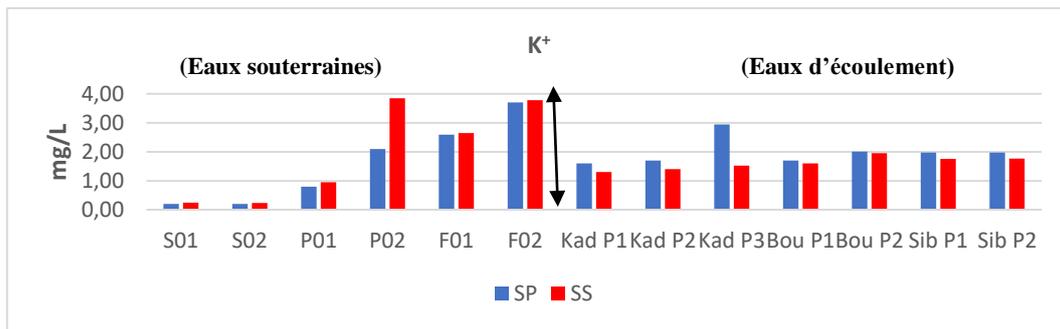


Figure V.16 : Variations spatiotemporelles des ions K⁺ dans les eaux de la localité de Batouri

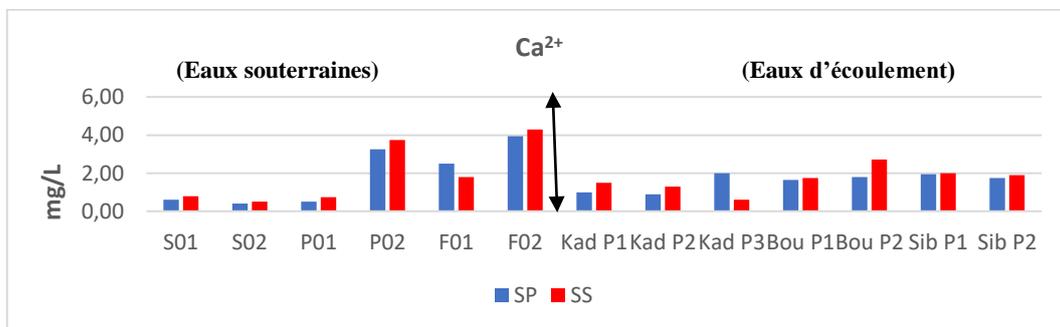


Figure V.17 : Variations spatiotemporelles des ions Ca²⁺ dans les eaux de la localité de Batouri

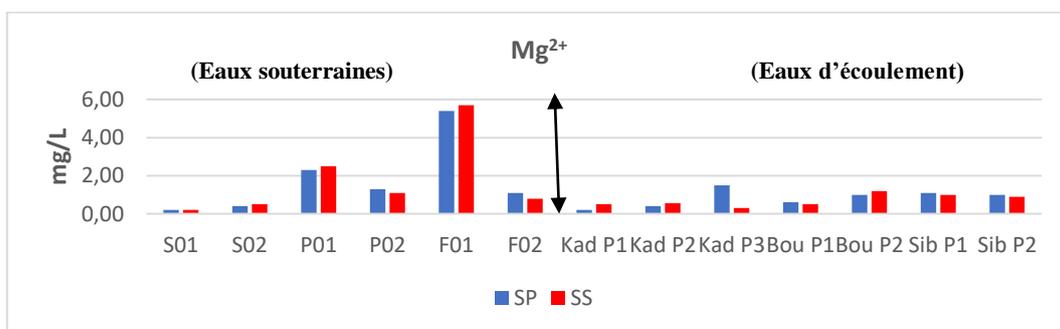


Figure V.18 : Variations spatiotemporelles des ions Mg²⁺ dans les eaux de la localité de Batouri

V.2.2.2. Anions majeurs

Les hydrogénocarbonates et l'alcalinité évoluent de façon synchrone dans l'espace et le temps aussi bien dans les eaux souterraines que dans celles d'écoulement. En général, l'alcalinité et les ions HCO_3^- ont de faibles concentrations durant la saison de pluie et augmentent au cours de la saison sèche même-ci exceptionnellement on note pendant la saison de pluie des pics pour les points KadP2, KadP3 et SibP2 (Figures V.19 et V.20).

Les ions NO_3^- et Cl^- sont peu représentés dans les eaux de surface par rapport à celles souterraines. Durant la période d'étude, pour ce qui est des eaux souterraines, les teneurs maximales en NO_3^- et en Cl^- sont enregistrées dans les ouvrages P02, F01 pendant la saison de pluie (Figures V.21 et V.22).

Contrairement aux ions NO_3^- et Cl^- , les ions SO_4^{2-} et PO_4^{3-} ont des concentrations importantes dans les eaux de surface par rapport à celles des eaux souterraines. On remarque également que les ions phosphates sont presque inexistantes dans les eaux souterraines alors que les sulfates sont représentés (Figures V.23 et V.24). Il faut également noter une variation non contrôlée des ions SO_4^{2-} dans les eaux d'écoulement durant toute la période d'étude (Figure V.23).

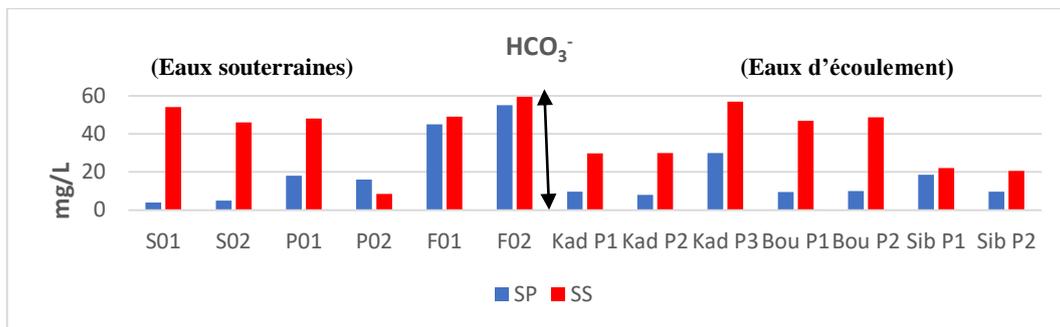


Figure V.19 : Variations spatiotemporelles de HCO_3^- dans les eaux de la localité de Batouri

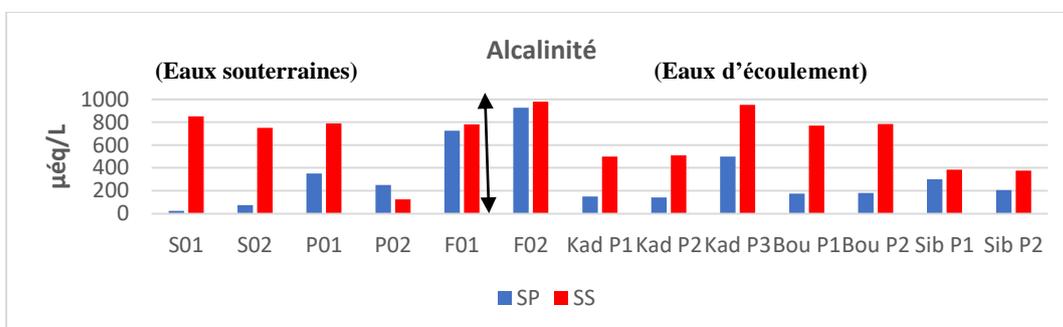


Figure V.20 : Variations spatiotemporelles de l'alcalinité dans les eaux de la localité de Batouri

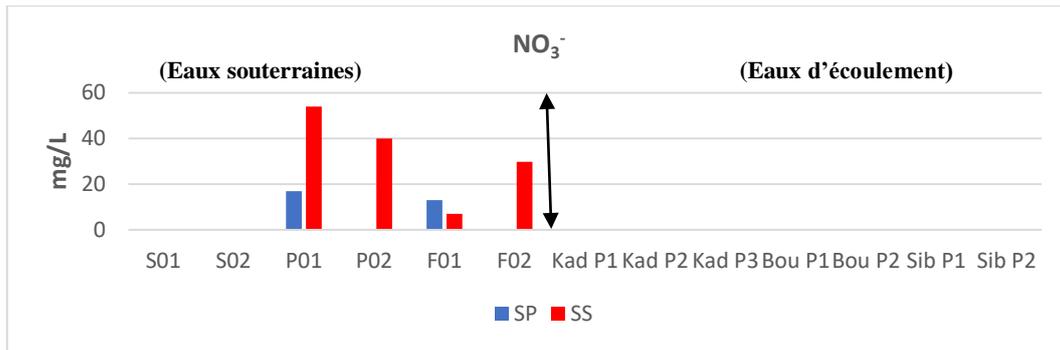


Figure V.21 : Variations spatiotemporelles des ions NO₃⁻ dans les eaux de la localité de Batouri

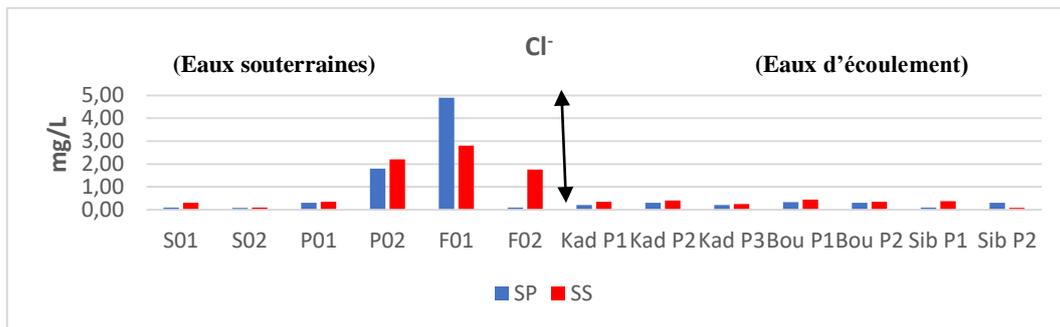


Figure V.22 : Variations spatiotemporelles des ions Cl⁻ dans les eaux de la localité de Batouri

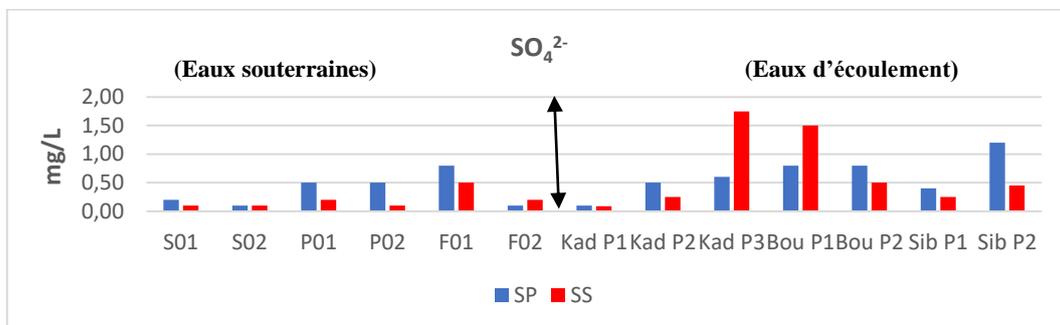


Figure V.23 : Variations spatiotemporelles des ions SO₄²⁻ dans les eaux de la localité de Batouri

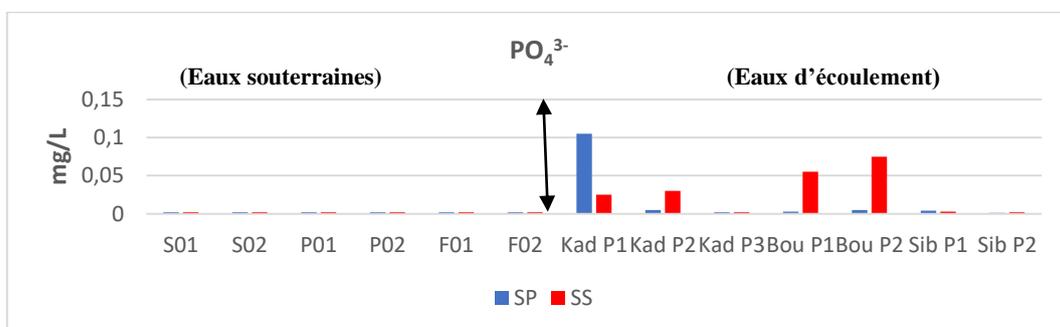


Figure V.24 : Variations spatiotemporelles des ions PO₄³⁻ dans les eaux de la localité de Batouri

Dans les eaux de la localité de Batouri en général, les concentrations en éléments majeurs sont très faibles. La somme des équivalents cations ($TZ^+ = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+ + H^+$) est comprise entre 49,44 et 864,70 $\mu\text{eq/L}$ pour une moyenne arithmétique de $250,87 \pm 120,28 \mu\text{eq/L}$ et une médiane de 183,54 $\mu\text{eq/L}$. On constate que toutes ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles trouvées dans la plupart des cours d'eau du Sud Cameroun forestier (Sigha Nkamdjou, 1994 ; Ndam Ngoupayou, 1997 ; Braun et *al.*, 2005 ; Fantong et *al.*, 2016 ; Rakotondrabe et *al.*, 2018). Ces concentrations sont de loin en deçà de la TZ^+ moyenne calculée pour les teneurs des fleuves et rivières du monde (1470 $\mu\text{eq/L}$) comme le montrent les travaux de Meybeck et Ragu (1996) Gaillardet et *al.* (1999). Enfin, on remarque que tous les cations majeurs présentent des concentrations très inférieures à celles proposées par l'OMS (2011) pour des eaux destinées à la consommation des hommes.

Les résultats des concentrations anioniques identifiés dans les eaux de la localité de Batouri montrent que la somme de leurs équivalents ($TZ^- = Cl^- + NO_3^- + SO_4^{2-} + Alc$) oscille entre 34,40 et 971,08 $\mu\text{eq/L}$ pour une moyenne arithmétique de $307,17 \pm 245,02 \mu\text{eq/L}$ et une médiane de 243,89 $\mu\text{eq/L}$. Ici également, on note que ces concentrations sont de façon générale très faibles et de même ordre de grandeur que celles trouvées dans les eaux de surface et souterraines du Sud Cameroun forestier (Braun et *al.*, 2002 ; Fantong et *al.*, 2016 ; Gountié et *al.*, 2017 ; Rakotondrabe et *al.*, 2018). Pour ce qui est de l'alcalinité dans la localité de Batouri, elle est sans doute liée au bicarbonate provenant du CO_2 atmosphérique et de la matière organique des sols car la zone d'étude ne contient pas des roches carbonatées (Ndam Ngoupayou, 1997 ; Boeglin *al.*, 2003 ; Prasad et Sangita, 2008 ; Aenab et *al.*, 2012 ; Fon et Bih, 2012 ; Bakia, 2014). Ces anions majeurs ont des concentrations très inférieures à celles proposées par l'OMS (2011) pour des eaux destinées à la consommation des hommes à l'exception des nitrates qui ont des teneurs supérieures à la normes dans certains échantillons.

Le calcul de la balance ionique (BI) des eaux de la localité de Batouri montre un déficit anionique caractérisé par un déficit cationique contrairement aux résultats obtenus dans la quasi-majorité des cours d'eau du Sud Cameroun forestier qui ont plutôt un déficit anionique dû à la forte présence d'anions acides organiques dans ces cours d'eau (Viers et *al.*, 2000 ; Braun et *al.*, 2005). Dans les eaux de la localité de Batouri, ces écarts sont probablement dû à un excès d'anions en provenance de fortes charges en MES inorganiques issues des activités anthropiques (exploitations minières et forestières, agricoles) dans la zone d'étude (Ndongo et *al.*, 2009 ; Gomes et *al.*, 2010 ; Mfonka et *al.*, 2015 ; Kringel et *al.*, 2016). Dans la zone d'étude,

les faibles minéralisations en éléments majeurs sont à mettre en relation avec la nature (roches silicatées fortement lessivées), l'âge du socle géologique (précambrien) et la présence des sols ferrallitiques très épais qui ne favorise pas l'altération chimique de ces roches primaires.

L'analyse du diagramme de Piper des eaux de la localité de Batouri (Figure V.25) montre deux principaux types de faciès : le faciès bicarbonaté calci-magnésien (HCO_3^- - Ca - Mg) et le faciès bicarbonaté sodi-potassique (HCO_3^- - Na - K). La prédominance des faciès bicarbonatés est en accord avec les résultats de plusieurs auteurs ayant travaillé dans les mêmes types d'environnements géologiques en Afrique même dans le monde (Braun *et al.*, 2012 ; Kpegli *et al.*, 2015 ; Kringel *et al.*, 2016 ; Huang *et al.*, 2016 ; Rakotondrabe *et al.*, 2018 ; Laxmankumar *et al.*, 2019 ; Rakotondrabe, 2019).

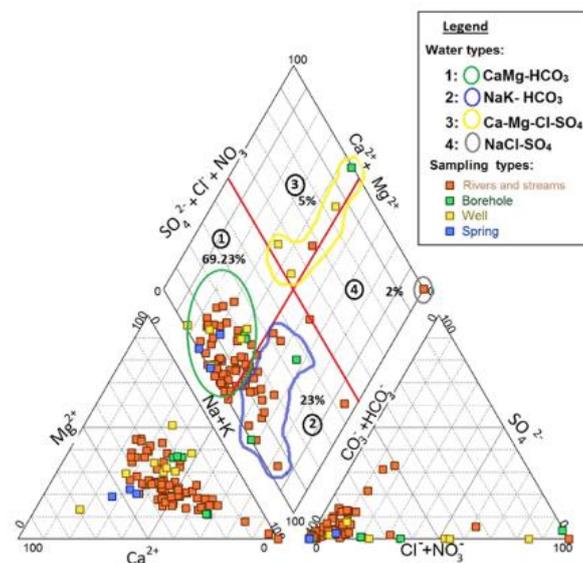


Figure V.25 : Diagramme de Piper (1944) montrant les différents faciès hydrochimiques identifiés dans les eaux de la localité de Batouri au cours de l'année 2016

V.3.2.3. Eléments en traces métalliques (ETMs) et cyanures

La distribution spatiale des ETMs et de cyanures dans les eaux de la localité de Batouri ne tient pas compte de l'évolution temporelle. On constate que cette variation montre que les eaux d'écoulement sont plus chargées en ETMs que celles souterraines (Figure V.26). Les fortes concentrations de métaux lourds identifiées dans les eaux d'écoulement concernent dans l'ensemble le Fer où le pic est localisé dans SibP1 suivi de SibP2 ; le manganèse dans SibP2 et BouP2 ; le cuivre et le zinc ont leurs pics au niveau de BouP2. Le cyanure et l'arsenic sont quant à eux les éléments en traces les moins représentés malgré les importantes concentrations enregistrées dans KadP1, KadP2 et KadP3.

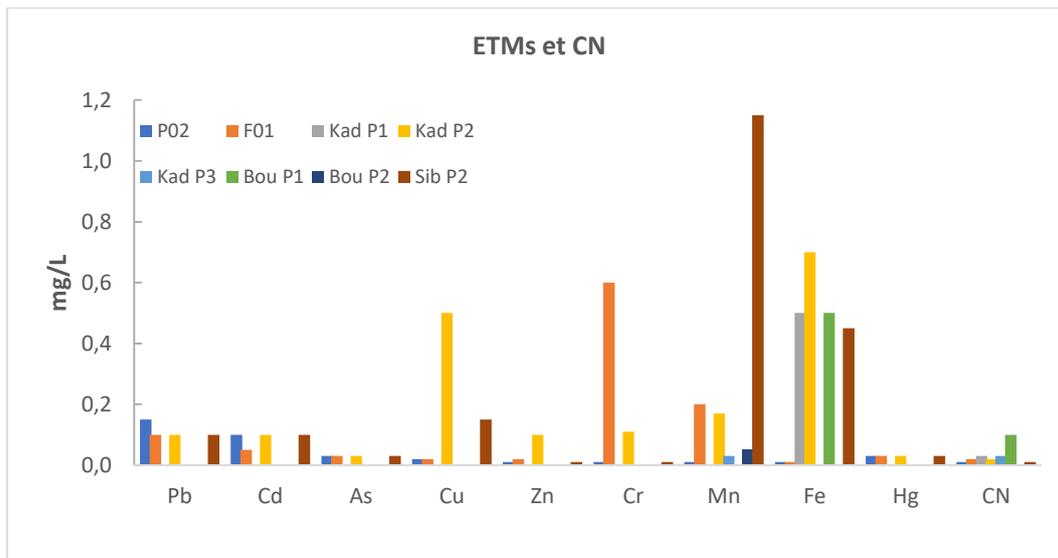


Figure IV.26 : Variations spatiales des concentrations des différents métaux lourds et du cyanure dans les eaux de la localité de Batouri

Selon Alloway et Ayres (1997) ; Callender (2003) ; Aranguren et *al.* (2008) ; Woocay et Walton (2008), les métaux lourds sont présents à l'état de traces, moins de 0,1 % dans les sols, les sédiments, les eaux de surface et les organismes vivants. Cependant, au-dessus d'une certaine valeur, ils deviennent toxiques pour les humains. En se basant sur leurs degrés de toxicité, neuf métaux lourds (Pd, Cd, As, Zn, Cu, Hg, Cr, Mn et Fe) et les cyanures ont été retenus pour cette étude. De ce qui précède, on note que l'ordre de grandeur décroissant de ces éléments chimiques dans les eaux de la localité de Batouri est le suivant Fe > Mn > Pb > Cu > Cr > Zn > Cd > As > Hg > CN. Les concentrations en ETMs sont significativement différentes entre les points d'échantillonnage.

Nonobstant leurs valeurs élevées (OMS, 2011), les teneurs des ETMs des eaux de la localité de Batouri sont relativement faibles par rapport à celles observées dans les zones d'exploitations minières industrielles comme c'est le cas pour de nombreux pays de l'Afrique de l'Ouest (Ghana : 7,29 mg/L et 0,8 mg/L respectivement pour le Fe et le Mn ; Zimbabwe : 0,175 mg/L pour l'AS ; 1,311 mg/L pour le Fe ; 0,575 mg/L pour le Zn) selon les travaux de Ravengai et *al.* (2005) ; Ahialey et *al.* (2010) ; Bhattacharya et *al.* (2012). En parcourant les travaux antérieurs réalisés dans des localités voisines de la zone d'étude par Ntep Gewt et Adeline (2005) ; Bakia (2014) ; Tehna et *al.* (2015) ; Pahimi et *al.* (2015) ; Kringel et *al.* (2016) ; Léopold et *al.* (2016) ; Kouankap Nono et *al.* (2017) ; Rakotondrabe et *al.* (2018) montrent la présence de ces ETMs dans les eaux, les sédiments et les sols.

V.3.2.4. Indice de Saturation (IS)

Dans la présente étude, les valeurs des indices de saturation (IS) obtenues pour l'ensemble des eaux de la localité de Batouri sont consignées dans le tableau XXXVIII. De l'analyse des résultats, on note que toutes les eaux sont sous-saturées en minéraux carbonatés et en minéraux sulfatés. Le constat est le même pour le dioxyde de carbone (CO₂), l'eau (H₂O) et le dioxygène (O₂).

Tableau XXXVIII : Indices de saturation des eaux de la localité de Batouri au cours de l'année 2016

Phase minéral	Types d'eau							
	Eau souterraine (ES)				Eau d'écoulement (EE)			
	Min	Moy	Max	E.T.	Min	Moy	Max	E.T.
IS Anhydrite	-6,80	-5,80	-4,90	0,60	-7,10	-5,46	-4,80	0,60
IS Aragonite	-5,64	-3,47	-0,61	1,46	-5,84	-3,47	-0,91	0,95
IS Calcite	-5,47	-3,30	-0,50	1,51	-5,48	-3,33	-1,06	0,91
IS Dolomite	-10,40	-6,50	-0,19	3,07	-11,85	-6,70	-1,19	1,87
IS Gypsum	-6,49	-5,60	-4,87	0,66	-6,49	-5,60	-4,87	0,66
IS Halite	-12,42	-10,51	-7,99	1,39	-12,42	-10,51	-7,99	1,39
IS H₂(g)	-27,18	-21,02	-18,74	1,87	-27,18	-21,02	-18,74	1,87
IS H₂O(g)	-1,44	-1,44	-1,44	0,00	-1,44	-1,44	-1,44	0,00
IS O₂(g)	-47,08	-41,97	-33,21	3,46	-47,08	-41,97	-33,21	3,46
IS CO₂(g)	-5,01	-2,21	-0,59	1,07	-5,01	-2,21	-0,59	1,07

Légende : IS = Indice de Saturation ; Min = minimum ; Moy = moyenne ; Max = maximum ; E.T. = écart-type

V.3.2.5. Indice de Pollution Métallique (IPM)

Les indices de pollution métallique calculés pour les différents prélèvements sont présentés dans le tableau XXXIX. Une étude comparative de ces indices de pollution métallique montre que la valeur la plus élevée est enregistrée au niveau du cours d'eau Kadey (KadP3) situé en aval du bassin versant et la valeur la plus faible est observée au niveau de l'ouvrage F01 comme le montre le tableau XXXIX.

Tableau XXXIX : Indices de pollution métallique (IPM) déterminés dans les eaux de Batouri

Sites de prélèvement	Wi	Wi x Qi	IPM
F01	0,45	75,15	121,45
P02	0,45	128,07	301,17
KadP3	0,45	594,01	1275,34
BouP2	0,45	591,48	1270,48
SibP1	0,45	591,99	1272,05
SibP2	0,45	593,46	1275,01

V.4. Origines et facteurs environnementaux influençant la qualité physicochimique des eaux du BVK à Batouri

La détermination de l'origine des paramètres d'une eau passe par la mise en évidence de l'affinité des différents éléments chimiques de cette dernière à partir des corrélations et des analyses en composante.

V.4.1. Facteurs environnementaux influençant la qualité physicochimique des eaux de la localité de Batouri dans le BVK

Pour présenter et discuter les différents processus qui contribuent à la qualité physicochimique des eaux de la localité de Batouri, deux approches complémentaires sont utilisées. Il s'agit de (1) l'analyse statistique multivariée grâce aux corrélations inter élémentaire et à l'analyse en composante principale et (2) la modélisation par le diagramme de Gibbs.

- Corrélations inter-élémentaires

L'analyse de la matrice de corrélations (Tableau XXXX) des différents paramètres physicochimiques des eaux de la localité de Batouri montre qu'il existe une bonne très corrélation entre la conductivité électrique CE et les ions Na^+ (0,863), Mg^{2+} (0,805), Ca^{2+} (0,800) et une bonne corrélation avec les ions Cl^- (0,683), K^+ (0,674) et F^- (0,653). Cette bonne relation montre ainsi une origine commune de ces éléments qui est dans le cas présent l'hydrolyse (altération chimique) des minéraux silicatés des roches plutoniques et métamorphiques de cette zone (Yidina, 2010 ; Kpegli et *al.*, 2015 ; Kouankap Nono et *al.*, 2017). On note aussi une bonne relation entre la turbidité et les MES totales (0,687). Cette dernière doit être mise en relation avec l'érosion mécanique observée dans l'ensemble du BVK et qui résulte de la déforestation, du décapage des sols et du transport des particules solides,

organiques et minérales dans les eaux. Des fortes corrélations sont également observées entre certains anions comme l'alcalinité et les hydrogénocarbonates (0,964) ; les ions chlorures et les ions nitrates (0,609). En absence de roches sédimentaires carbonatées dans la localité de Batouri, l'alcalinité mesurée correspond aux bicarbonates auxquels s'ajoutent les ions acides organiques non dosés dans les eaux et qui sont issus de la décomposition de la matière organique vivante (Ndam Ngoupayou, 1997 ; Braun *et al.*, 2005 ; Reza et Singh, 2010 ; Al-Mashagbah, 2015 ; Abde-Satar *et al.*, 2017 ; Nkoué Ndongou *et al.*, 2017). Les associations ions chlorures et ions nitrates témoignent d'une source superficielle. C'est le signe d'une contamination anthropique (Stiger *et al.*, 2006 ; Ibrahima *et al.*, 2015 ; Fantong *et al.*, 2016). La présence des nitrates dans les eaux souterraines de la localité de Batouri est liée aux eaux usées domestiques, aux effluents des fosses septiques et aux déchets des animaux (Kim *et al.*, 2003 ; Fantong *et al.*, 2013). Compte tenu de l'absence des roches évaporites dans la localité de Batouri d'une part, et d'autre part de la distance qui la sépare de l'océan atlantique ($d > 250$ km), la présence des ions chlorures peut être attribuée à des sources géogéniques et anthropiques. Les autres sources potentielles des ions chlorures dans les eaux de la localité de Batouri sont le traitement des eaux pour consommation (chloruration des eaux), les chlorures de potassium utilisés comme engrais et rependus dans les champs (agriculture) et les eaux usées d'origines humaines (lessive, vaisselle etc.).

- Analyse en Composante Principale (ACP)

L'analyse en composante principale donne plus d'indications sur les principales origines des paramètres physicochimiques des eaux de la zone d'étude car elle est une extension de l'analyse statistique multivariée qui vient d'être présentée. Suivant le plan factoriel F1-F2, la distribution dans l'espace des différents paramètres met en évidence deux principaux groupes pouvant expliquer les processus contrôlant la minéralisation des eaux de la localité de Batouri (Figure IV.28).

Sur l'axe F1 avec une variance de 38,01%, le premier groupe rassemble les paramètres physiques (pH, CE) l'alcalinité et les ions K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- (Figure IV.27). Cette association montre une minéralisation des eaux à la fois d'origine géogénique et anthropique (Huang *et al.*, 2010 ; Yidana, 2010 ; Ameh et Akpah, 2011 ; Zhao *et al.*, 2015 ; Cortes *et al.*, 2016 ; Zhu, 2016). Les paramètres présents naturellement sont la CE, le pH, les ions K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- et l'alcalinité qui proviennent de la dissolution des minéraux silicatés au cours du phénomène d'hydrolyse lors du contact eau - roche. Les paramètres présents grâce aux

activités humaines sont les ions NO_3^- , Cl^- et le pH qui proviennent soit des rejets domestiques, soit des pratiques agricoles (principalement les nitrates), soit par la chloruration de l'eau des ouvrages de captages (puits et forages).

Tableau XXXX : Matrice de corrélation des différents paramètres physicochimiques obtenus dans les eaux de la localité de Batouri (2016).

Paramètres	pH	CE	Turb	Alc	MES	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
pH	1															
CE	0,246	1														
Turb	-0,190	-0,040	1													
Alc	0,345	0,474	-0,150	1												
MES	-0,119	-0,038	0,687	-0,085	1											
Na ⁺	0,258	0,863	-0,040	0,582	0,000	1										
NH ₄ ⁺	-0,010	0,351	-0,089	-0,027	-0,087	0,300	1									
K ⁺	0,330	0,674	0,063	0,332	-0,017	0,744	0,268	1								
Mg ²⁺	0,501	0,805	-0,071	0,460	-0,089	0,740	0,308	0,558	1							
Ca ²⁺	0,413	0,800	-0,126	0,559	-0,156	0,672	0,265	0,530	0,751	1						
F ⁻	0,322	0,653	0,131	0,302	0,083	0,521	0,183	0,544	0,556	0,489	1					
Cl ⁻	0,182	0,683	-0,026	0,337	-0,015	0,747	0,288	0,451	0,695	0,504	0,337	1				
NO ₃ ⁻	0,214	0,436	-0,040	0,283	-0,042	0,548	0,203	0,491	0,602	0,364	0,149	0,609	1			
PO ₄ ³⁻	0,111	-0,273	-0,096	-0,065	-0,091	-0,211	-0,087	-0,088	-0,233	-0,226	-0,228	-0,165	-0,155	1		
SO ₄ ²⁻	0,027	0,290	0,544	0,037	0,406	0,154	-0,005	0,195	0,239	0,146	0,668	0,021	-0,061	-0,222	1	
HCO ₃ ⁻	0,344	0,370	-0,142	0,964	-0,079	0,486	-0,087	0,296	0,380	0,507	0,240	0,148	0,238	-0,047	0,030	1

Sur l'axe F2 avec une variance de 13,79 %, le deuxième groupe est constitué des paramètres physiques (turbidité et MES totales) uniquement (Figure V.26). Les résultats obtenus sur cet axe montrent une dégradation mécanique (érosion) qui serait due aux activités forestière et minière (déboisement, décapage des sols, ouverture des tranchées, dragage des lits des cours d'eau, etc.) menées dans la zone d'étude et ses environs. Il faut noter que deux éléments sortent de cette association (SO_4^{2-} et PO_4^{3-}). Leur exclusion serait due à leur origine naturelle pour les ions sulfates (oxydation des minerais sulfurés) ou à leur origine anthropique pour les ions phosphates (pertes d'engrais de type NPK) comme le montrent les travaux de Stricker (2010).

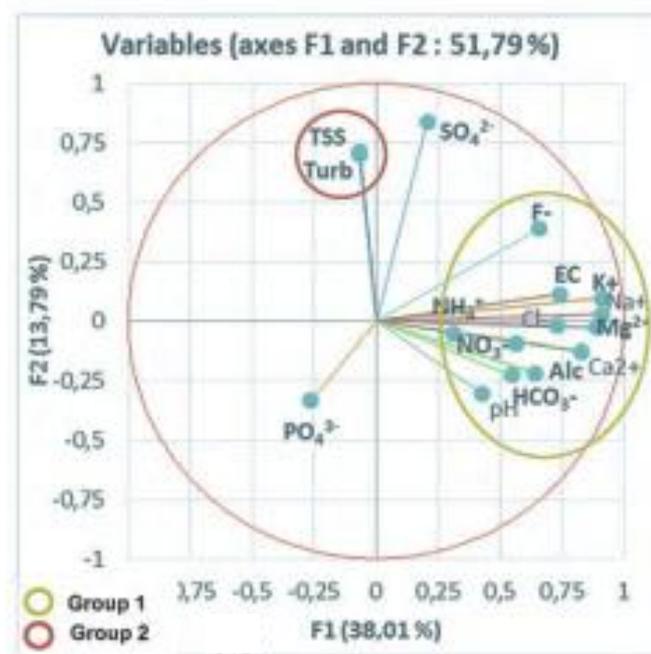


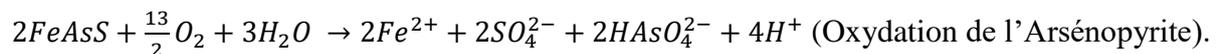
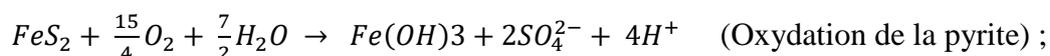
Figure V.28 : Analyse des paramètres dans le plan factoriel F1-F2 dans les eaux de la localité de Batouri.

- Modélisation par le diagramme de Gibbs

On utilise le diagramme de Gibbs en hydrochimie appliquée pour déterminer les mécanismes (apports atmosphériques, processus d'évaporation-cristallisation et interactions eau - roches) qui contrôlent la composition chimique des eaux (Gibbs, 1970). Dans les eaux de la localité de Batouri, le modèle de Gibbs montre que l'interaction entre les roches et l'eau est le processus majeur qui contrôle la composition physicochimique des eaux. C'est un résultat qui est similaire à ceux obtenus par de nombreux auteurs dans le Sud Cameroun (Majestic *et al.*, 2007 ; Armah *et al.*, 2010 ; Mfonka *et al.*, 2015 ; Fantong *et al.*, 2016 ; Kamtchueng *et al.*, 2016 ; Mimba *et al.*, 2017).

V.4.2. Origines des éléments en trace métalliques et des cyanures dans les eaux de la localité de Batouri (BVK)

Les résultats de la matrice de corrélation obtenus entre les éléments en traces métalliques et les cyanures (Tableau XXXXI) pour les eaux de la localité de Batouri dans le BVK montrent qu'il existe de bonnes corrélations entre les différents couples. Il s'agit notamment du Zn/Cu (0,985), Mn/Pb (0,925), Cd/Pb (0,917), Mn/Cd (0,874), Fe/Cr (0,723), Cr/CN (0,708) et Cr/Mn (0,665). Lesdits résultats inspirent qu'on pourrait se retrouver en face d'une source commune pour la majorité de ces éléments en traces métalliques (Fe, Mn, Cr, Pb, Cd) et des cyanures. Cette source unique pourrait être les déchets provenant des différents sites miniers (exploitations semi-mécanisées d'or) présents dans le Bassin versant de la Kadey à Batouri. Ils sont principalement les métaux lourds utilisés lors des différents processus de séparation chimique (flottation / amalgamation) du minerai de la gangue (Younger, 2001 ; CAPAM, 2016 ; Kringel et *al.*, 2016 ; Léopold et *al.*, 2017). Toutefois, il faut noter que le fer et l'arsenic sont relativement liés. En effet, l'oxydation des minéraux sulfurés (pyrite : FeS₂, arsénopyrite : FeAsS) libère en solution le fer ferrique et les sulfates suivant l'une des deux équations ci-dessous :



En somme, les ETMs et les cyanures présents dans eaux du bassin versant de la Kadey à Batouri ont des valeurs faibles dans l'ensemble par rapport à d'autres zones et ceci nonobstant des teneurs importantes parce que la solubilité de ces éléments est fonction du pH. Plus le pH est élevé moins la mobilité des métaux lourds est effectuée (Huang et *al.*, 2010). C'est ce qui traduit la présence de drainage minier acide (DMA) dans le bassin versant au niveau de la localité de Batouri (5,72 < pH < 6,08).

Tableau XXXXI : Matrice de corrélation entre les éléments en traces métalliques et les cyanures dans les eaux du BVK à Batouri

Paramètres	pH	CE	Pb	Cd	Cu	Zn	CN	Cr	Mn	Fe
pH	1									
CE	0,405	1								
Pb	-0,191	-0,718	1							
Cd	-0,928	-0,271	0,917	1						
Cu	-0,248	-0,369	-0,060	-0,005	1					
Zn	-0,358	0,024	-0,191	-0,138	0,985	1				
CN	0,310	-0,470	-0,120	-0,229	-0,328	-0,291	1			
Cr	0,577	0,347	0,584	0,479	-0,339	-0,404	0,708	1		
Mn	0,298	-0,048	0,925	0,874	-0,245	-0,368	0,012	0,665	1	
Fe	0,584	0,557	0,405	0,316	-0,470	-0,511	0,191	0,723	0,347	1

V.5. Estimation du degré de pollution des eaux de la localité de Batouri dans le BVK à partir des normes de l’OMS et du calcul de l’IPM

Parmi les métaux lourds et les éléments toxiques identifiés dans les eaux de la localité de Batouri, les concentrations en Fe, Mn, Pb, Cd et Cr sont largement supérieures aux valeurs maximales admissibles (VMA) par l’OMS. L’indice de pollution métallique obtenu pour les différents métaux lourds dosés est de 1073,07 pour les eaux d’écoulement et 156,09 pour les eaux souterraines (Tableau XXXXI et Tableau XXXXII).

Tableau XXXXI : Indices de pollution métallique pour les eaux d’écoulements de la localité de Batouri dans le BVK

ETM (µg/L)	Valeur guide de l’OMS (Si) en µg/L	Concentration moyenne (Mi) en µg/L	Indice Wi (Wi = 1/Si)	Sous – indice Qi (Qi = 100*Mi/Si)	Wi*Qi
Pb	10	95	0,1	950	95
Cd	3	48	0,33	1584	522,72
As	10	10	0,1	100	10
Cu	2000	281	0,0005	14,05	0,0070
Zn	3000	170	0,0003	5,10	0,0015
Cr	50	65	0,02	130	2,6
Mn	400	417	0,0025	104,25	0,26
Fe	300	994,7	0,0033	328,251	1,083
			$\sum Wi = 0,55$	$\sum Wi * Qi = 631,67$	
					IPM = $\sum Wi * Qi / \sum Wi = 1134,87$

Tableau XXXXII : Indices de pollution métallique pour les eaux souterraines de la localité de Batouri dans le BVK

ETM (µg/L)	Valeur guide de l'OMS (Si) en µg/L	Concentration moyenne (Mi) en µg/L	Indice Wi (Wi = 1/Si)	Sous – indice Qi (Qi = 100*Mi/Si)	Wi*Qi
Pb	10	85,55	0,1	855,5	85,55
Cd	3	0	0,33	0	0
As	10	0	0,1	0	0
Cu	2000	3,57	0,0005	0,1785	0,000089
Zn	3000	6,08	0,0003	0,1824	0,000054
Cr	50	0	0,02	0	0
Mn	400	107,52	0,0025	26,88	0,0672
Fe	300	0	0,0033	0	0
			$\sum Wi = 0,55$	$\sum Wi * Qi = 85,61$	
IPM = $\sum Wi * Qi / \sum Wi = 153,82$					

De ces résultats, il ressort que les valeurs de ces indices sont supérieures à 100 qui est la valeur limite matérialisant une pollution critique. Ainsi, avec un IPM de 1134,87, les eaux d'écoulement de la localité de Batouri sont presque 100 fois plus polluées par les activités anthropiques (exploitation de l'or) qui s'y déroulent que les eaux souterraines (IPM = 153,82). Des valeurs similaires ont été obtenues sur d'autres sites miniers au dans la région de l'Est et même hors des frontières du triangle national (Reza et Singh, 2010 ; Ameh et AKpah, 2011 ; Kringel et al., 2016 ; Bhardwaj et al., 2017 ; Ratotondrabe et al., 2018). On peut également noter que l'IPM ne dépend pas des différents éléments chimiques mais uniquement de ceux néfastes sur la qualité des eaux (Bhardwaj et al., 2017).

Conclusion

En somme, les eaux de la localité de Batouri sont acides avec un pH compris entre 5,72 et 6,08 ; elles sont très faiblement à faiblement minéralisées ($18 < CE < 140 \mu\text{S}/\text{cm}$; $49,44 < \text{TZ}^+ < 864,70 \mu\text{éq}/\text{L}$; $34,40 < \text{TZ}^- < 971,08 \mu\text{éq}/\text{L}$) avec des turbidités et des MES totales respectivement comprises entre 0,37 et 4012 NTU et entre 3,93 et 1108,27 mg/L. Les principaux faciès hydrogéochimiques identifiés dans les eaux de la localité de Batouri sont de deux types : le faciès bicarbonaté calci-magnésien ($\text{HCO}_3 - \text{Ca} - \text{Mg}$) et le faciès bicarbonaté sodi-potassique ($\text{HCO}_3 - \text{Na} - \text{K}$). On note également que ces eaux sont sous-saturées ($\text{IS} < 0$) en minéraux carbonatés et en minéraux contenant des sulfates. Les indices de qualité des eaux (IQE) sont compris entre 12,45 et 3271,11. Ils montrent que les eaux de la localité de Batouri sont des eaux de « bonne qualité » à « mauvaise qualité ». Ici, les éléments en trace métalliques ont des concentrations supérieures à celles recommandées par les normes de l'OMS (2011) pour ce qui est des destinées à la consommation humaine ($0,008 < \text{Pb} < 0,015 \text{ mg}/\text{L}$; $0 < \text{Cd} < 0,05$

mg/L ; $0 < \text{As} < 0,028 \text{ mg/L}$; $0,005 < \text{Cu} < 0,8 \text{ mg/L}$; $0 < \text{Zn} < 0,4 \text{ mg/L}$; $0 < \text{Cr} < 0,1 \text{ mg/L}$; $0 < \text{Mn} < 1,75 \text{ mg/L}$; $0,1 < \text{Fe} < 2,99 \text{ mg/L}$). Le calcul des indices de pollution métallique (IPM) dans des valeurs comprises entre 121,45 et 1275,34. Ces valeurs sont toutes supérieures à 100. Cela montre que ces eaux sont énormément polluées pour ce qui est des métaux lourds.

Il ressort enfin de la présente étude que les variations spatiotemporelles des différents paramètres physicochimiques dans les eaux (souterraines et d'écoulement) de la localité de Batouri sont contrôlées par les facteurs environnementaux suivants : la géologie, le climat, les apports atmosphériques et les activités anthropiques. Ainsi, le pH, la CE et les différentes concentrations des majeurs assez faibles dans les eaux de la Kadey par rapport au reste des cours d'eau du Sud Cameroun. Cependant, les MES totales et la turbidité ont des valeurs très élevées comme c'est le cas pour la majorité des cours d'eau drainés par des sites d'exploitation minière et / ou forestière du Cameroun et des pays de l'Afrique de l'Est. La présence prononcée de plusieurs ETM dans ces eaux est à mettre en relation avec la présence des exploitations minières semi-mécanisées qui existent dans la zone d'étude. Ces éléments sont le résultat de processus de séparation du minerai (le cyanure par lixiviation ; le mercure par amalgamation ; etc.).

Le calcul des indices de pollution métalliques (1134,87 pour les eaux d'écoulement et 153,82 pour les eaux souterraines) montre que les eaux de la localité de Batouri sont polluées par les métaux lourds car toutes ces valeurs sont supérieures à la limite critique de 100.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le Bassin Versant de la Kadey (BVK) qui fait l'objet de la présente étude est situé au sud-est de la région de l'Est-Cameroun entre les parallèles 4°05'12'' et 5°25'35'' de latitude Nord, et les méridiens 13°47'12'' et 14°50'08'' de longitude Est. Il est drainé par les cours d'eau Kadey et Doumé qui confluent pour se déverser dans la Sangha. Son substratum géologique à l'instar de celui du sud Cameroun forestier est constitué d'un socle granito gneissique qui appartient à la Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale (CPNE) du Cameroun encore appelée Chaîne mobile délimité au nord par la zone de Cisaillement de l'Adamaoua et au sud, par la bordure nord du Craton du Congo. Il surmonté par endroits par d'épaisses couches de sol ferralitiques (rouges et/ou jaunes) et des sols hydromorphes. Sa végétation est constituée par endroits d'une forêt dense et/ou d'une forêt dégradée et d'herbes associées aux plantes vivrières et de rentes qui est une conséquence des différentes activités anthropiques présentes.

Les résultats obtenus montrent que sur le plan climatologique (températures et pluies), les températures moyennes annuelles varient au niveau des différentes stations pluviométriques du BVK entre 22,9 et 26,1°C pour une moyenne interannuelle de 24,2°C ± 0,5. Les pluies annuelles quant à elles varient entre 863 mm à Abong-Mbang et 2362 mm (Yokadouma) pour une moyenne interannuelle de 1633±179 mm durant la période comprise entre 1935 et 2015 (81 ans). Elles varient différemment d'une année à une autre avec alternance de périodes humides et sèches. Le test de Pettit révèle des ruptures significatives dans toutes les stations du BVK avec des diminutions de pluies annuelles qui sont comprises entre -9,5 et -13 %, soit environ 248,5 mm de la baisse des pluies annuelles depuis l'année 1955. Les variations de pluies mensuelles et saisonnières sont caractéristiques du régime équatorial de transition à quatre saisons inégalement réparties vers l'extrême sud de la région de l'Est (Abong-Mbang, Bertoua et Yokadouma) et passe au régime tropical de transition à deux saisons (sèche et humide) vers le nord de la région de l'Est à Batouri. Cette tendance à la baisse de pluies annuelles est observée non seulement à l'échelle du BVK, mais également aux niveaux de toute la région de l'Est-Cameroun et même du territoire camerounais.

Sur le plan hydrologique, les débits annuels de la Kadey à Batouri (8 749 km²) varient entre 97,9 m³/s et 218 m³/s durant la période comprise entre 1954 - 2015 sans prendre en compte la lacune observée entre 1977 et 1998, pour un module interannuel de 147±25,6 m³/s et un débit spécifique de 16,80 L/s/km². Ce qui correspond à une lame d'eau écoulée de 529 mm et représente un coefficient d'écoulement de 30,08 %. Quant aux débits de la Kadey à Pana (20 372 Km²), les débits annuels varient entre 148,4 m³/s et 317 m³/s entre 1964 - 2015 sans prendre en compte la lacune d'observation comprise entre 1981 et 1998, pour un module interannuel de 304±28,1 m³/s (15 L/s/km²) et une lame d'eau écoulée de 470,59 mm correspondant à un coefficient d'écoulement de

28,81 %. Aux échelles pluriannuelles, l'analyse de l'évolution de ces débits montre une succession de périodes humides et sèches.

Lorsque l'on compare les débits de la Kadey à Batouri avant la lacune (120 m³/s) et après la lacune (104,5 m³/s) ainsi que ceux de Pana avant (247 m³/s) et après la lacune (215 m³/s); on enregistre dans l'ensemble une baisse des débits d'environ -13 % sur la Kadey à Batouri et à Pana pendant les périodes actuelle comparativement aux périodes anciennes situées avant les lacunes d'observations. Les débits moyens mensuels de la Kadey oscillent d'une part entre 50,2 m³/s (mars) et 342,8 m³/s (novembre) à Batouri, et entre 65 m³/s (février) et 489,6 m³/s (novembre) à Pana. De la confrontation des débits moyens mensuels de la Kadey à Batouri et à Pana avant et après la lacune, il ressort que les moyennes mensuelles observées durant la période actuelle (1998 à 2015) sont dans l'ensemble inférieures à celles de la période ancienne située entre 1954-1977 à l'exception des débits mensuels de la saison sèche comprise entre juillet - septembre qui ont quant à eux connu une augmentation de leurs débits.

Les débits journaliers de la Kadey à Batouri montrent des fluctuations qui varient différemment d'une année à une autre. C'est ainsi que durant la période comprise entre 1951 et 2015, les débits journaliers ont varié entre 10 m³/s (0,34 l/s/km²) et 574 m³/s (35 l/s/km²). Durant les périodes d'étiage de décembre à mars, on constate une augmentation du coefficient de tarissement passant de 0,015 à 0,045 soit plus de 180% entre les périodes pré et post lacune dans le BVK. Par contre, le coefficient de variation des crues de la Kadey à Pana oscille entre 0,202 et 0,228 entre 1998 et 2015. L'analyse des relations et des coefficients de corrélation pluies annuelles-débits annuels durant la période d'étude ne présente aucune corrélation étroite et significative entre ces deux paramètres mais plutôt une simple dépendance. C'est ainsi qu'on enregistre simultanément des baisses de pluies annuelles comprises entre -9.5 et -13% contre -13% pour les débits annuels. En revanche, les évolutions mensuelles des pluies et des débits confirment, une modification du régime avec le passage d'un régime bimodal du sud (Abong-Mbang, Bertoua, Yokadouma) vers un régime à tendance unimodal au nord à Batouri, caractéristique du climat tropical de transition. Cette corrélation bien que traduisant uniquement une relation de dépendance entre les deux paramètres est l'expression du changement climatique qui ne cesse de prendre de l'ampleur à l'échelle du BVK, dans tout le sud du Cameroun forestier comme le Nyong, le Ntem, le Dja et la Boumba et même au-delà des frontières nationales en Afrique Centrale et Occidentale.

Sur le plan hydrodynamique, les battements de la nappe observés dans le BVK fluctuent entre 3,71 et 10,54 m pour une moyenne de 5,5±0,49 m. Les variations les plus élevées sont enregistrés aux niveaux des versants et des sommets de versants. La variation des niveaux piézométriques indique

quant à elle une fluctuation comprise respectivement entre 621,85 et 720,90 m pour les sources ; et entre 689,72 et 892,99 m pour les cours d'eau. On note une évolution synchrone, tout au long de l'année, de la surface piézométrique dans les différents ouvrages de captages qui pourrait être la résultante et l'expression de l'existence d'un aquifère de sub-surface unique et continu dans tout le bassin comme c'est souvent le cas en zone de socle cristallin fracturé.

A l'échelle du BVK, le bilan hydrique estimé montre que pour une lame d'eau précipité de 1761 mm durant la période d'étude, l'écoulement est de 350,50 mm représentant 19,90% de la pluie ; l'ETR est de 1222,95 mm soit 69,45% de la pluie et l'infiltration (187,55 mm) correspond à un coefficient d'infiltration de 10,65%.

Sur le plan hydrogéochimique enfin, les eaux du BVK sont acides ($5,72 < \text{pH} < 6,08$) et très faiblement à faiblement minéralisées ($18 < \text{CE} < 140 \mu\text{S}/\text{cm}$; 49,44 et 1252,14 $\mu\text{eq}/\text{L}$ et $428,17 \pm 341,85 \mu\text{eq}/\text{L}$). Plusieurs facteurs environnementaux contrôlent la qualité des eaux du BVK : la lithologie, les activités anthropiques et le climat. L'exploitation minière artisanale se manifeste surtout par de fortes fluctuations de turbidités comprises entre 17 et 4 012 NTU et de MES totales qui oscillent entre 3,93 et 1108,27 mg/L dans les eaux de ce dernier. L'exploitation semi mécanisée quant à elle est à l'origine de la présence remarquée des Eléments Traces Métalliques (ETMs) : $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{As} > \text{CN}$ dans les eaux du BVK à Batouri.

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

- une étude hydroclimatologique à une échelle beaucoup plus large dans le bassin du Congo au Cameroun avec prise en compte des pluies journalières et des débits de cours d'eau Dja, Boumba, Ngoko et Sangha pour évaluer les phénomènes de la variabilité climatique et des activités anthropiques sur les ressources en eau de ce grand bassin versant forestier qui joue un rôle primordial dans l'équilibre de la planète, le cycle de l'eau et la séquestration du Carbone ;
- une étude des paramètres physiques et hydrodynamiques des sols et des aquifères tels que la granulométrie, les perméabilités, les transmissivités pour mieux rendre compte du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère ;
- un suivi pluriannuel des éléments chimiques avec prise en compte des éléments en traces dans les eaux de surface (pluies et cours d'eaux) et souterraines, les sédiments, la faune, la flore dans la zone d'intérêt mais également à l'échelle de l'ensemble du bassin du Congo dans sa partie camerounaise.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel-Satar, A.M., Ali, M.H. and Goher, M.E., 2017.** Indices of Water Quality and Metal Pollution of Nile River. Egypt *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 43, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2016.12.006>
- Abdou Babaye, M.S., 2012.** Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako – Niger). Thèse de doctorat Université de Liège et Université Abdou Moumouni. 265p.
- Action Contre la Faim (ACF), 2008.** Eau-Assainissement-Hygiène pour les populations à risque. Editions Hermann, Paris, 785p.
- Aenab, A.M., Singh, S.K. and Al-Rubaye, A.A.M., 2012.** Evaluation of Tigris River by Water Quality Index Analysis Using C++ Program. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 523527. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.47061>
- Ahiale, E.K., Serfoh-Armah, Y., Kortatsi, B.K., 2010.** Hydrochemical Analysis of Groundwater in the Lower Pra Basin of Ghana. *Journal of Water Resource and Protection*, 2, 864-871. [doi:10.4236/jwarp.2010.210103](https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.210103)
- Alaerts, 1990 :** L'écoulement de l'eau dans les sols perméables et son influence sur la construction des puits – la technique de l'eau juillet 1990.
- Alloway, B.J. et Ayres, D.C., 1997.** Chemical Principles of Environmental Pollution. 2nd Edition, Blackie Academic Professional, Chapman and Hall, London, 381p.
- Al-Mashagbah, A.F., 2015.** Assessment of Surface Water Quality of King Abdullah Canal, Using Phy-Sico-Chemical Characteristics and Water Quality Index, Jordan. *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 339-352. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2015.74027>
- Ameh, E.G., Akpah, F.A., 2011.** Heavy metal pollution indexing and multivariate statistical evaluation of hydrogeochemistry of River PovPov in Itakpe Iron-Oremining area Kogi State, Nigeria. *Adv. Appl. Sci. Res.* 2, 33–46.
- Anaba Onana, A.B., Ndam Ngoupayou, J.R., Mvondo Ondoa, J., 2017.** Analysis of crystalline bedrock aquifer productivity: Case of central region in Cameroon. *Groundwater for Sustainable Development*, 5, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.05.003>
- Anonyme UNESCO 2020.** PHI-VIII : LA SÉCURITÉ DE L'EAU Réponses aux défis locaux, régionaux et mondiaux (2014-2021) ; Rapport Interne UNESCO 16 p.
- Aranguren Salvarredy M.M., 2008.** Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes boliviennes) par des déchets miniers: approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat PhD de l'Université de Toulouse 3 Paul Sabatier : IRD, 371 p.

- Ardoin-Bardin, S., 2004.** Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, 330p.
- Ardoin-Bardin, S., Lubes-Niel, H., Servat, E., Dezetter, A., Boyer, J.F., Mahé, G. et Paturel, J.E., 2003.** Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. In : Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (ed. by E. Servat, W. Najem, C. Leduc, and A. Shakeel). Proc. Int. Conf. of Montpellier 2003, 223-228, IAHS Publ. 278. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Armah, F.A., Obiri, S., Yawson, D.O., Onumah, E.E., Yengoh, G.T., Afrifa Ernest, K.A., Odo J.O., 2010.** Anthropogenic sources and environmentally relevant concentrations of heavy metals in surface water of a mining district in Ghana: a multivariate statistical approach. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 45:13, 1804-1813, doi: [10.1080/10934529.2010.513296](https://doi.org/10.1080/10934529.2010.513296)
- Asaah, Akwinga.V., Zoheir, B., Lehmann, B., Frei, D., Burgess, R., Suh, C.E., 2015.** Geochemistry and geochronology of the ~620 Ma gold associated Batouri granitoids, Cameroon. *International Geology Review*. 57, 1485-1509. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.951003>
- Bakia, M., 2014.** East Cameroon's artisanal and small-scale mining bonanza: How long will it last? *The Futures of Small-Scale Mining in Sub-Saharan Africa*.6:40-50. doi:10.1016/j.futures.2013.10.022.
- Banton, O et Bangoy Mulongo, L., 1997.** Hydrologie, multi-sciences environnementales des eaux souterraines. Press. Univ. Quebec. AUPELF. UREF, 460 p.
- Beaux J.F, 1997.** L'environnement, Collection Repères pratiques Nathan, Paris, 160 p.
- Bhardwaj, R., Gupta, A., Garg, J.K., 2017.** Evaluation of heavy metal contamination using environmetrics and indexing approach for River Yamuna, Delhi stretch, India. *Water Sciences*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wsj.2017.02.002>
- Bhattacharya, P., Sracek, O., Eldvall, B., Asklund, R., Barmen, G., Gunnar, J., Koku, J., Gustafsson, J.E., Singh, N., Balfors, B.B., 2012.** Hydrogeochemical study on the contamination of water resources in a part of Tarkwa mining area, Western Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 66 (67), 72-84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.03.005>
- Bineli Ambomo, E., 2009.** Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Nyong. Mém. DEA. Univ. Yaoundé I, Fac Sci. Dpt Sciences de la Terre. 82p.

- Bitom, D., 1988.** Organisation et évolution d'une couverture ferrallitique en zone tropicale humide (Cameroun). Genèse et transformation d'ensembles ferrugineux indurés profonds. Thèse de doctorat de l'Université Poitiers, 164p.
- Boeglin, J.L., Ndam, J.R., Braun, J.J., 2003.** Composition of the different reservoir waters in a tropical humid area: example of the Nsimi catchment (Southern Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*. 37, 103-110. [http://dx.doi.org/10.1016/S08995362\(03\)000411](http://dx.doi.org/10.1016/S08995362(03)000411)
- Boeglin, J-L, Probst, J.L., 1998.** Physical and chemical weathering rates and CO₂ consumption in a tropical lateritic environment: the upper Niger basin. *Chem. Geol.* 148, 137-156.
- Boeglin, J-L, Probst, J.L., 2000.** Transports fluviaux de matières dissoutes et particulaires sur un bassin versant en région tropicale : le bassin du Niger au cours de la période 1990-1993. *Sci. Géol. Bull.* 49 (1-4), 25-45.
- Bon, F.A., Ndam Ngoupayou, J.R, Ewodo Mboudou, G., Ekodeck, G.E., 2016.** Hydrogeological characterization of weathered and fissured basement aquifers of the Olezoa watershed in Yaoundé, Cameroon. *Revue des Sciences de l'Eau*. 29: 149-166.
- Braun, J.J., Dupré, B., Viers, J., Ndam Ngoupayou, J. R., Bedimo Bedimo, J.P., Sigha-Nkamdjou, L., Nkamdjou, Freydier, R., Robain, H., Nyeck, B., Bodin, J., Oliva, P., Boeglin, J.L., Stemmler, S., Berthelin, J., 2002.** Biogeohydrodynamic in the forested humid tropical environment: the case study of the Nsimi small experimental watershed (south Cameroon). *Bull. Soc. géol. France*, 4, 347-357.
- Braun, J.J., Marechal, J.C., Riotte, J., Boeglin, J.L., Bedimo Bedimo, J.P., 2012.** Elemental weathering fluxes and saprolite production rate in a Central African lateritic terrain (Nsimi, South Cameroon) *Geochimica et Cosmochimica*, 99, 243-270.
- Braun, J.J., Ndam Ngoupayou, J.R., Viers, J., Dupre, B., Bedimo Bedimo, J.P., Boeglin, J.L., Robain, H., Nyeck, B., Freydier, R., Sigha Nkamdjou, L., Rouiller, J., Muller, J.P., 2005.** Present weathering rates in a humid tropical watershed: Nsimi site (South Cameroon). *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 357-387.
- Braun, J.J., Viers, J., Dupre, B., Polve M., Ndam J. and Muller J.-P., 1998.** Solid/Liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyoum, East Cameroon: the implication for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical regions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62, 273299
- Bring, C., 2015 :** Variabilité pluviométrique sur le plateau de l'Adamaoua et son incidence sur les calendriers Agropastoraux, Thèse pour le Doctorat Ph-D, Université de Ngaoundéré, pp 40-118.

- Brunet-Moret, Y. ; Chaperon, P. ; Lamagat, J.P. et Molinier, M., 2018** : Monographie hydrologique du fleuve Niger, Tome I : Niger supérieur. Coll. Monog. Hydrol. n° 8, Paris, 396p.
- Callender, E., 2003.** Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. Treatise on Geochemistry (Second Edition), 59-89.
- Campbell, B., 2009.** Ressources minières en Afrique. Quelle réglementation pour le développement ? Presses de l'Université du Québec. 276p.
- CAPAM, 2016.** Mission de suivi environnemental des sites d'exploitations minières artisanales dans les régions de l'Est et de l'Adamaoua. 44p.
- Castany, G., 1998.** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Éd. Dunod, Paris V, 236 p.
- Cortes, J.E., Muñoz, L.F., Gonzalez, C.A., Niño, J.E., Polo, A., Suspes, A., Siachoque, S.C., Hernández, A., Trujillo, H., 2016.** Hydrogeochemistry of the formation waters in the San Francisco field, UMV basin, Colombia - A multivariate statistical approach. *Journal of Hydrology*, 539, 113-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.010>
- CVUC, 2015.** Rapport Technique des communes de la région de l'Est. 278p.
- Dao, A., Kamagate. B., Mariko. A., Goula, B. Albert., Seguis. L., Maiga, H., Bokar, S. Issiaka., 2010.** Variabilité Climatique et Réponse Hydrologique du Bassin Versant Transfrontalier de Kolondièba au Sud du Mali. *European Journal of Scientific Research* 43: 435-444.
- Dedzo, M.G., Tsozué, D., Mimba, M.E., Teddy, F., Nembungwe, R.M., Linida, S., 2017.** Importance of rocks and their weathering products on groundwater quality in Central-East Cameroon. *Hydrology* 4 (2):23. <http://dx.doi.org/10.3390/hydrology4020023>
- Derwich E., Benaabidate L., Zian A., Sadki O., Belghity D., 2010.** Caractérisation physicochimique des eaux de la nappe alluviale du Haut Sebou en aval de sa confluence avec oued FES. *Larhyss Journal*, 08, 101-112.
- Detay, M., 1993.** Le forage d'eau, réalisation, entretien, réhabilitation. Masson. Paris. 375p.
- Djeuda Tchapgna, H.B. et Tanawa, E., 1999** : Qualité de l'eau et normes en relation avec les usages dans les pays en voies de développement, Communication présentée à la 6^e semaine nationale de l'eau organisée par le Ministère des Mines, de l'eau et de l'Energie, Yaoundé du 15 au 22 mars 1999, 14 p.
- Djeuda Tchapgna, H.B., Tanawa, E., Ngnikam, E., 2001.** L'eau au Cameroun : Approvisionnement en eau. Tome I, édit. PUY, 359 p.
- Djeuda Tchapgna, H.B., Tanawa, E., Temgoua, E., Siakeu, J., Ngo Massana, B., 1999.** Modes de circulation, mécanisme de recharge et temps de séjour des eaux souterraines

des altérites en milieu cristallin : cas du bassin versant de l'Anga'a, Yaoundé, Cameroun. Collect. GEOCAM 2/1999, édit. PUY, 359 p.

- Djoufack-Manetsa, V., 2011.** Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de la variabilité du NDVI. Thèse de Doctorat des Université de Yaoundé I et Bourgogne. 303p.
- EDC, 2011.** Évaluation environnementale et sociale (EES). Volume 1. Évaluation des impacts environnementaux et sociaux (EIES). Mars 2001. Projet Hydroélectrique de Lom Pangar
- Etame, J., 2001.** La mine artisanale en Afrique : aspects techniques et environnementaux. CIFEG, Publication Occasionnelle 37 : 87-93.
- Ewodo Mboudou, G., Ombolo, A., Fouepe Takoundjou, A., Bon A.F., Bineli Ambomo, E., Bello, M., 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 (I), pp 123-127.
- Fantong, W.Y., Fouépé, A.T., Issa, Djomou, Serges L.B., Banseka, H.S., Anazawa, K., Sma, A., Mendjo, J.W., Aka, F.T., Ohba, T., Hell, J.V., George E, N. 2013.** Temporal pollution by nitrate (NO₃), and discharge of springs in shallow crystalline aquifers: Case of Akok Ndoue catchment, Yaounde (Cameroon). *African Journal of Environmental Science and Technology*, 7(5), 175-191. [doi: 10.5897/AJEST2013.1421](https://doi.org/10.5897/AJEST2013.1421)
- Fantong, W.Y., Kamtchueng, B.T., Ketchemen-Tandia, B., Kuitcha, D., Ndjama, J., Fouepe, A.T., Takem, G.E., Issa, Wirmvem, M.J., Bopda Djomou, S.L., Ako Ako, A., Nkeng, G.E., Kusakabe, M., Ohba, T., 2016.** Variation of hydrogeochemical characteristics of water in surface flows, shallow wells, and boreholes in the coastal city of Douala (Cameroon) *Hydrological Sciences Journal*, 61, 2916-2929 <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1173789>
- Feumba, R., 2005.** Hydrogéologie en zone de socle cristallin : Cas du bassin versant de l'Ekozoa, secteur nord de la ville de Yaoundé – Cameroun. Mém. DEA. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 94 p.
- Feumba, R., 2015.** Hydrogéologie et évolution de la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besseke (Douala, Cameroun). Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I, Cameroun. 254p.
- Fomété, T., Tchanou, Z., 1998.** La gestion des écosystèmes forestiers du Cameroun à l'aube de l'an 2000, volume 2, IUCN, Yaoundé, Cameroun.

- Fon, A.F., Bih, V.C., Cheo, E.S., 2012.** Application of Electrical Resistivity and Chargeability Data on a GIS Platform in Delineating Auriferous Structures in a Deeply Weathered Lateritic Terrain, Eastern Cameroon. *International Journal of Geosciences*. 2. 960-971. doi:10.4236/ijg.2012.325097
- Fouépé Takounjou, A., Ndam Ngoupayou, J.R., Marechal, J., Riotte, J., Sigha Nkamdjou, L., Mafany, Ekodeck, G.E., 2012:** Estimation of groundwater recharge of shallow aquifer on humid environment in Yaoundé, Cameroon using hybrid-water fluctuation and hydrochemistry methods. *Environmental Earth Sciences*. 12p.
- Foumena, W.C., Bamenjo, J.N., 2013.** Artisanal Mining a challenge to the Kimberly process: a case study of the Kadey Division, East region of Cameroon, RELUFA extractive industries programme team. www.relufa.org/documents/BOOKENGLISH_NET.pdf.
- Freyssinet, Ph., Lecomte, P., Edimo, A., 1989.** Dispersion of gold and base metals in the Mborguéné lateritic profile, East Cameroun. *Journal of Geochemical Exploration*. 32: 99-116. doi:10.1016/0375-6742(89)90050-2.
- Gaillardet, J., Dupre, B., Louvat, P. and Allegre, C.J., 1999.** Global silicate weathering of silicates estimated from large river geochemistry. *Chemical Geology* 159: 3-30.
- Ganwa, A.A., Klötzli, U. S., Hauzenberger, C., 2016.** Evidence for Archean inheritance in the prePanafrican crust of Central Cameroon: Insight from zircon internal structure and LA-MC-ICPMS UPb age. *Journal of African Earth Sciences*, 120, 12-22.
- Gautier, F., Lubes-Niel, H., Sabatier, R., Masson, J.M., Paturel, J.E Servat, E., 1998.** Variabilité du régime pluviométrique de l’Afrique de l’Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, pp. 921- 935.
- GIZ/Plan, 2009.** Les forêts du Cameroun. Analyse Technique : Etat des lieux sur le patrimoine forestier des régions du Centre – Sud – Est. Coll. Inter. Yaoundé 15 janvier 2009. Pp 17-26.
- Glèlè Kakai, R., Salako, V. K., Padonou, E. A., Lykke, M., 2016.** Méthodes statistiques multivariées utilisées en écologie. *Annales des Sciences Agronomiques* 20 - spécial Projet Undesert-UE : 139-157.
- Gomes, M.E.P., Antunes., I.M.H.R., Silva, P.B., Neiva, A.M.R., Pacheco, F.A.L., 2010.** Geochemistry of waters associated with the old mine workings at Fonte Santa (NE of Portugal). *Journal of Geochemical Exploration* 105,153-165. doi:10.1016/j.gexplo.2010.05.001

- Gountié Dedzo, M., Tsozué, D., Mimba, M.E., Teddy, F., Nembungwe, R. M., Linida, S., 2017.** Importance of Rocks and Their Weathering Products on Groundwater Quality in Central-East Cameroon. *Hydrology*, 4, 23 ; doi:10.3390/hydrology4020023.
- Gournay, A., 2012.** Analyse statistique multivariée. Notes de cours Université de Neuchâtel. 76p.
- GWP-Caf – CEEAC, 2014.** Etat des lieux des services météorologiques et hydrologiques de la République du Cameroun. Technical Report, Yaounde, 95p.
- Huang, X., Deng, H., Zheng, C., Cao, G., 2016.** Hydrogeochemical signatures and evolution of groundwater impacted by the Bayan Obo tailing pond in northwest China. *Sci. Tot. Env.*, 543, 357-372. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.150>
- Huang, X., Sillanpää, M., Gjessing, Egil. T., Peräniemi, S., Vogt, Rolf., D., 2010.** Environmental impact of mining activities on the surface water quality in Tibet: Gyama valley. *Sci. Tot. Env.*, 408, 4177-4184. [doi:10.1016/j.scitotenv.2010.05.015](http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.05.015)
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A., 1989.** Segmentation des séries Hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l’Afrique de l’Ouest. *Journal of Hydrology*. 10 pp. 349-367.
- Ibrahima, M., Moctar, D., Maguette, D.N., Diakher, M.H., Malick, N.P. and Serigne, F., 2015.** Evaluation of Water Resources Quality in Sabodala Gold Mining Region and Its Surrounding Area (Senegal). *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 247-263. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.73020>
- IRAD, 2008.** Zones agro écologiques du Cameroun. www.irad-cameroon.org juin 2008
- Kamagaté, B., 2006 :** Fonctionnement hydrologique et origines des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute Vallée de l’Ouémé). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France.
- Kamtchueng, B.T., Fantong, W.Y., Wirmvem, M.J, Tiodjio, R.E, Takounjou, A.F, Ndam Ngoupayou, J.R., Kusakabe, M., Zhang, J., Ohba, T., Tanyileke, G., Hell ,J.V, Ueda, A. 2016.** Hydrogeochemistry and quality of surface water and groundwater in the vicinity of Lake Monoun, West Cameroon: approach from multivariate statistical analysis and stable isotopic characterization. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 524. [doi 10.1007/s10661-016-5514-x](http://dx.doi.org/10.1007/s10661-016-5514-x)
- Kankeu, B., 2008.** Anisotropie de la susceptibilité magnétique (ASM) et fabriques des roches Néoprotérozoïques des régions de Garga-Sarali et Bétaré-Oya à l’Est de Cameroun : Implications géodynamiques pour l’évolution de la chaîne pan-africaine de l’Afrique Centrale. PhD. Dissertation, University of Yaoundé I. Cameroon. 159 p.

- Kankeu, B., Greiling, R.O., Nzenti, J.P., 2009.** Pan-African strike-slip tectonics in eastern Cameroon-Magnetic fabrics (AMS) and structure in the Lom basin and its gneissic basement. *Precambrian Research* .174, 258-272. [doi:10.1016/j.precamres.2009.08.001](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.08.001)
- Kim, J.H., Kim, R.H., Lee, J., Chang, H.W., 2003.** Hydrogeochemical characterization of major factors affecting the quality of shallow groundwater in the coastal area at Kimje in South Korea. *Environment Geology*, 44, 478-489.
- Kouakou, K. E. Goula, B. T. A. & Savane, I., 2007 :** Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte D’ivoire - Burkina Faso). *Euro. Journal of Sciences Research* 16, pp 31 43.
- Kouam Kenmogne, G-R ., Hernanie G. M., Ayonghe Ndonwy, Djomoudou Bopda, S.L., Ekodeck, G.E., 2006.** Gestion intégrée des ressources en eau et objectifs du millénaire pour le développement en Afrique : Cas du Cameroun, *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 7 Numéro 2 | septembre 2006, mis en ligne le 27 avril 2009, Consulté le 02 Février 2018. URL : <http://vertigo.revues.org/2319> ; [doi: 10.4000/vertigo.2319](https://doi.org/10.4000/vertigo.2319)
- Kouankap Nono, G.D., Tah Bong, C., Wotchoko, P., Magha, A., Chiane Beng Japhet, K., Tene Djoukam, J.F., 2017.** Artisanal gold mining in Batouri area, East Cameroon: impacts on the mining population and their environment. *J. Geol. Min. Res.* 9 (1): 1–8. [http:// dx.doi.org/10.5897/JGMR16.0263](http://dx.doi.org/10.5897/JGMR16.0263)
- Kouassy Kalédjé, P.S., Ndam Ngoupayou, J.R., Fouépé Takounjou, A., Zebsa, M., Rakotondrabe, F., Mvondo Ondoa, 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. *The Scientific World Journal*. Vol. 2019, Article ID 3814962. <https://doi.org/10.1155/2019/3814962>
- Kouassy Kalédjé, P.S., Ndam Ngoupayou, J.R., Kpoumié, A., Fouépé Takounjou, A., Mvondo Ondoa, J., 2016.** Analysis of climate variability and its influence on the hydrological response of the catchment area of Kadey (East Cameroon), *International Journal of Geosciences*, 7, 539-547. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2016.74041>
- Kpegli, K.A.R, Alassane, A., Trabelsi, R., Zouari, K., Boukari, M, Mama, D., Dovonon, F.L., Yoxi, Y.V., Toro-Espiti, L.E., 2015.** Geochemical processes in Kandi Basin, Benin, West Africa: A combined hydrochemistry and stable isotopes approach. *Quaternary International*, 369, 99-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2014.12.070>

- Kpoumié, A., 2015.** Hydroclimatologie et transports solides dans un écosystème tropical anthropisé d'Afrique centrale dans un contexte déficitaire : cas du bassin versant de la Sanaga au Cameroun. Thèse de Doctorat/Ph.D Université de Yaoundé I-Cameroun, 245p.
- Kringel, R., Rechenburg, A., Kuitcha, D., Fouépé, A., Bellenberg, S., Kengne, I.M., Fomob, M.A., 2016.** Mass balance of nitrogen and potassium in urban groundwater in Central Africa, Yaounde/Cameroon. *Sci. Total Environ.* 547:382–395. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.090>
- Kwékam, M., Liégeois, J-P., Njonfang, E., Affaton, P., Hartmann, G., Tchoua, F., 2010.** Nature, origin and significance of the Fomopéa Pan-African high-K calc-alkaline plutonic complex in the Central African fold belt (Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*.57, 1-2, 7995. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.07.012>
- Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2015.** The conceptual model of hard rock aquifers and its practical Applications. Vingtèmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues (La Roche-sur-Yon. 11 pp.).
- Leo Nollet, M.L., 2007.** Hand book of water analysis. 2nd edition, Taylor & Francis Group, London New York, 786p.
- Leopold, E.N., Sabine, D.D., Philemon, Z.Z., Jung, M.C., 2016.** Physical and Metals Impact of Traditional Gold Mining on Soils in Kombo-Laka Area (Meiganga, Cameroon). *Inter. Jour. Geosc.*, 7, 1102-1121. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2016.79084>
- Letouzey, R., 1968.** Etude phytogéographique du Cameroun. Paris, 511 p.
- Li, J., Li, F., Liu, Q., Zhang, Y., 2014.** Trace metal in surface water and groundwater and its transfer in a Yellow River alluvial fan: Evidence from isotopes and hydrochemistry. *Sci. Tot. Environ.*, 472, 979-988. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.120>
- Lienou G., Mahe G., Olivry J. C., Naah E., Servat E., Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Ndam Ngoupayou J. R., Ekodeck G. E., Paturel J. E., 2005.** Régimes des flux des matières solides en suspension au Cameroun: revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrol. Sc. Journal*, 50 (1), pp 111-123.
- Liéno, G., 2007.** Impact anthropiques et climatiques sur l'évolution récente de quelques bassins versant représentatifs au Cameroun : climatologie, hydrologie, érosion, transport des matières. Thèse de doctorat Ph.D, Université de Yaoundé I.405p.

- Majestic, B.J., Schauer, J.J., Shafer, M., 2007.** Development of a manganese speciation method for atmospheric aerosols in biologically and environmentally relevant fluids. *Aerosol Science and Technology*, 41, 925-933.
- Maneux, E., 1998.** Erosion mécanique des sols et transports fluviaux de matières en suspension : application des systèmes d'information géographique dans les bassins versant de l'Adour, de la Dordogne et de la Garonne. Ph.D Dissertation, Université de Bordeaux I, France.
- Meybeck M., Ragu A., 1996.** River Discharges to the Oceans. An assessment of suspended solids, major ions, and nutrients. Environment Information and Assessment Rpt. UNEP, Nairobi, 250 p.
- Mfochive, O. F., 2011.** Variabilité et changement climatiques : Impacts sur les ressources en eau et stratégies d'adaptations dans le massif forestier du Sud-Cameroun (bassin du So'o) Mém. Master. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 83 p.
- Mfonka, Z., Ndam Ngoupayou, J.R., Ndjigui P.D., Zammouri, M., Kpoumie, A., Rasolomanana, E., 2015.** Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). International. *Journal of Biological and Chemical Sciences*. 9, 2200-2218. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.39>
- Mimba, M.E., Ohba, T., Nguemhe Fils, S.C., Wirmvem, M.J., Bate Tibang, E.E., Nforba, M.T., Aka, F.T., 2017.** Regional hydrogeochemical mapping for environmental studies in the mineralized Lom Basin, East Cameroon: a pre-industrial mining survey. *Hydrology* 5(2):15–31. <https://doi.org/10.11648/j.hyd.20170502.11>
- MINATD, 2017.** Communal Development Plan of Batouri. Technical Report (105 pp.).
- MINEE/GWP-Cmr, 2009a.** Etat des Lieux du Secteur de L'eau au Cameroun: Connaissances et Usages de Ressources en Eau (Tome 1). Rapport technique, Yaoundé, 235p.
- MINEPAT, 2013.** Rapport sur le développement économique du Cameroun : Région de l'Est.
- MINEPAT/SRADDT-Est, 2017.** Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire de l'Est (SRADDT-Est). Rapport diagnostic (Volume 1) Rapport littéral. 396p.
- MINEPED/MINFOF, 2016.** Le domaine de l'Etat. Compte Rendu des états généraux sur les forêts et les produits forestiers du Cameroun. MINEPED-MINFOF, 2016. Yaoundé – Cameroun. 178p.
- MINMIDT, 2017.** Exploitation artisanale de l'or dans la région de l'Est du Cameroun. Rapport Technique de la commission de suivi et d'évaluation de la mise en application des procédures en la matière. Yaoundé – Cameroun, 59 p.

- Mumbfu, E.M., Mengnjo, J.W., Takeshi, O., Nozomi, N., Nguemhe Fils, S.C., Tongwa Aka, F., 2017.** Seasonal Hydrological Inputs of Major Ions and Trace Metal Composition in Streams Draining the Mineralized Lom Basin, East Cameroon: Basis for Environmental Studies. *Earth Syst Environ* (2017) 1:22. [doi 10.1007/s41748-017-0026-6](https://doi.org/10.1007/s41748-017-0026-6)
- Musy, A., 2004 :** Cours d'hydrologie générale. Section SIE et GC. 4e semestre. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM) ; Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement. (ISTE) ; Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL).
- Mvondo Ondo, J., Mvondo, H., Bas den Brok., 2009.** Pan-African tectonics in northwestern Cameroon: Implication for the history of western Gondwana. *Gondwana Research*, 16, 163-164.
- Mvondo, H., J den Brok, S.W., Mvondo, Ondo, J., 2003.** Evidence for symmetric extension and exhumation of the Yaounde nappe (Pan-African fold belt, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 36, 215-23. [doi:10.1016/S0899-5362\(03\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00017-4).
- Naah, E., 1990 :** Hydrologie du Grand Yaéré du Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Yaoundé, 326p.
- Ndam Ngoupayou J. R. 1997.** Bilans hydrogéochimiques sous forêt tropicale humide en Afrique du bassin expérimental de Nsimi-Zoetélé aux réseaux hydrologiques du Nyong et de la Sanaga (Sud-Cameroun). Thèse Univ. Paris VI, 214 p., 2 annexes.
- Ndam Ngoupayou, J.R., Dzana, J.G., Kpoumie, A., Tanwi Ghogomu, R., Fouepe Takounjou, A., Braun, J.J., Ekodeck., G.E., 2016.** Present-day sediment dynamics of the Sanaga catchment (Cameroon): from the total suspended sediment (TSS) to erosion balance. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 6, 1080-1093. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.968572>
- Ndong, B.F., Ntomba, M.S. et Mvondo Ondo, J., 2012 :** Déformation et métamorphisme dans la partie centrale de la chaîne de Ngovayang (Sud-Cameroun). *Afrique SCIENCE* 08(3), 42, ISSN 1813-548X, pp 50-42, <http://www.afriquescience.info>
- Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J, M., Njanko, Th., 2003.** Pan-African tectonic evolution In central and southern Cameroon: transpression and transtension during sinistral shear movements. *Journal of African Earth Sciences*. 36: 207–214. [doi:10.1016/S0899-5362\(03\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00023-X)
- Ngon Ngon G. F., Yongué F. R., Bitom D. L., Bilong P., 2009.** A geological study of clayey laterite and hydromorphic material of the region of Yaoundé (Cameroun): a prerequisite for local material promotion. *J. Afr. Earth Sci.* 55, 69-78.

- Ngounou Ngatcha, B. ; Murdy, J. ; Sigha Nkamdjou, L. ; Njitchoua, R. ; Naah, E., 2005:** Climate variability and impacts on an alluvial aquifer in semiarid climate, the Logone-Chari plain (South of Lake Chad). Proceedings of symposium S6 held during the seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguacu. Brazil, IAHS Publ. 295, 2005, pp 94-100.
- Nguenang G-M., Djeukam R. Eboule S., Eyene, E., 2003,** État des lieux de la foresterie communautaire au Cameroun. Ministère des Eaux et Forêts, 114 p.
- Njanko, T., Nédélec, A., Kwékam, M., Siqueira, R., Esteban, L., 2010.** Emplacement and deformation of the Fomopéa pluton: Implication for the Pan-African history of Western Cameroon. *Journal of Structural Geology*, 32, 3, 306-320.
- Nkoubou, C., Barbey, P., Yonta-Ngouné, C., Paquetted, J.L., Villiéras, F., 2014.** Precollisional geodynamic context of the southern margin of the Pan-African fold belt in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 99, Part 2, 245-260.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.10.002>
- Ntep Gwet, P., Adeline, T., 2005.** Rapport d'Etude environnementale du barrage de Lom Pangar thème 11 : mines. 120p.
- Ntep Gweth, P., 2001.** Ressources minérales du Cameroun, 375p.
- Ntep, F., 2005.** Hydrodynamique et qualité des eaux des nappes en zone de socle cristallin fissuré et altéré : Cas du bassin versant de la Mingo (Yaoundé – Cameroun). Mém. DEA. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 84 p.
- Nzenti, J.P., 1998.** Neoproterozoic alkaline meta-igneous rocks from the Pan-African North Equatorial Fold Belt (Yaounde, Cameroon): biotitites and magnetite rich pyroxenites. *Journal of African Earth Sciences*, 26, 37-47.
- Nzenti, J.P., Tchoua, F.M., 1996.** Les gneiss scapolitiques de la chaîne Nord équatoriale au Cameroun : témoins au précambrien de la sédimentation évaporitique en bordure Nord du craton du Congo. *Compte Rendu Acad. Sci.* pp 289 – 294.
- Olivry J.C. et Naah E., 1978.** Qualité des eaux de quelques rivières du Cameroun méridional. Rapp. ONAREST, Yaoundé, 39p.
- Olivry, J.C., 1977.** Transports solides en suspension au Cameroun. In: Erosion and solid matter transport in land water, Paris. IAHS Publ.122. 134-141.
- Olivry, J.C., 1986.** Fleuves et rivières du Cameroun. Monographie hydrologique. ORSTOM, N° 9. Ed. MESRES-ORSTOM.733p.
- Olivry, J.C. ; Naah, E., 1978 :** Qualité des eaux de quelques rivières du Cameroun méridional. IRTISS/ONAREST, Yaoundé, 53 p.

- Omang, B.O., Bih, C.V., Fon, N.N., Suh, C.E., 2014.** Regional geochemical stream sediment survey for gold exploration in the upper Lom basin, Eastern Cameroon. *Int Journ Geosci* 5:1012–1026
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS), 2011.** Guidelines for Drinking-water Quality Recommendations; Fourth Edition; 518p.
- Owona, S., Schulz, B., Ratschbacher, L., Mvondo Ondo, J., Ekodeck, G.E., Tchoua, M.F., Affaton, P., 2011.** Pan-African metamorphic evolution in the southern Yaounde Group (Oubanguide Complex, Cameroon) as revealed by EMP-monazite dating and thermobarometry of garnet metapelites. *Journal of African Earth Sciences*, 59, 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.09.003>
- Owona, S., Mvondo Ondo, J., Ratschbacher, L., Ekodeck, G.E., 2013b.** Evidence of quartz dynamic recrystallizations in SW Cameroon: Implications on late-archean, -eburnean and -panafrican deformations over 250-750°C. *Sciences Technologies et Développement* 15 :48-58
- Pahimi, H., Panda, C.R., Ngassoum, M.B., Tchameni, R., 2015.** Environmental Impacts of Mining in the Volcano-Sedimentary Basins of Cameroon: Case Study of Artisanal Gold Mine Tailings (Betare Oya, East-Cameroon). *International Journal of Energy, Sustainability and Environmental Engineering*. 2, 5-15.
- Pettit, A.N., 1979.** A non –parametric approach to the change point problem. *Applied statistics*, 28, N°2, pp126-230.
- Prasad, B and Sangita, K., 2008.** Heavy Metal Pollution Index of Ground Water of an Abandoned Open Cast Mine Filled with Fly Ash: a Case Study. *Mine Water and the Environment*, 27, 265. [doi: 10.1007/s10230-008-0050-8](https://doi.org/10.1007/s10230-008-0050-8)
- Rakotondrabe, F., 2019.** Gestion des ressources en eau liées aux activités minières artisanales en Afrique : cas de Bétare Oya (Est du Cameroun) et de Vohibory (Sud-Ouest de Madagascar). Thèse de Doctorat Ph.D, Universités de Yaoundé I et Antananarivo, 253 p.
- Rakotondrabe, F., Ndam Ngoupayou, J.R., Mfonka, Z., Harilala Rasolomanana, E., Nyangono Abolo, A.J., Banakeng, L.A., Ako Ako, A., Rakotondrabe, M.H., 2017.** Assessment of Surface Water Quality of Bétaré-Oya Gold Mining Area (East-Cameroon). *Journal of Water Resource and Protection*, 2017, 9, 960-984 <http://www.scirp.org/journal/jwarp>
- Rakotondrabe, F., Ndam Ngoupayou, J.R., Mfonka, Z., Rasolomanana, E.H., Nyangono Abolo, A.J., Ako Ako, A., 2018.** Water quality assessment in the Bétaré-Oya gold

- mining area (East-Cameroon): Multivariate Statistical Analysis approach. *Sci. Tot. Environ.*, 610-611, 831-844. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.080>
- Ravengai, S., Love, D., Mabvira-Meck, M., Musiwa, K., Moyce S., 2005.** Water quality in an abandoned gold mining belt, Beatrice, Sanyati Valley, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*.826–831. [doi:10.1016/j.pce.2005.08.026](https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.08.026)
- Remenieras, G., 1960.** L'Hydrologie de l'Ingénieur. Eyrolles, Paris 413 pages.
- Reza, R. and Singh, G., 2010.** Heavy metal contamination and its indexing approach for river water. *International Journal of Environmental Sciences Technology*, 7(4), 785-792. [doi:10.1007/BF03326187](https://doi.org/10.1007/BF03326187)
- Roche, M., 1963 :** Hydrologie de surface. ORSTOM, Paris, 430p.
- Rodier, J., 2009.** L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 9ème édition, Dunod, Paris, 1383 p.
- Rodier, J., 2009.** L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 9ème édition, Dunod, Paris, 1383 p.
- Salomons, W., 1995.** Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention. *J Geochem Explor* 52:5–23.
- Savané, I. Kapo, C. et Gion, P., 2001.** Variabilité climatiques et ressources en eau souterraine dans la région semi montagneuse de Man. *Sécheresse* 12, 232-237.
- Schoeller, 1962.** Les eaux souterraines. Ed. Masson et Cie. Paris. *Sci. Geol. Bull.*, 39, 3-77.
- Segalen, P., 1967.** Les sols et la géomorphologie du Cameroun, cahier ORSTOM séries pédologique. 2 :137-187.
- Servat, E. and Sakho, 1999.** Instability of water resources and management of a planned water system in non-sahelian West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 40, pp 217-230.
- Servat, E., Paturel, J.E., Kouamé, B., Lubes-Niel, H., 1998.** Des différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 12, №2, pp 363-370.
- Servat, E., Paturel, J-E., Kouame, B., Traveglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J-F., Lubes-Niel, H., Fritsch, J-M., Masson, J.M., Marieu, B., 1998.** Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale. In Servat E., Hugues D., Fritsch J. M, Hulme M. (eds). *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century, IAHS Publication 252*; 323-337.
- Servat, E., Sakho, M., 1999.** Instability of water resources and management of a planned water system in non sahelian west Africa. *Hydrological sciences journal*, 40, pp 217-230.

- Sigha-Nkamdjou, L., 1994.** Fonctionnement hydrochimique d'un écosystème forestier de l'Afrique centrale: la Ngoko à Mouloundou (Sud-Est du Cameroun). Edit. ORSTOM, TDM, 111, 378p.
- Sigha-Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Bedimo Bedimo, J.P., 1998.** Variabilité des régimes hydrologiques des cours d'eau de la bande méridionale du plateau sud-Camerounais. Publication *AISH*. N°252-222.
- Sigha-Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Liéno, G., Ndam Ngoupayou, J. R., Bello, M., Kamgang, G.R., Ekodeck, G. E., Ouafu Mendo, M. R., Patural, J. E., and Servat, E., 2005.** Impacts des modifications climatiques et anthropiques sur les flux de matières de quelques bassins fluviaux du Cameroun. In: A. J. Horowitz and D. E. Walling, eds. *Sediment Budgets 2*. IAHS Publication 292, Wallingford: *IAHS Press*, 291–298.
- Sighomnou, D., 2004.** Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I. 291p.
- Singh, G et Rakesh, K.K., 2016.** Heavy metal contamination and its indexing approach for groundwater of Goa mining region, India. *Applied Water Sciences*. [doi:10.1007/s13201-0160430-3](https://doi.org/10.1007/s13201-0160430-3)
- Soba, D., 1989.** La série de Lom : étude géologique et géochronologique d'un bassin volcanosédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est de Cameroun. Thèse de doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.198 p.
- Soro, T.D., Soro, N., Oga-Yéi, M.S., Soro, G., Ahoussi-Kouassi, E., Biémi, J., 2011 :** La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire), *Physio-Géo*, Volume 5, mis en ligne le 22 février 2011, consulté le 19 septembre 2013. URL : <http://physiogeo.revues.org/1581>
- Stigter, T.Y., Carvalho Dill, A.M.M., Ribeiro, L., Reis, E, 2006.** Impact of the shift from groundwater to surface water irrigation on aquifer dynamics and hydrochemistry in a semi-arid region in the south of Portugal. *Agric. Water Manage*, 85, 121-132
- Stricker, A-E et Héduit, A., 2010.** Phosphore des eaux usées Etat des lieux et perspectives. Rapport Scientifiques. 54p.
- Suchel, J.B., 1987.** Les climats du Cameroun. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Bordeaux III. France, 1186 p.
- Suchel, J.B., 1988.** Les climats du Cameroun. Thèse Univ. Saint Etienne 1188 p.

- Tabari, H., Meron, T.T., Willems, P., 2015.** Statistical assessment of precipitation trends in the upper Blue Nile River basin. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1046-0>
- Taiwo, A.M et Awomeso, J. A., 2017.** Assessment of trace metal concentration and health risk of artisanal gold mining activities in Ijeshaland, Osun State Nigeria. Part 1. *Journal of Geochemic an Exploration* 177, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.01.009>
- Tchakounté, J., Eglinger, A., Toteu, S.F., Zeh, A., Nkoumboua, C., Mvondo-Ondoa, J., Penaye, J., Martin de Wit., Barbey, P., 2017.** The Adamawa-Yadé domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic Central African Orogenic belt (Bafia area, Cameroon). *Precambrian Research*, 299, 210-229. <doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.001>
- Tchouankoue, J.P., Xian-Hua Li, Ngo Belnoun, R.N., Mouafo, L., Ferreira, V. P., 2016.** Timing and tectonic implications of the Pan-African Bangangte syenomonzonite, West Cameroon: Constraints from in-situ zircon U-Pb age and Hf-O isotopes. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.009>
- Tehna, N., Nguene, F.D., Etame, J., Medza Ekodo, J.M., Noa Tang, S., Suh, Emmanuel. C., Bilong, P. 2015.** Impending Pollution of Betare Oya Opencast Mining Environment (Eastern Cameroon). *Journal of Environmental Science and Engineering B*. 4 : 37-46. <doi:10.17265/2162-5263/2015.01.006>
- Thorntwaite, C.W., 1954.** The measurement of potential evapotranspiration. John P. Mather Seebrook, New Jersey, 225 p.
- Toteu, S.F, Penaye, J., Deloule, E., Randall, W., Schmus, V., Tchmeni, R., 2006.** Diachronous evolution of volcano-sedimentary basins north of the Congo craton: Insights from U–Pb ion microprobe dating of zircons from the Poli, Lom and Yaounde´ Groups (Cameroon). *J. Earth Sci.* 44: 428-442. <doi:10.1016/j.jafrearsci.2005.11.011>
- Toteu, S.F., Van Schumus, W.R., Penaye, J., Michard, A., 2001.** New U–Pb and Sm–Nd data from north-central Cameroon and the pre-Pan African history of central Africa. *Precambrian Research* 108, 45-73.
- Vicat, J.P., 1998.** Esquisse géologique du Cameroun. 6p.
- Vicat, J.P., Pouclet, A., Nkoumou, C., Seme Mouangue, A., 1997.** Le volcanisme fissural néoproterozoïque des séries du Dja inférieur, de Yakadouma (Cameroun) et de Nola (Centrafrique) signification géotechnique. *C.R Acad. Sci. Paris*, 325, p.671- 677.
- Viers, J., Dupre, B., Braun, J.J., Deberdt, S., Angeletti, B., Ndam Ngoupayou, J.R., Michard, A., 2000.** Major and trace element abundances, and strontium isotopes in the

- Nyong basin rivers Cameroon constraints on chemical weathering processes and elements transport mechanisms in humid tropical environments. *Chemical Geology*, 169, 211-241.
- Vishiti, A., Etame, J., Suh, C.E., 2019.** Features of gold-bearing quartz veins in an artisanal mining-dominated terrain, Batouri gold district, Eastern region of Cameroon. *IUGS*, <https://doi.org/10.18814/epiugs/2019/019016>
- Vishiti, A., Suh, C. E., Lehmann, B., Shemang, E. M., Ngome Njumbe L.J., Nshanji, N.J., Chinjo, F. E., Mongwe, O.Y., Egbe, A. J., Petersen, Sven., 2017.** Mineral chemistry, bulk rock geochemistry, and S-isotope signature of lode-gold mineralization in the Bétaré Oya gold district, south-east Cameroon. *Geological Journal*, 1–18.
- Vishiti, A., Suh, Cheo.E., Lehmann, B., Egbe, J.A., Shemang, E.M., 2015.** Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. *J. Earth Sci.* 111: 1-13. [doi: 10.1016/j.jafrearsci.2015.07.010](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.010)
- Wasseige, C., De Marcken, P., Bayol, N., Hiol Hiol, F., Mayaux, P., Desclée, B., Nasi, R., Billand, A., Defourny, P., Eba'a Atyi, R., 2012.** Les forêts du bassin du Congo – Etats des forêts 2010. Luxembourg : Office des publications de l'Union Européenne.
- Woocay, A., et Walton, J., 2008.** Multivariate analyses of water chemistry: Surface and ground water interactions. *Ground Water*, 3,437-449. [doi:10.1111/j.1745-6584.2007.00404.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00404.x)
- Yidana, SM., 2010.** Groundwater classification using multivariate statistical methods: Southern Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 57, 455-469. [doi:10.1016/j.jafrearsci.2009.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.12.002)
- Yihdego, Y., Webb, J.A., 2011:** Modeling of bore hydrograph to determine the impact of climate and land use change in western Victoria, Australia. *Hydrogeological Journal*, 2011, 19, 877–887.
- Younger, P.L., 2001.** Mine water pollution in Scotland: nature, extent and preventative strategies. *The Science of the Total Environment*, 265, 309-326.
- Zebza, M., Ebogo, S.O., Wassansa, M.E., Kouassy Kalédjé, P.S., Amougou, J.A., 2014.** Données nouvelles sur Exploitations minières dans la Région de l'Est Cameroun : facteurs de Changements Climatiques et risques d'Insécurité Alimentaire (Cas spécifique de l'exploitation de l'or à Batouri). *Annales de Géographie*, Fac des Arts, Lettres et Sc. Humaines, Univ de Ydé I vol 3 n° 7, pp 10-17.
- Zhao Yong, Z., Abuduwaili, J., Fengqing, J., 2015.** Heavy metal contamination, sources, and pollution assessment of surface water in the Tianshan Mountains of China. *Environ Monit Assess*, 187, 33. [doi: 10.1007/s10661-014-4191-x](https://doi.org/10.1007/s10661-014-4191-x)

ANNEXES

Annexes I : Publications Scientifiques issues de la Thèse

I.1. Kouassy Kalédjé, PS., Ndam Ngoupayou, JR., Rakotondrabe, F., and Mvondo Ondo, J. (2020) Quantitative assessment of water resources by the method of the hydrological balance in the Kadey catchment area (East-Cameroon). *Groundwater for Sustainable Development* 10 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100278>

I.2. Kouassy Kalédjé, PS., Ndam Ngoupayou, J.R., Fouépé Takounjou, A., Zehsa, M., Rakotondrabe, F., and 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. *The Scientific World Journal* Vol. 2019, Article ID 3814962, 7 pages <https://doi.org/10.1155/2019/3814962>

I.3. Kouassy, Kalédjé P.S., Ndam, Ngoupayou J.R., Kpoumie, A., Fouépé, Takounjou A. and Mvondo, O.J. (2016) Analysis of Climate Variability and Its Influence on the Hydrological Response of the Catchment Area of Kadey (East Cameroon). *International Journal of Geosciences*, 7, 539-547. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2016.74041>

I.4. Kouassy Kalédjé PS, Ndam Ngoupayou J.R, Djomou Djomga P.N, Mvondo Ondo J. (2016) The Catchment Area of Kadey in East-Cameroon: Assessment of Arsenic Contamination in Deep Groundwater Resources. *Journal of Geology and Geophysic*, 5: 250. <http://doi:10.4172/23818719.1000250>



Quantitative assessment of water resources by the method of the hydrological balance in the Kadey catchment area (East-Cameroon)



Kalédjé P.S. Kouassy^{a,b,*}, J.-R. Ndam Ngoupayou^a, F. Rakotondrabe^{a,c}, J. Mvondo Ondoa^a

^a Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaoundé I, Cameroon

^b Department of Geology, Faculty of Science, Payame Noor University (PNU), Teheran, Iran

^c Department of Mines, Advanced School of Engineering of Antananarivo, University of Antananarivo, Madagascar

ARTICLE INFO

Keywords:

Hydrodynamics
Aquifer recharge
Productivity
Transmissivity
Exploitation flow

ABSTRACT

The hydrodynamic study was carried out using an approach that takes into account the hydrological balance, the relationships between the hydrodynamic parameters (Q, Pt, Ns, EA, Qs and T) and the influence of these parameters on the drilling productivity. The Kadey department receives on average 1428,93 mm of rain per year and the amount of water likely to infiltrate to recharge the aquifers is 107,4 mm or 7,51% of rainfall. The study of the physical and hydrodynamic parameters shows that the depths of the studied drillings vary from 45 to 90 m with an average of 69 m; the thickness of the alterites is between 2,7 and 31 m with an average of 11.9 m. The hydraulically active depths are between 60 and 80 m. The transmissivity values obtained by the method of Cooper-Jacob in descent are between $2,58.10^{-3}$ and $4,78.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ with an average of $1,35.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Drilling flows range between 0,2 and $10 \text{ m}^3/\text{h}$ with an average of $2,45 \text{ m}^3/\text{h}$ which gives us specific flow rates between $5,4.10^{-6}$ to $5,63.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ for an average of $5,19.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Transmissivities, specific flows and exploitation rates have coefficients of variation greater than 100%, thus reflecting the structural heterogeneity of the aquifer.

1. Introduction

Water is a vital part of life and is important for countless human activities. It has been at the heart of all issues for decades with an annual investment of more than \$ 600 billion (WHO, 2011). This water is divided into three categories: saltwater (97% of the world's reserves), fresh water (0,3%) and fresh water not directly useable (2,4%), mobilizing a total volume of about $1,34.10^{18} \text{ m}^3$ (Ntep Gwet and Adeline, 2005; UNDP/WB, 2017). As stated above, there is enough water. But in terms of availability, resources are scarce as 99,7% of the waters are not accessible. Freshwater, a directly accessible material, presents a sad picture, since, in the general opinion, its scarcity seems inevitable. However, a country that lacks water is a country that can neither feed its population nor develop. Moreover, per capita water consumption is now considered an indicator of a country's economic development (WHO, 2011; UNDP/WB, 2017; Mfonka et al., 2018).

The Cameroonian authorities, aware of these problems, have multiplied the projects of establishment of water points for the supply of drinking water to rural populations as well as large cities with the support of development partners (Non-Governmental Organizations; Civil Society). South Cameroon's groundwater resources are largely

contained in the reservoirs formed by the fractured basement due to its wide geographical distribution, i.e. 97,5% of the South Cameroon Plateau (Ewodo Mboudou, 2011). These localized resources in fractured or fissured aquifers, which are relatively well protected due to the high surface coverage, are therefore bacteriologically and parasitologically sound.

In the present study, where we started with an analysis of the different terms of a hydrological report, it is a question of showing the importance of each one in the process of recharging superficial and deep aquifers (Djeuda Tchapinga et al., 2000; Kouassy Kalédjé et al., 2016; Mfonka et al., 2018). In short, it is a matter of performing, using a decomposition of the different formulas of Coutagne, a mathematical prediction (mathematical simulation) of the quantity of water that can be stored if the inflections and precipitations are known.

Groundwater resources are the main sources of drinking water supply in rural areas, as is the case in Kadey. These resources deserve to be known in order to promote an optimization of the water supply and a sustainable management of this resource. The search for groundwater in the middle of the basement is essentially based on the identification of the fractures that are witnesses of the tectonic deformations. Thus, drilling that does not cross any fracture cannot produce water. This is

* Corresponding author. Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaoundé I, Cameroon.

E-mail address: pskaledje@gmail.com (P.S.K. Kalédjé).

why failures are generally numerous during drilling campaigns when the implantation is not carried out under optimal conditions (Kouadio et al., 2008; Tabue Youmbi, 2013; Fantong et al., 2016). In the East Cameroon region, an inventory of the various works carried out by the UNESCO (1987) has made it possible to count 1.176 water points (boreholes and modern wells). But the report is bitter, because on these 1176 works, 766 are abandoned for various reasons (mechanical failure, drying up, water quality, etc.) and 128 were declared negative because not having reached a minimum flow of 1 m³/h to be declared positive, making a total of 538 abandoned works, or 45.75%. This high failure rate (54.25%) attracts not only the attention of the authorities but also that of the scientific community. This study is therefore a contribution to the evaluation of the water potential of aquifers and to propose a set of recommendations for sustainable management of this natural resource.

2. Materials and methods

2.1. Materials

2.1.1. Geographic location

The department of Kadey is located in the region of East Cameroon between 4° 12' and 4° 36' north latitude and 14° 29' and 14° 45' east longitude (Fig. 1). It covers a total area of 2571 km² and is bordered on the north by the Lom and Djérem department, on the east by the Central African Republic, on the south by the Boomba and Ngoko departments and on the west by the Haut-Nyong department (Sigha Nkamdjou, 1994;

Mvondo Ondo, 2009; Vishiti et al., 2015; Kouassy Kalédjé et al., 2016; Tchakounté et al., 2017).

The Kadey department belongs to the Béaré-Oya Gold District in which the mining activities (artisanal and semi-mechanized mining of gold, quarrying by mechanical sinking and even by mining, etc.) are very intense and lead to bedrock cracking permanently (Mvondo Ondo, 2009; Vishiti et al., 2015; Kouassy Kalédjé et al., 2016).

The climate is a transitional Equatorial Guinean type with four seasons: two (02) rainy seasons and two (02) dry seasons as shown in Fig. 2 (Bangouls and Gausson, 1969; Kouassy Kalédjé et al., 2016).

2.1.2. Hydrogeological context and data acquisition

Generally, in the basement zone, two types of aquifers can be distinguished: the aquifer of alterites (superficial) and the fractured aquifers (deeper) (Cooper-Jacob, 1950; Koita, 2010; Soro et al., 2010; Ewodo et al., 2013; Femba, 2005). According to Edet and Worden (2009); Eiriksson et al. (2013); Kouassy et al. (2016), the exploitation of aquifer alterites in sub-Saharan Africa began in the years 1950–1960. The exploitation of these aquifers was mainly related to the lack of suitable means for drilling, but also to the lack of knowledge or under-estimation of the hydraulic role of fracking in the healthy basement. These aquifers, which develop in sandy-clay formations, are capable of accumulating large amounts of water, but their low permeability makes extraction difficult. Djeuda Tchapinga (1987) characterizes alterite aquifers as aquifers with high total interstice porosity, low effective porosity and very low permeability.

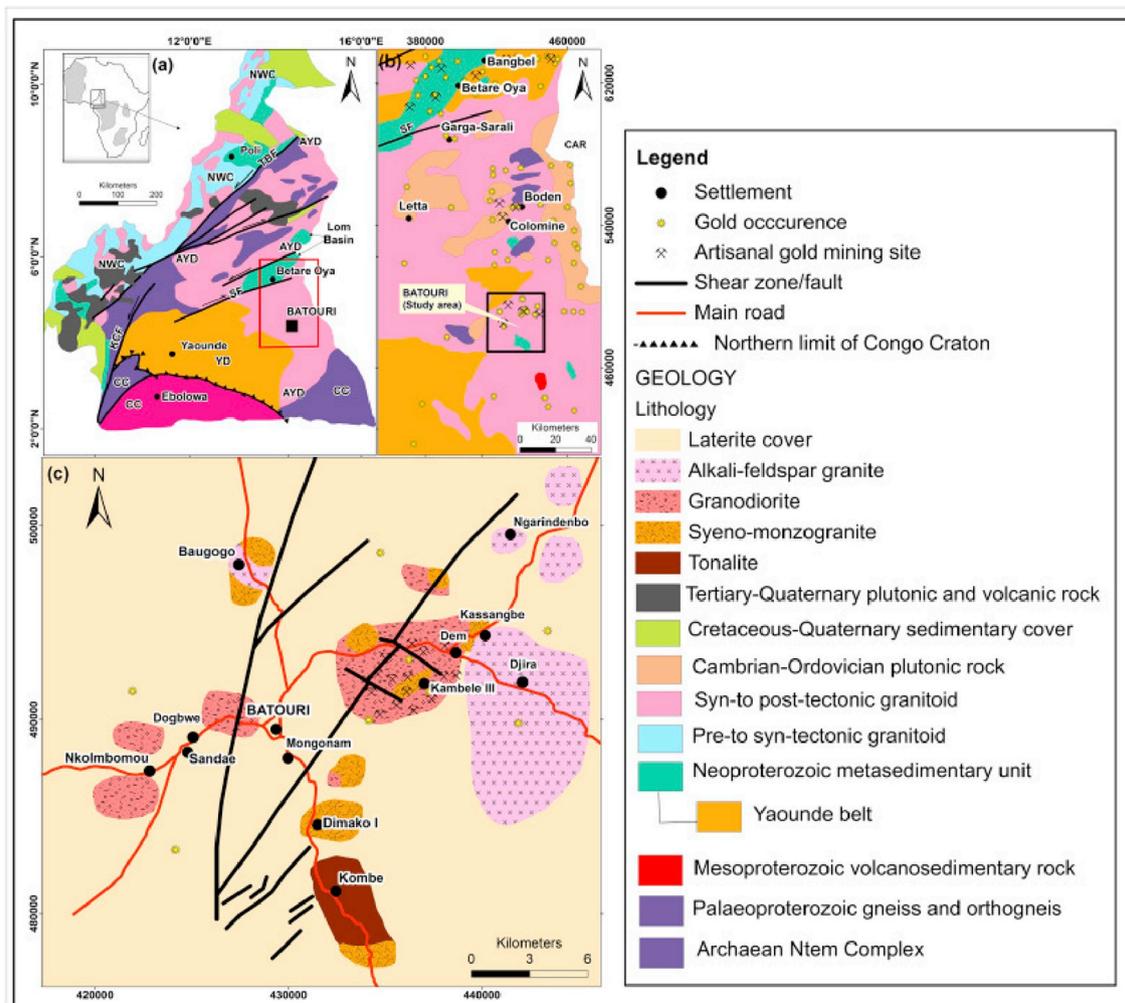


Fig. 1. Location of the Kadey department and the city of Batouri (according to Vishiti et al., 2015).

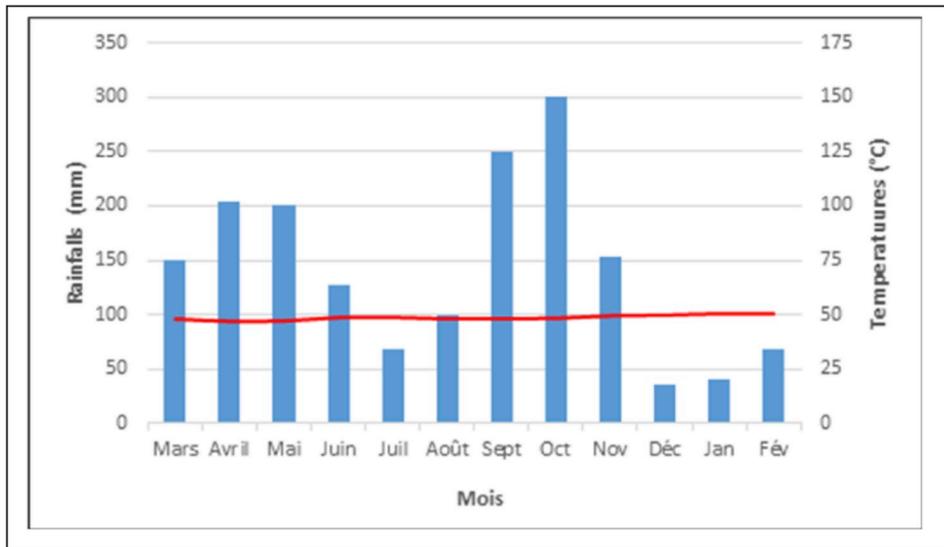


Fig. 2. Ombrothermal diagram of Kadey in Batouri, 1964–2002 (according Bangouls and Gaussen, 1969).

In the granito-gneissic domain, as is the case in the department of Kadey, alterites are unequally rich in aquifer levels and these are generally not very productive. According to Femba (2005); Eiriksson et al. (2013), only a few shallow levels above healthy rock are of interest, especially when they are in the aquifer beating zone (level change piezometrical zone). Unlike alterites, the basement has practically zero matrix porosity except in the superficial zone corresponding to the lower limit of the grained arenas; the permeability is good especially in areas with a high fracturing density (Copper-Jacob, 1947; Soro et al., 2010; Eiriksson et al., 2013).

The hydrogeological data used for this study mainly concern the technical data of the drilling carried out in the department of Kadey from 1990 to 2015. We have retained for this study 56 drill datasheets for the relevance of the data which they abound notably pumping tests. . The drilling datasheets used were provided by the Regional Center for Scientific Research and Innovation (CRRI) of the East.

2.2. Methods

2.2.1. Determination of groundwater recharge

The assessment of groundwater recharge is one of the most relevant parameters in hydrogeology but also the most difficult to estimate. Various approaches have been considered and tested. These are direct, geochemical, physical and climatic methods.

In this study, we will primarily use the climate method or water balance method because of its ease of use and available data (Tabue Youmbi, 2013; Fontang et al., 2016; Kouassy Kalédjé et al., 2016). It is based on the principle that precipitation (P) falling in a given region is divided between evapotranspiration (ETR), groundwater recharge (I) and surface flow (R) so that the equation hydrological balance is expressed by the relationship:

$$P = ETR + R + I \tag{1}$$

However, since the rain is a known datum, ETR remains determined by the Coutagne method (the Turc and Thornthwaite methods do not make it possible to establish the hydrological balance in this type of region as Djeuda Tchapgna et al. (1999) and R (runoff) by the Tixeront-Berkaloff method.

2.2.2. Estimation of potential evapotranspiration and actual evapotranspiration

In 1948, Thornthwaite proposed an expression for estimating FTE considering only the monthly temperature (Djeuda Tchapgna et al.,

2000; Kouamé et al., 2011; Lachassange et al., 2015; Kouassy et al., 2016; Fantong, 2016). The development of this expression gives the following formula:

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha \times F(\lambda) \tag{2}$$

Avec : $\alpha = 0,49239 + 1,79 \cdot 10^{-2}I - 7,71 \cdot 10^{-5}I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7}I^3$; $I = \sum_{j=1}^{12} i$ où $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$.

T: average monthly temperature in ° C; I: annual thermal index; i: monthly thermal index; F: correction coefficient, function of latitude and given month.

About the ETR, it is the following formulation of Coutagne (Lasm, 2000; Kouamé et al., 2011; Kouassy et al., 2016) that has been retained:

$$ETR = P - \lambda P^2 \tag{3}$$

Here, $\lambda = 1/(0,8 + 0,145T)$; T: mean annual temperature in ° C; P: mean annual precipitation in m.

The application of this formula is conditioned by the following relation:

$$1/8^{\lambda} < P < 1/2^{\lambda}$$

When $P < 1/8^{\lambda}$, $ETR = P$;
If $P > 1/2^{\lambda}$, $ETR = 0,20 + 0,035T$.

2.2.3. Estimate of runoff

After studying a set of basins, Tixeront and Berkaloff established a relationship whose simplified form gives runoff (Kouassi et al., 2012; Onana et al., 2017; Jalloh et al., 2018).

$$R = \frac{P^2}{3ETP^2} \tag{4}$$

With R: runoff in mm; P: mean annual precipitation in mm; ETP: average annual potential evapotranspiration calculated by the Thornthwaite method in mm.

2.2.4. Estimation of infiltration

It is calculated by difference with the other parameters that is to say:

$$I = P - (ETR + R) \tag{5}$$

2.2.5. Hydrodynamic study of aquifers

The hydrodynamic study is essentially based on the interpretation of

the pumping tests from the different drilling datasheets. The interpretation of these essays is based on the transient hydrodynamic expressions of [Thies \(1935\)](#) and [Copper-Jacob \(1947\)](#). In general, these methods are applicable for long-term pumping, but from short-term tests, provided that a plateau is reached during each cycle, these parameters can be calculated ([Lasm, 2000](#); [Soro et al., 2010](#); [Ewodo Mbutou et al., 2012](#)).

2.2.5.1. Determination of transmissivity. The transmissivity can be evaluated with the descent data as well as the pumped water flow. In the first case, the value of the transmissivity is tainted by error due to the uncertainties in the measurements caused by the drilling pressure losses, which can reach 50% or more in some cases ([Lachassagne and Wyns, 2005](#); [Fantong et al., 2016](#)). In the second case, the value of the transmissivity obtained is much more reliable because the losses in the drilling are negligible. Transmissivity was evaluated using the method of [Cooper-Jacob \(1946\)](#), using the data of the ascent to eliminate the effects of quadratic losses in drilling and around the borehole as suggested [Lasm \(2000\)](#); ; [Femba \(2005\)](#) and [Lasm et al. \(2015\)](#). This formula is based on the formula of [Theis](#) which it is also an approximation. Simplified, it is written:

$$S = 0,183 \frac{Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r^2s} \quad (6)$$

If we report on paper semi-logarithmic the drawdown s as a function of the time t rise, we get a straight line as soon as the logarithmic approximation becomes possible. This line is extended to the abscissa axis and the intersection point has coordinates

$$\begin{pmatrix} s = 0 \\ t = t_0 \end{pmatrix}.$$

If we put these values in the previous equation, we deduce:

$$S = \frac{2,25Tt}{r^2}$$

If now $t/t_0 = 10$, from which $\log t/t_0 = 1$, we can replace s by s_1 , that is to say by the difference of drawdown per logarithmic cycle of time. Which give:

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s} \quad (7)$$

In theory, to be able to use this approximation, the following conditions must be met:

- the tablecloth tested is captive;
- the aquifer layer is homogeneous, isotropic and of the same thickness throughout the zone of influence of the pumping;
- the aquifer layer is of infinite lateral extension;
- the release of water by the porous level is made as a result of an instantaneous level decrease;
- the well is complete;
- the radius of the well is negligible;
- the pumping rate is constant and equivalent to the operating flow of the structure.

The test pumping carried out practically never verifies all of these conditions; this situation does not prevent the use of this method for the interpretation of the tests.

Here, according to the work of [Shanshan et al. \(2015\)](#), all the studied tablecloths are taken as captive (roof and impermeable wall), so we suppose that they check the hypotheses of [Jacob's](#) method. It was not possible for us to evaluate the storage coefficients of the aquifers because of the absence of a piezometer. Thus, to better assess the distribution of transmissivity, a classification of transmissivity has been established and is as follows ([Kouassy Kalédjé et al., 2016](#); [Onana et al., 2017](#)):

- weak class: $T < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;
- middle class: $10^{-5} < T < 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$;
- strong class: $T > 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

2.2.5.2. Determination of the specific flow. The specific flow is one of the hydraulic parameters whose measurement is easy on a structure; it is the ratio of the pumping rate to the drawdown observed in the well. The specific flow also gives indications on the characteristics of the boreholes and on the state of connection between the networks of fractures ([Leblond, 1984](#); [Soro et al., 2010](#); [Harterter et al., 2018](#)). Q_s was calculated at the end of the third level at all drill holes from the following formula:

$$Q_s = Q/s \quad (8)$$

With: Q_s : specific flow (m^3/h); Q : pumping rate (m^3/h); s : drawdown (m).

To better understand the distribution of specific flows in the aquifers of the department of Kadey, we proceeded to the classification of these flows and we obtained the following classes:

- weak class: $Q_s \leq 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$;
- middle class: $0.1 \text{ m}^3/\text{h} < Q_s < 1 \text{ m}^3/\text{h}$;
- strong class: $Q_s = 1$.

2.2.5.3. Study of the parameters influencing the drilling productivity. For this purpose, the first works focused on finding the most productive fractures. In a relatively recent period, other authors have shown that the productivity of the structures in the middle of the basement can also be linked to other parameters such as the thickness of the alteration and the depth of the boreholes. In Cameroon in particular, the studies have shown some relationships between the alteration thickness, the depth of the boreholes and the exploitation rate of these boreholes. This flow rate refers to the capacity of an aquifer to provide, through a catchment, a minimum flow that can be exploited. It also refers to the productivity of an aquifer.

In order to know the influence of hydrodynamic parameters on drilling productivity in the Kadey department, two types of analysis were carried out. It was on the one hand to highlight the roles that individually play the parameters such as Q_s (Specific Flow), AE (Thickness of Alterite), Pt (Total Depth), T (Transmissivity) and NS (Level Static) on productivity and on the other hand to make an approach based on establishing correlation between all these variables from a multidimensional statistical analysis such as principal component analysis ([Femba, 2005](#); [MINEE/GWP-Cmr, 2009](#); [Prasad, 2011](#)).

3. Results and discussions

3.1. Assessment of aquifer productivity

3.1.1. Results of the hydroclimatological study

3.1.1.1. Application of the double-cumul test. In order to verify the correction made to the Batouri station series, the double cumulating law has been applied which shows the homogeneity of the said series, with reference to Bertoua, Abong-Mbang and Meiganga, which are well known. ([Fig. 3](#)).

The application of this method to the Batouri station shows no break. The points are aligned along a line whose correlation coefficient is 0.999, which gives the series a good homogeneity.

The analysis of the double-cummul curve allows us to observe that there is homogeneity of precipitation data in the Bertoua and Batouri stations. This state of affairs is undoubtedly due to the presence of said stations in the same synoptic scale.

These results are therefore in line with those of [Bon et al. \(2016\)](#) for the sub-watersheds of Sanaga and confirm the notion of uniformity in precipitation of the "South-Cameroon Plateau" formerly mentioned by

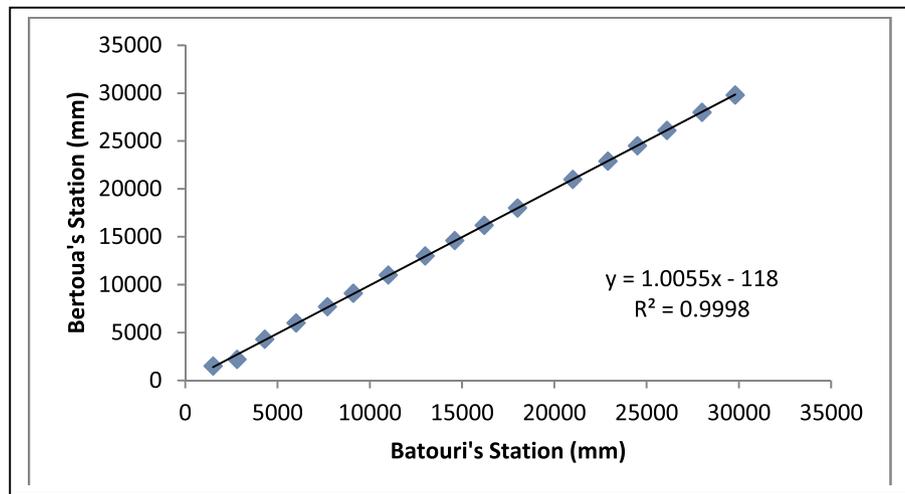


Fig. 3. Application of the double cumulated law after error correction.

Bouziane and Labadi (2009) and insistently resumed by Eiriksson et al. (2013) and Tabue Youmbi, 2013.

3.1.1.2. *Rainfall variation at the Batouri station.* Statistical calculations give the characteristics of the Batouri series, which are presented in Table 1.

Statistical calculations show that the average annual precipitation is 1430,19 mm.

3.1.2. *Results of the water balance*

The results of the hydrological balance study for the period 1975–2016 are recorded in the following table (Table 2):

The Kadey department receives an average of 1430,19 mm of rain a year. The estimated runoff is 159,03 mm or 15,67% of the precipitation. The value of the actual evapotranspiration estimated by the Coutagne method gives a value of 792,25 mm representing 76,90% of the precipitation. The infiltration obtained is only 86,42 mm. It represents 7,41% of the precipitation. We can say that the feeding of the water table of the department is done largely with the help of the effective infiltration.

3.1.3. *Hydrodynamic characterization of aquifers*

3.1.3.1. *Statistical analysis of drilling parameters.* Statistical analysis of drilling parameters yielded several results (Table 3):

The flow rates vary respectively between 0.2 and 10 m³/h with an average of 2.454 m³/h for Q and between 5,4.10⁻⁶ and 5,63.10⁻⁴ m³/h with an average of 5,413.10⁻⁵ m³/h for qs. Calculated coefficients of variation are greater than 1, indicating heterogeneity in the data. In our study, only 10 boreholes have a flow rate (Q) greater than 2 m³/h. This represents a success rate of 43,47%.

The transmissivity values are between 1,92.10⁻⁶ and 5,8.10⁻⁴ m²/s with an average of 4,89.10⁻⁵ and a coefficient of variation of 2,494. These values are heterogeneous and very weak. In fact, only 44% of the boreholes have transmissivities ranging from medium to high. The localities of Dem, Kenzou and Mbang hold the highest values with

Table 1
Rainfall variation at the Batouri station.

	March	April	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb
Moy	103,24	124,85	152,90	152,42	97,81	78,12	122,86	95,25	35,87	16,85	9,34	40,67
Max	254,3	225,2	350,4	271,3	260,8	199,35	284,4	194	128,3	55,2	43,4	160,1
Min	0,6	19,9	36,8	33,7	9,2	1,1	10,8	21,25	0	0	0	0
Standard deviation	58,90	55,18	73,09	54,46	70,34	54,65	63,04	37,53	32,51	17,23	12,81	38,33
Coef. of variation	0,57	0,44	0,47	0,35	0,78	0,69	0,51	0,40	0,90	1,02	1,37	0,94

Table 2
Hydrological balance of the Kadey department (1975–2016).

P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
1430,19	1502,16	792,25	161,51	86,42

Table 3
Statistical analysis of drilling parameters.

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Standard deviation	Coef. of variation
Q (m ³ /h)	0,200	10,000	2,454	2,558	1,042
Pt	45,000	90,000	69,732	13,984	0,200
EA	2,700	31,000	11,358	8,508	0,749
Ns	3,410	30,800	14,526	6,816	0,469
T (m ² /s)	1,92.10 ⁻⁶	5,8.10 ⁻⁴	4,89.10 ⁻⁵	1,22.10 ⁻⁴	2,494
Qs (m ³ /s)	5,4.10 ⁻⁶	5,63.10 ⁻⁴	5,413.10 ⁻⁵	1,12.10 ⁻⁴	2,069

respectively 1,16.10⁻⁴ m²/s, 1,6.10⁻⁴ m²/s and 5,8.10⁻⁴ m²/s. The specific flow used to show drilling productivity varies from 5, 4.10⁻⁶ to 5, 63.10⁻⁴ m³/s.

The total drilling depth varies from 45 to 90 m with an average of 69,73 m. This depth is subject to obtaining a flow rate called positive flow and fixed at the start of the project. The alteration thickness varies from 2,7–31 m with an average of 11,358 m. The static level, meanwhile, varies from 3.41 to 24,80 m with an average of 11,56 m.

The different coefficients of variation determined for the depth of alteration, the thickness of alteration and the static level are less than 100. These low values reflect a low dispersion of the parameters studied. They also show that there is some homogeneity in these values.

3.1.3.2. *Analysis of the parameters influencing productivity.* This analysis is based essentially on the results obtained by the work done with the

Principal Components Analysis (PCA).

The analysis of the correlation matrix (Table 4) shows a high correlation between Q and Qs (0,799), between T and Q (0,664), and a significant correlation between Pt and Ns (0,527) and T and Qs (0,503). No other significant correlation appears in this matrix. The analysis of eigenvalues (Table 5) shows that factors F1, F2 and F3 alone account for 83,749% of the variables expressed. They can therefore be used to interpret the results obtained.

At the factorial plane F1–F2, the factor F1 is determined by T, Qs and Q. The proximity of these variables in the community circle indicates the strong correlation that exists between them. This factor expresses the productivity of the department’s works. These results confirm that there is a relationship between the transmissivity and the specific flow and between the transmissivity and the flow of the boreholes. As for the factor F2, it is determined by Pt, EA and Ns. This axis shows us the accessibility of water in the aquifers of the department. In fact, the slight deterioration observed in the department indicates that aquifer levels are very often subject to seasonal fluctuations (Baka et al., 2011; Anaba Onana et al., 2017; Mfonka et al., 2018).

The factorial plane F1–F3 represents 53,43% of the variables expressed. The factor F1 is always determined by Qs, Q and T and denotes the productivity of aquifers. The F3 factor is defined by the total depth. This axis can represent the availability of water resources in the department’s aquifers. The presence of Ns on the F1 axis shows the influence of the pumping on the static level; this level could be significantly reduced during different operations. Indeed, when the static level in the aquifer rises, the operating flow decreases and when the flow decreases increases. But this is only valid for high and medium flows (Cooper-Jacob, 1950; Baka et al., 2011; Ewodo Mboutou et al., 2012).

3.2. Assessment of aquifer productivity

The study of the hydrological balance reveals that for 1430,19 mm of rain fell every year on the department of Kadey, the part which amounts to the infiltration is estimated at 86,42 mm or 7,41% of the precipitations. The aquifers of the department mobilize for a total area of 1770 km² about 135,263,400 m³ of water.

The absence of a significant relationship between the parameters (Pt, EA, Ns and T) at the different graphs considered individually, led to the adoption of a statistical study based on the principal component analysis (PCA). The analysis of the results of the correlation matrix shows a good correlation between Q and Qs (0,799). Thus, to a lesser degree, the existing relations between T and Q (0,664), Pt and Ns (0,527) and T and Qs (0,503) must be emphasized. This weak correlation observed between T and Qs shows the role played by the alterites in the permeability of the formations of the department. Indeed, it is proved by several studies carried out on the basement that when the depth of alteration is important the probability of obtaining a high flow rate is very high (Kouassi et al., 2012; Lachassange et al., 2015; Mfonka et al., 2018). This is not the case for aquifers in the department of Kadey where the alteration thickness is very low. In this context, obtaining a large flow is

Table 4
Hydrodynamic parameters correlation matrix.

Variables	Q (m ³ /h)	Pt	EA	Ns	T (m ² /s)	Qs (m ³ /s)
Q (m ³ /h)	1					
Pt	-0,106	1				
EA	0,067	0,191	1			
Ns	-0,187	0,527	0,475	1		
T (m ² /s)	0,664	-0,019	0,321	-0,073	1	
Qs (m ³ /s)	0,799	-0,211	0,114	-0,194	0,503	1

All the numbers in bold show the existence of an affinity between the hydrodynamic parameters concerned. Indeed, when the value in the correlation matrix is greater than 0.5, we speak of affinity between these two elements.

Table 5
Eigenvalues and percentages of variances expressed.

Factors	F1	F2	F3
Own value	2,446	1,819	0,760
Variability (%)	40,766	30,317	12,666
% cumulated	40,766	71,083	83,749

related to the state of fracturing or cracking of the aquifer (Alassane, 2004; Ntep Gwet and Adeline, 2005; MINEE/GWP-Cmr, 2009; Soro et al., 2010; Tehna et al., 2015).

The results of the Main Components Analysis (PCA) made it possible to highlight the relationships between the different parameters. The first three factors alone account for 83,749% of the variables expressed in the data. At the factorial plane F1–F2, two hydrodynamic factor groupings are observed on the community circle. It is on the one hand of T, Q and Qs on the axis F1 and Pt, Ns and EA on the axis F2. The factor F1 expresses the productivity of the works and reveals the existence of a relation between T, Q and Qs. This correlation shows the ease with which cuirasses (alterites) let themselves through the water. This result could explain in part the high rate of negative drilling and the low flows very often observed in these lands. This failure rate can also be due to the state of fracturing which remains an essential element in the transmissive capacity of crystalline and crystallophyllian rocks because, in the absence of tectonic and disintegration phenomena, these rocks are practically impermeable (Djeuda Tchapinga et al., 1999; Lasm, 2000; Dibi et al., 2004; Lachassange et al., 2005; N’go et al., 2005; Soro et al., 2010; Prasad, 2011; Tehna et al., 2015). The fractures generated condition good or poor transmissivity depending on whether they are open or closed (MINEE/GWP-Cmr, 2009; N’go et al., 2005; Lachassange et al., 2011; Adadzi et al., 2018).

The factor F2 expresses the accessibility of water in the aquifers of the department. It essentially shows the variation of the level of water in these aquifers. Dibi et al. (2004) point out that on granitic soils, the water level in aquifers is often subject to seasonal fluctuations because of the weakness of the alteration thickness found in these formations. This may explain the fact that productivity is less important in granitic terrain. At the factorial plane F1–F3, the factor F3 can represent the availability of the water resource. But this resource is threatened not only by the climatic conditions of the environment but also by the pumping which can cause a significant drawdown of the level of the groundwater.

4. Conclusion

This study, which focused on the quantitative assessment of water resources in the Kadey Department, concluded that:

The study of the water balance revealed that the ETR calculated by the Coutagne method is of the order of 1428.93 mm, mobilizing about 77% of the precipitation, and that the infiltration (104.40 mm) represents only 7.51% of these. Runoff only receives 15.49% of this precipitation.

The hydrodynamic study of aquifers has shown that the formations of the department are weakly transmissive. The hydraulically active depths are between 50 and 80 m. About 65% of the boreholes have a low specific flow, ie low productivity. This low productivity is certainly due to the fact that in the basement area during village water campaigns, the decision to stop drilling is not rationalized because some drilling is prematurely stopped as soon as the expected flow is obtained. The PCA data interpretation shows that the good productivity observed is mainly related to the total depth of the structures, the alteration thickness and the level of the water in the borehole.

The study of the hydrological balance coupled with the hydrodynamic study in the department show that the aquifers of the department mobilize 135.582.000 m³ of water. This volume of water can meet the needs of the population of the department if each inhabitant consumes

on average 20 L of water per day. But there is an uneven distribution of this resource in the department because at the moment when some localities benefit from water permanently, others assist powerless drying up or intermittent drilling. Indeed, the slight deterioration observed on the formations of the department seems to be the main cause of this intermittency because the water levels in aquifers are subject to seasonal fluctuations. This greatly reduces the productivity of these groundwater catchment works.

Acknowledgements

This work was supported by the European Union through the PAF-ROID educational grant program (Grant no. HDP2A), UNESCO/Sida through ANESI Scholarships Programs, Hydrogeology and Hydraulically Laboratory of Department of Geology, Faculty of Science, Payame Noor University (PNU), Teheran, Iran. Thanks are also extended to the editor and reviewers for their valuable suggestions to improve upon the quality of this manuscript.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data related to this article can be found at <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100278>.

References

- Adadzi, P., Coffie, H., Afetorgbor, E., Takase, M., 2018. Vertical electrical sounding survey for groundwater exploration for rural water supply in parts of Ketu south in the volta region of Ghana. *J. Hydrogeol. Hydrol. Eng.* 7, 1. <https://doi.org/10.4172/2325-9647.1000163>.
- Alassane, A., 2004. Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto Novo (Sud du Bénin): Identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Postgraduate Doctoral Dissertation. Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal, p. 145.
- Anaba Onana, A.B., Ndam Ngoupayou, J.R., Mvondo Ondoa, J., 2017. Analysis of crystalline bedrock aquifer productivity: case of central region in Cameroon. *Ground Water Sustain. Dev.* 5, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.05.003>.
- Baka, D., Lasm, T., Oga, M.S.Y., Youan, M.T.A., De Lasm, O., Kouakou, S.O., Ettien, B.F., 2011. Characterization of transmissivity in the fractured reservoirs in the Oumé area (Center of Côte d'Ivoire). *Am. J. Sci. Ind. Res.* 2 (2), 310–322.
- Bangouls, F., Gaussen, H., 1969. Les climats biologiques et leur signification. *Ann. Géol.* XXVI, 193–220.
- Bon, A.F., Ombolo, A., Ewodo Mboudou, G., Ndam Ngoupayou, J.R., Ekodeck, G.E., 2016. Estimation of hydraulic conductivity of soils at a watershed-scale using Porchet's method: application in the Olezoa Waterhed, Yaounde, Cameroon. *Int. J. Geosci.* 7, 397–408. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.73031>.
- Bouziane, M.T., Labadi, A., 2009. Les eaux Profondes de la Région de Biskra (Algérie). *Eur. J. Sci. Res.* 25 (4), 526–537.
- Cooper-Jacob, E., 1950. Flow of ground water. *Engineering hydraulics*, chapter 5, pp. 321–386.
- Copper-Jacob, E., 1947. Draw-down test to determine effective radius of artesian well transactions. *Am. Soc. Civ. Eng.* 112, 1047–1070.
- Dibi, B., Inza, D., Goula, A., Savane, I., Biemi, J., 2004. Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Sud Sciences & Technologies*, pp. 22–31 n°13.
- Djeuda Tchapgna, H.B., 1987. Géologie et hydrogéologie d'un secteur de la zone mobile d'Afrique centrale : région de poli, Nord – Cameroun. Thèse de Doctorat. Univ. Sc. Tech. Méd. de Grenoble 1. France, p. 333.
- Djeuda Tchapgna, H.B., Ngo Massana, B., Siakeu, J., Tanawa, E., Temgoua, E., 1999. In: Sci, VICAT, J.P., BILONG, P. (Eds.), Modèles de circulation, mécanisme de recharge, et temps de séjour des eaux souterraines des altérites en milieu cristallin: cas du bassin versant de l'Anga'a, Yaoundé-Cameroun. *Collect. GIOCAM*, 2/1999. Press. Univ. de Yaoundé, pp. 117–126.
- Djeuda Tchapgna, H.B., Tanawa, E., Temgoua, E., Ngnikam, E., Siakeu, J., Ngo Massana, B., 2000. Caractéristiques structurales et propriétés hydrodynamiques des altérites de la zone périurbaine de Yaoundé IV – Cameroun. *Rapport*, p. 17.
- Edet, A., Worden, R., 2009. Monitoring of physical parameters and evaluation of the chemical composition of river and groundwater in Calabar (Southeastern Nigeria). *Environ. Monit. Assess.* 157, 243–258.
- Eiriksson, D., Whitson, M., Luce, C.H., 2013. An evaluation of the hydrologic relevance of lateral flow in snow at hillslope and catchment scales. *Hydrol. Process.* 27 (2013), 640–654.
- Ewodo Mboutou, G., Ombolo, A., Fouepe Takounjou, A., Bon, A.F., Bineli Ambomo, E., Bello, M., Ekodeck, G.E., 2012. Etude des paramètres hydrauliques des aquifères de subsurface du bassin versant de Mingosso, région de Yaoundé. *Revue CAMES-Série A* 13 (1), 123–127.
- Fantong, W.Y., Ketchamen-Tandia, B., Kuitcha, D., Ndjama, J., Fouepe, T.A., Takem, G. E., Issa, Wirmvem, M.J., Bopda Djomou, S.L., Ako Ako, A., Nkeng, G.E., Kusakabe, M., Ohba, T., 2016. Variation of hydrogeochemical characteristics of water in surface flows, shallow wells, and boreholes in the coastal city of Douala (Cameroon). *Hydrol. Sci. J.* 61, 2916–2929. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1173789>.
- Femba, R., 2005. Hydrogéologie en zone de socle cristallin : cas du bassin versant de l'Ekooza, secteur Nord de la ville de Yaoundé – Cameroun, vol. 1. *Mém. DEA, Fac Sc, Univ. Ydé*, p. 79.
- Harterter, J., Hamilton, L.C., Boag, A.E., Stevens, F.R., Ducey, M.J., Christoffersen, N.D., Oester, P.T., Palace, M.W., 2018. Does it matter if people think climate change is human caused? *Clim. Serv.* <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.06.014>.
- Jalloh, Y., Sasaki, K., Jalloh, A.B., 2018. Rural assessment of groundwater quality parameters: a case study of Pepel northern Sierra Leone. *J. Hydrogeol. Hydrol. Eng.* 7, 1. <https://doi.org/10.4172/2325-9647.1000161>.
- Koita, M., 2010. Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Languedoc, Montpellier-France, p. 235p.
- Kouadio, K.E., Savane, I., Lasm, T., Biémi, J., 2008. Hydrogeology prospecting in crystalline and metamorphic area by spatial analysis of productivity potential. *Eur. J. Sci. Res.* 22 (3), 373–390.
- Kouamé, K.F., Bernier, M., Saley, M.B., Kouadio, B.H., Kouassi, M., 2011. Evaluation des ressources en eau de surface en contexte de variabilité climatique dans une perspective de gestion durable des ressources naturelles dans le bassin versant de N'zo en Côte d'Ivoire. Communication acceptée au colloque international RIPIECSA Nord Cameroun « Sciences de l'eau, du climat et de l'environnement pour un développement durable de l'Afrique » du 21 au 25 nov 2011, Ngaoundéré, Cameroun. *Communication orale*.
- Kouassi, A.M., Ahoussi, K.E., Yao, K.A., Ourega, W.E.J.A., Yao, K.S.B., Biemi, J., 2012. Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'Zi-Comoé (centre-est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss J.* (10), 57–74.
- Kouassy Kalédjé, P.S., Ndam Ngoupayou, J.R., Kpoumié, A., Fouépé Takounjou, A., Mvondo Ondoa, J., 2016. Analysis of climate variability and its influence on the hydrological response of the catchment area of Kadey (East Cameroon). *Int. J. Geosci.* 7, 539–547. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.74041>.
- Lachassagne, P., Wyns, R., 2005. Aquifères de socle: nouveaux concepts, application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Geosciences* 2, 32–37.
- 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, 1365–1321.
- Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2015. The conceptual model of hard rock aquifers and its practical applications. In: *Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues*, La Roche-sur-Yon, p. 11.
- Lasm, T., 2000. Hydrogéologie des réservoirs fractures de socle: analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de doctorat de. Université de Poitiers, France, p. 272.
- Leblond, P., 1984. Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP), vol. 1. Thèse de 3è cycle de l'Université de Bordeaux, p. 150.
- Mboudou, Ewodo, 2011. Caractérisation et fonctionnement des aquifères de sub-surface en zone de socle cristallin et de climat intertropical humide : cas des bassins versants de la Mingosso et de l'Abiégué (Région de Yaoundé). Thèse de Doctorat. Univ. Ydé 1, p. 205.
- Mfonka, Z., Ndam Ngoupayou, J.R., Ndjigui, P.-D., Kpoumié, A., Zammouric, M., Ngouha, A.N., Mouncherou, O.F., Rakotondrabe, F., Rasolomanana, E.H., 2018. A GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Foumban (Western-Cameroon). *Groundw. Sustain. Dev.* 7 (2018), 250–264. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.006>.
- MINEE/GWP-Cmr, 2009. Etat des Lieux du Secteur de L'eau au Cameroun: Connaissances.
- Mvondo Ondoa, J., 2009. Evolution thermo-mécanique de la croûte inférieure au Néoprotérozoïque à partir de deux exemples considérés dans les régions de Yaoundé et de Bafia (Centre Sud Cameroun) pour une meilleure compréhension de leur configuration structurale au sein de la portion camerounaise de la chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale. Thèse de Doctorat/Ph.D. Univ. Ydé 1, p. 209.
- N'go, Y.A., Goné, D.L., Savané, I., et Goblé, M.M., 2005. Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique Sci.* 01 (1), 127–144.
- Ntep Gwet, P., Adeline, T., 2005. Rapport d'Etude environnementale du barrage de Lom Pangar theme 11. mines, p. 120.
- Prasad, et al., Singh V.S., Krishnamacharyulu S.K.G, Pallavi Benerjee, 2011. Application of drastic model and GIS: for assessing vulnerability in hard rock granitic aquifer. *Environ. Monit. Assess.* <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1572-7>.
- Shanshan, H., Jie, L., Guangming, Z., Min, X., Chang, Z., Yujie, Y., Xiaodong, L., Ping, L., Jiayu, L., Lu, H., 2015. How to manage future groundwater resource of China under climate change and urbanization: an optimal stage investment design from modern portfolio theory. *Water Res.* 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.08.007>.
- Sigha Nkamdjou, L., 1994. In: *Fonctionnement hydrochimique d'un écosystème forestier de l'Afrique Centrale : la Ngoko à Mouloundou (Sud-Est du Cameroun)*. Th. Doc. Univ. Paris (Orsay). Col. TDM n 111. ORSTOM, Paris, p. 378.
- Soro, G., Soro, N., Ahoussi, K.E., Lasm, T., Kouamé, F.K., Soro, T.D., J. Biémi, J., 2010. Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire). *Etud. Geol.* 66 (2), 227–242 julio-diciembre 2010.

- Tabue Youmbi, J.C., 2013. Vulnérabilité de la nappe superficielle en zone de socle cristallin urbanisé: cas du bassin versant de la Mingoa à Yaoundé au Cameroun. Thèse Doctorat Ph/D. Univ. Yaoundé 1, Cameroun, p. 233.
- Tchakounté, J., Eglinger, A., Toteu, S.F., Zeh, A., Nkoumbou, C., Mvondo-Ondoa, J., Penaye, J., de Wit, M., Barbey, P., 2017. The Adamawa-Yadé domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic central African orogenic belt (Bafia area, Cameroon). *Precambrian Res.* 299, 210–229. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.001>.
- Tehna, N., Nguene, F.D., Etame, J., Medza Ekodo, J.M., Noa Tang, S., Suh, E.C., Bilong, P., 2015. Impending pollution of Betare Oya opencast mining environment (Eastern Cameroon). *J. Environ. Sci. Eng. B* 4, 37–46. <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2015.01.006>.
- Thies, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and the duration of discharge of well using groundwater storage. In: *Am. Geoph. Union Trans*, 16th ann. Meeting, pp. 519–524 (Washington).
- UNDP/WB, 2017. Etat des lieux sur l’approvisionnement en eau dans les régions de l’Adamaoua et de l’Est (Cameroun) : Stratégies pour pallier au flux migratoire des populations des pays limitrophes. *Etudes conjointes UNDP/WB*, p. 171. Rapport Technique.
- UNESCO, 1987. *Les eaux souterraines des roches dures du socles*, ISBN 92-3-201980-9, p. 287.
- Vishiti, A., Suh, C.E., Lehmann, B., Egbe, J.A., Shemang, E.M., 2015. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. *J. Afr. Earth Sci.* 111, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.010>.
- WHO, 2011. *Guidelines for Drinking-Water Quality Recommendations*, p. 518.

Research Article

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

Paulin Sainclair Kouassy Kalédjé ¹, **Jules-Rémy Ndam Ngoupayou**¹,
Alain Fouépé Takounjou², **Mireille Zebsa**³,
Felaniaina Rakotondrabe⁴ and **Joseph Mvondo Ondo**¹

¹Faculty of Science, University of Yaoundé 1, Yaoundé - Cameroon, P.O. Box: 812 Yaoundé, Cameroon

²Hydrological Research Centre, Institute of Geological and Mining Research, Yaoundé, Cameroon

³Research and Innovation Centre, Ministry of Scientific Research and Innovation, Bertoua, Cameroon

⁴Advanced School of Engineering of Antananarivo, University of Antananarivo, Antananarivo, Madagascar

Correspondence should be addressed to Paulin Sainclair Kouassy Kalédjé; paulinsainclair@yahoo.fr

Received 25 September 2018; Revised 12 November 2018; Accepted 18 November 2018; Published 1 January 2019

Academic Editor: Federico Porcu

Copyright © 2019 Paulin Sainclair Kouassy Kalédjé et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

During the night of November 18 to 19, 2016, many stormy cells are not very mobile organized on the east of the southern plateau of Cameroon and dumped up to 260 mm of rain in 4 hours. Occurring on a relatively saturated soil, these rains caused strong floods of Kadey and Doumé. The floods were particularly damaging in the city of Batouri, where a subdivision was submerged by the Boubbé (tributary of the Sangha) with water heights in the houses reaching 1.75 m, despite the presence of a dam allowing clipping floods upstream of the basin. In this article, we present the results of the analysis of the postevent survey generated on this event with flow rates estimated on 15 sections of ungauged subbasins. These flows are then compared with those obtained from other recent postevent survey and those estimated by various regional estimations. The inventory of heavy rains around Batouri during the period 1970–2016 has led to the revision of current development standards in the region, which seem to underestimate rainfall and infrequent flows.

1. Introduction

The intense rains accompanied by flash floods are one of the characteristics of the Equatorial Guinean climate. The extension of urbanized areas in southeastern Cameroon has multiplied homes vulnerable to flooding [1–3]. The collection of data on flash floods is therefore a crucial issue for the definition of flood zones and risk control in urban or peri-urban areas. In recent years, the practice of postevent survey (REX) has grown considerably in Europe and West Africa [4–6] to evaluate flows of these extreme floods. The purpose of the REX analysis is to reconstruct the flows achieved during

exceptional events from the flood leases and the testimony of local residents. These operations have notably helped to reevaluate extreme flows in the Mediterranean and tropical zones, where values greater than $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ over a few km^2 have frequently been observed [3, 7].

The rain that hits the southeast of Cameroon on 18 and 19 November 2016 had the particularity of reaching in some localities more than 200 mm in 3 hours, with a relatively small spatial extension, a few hundred km^2 in total, and often only a few dozen square kilometers for the most intense part. This phenomenon is not new in the region, but its location in urbanized areas has led to very significant damage.

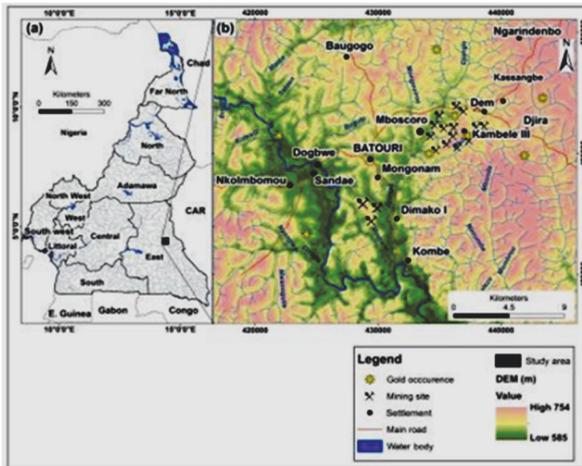


FIGURE 1: Location of the study site and major rivers.

The characteristics of this episode are described in this article. Flow rates were estimated a posteriori on eighteen (18) sections of ungauged rivers. The values obtained were compared with those of other recent postevent survey from the Southern Cameroon forest. The return periods of the episode were qualified by a regional approach consisting of inventorying similar episodes that occurred in the vicinity of Batouri during the last 50 years. In addition to this article, information on this phenomenon can also be found in other studies conducted by CEREMA (Center for Studies and Expertise on Risks, the Environment, Mobility and Development) (2015) [8], using the same flow estimation method presented here, or by Rey et al. (2016) [9], which describe the environmental consequences of such a hydrometeorological episode.

2. Materials and Methods

2.1. Characterization of the Area. The area affected by the intense rains of 18 and 19 November 2016 is located in southeastern Cameroon. The most impacted villages were from west to east: Sandae, Dogbwe, Batouri, Mongonam, Mboscoro, Kambélé III, and Dem (Figure 1).

The area is drained by two rivers: Kadey in the West and Boumbé in the East. Kadey has a fairly extensive catchment in the northwest (251 km^2) but has had little impact during this episode. For the Boumbé, the topographic basin at the Kenzou station is 109 km^2 . The hydrogeological catchment, on a cracked base, feeding the source of the Boumbé covers 372 km^2 [10]. The rapid recharge area of this catchment is located north of a ridge and was only slightly affected by the event.

The relief, which is a plateau, consists of small hills, and the altitudes vary between 780 and 1000 meters. Metamorphic rocks are largely in the majority but this sector has some karstic outcrops, the latter being located more to the northwest. Land use is made up of scrubland, areas, and urbanized areas dominated by forest and mining structures that have been expanding rapidly in recent decades. The

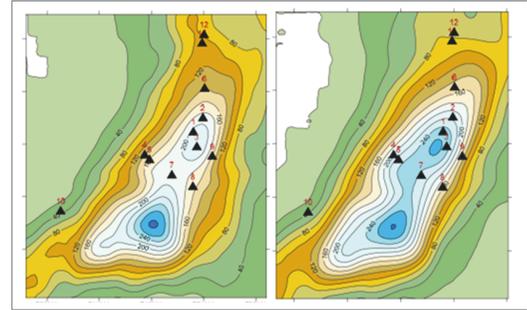


FIGURE 2: Precipitation casts from November 18, 2016 at 4:00 am GMT to 19 November 2016 at 6:00 am GMT, estimated from the Panthere radar product (left) and OHM-CV reanalysis (right).

Boumbé subbasin in Kenzou has the following percentages [11]: scrubland 12%, forests 57%, agricultural land 24%, and urban areas 7%. Kadey has fairly similar percentages, but for the two basins, the area affected by the cumulative highs is on the immediate periphery of Batouri; the percentage of urbanized area is higher and is around 25%. For the locality of Batouri, the percentage of urbanized area is close to 100%.

The event of November 18 and 19 occurs in a particular hydrological context, as two episodes of heavy rainfall hit the area the previous month. On October 12th, the stormy rains mainly affect the south-south sector of the eastern region of Cameroon: Bertoua, Mandjou, or Batouri are about 167 mm and Mbang (south of the city) only 383 mm. Then, on October 25, a new episode touches Batouri with 307 mm in 12 hours in Tripano. The southeast Cameroon receives during this episode 142 mm in Bertoua and 122 mm in Mandjou. On 18 November, the soils are very humid, the Kadey cracked basins on the sources of Dem and Lom; Kadey has a flow rate of $0.98 \text{ m}^3/\text{s}$, while the low flow rate before 12 October was $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.2. Meteorological Event. On November 18, 2017, the rains started around 9:00 pm (6:00 pm GMT). The results obtained from the weather radar images of France show little mobile storm cells that have been stationed for about 4 hours in the area from Tongo Gadima in the southwest to Tikondi in the northeast, about twenty km, whose width does not exceed 7-8 km. From the analysis of these images, we see that, later in the night, other cells affected the entire Kadey department, between the locality of Mbang and that of Pana, with lower intensities.

Radar images provide an estimate of rainfall and their spatial variability (Figure 2). The Panther radar rain, supplied by Météo-France, has been corrected for rain gauges using a correction factor, constant in space and updated every hour. The spatial resolution is 1 km^2 and the temporal resolution is 5 mm. The radar rain OHM-CV (Mediterranean Hydrometeorological Observatory Cévennes-Vivarais) corresponds to a reanalysis with a variable correction factor in space, interpolated by kriging. The spatial resolution is 1 km^2 and the reanalysis is available at a time resolution of 60 minutes.



FIGURE 3: Equipment of the station of Kadey with Batouri in automatic station.

The images differ between Batouri and Kenzou, a sector where Panther totals are underestimated compared to OHM-CV totals. According to the OHM-CV reanalysis, the accumulations are of the order of 280 mm in the commune of Batouri and 265 mm in the commune of Kenzou. According to this same treatment, the areas corresponding to rainfall totals greater than 100, 150, and 200 mm are, respectively, 264, 123, and 67 km². The OHM-CV radar rains are closer to the ground-based rainfall than the Panther radar rains, particularly in Mandjou and Kenzou. It is the consequence of the treatment that spatially interpolates the difference between radar rain and values of the rains obtained by pluviometers on the level of the ground (Figure 3), while the correction of radar rain is spatially uniform in the case of Panther. We will finally retain the OHM-CV rains as a reference.

The rainfall hyetograph made from hourly and cumulative rainfall data then shown in Figure 4 for the pixel provided maximum rainfall accumulation in the Kadey department.

3. Results and Discussions

3.1. Hydrometric Stations of the Measurement Network. Boumbé and Kadey have several hydrometric stations. On the Kadey, the city of Batouri has three stations, but not gauged and whose data are not disseminated. On the Boumbé, two other stations managed by the Regional Direction for the Environment, Planning and Housing (DREAL) are active, but are located downstream of Borgené and are less relevant for this event.

The ordinary flows observed at the Boumbé and Mbang spring are explained by the absence of intense rainfall in the Garou Boulai-Gado Badjere-Boulembé-Mbang sector, which is the fast recharge area for the Boumbé and Lom springs.

The flow observed on the DREAL threshold of the Boumbé spring is the sum of the outflow of the basin and the flow on a small catchment of 1.02 km². If we subtract the input from the Boumbé spring (11 m³/s), the flow corresponding to this basin is exceptional, 36 m³/s, i.e., a specific discharge of 35.6 m³/s/km². The source of the Boumbé is less than one kilometer from the weather station of Pana.

At the Bertoua station, the Lom flood (479 m³/s) is the strongest in the last 10 years of the station's existence. The

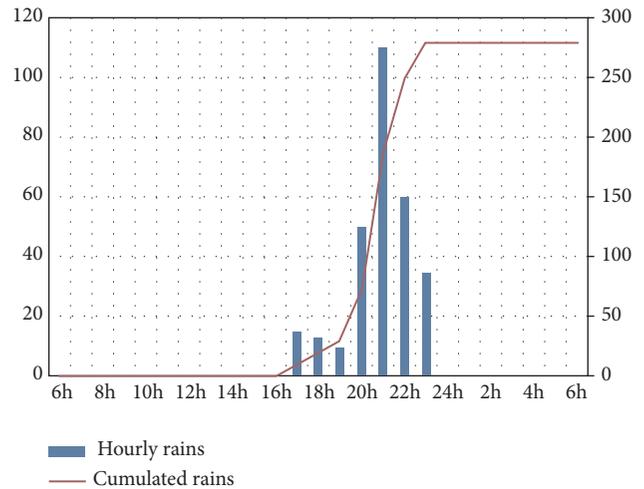


FIGURE 4: Hyetogram of the rain at the pixel that provided the maximum rain, at Batouri, from 18 November at 6:00 am GMT to 19 November at 6:00 am GMT.

specific discharge is 5.6 m³/s/km² for a catchment with an area of 102 km². Several testimonies concerning the water levels on the road indicate nevertheless that the flood of May 12, 2001, was as important as that of November 19, 2016, at the confluence Boumbé-Kadey.

Further downstream, the flood reaches 499 m³/s at Kambélé III on Boumbé, for a catchment area of 115 km², i.e., a specific flow of 4.3 m³/s/km². According to the station's records and the flood markings installed by the Hydrological Research Centre, the flood of 19 November 2016 is of the same order of magnitude as those of 1976 (519 m³/s), 2005 (487 m³/s), and 2003 (440 m³/s). The flood of October 2016 reached 344 m³/s. The return period of the November 2016 flood seems to be between 10 and 20 years old. This moderate return period is clearly due to the fact that the rainy system has saved significant portions of the catchment area.

On the Kadey, at the Batouri station, in service since 1978, the flood reached 234 m³/s and was only exceeded by the 2003 flood (254 m³/s). Further upstream, at Dem, over the last 100 years, only the 1957 flood is higher than the 2016 flood mark. In this sector, the return period of the flood is certainly greater than 20 years, but it is difficult to be more precise in the absence of reliable data. It should be kept in mind that the flows on the Bertoua, Batouri, and Kenzou stations are widely extrapolated and that their absolute values are very uncertain.

3.2. Flow Estimation by Postevent Survey. To complete the hydrometric information on the ungauged watersheds, the flows were estimated after the floods, by identifying the maximum levels reached and the slopes of the water lines, then applying hydraulic formulas (Gaume and Borga, 2008). In a typical case, it is a question of choosing a rectilinear rectangle without modification of width or break of slope, to measure the cross section at the point considered and the slope of the water line on a few meters or a few tens of meters upstream and downstream of the cross section, finally to apply a Manning-Strickler hydraulic formula to calculate

the flow velocity, the roughness coefficient being estimated according to the size of the bed. In other cases, weir-type formulas are applied to water heights estimated at thresholds, or the velocity is estimated by applying the Bernoulli theorem between the upstream and downstream coasts of a structure under load, bridge, or nozzle.

In addition to the two stations located on Boumbé and Lom, flows were estimated for eighteen (18) sections. One of the sections (Batouri) corresponds to the threshold of a reservoir and the flow rate was calculated by a weir formula with a thick threshold, with rectangular section without ridges, in the free regime. The flows of the other sections were estimated from the Manning formula. The calculation method is detailed in other lessons learned from rivers in Europe and West Africa [5, 12, 13]. The 2016 flood surveys and spreadsheets are available in the Ministry of Scientific Research and Innovation database through the Hydrological Research Centre.

The areas of the basins corresponding to these sections were calculated by treatment of the Digital Elevation Models (DEM) 25 m of the National Geographic Institute (NGI). The mean water slides, by correlations and corrections, were calculated for each basin by processing the radar image provided by the OHM-CV.

The flows are expressed in terms of probable flow rates, framed by lower and upper bounds corresponding to the uncertainties on the estimation of these flows. These uncertainties vary from 20 to 50% according to the choice of the section, its regularity, and the legibility of the flood traces. The most important uncertainty factor is often related to the estimation of the Strickler roughness coefficient.

The specific flows vary between 4 and 27 m³/s/km². The highest values (Pana, 29.8 m³/s/km², and Batouri, 26.3 m³/s/km²) correspond to the two smaller basins, less than or equal to 1 km². For the other basins, the specific flows vary between 10 and 18 m³/s/km², if one considers only the basins having received more than 150 mm of rain. The maximum specific discharge, 18 m³/s/km², corresponds to the Batouri catchment, at the heart of the rainy system. The basins with a water slide of less than 150 mm have the lowest specific flows, from 1.4 to 7.5 m³/s/km² (Dem and Kambélé III sections upstream of the catchment area of Boumbé), sections of the Kadey incorporating an upstream little watered). Accounting for the impact of pond area on flow abundance, probable flow rates are fairly well organized around

$$Q_{m3/s} = 19,96 \times S_{km2}^{0.57} \quad (R^2 = 0,81) \quad \text{or} \quad Q_{m3/s} = 17,58 \times S_{km2}^{0.76} \quad (R^2 = 0,85)$$

if only pools over 150 mm in sizes are considered (Figure 5).

3.3. Comparison with Other Exceptional Episodes. Figure 5 compares the results obtained for the event of 18 and 19 November 2016 (considering only basins that received more than 150 mm of rain) with other exceptional episodes since 2000 in southeastern Cameroon. Debit estimates provided by regional flood discharge prediction formulas are also shown:

- (i) **Bressang-Golossof** (for catchments area between 20 and 400 km²):

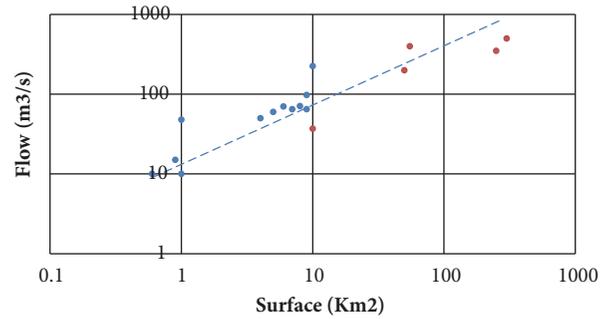


FIGURE 5: Probable flows based on catchment area.

$$Q_{m^3/s \text{ rare}} = 30 \times S(km)^{0,75}$$

- (ii) **Crupedix:**

$$\text{Outstanding } Q_{m^3/s} = Q_{10 \text{ years}} \times K_2$$

$$Q_{m^3/s(10 \text{ years})} = S(km^2)^{0,8} \times (P(mm)/80)^2 \times K$$

The estimated flows are of the same order of magnitude as those observed during other French REX in the Mediterranean region: around Draguignan in the Var in 2010 [5, 14], on the Côte d’Azur around Mandelieu in 2015 [13], and around Abidjan in 2013 [15] and Grand Bassam in 2012 [16]. They remain significantly lower than those estimated during the Gard floods in 2002, at least for basins larger than a few km², or around Lodève in 2015 for nonkarst basins [17]. It is also noted that the estimated feedback values for the episode of November 18 and 19, 2016, exceed the exceptional flows calculated by the Crupedix formula proposed for exceptional flows, while remaining below those given by the Bressang-Golossof rare. It is possible that the decadal rainfall quantile in the area, P10 years = 122 mm, occurring in Crupedix is underestimated.

3.4. Estimation of the Return Period of the Rains. The only long series of intraday rains available around Batouri is the Bertoua series, whose statistical analysis was done for the period 1968-2014 by the Hydrological Research Centre in 2017 [18]. The return periods were calculated after adjusting for Weibull law has the observed data for a return period of 50 years; the estimates provided are 49 mm in 30 minutes, 72 mm in 1 hour, and 121 mm in 4 hours.

The Simulation of Hydrograms for the predetermination of floods REGionalized (SHYREG) method [19] based on the synthesis of several hundred series of hourly rainfall and on a regionalization of the parameters from the daily rainfall in the Cameroonian territory provides higher accumulations for durations less than 1h, but close enough for longer durations: according to National Direction of Meteorology (2014) [20, 21], for the same period of return, fiftieth year, we would have accumulations of the order of 70 mm in 1 hour, 90 mm in 2 hours, and 120 mm in 4 h. For a 100-year return period, the estimates are of the order of 90 mm in 1 h, 100 mm in 2 h, 120 mm in 3 h, and 135 mm in 4 h. According to these estimates, the one-time maximum of the episode

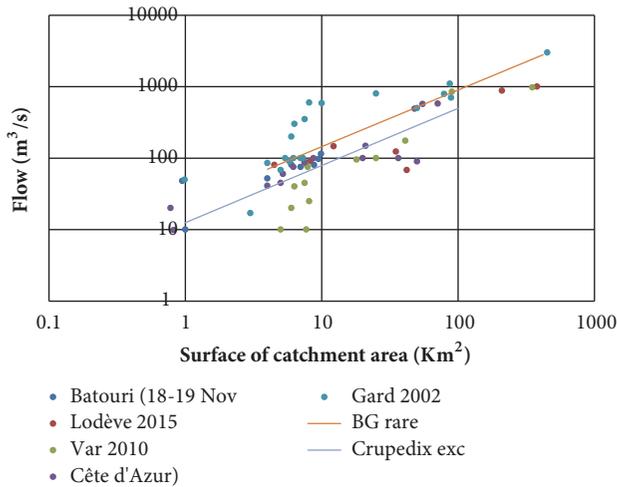


FIGURE 6: Comparison of flows obtained for different recent postevent survey and for different flood predetermination estimation.

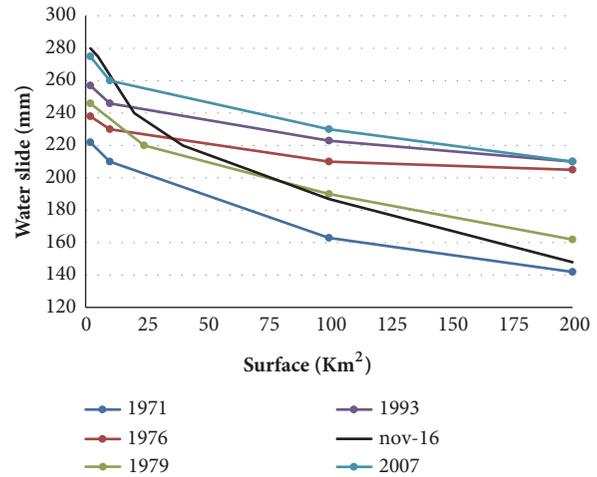


FIGURE 7: Spatial extension of exceptional episodes exceeding 200 mm in 4 hours.

of November 18 and 19, 2016, would therefore have a return period well above the centennial.

These estimates can be compared to the inventory of exceptional episodes in the forest massif of southeast Cameroon. Ndam Ngoupayou et al. (2014) [22] state as follows:

- (i) 90 mm in 1 hour on October 27, 1984, in Songloulou.
- (ii) 120 mm in 1 hour at Natchigal on 30 September 2001.
- (iii) 180 mm in 2 hours at Goura on 25 October 1993.
- (iv) 298 mm in 4 h Ebebda and 385 mm in 4 h in Bamendjin on 23 September 1997 (and not in October as the authors have indicated, no remarkable episode having occurred in this month).

These episodes could be mapped from the rainfall data available in the National Direction of Meteorology databases at these dates. For the episode of September 23, 1997, it should be noted that no cumulation available in the National Direction of Meteorology database exceeds 300 mm, the accumulations of Ebebda and Bamendjin from another network of measurements. The 1993 episode seems to be of a different nature from the others, much larger, and more like a Cevennes episode. But an intense rain cell, exceeding locally 200 mm, is also centered on the northeast of Batouri.

To these episodes are added three more intense episodes (17 September 2007, 29 September 2016, and 18 November 2016) of more than 200 mm in a few hours (3 to 5 hours), for which we have radar rainfall (Figure 6).

Considering only the period 1985-2016, it is thus a total of seven exceptional episodes which were observed on the immediate periphery of Batouri, on an area delimited by Kenzou to the north, Dem to the south, Mbam to the west, and Nbounou to the East. These episodes have in common to have exceeded locally 200 mm in less than 4 hours, which leads to a period of regional return (that is to say, on the area) of less than 7 years for this type of episode. On earlier dates,

Chaptal (1934) [23] mentions 227.9 mm fell in 24 hours on September 26 and 27, 1933 (with height of up to 33 mm in 15 minutes and 40 mm in 30 minutes, these intensities cited as being remarkable were only rarely exceeded in 60 years, November 3, 1910, and July 8, 1917), and 233 mm in 7 h on October 11, 1862.

Areas of water bursts exceeding different thresholds were calculated from interpolated rainfall or radar images (Figure 7). We distinguish the much localized episodes for which the precipitated slide decreases rapidly according to the surface (1971, 2007, and 2016) and those for which it decreases more slowly (1976, 1979, and 1993). For the first group, the areas corresponding to a water level of at least 200 mm vary from 25 to 75 km², while for the second group, they exceed 200 km². The area of the water body exceeding 200 mm can be estimated on average about 100 km².

A very crude reasoning can be used to try to determine the local return period of an exceptional rainfall of at least 200 mm in 4 hours, whose spatial extension is, as we have seen, 100 km² on average. During the period 1985-2016, there are seven episodes of this type, on a fixed area that can be represented by a square of 50 km side. It is inferred that a total of $7 \times 100 = 700$ km² received a rainfall of at least 200 mm (in 4 hours) during the period considered, i.e., thirty-one (31) years. For each point in the area to be averaged once with a rainfall of more than 200 mm in 4 hours, it would take $2,500/700$ more time, or $2,500/700 \times 45 = 111$ years. The same reasoning, realized for a 150 mm water slide with an average surface area of about 300 km², would lead to estimating the corresponding return period at around 45 years. By comparison, the Simulation of Hydrograms for the predetermination of floods REGionalized (SHYREG) gives this rain a substantially centennial return period. It would therefore tend to overestimate return periods [24-26].

In this calculation, however, there are numerous uncertainties, relative to the estimation of the reference area, the average extent of a given water table, the assumption that the intense rainfall is equiprobable over the reference area,

the number of undetected intense episodes, the short length of the reference period with regard to the validity of the statistical analysis, and the spatial abatement allowing to move from the occurrence of a rainfall height to a point to that of an average rainfall of the same height over a given area, which has not been taken into account. In this way, by choosing, for example, a smaller reference area of 900 km² (a square of 30 km on the side), the return period of a water slide of 200 mm in 4 hours would be increased to 60 years and that of a water slide of 150 mm in 4 h to 20 years. It is therefore appropriate to set a fairly broad range for the return period of an episode such as that which affected the Kadey catchment, at least between 60 and 160 years of age, taking into account the uncertainties in the reference area in the method used. In addition, the return period of the October 1998 episode in Pana, whose maximum seems to have reached 420 mm locally in 6:30, was estimated at a little over a hundred years, based on the historical information showing four other comparable episodes over the last 600 years [27]. Davy (1989) [28] also mentions that four showers greater than 200 mm in 6 hours were recorded at the Pana station between 1889 and 1988. These episodes are referring to periods significantly longer than that of the November 2016 rain in Batouri; the estimated return periods cannot be directly compared to those we estimated, but they do not seem to invalidate the range we have proposed [29].

To answer more precisely the question of the frequency of these rains with strong intensities on short durations supposes more important studies. For example, using the recent archives of radar data from 1990 to the present day of the Agency for the Safety of Air Navigation in Africa and Madagascar (ASECNA) coupled with those of the National Direction of Meteorology, it would be possible to study their frequency by taking into account both the area covered by the high intensities and their duration.

4. Conclusion

The postevent survey on the floods observed on 18 and 19 November 2016 on the southeast of the South-Cameroon Plateau in Batouri precisely characterized the rains and flows of this meteorological event. Rainfall accumulations of 260 mm in 4 hours have been achieved, and the specific flows are of the order of 10 to 20 m³/s/km² or more. These flows are of the same order of magnitude or exceeded by those estimated during other recent Cameroonian REX in the forest and humid tropical regions (Congo Basin) on the one hand and on the other hand in several regions: Montpellier-Grabels, Nîmes, Var, and Lodève (France); Bouar, Kaga-bandoro, and Bosangoua (Central Africa Republic); Kano, Adamawa, Taraba, Oyo, Delta Imo Lagos, and Edo (Federal Republic of Nigeria). This type of episode is not so rare in the Kadey and the repetition of these episodes encourages revising the management standards with regard to rare floods at the level of Cameroon but also of the subregions Central Africa and Africa from west. The estimates provided by the statistical analysis of the Batouri local series or by the SHYREG method seem to overestimate the return periods of the rains for intraday durations. Although large uncertainties

remain, the return period of rain received by the Kadey Basin in Batouri could be between 60 and 160 years old. In the continuation of this article, a rain-flow model will be proposed to evaluate in the framework of the same episode the role of urbanization or the initial conditions of saturation of soils on the flows, as well as the efficiency of the structures of storage for flood protection.

Data Availability

The data of the present study are available but can not be published yet, because they are still the property of the Ministry in Charge of Scientific Research and Innovation of Cameroon until December 2019.

Disclosure

This study was carried out as part of the hydrometeorological studies for the construction of a dam in eastern Cameroon.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

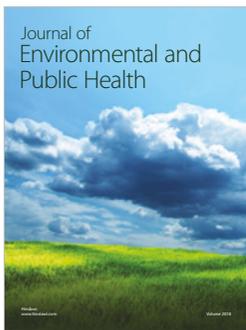
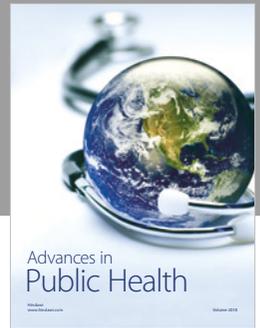
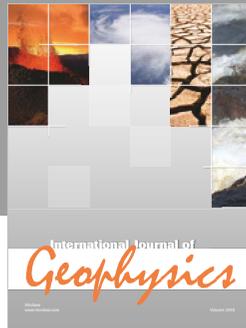
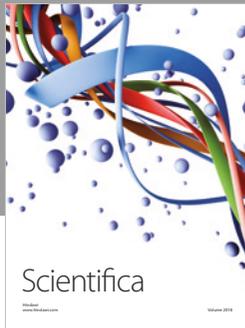
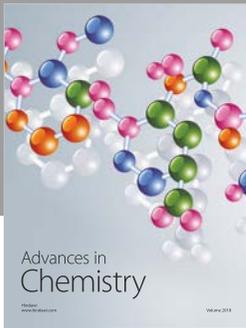
Acknowledgments

We would like to thank our colleagues from Hydrological Research Centre and Geochemical Analysis Laboratory of Water who participated in the field measurements. We also thank Christelle Gislaine Belinga for the prospecting work carried out on Météo-France, InfoClimat, and the National Meteorological Direction of Cameroon.

References

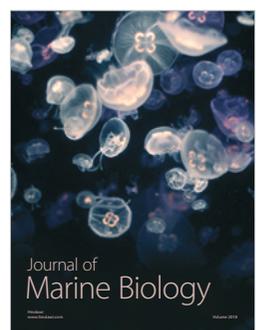
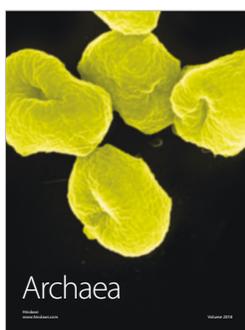
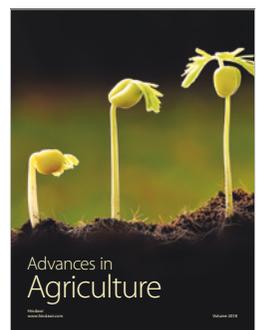
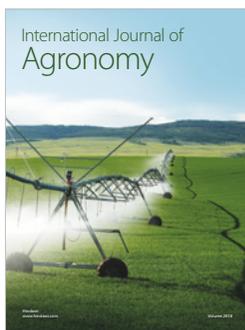
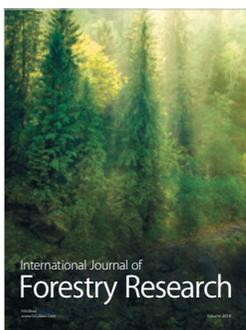
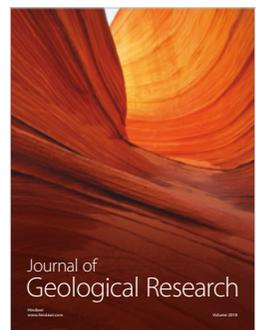
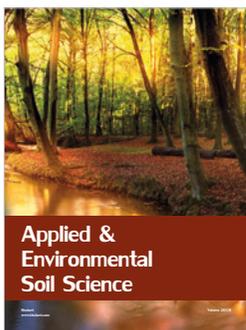
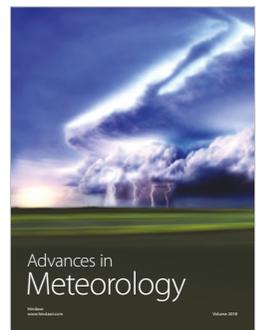
- [1] E. Gaume and C. Bouvier, "Analyse hydro-pluviométrique des crues du Gard et du Vidourle des 8 et 9 septembre 2002," *La Houille Blanche, International Water Journal*, no. 6, pp. 99–106, 2004.
- [2] G. Delrieu, V. Ducrocq, E. Gaume et al., "The catastrophic flash-flood event of 8-9 September 2002 in the Gard Region, France: a first case study for the Cévennes-Vivarais Mediterranean hydrometeorological observatory," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 6, no. 1, pp. 34–52, 2005.
- [3] J. M. Masson, "Analyse d'une longue série pluviographique - Montpellier Bel-Air 1920-1971," *La Météorologie*, vol. 20-21, pp. 105–117, 1980.
- [4] E. Gaume and M. Borga, "Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations," *Journal of Flood Risk Management*, vol. 1, no. 4, pp. 175–189, 2008.
- [5] O. Payraastre, J. P. Naulin, C. C. Nguyen, and É. Gaume, Article ID 01272025, Analyse hydrologique des crues de juin 2010 dans le Var. Rapport de recherche IFSTTAR, 33 p, en ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01272025/document>.
- [6] P. Brunet, C. Bouvier, and É. et Gaume, "Retour d'expérience sur les crues du Gard en septembre 2002 : contrôle de la qualité des débits estimés et comparaison avec les formules synthétiques régionales," in *Évènements extrêmes fluviaux et maritimes, CD-Rom, congrès SHF*, p. 8, Paris, 2012.

- [7] E. Gaume, V. Bain, P. Bernardara et al., "A compilation of data on European flash floods," *Journal of Hydrology*, vol. 367, no. 1-2, pp. 70–78, 2009.
- [8] CEREMA (2015) - Retour d'Expérience des intempéries sur les départements de l'Hérault et du Gard de septembre à décembre 2014. Rapport d'expertise sur la commune de Grabels. Édité DDTM34 (DREAL Languedoc-Roussillon), 72 p., en ligne : http://www.herault.gouv.fr/content/download/15944/102326/file/RapportExpertiseCerema_GRABELS_2015_05_22.pdf.
- [9] T. Rey, S. Defossez, F. Vinet, and L. Boissier, "Kinematics and impacts of a hydro-meteorological event: the floods of 6-7 October 2014, Grabels (Mediterranean France)," *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 16, no. 1, 2016.
- [10] K. P. Kouassy, N. J. Ndam, A. Kpoumie, T. A. Fouepe, and O. J. Myondo, "Analysis of Climate Variability and Its Influence on the Hydrological Response of the Catchment Area of Kadey (East Cameroon)," *International Journal of Geosciences*, vol. 07, no. 04, pp. 539–547, 2016.
- [11] J. C. Maréchal, A. Vestié, H. Jourde, N. Dorfliger, J. C. Maréchal, and A. Vestié, "The Lez hydrosystem: active management for a karst stakes," *Karstologia*, vol. 62, p. 1, 2013.
- [12] O. Payrastre, E. Gaume, and H. Andrieu, "Use of historical data to assess the occurrence of floods in small watersheds in the French Mediterranean area," *Advances in Geosciences*, vol. 2, pp. 313–320, 2005.
- [13] L. Lebouc and O. Payrastre, "Reconstitution et analyse des débits de pointe des crues du 3 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes," *Rapport de recherches, convention DGPR-IFSTTAR*, no. 2201030666, Article ID 2201030666, p. 18, 2017, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01589775/document>.
- [14] C. Martin, "Return on the hydrological episode of June 15, 2010 in Var (France): the case of Nartuby," *Études de Géographie Physique*, pp. 53–62, 2012.
- [15] Y. Zhou, Z. Yang, D. Zhang, X. Jin, and J. Zhang, "Inter-catchment comparison of flow regime between the Hailiutu and Huangfuchuan rivers in the semi-arid Erdos Plateau, Northwest China," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 60, no. 4, pp. 688–705, 2015.
- [16] K. F. Otchoumou, M. B. Saley, G. E. Aké, I. Savane, and K. B. Djè, "Climate variability and coffee and cocoa production in the humid tropics: Case of the Daoukro region (Central-East of Côte d'Ivoire)," *Int. J. Innov. Appl. Stud*, vol. 1, pp. 194–215, 2012.
- [17] P. Brunet and C. Bouvier, "Analysis of the September 12th 2015 Lodève (France) flash flood: Influence of karsts on flood characteristics," *La Houille Blanche*, vol. 2017-, no. 3, pp. 39–46, 2017.
- [18] J. Lavabre, "Estimation des débits de crue par la méthode SHYREG," in *Présentation sommaire de l'approche, Intérêts de l'approche, Limites d'utilisation*, p. 6, 2007.
- [19] Y. Aubert, P. Arnaud, P. Ribstein, and J. Fine, "La méthode SHYREG débit—application sur 1605 bassins versants en France métropolitaine," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 59, no. 5, pp. 993–1005, 2014.
- [20] M. Coustau, *Contribution à la prévision des crues sur le bassin du Lez : modélisation de la relation pluie débit en zone karstique et impact de l'assimilation des débits*, vol. 2, Thèse de l'Université Montpellier, 2011.
- [21] M. Desbordes, G. Fabre, and J. C. Gilly, "La catastrophe hydrogéologique du 3 octobre," in *Risques naturels dans le Sud-Est de la France, actes de colloque (Avignon, 1989)*, vol. 15 of *mémoire hors-série*, pp. 77–91, Association des Géologues du Sud-Est, Revue de Géologie Alpine, 1990.
- [22] J. Ndam Ngoupayou, J. Dzana, A. Kpoumie et al., "Present-day sediment dynamics of the Sanaga catchment (Cameroon): from the total suspended sediment (TSS) to erosion balance," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 1080–1093, 2016.
- [23] L. Chaptal, "Les pluies de la fin septembre 1933 à Montpellier," *Annales de l'École Nationale d'Agriculture de Montpellier*, vol. XXII, no. IV, pp. 335–344, 1934.
- [24] M. Coustau, *Contribution à la prévision des crues sur le bassin du Lez : modélisation de la relation pluie débit en zone karstique et impact de l'assimilation des débits*, vol. 2, Thèse de l'Université Montpellier, 2011.
- [25] L. Davy, "A natural catastrophe: the Nimes storm of 3 October 1988 and its hydrological consequence," *Hydrologie Continentale*, vol. 4, no. 2, pp. 75–92, 1989.
- [26] R. Naullet, M. Lang, T. B. M. J. Ouarda et al., "Flood frequency analysis on the Ardèche river using French documentary sources from the last two centuries," *Journal of Hydrology*, vol. 313, no. 1-2, pp. 58–78, 2005.
- [27] R. Merz and G. Blöschl, "Flood frequency regionalisation - Spatial proximity vs. catchment attributes," *Journal of Hydrology*, vol. 302, no. 1-4, pp. 283–306, 2005.
- [28] Météo-France (1999) - Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 à 10 jours sur 3 000 postes français, méthode du renouvellement. Édition Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (DPPR, SDPRM), 463 p.
- [29] D. Koutsoyiannis, "Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 49, no. 4, pp. 591–610, 2004.



Hindawi

Submit your manuscripts at
www.hindawi.com



Analysis of Climate Variability and Its Influence on the Hydrological Response of the Catchment Area of Kadey (East Cameroon)

Kaledje Paulin Sainclair Kouassy¹, Ngoupayou Jules-Rémy Ndam¹, Amidou Kpoumie², Takounjou Alain Fouepe³, Ondoua Joseph Mvondo¹

¹Laboratory of Engineering Geology and Alterology, Faculty of Science, University of Yaounde 1, Yaounde, Cameroon

²Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Maroua, Maroua, Cameroon

³Institute of Geological and Mining Research, Hydrological Research Centre, Yaounde, Cameroon
Email: kkaledje@yahoo.fr

Received 6 February 2016; accepted 24 April 2016; published 27 April 2016

Copyright © 2016 by authors and Scientific Research Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Register in the framework of the International Program of Research on Water Resources Management and Protection of Ecosystems, the Congo basin in which lies the catchment area of the Kadey (2647 km²) was selected to better assess the impact climate variability on the water surface in the perspective of supply drinking water both in the rainy season and in periods of low water. Based on new data from rainfall and flow rates obtained in the last fifteen years (1998-2013), the major trends in time series and the scope of the “drought” were identified. The historical rainfall in the basin is characterized by two major ruptures rainfall in 1969 and 1999. These have generated an order deficit of 14% respectively and an excess of nearly 19%. These phenomena also affected the recurrence of cumulative rainfall throughout the Kadey basin. Here, the hydrological response to excess rainfall is over 100%. However, it appears that over the period 1970-2012, the number of years that has undergone a “severe drought” is to play down.

Keywords

Catchment Area of Kadey, Climate Variability, Surface Water, Hydrological Response

1. Introduction

Cameroon and Central Africa under mousson regime, is a vast complex where the climate is governed by the movement of the Atlantic mousson. This part of Africa is hit in recent decades by a more or less severe drought as the climate is equatorial, tropical humid and semi-arid [1]-[3]. This decrease in current rainfall since the beginning of the 70s seems to be the consequence of strong climate variability because of a likely disruption of the West African mousson [3]. It is characterized by a decrease of about 15% to 20% of the rainfall and an even greater decline in stream flow [4] [5].

However, this background of general decline hydroclimatic is upset for example by increasing the speed of the Oubangui River (Central African Republic) since 1970 despite a significant rainfall deficit [5] [6]. This hydrological paradox is also observed in Gabon and Central African Republic in equatorial climate through an increase in groundwater level over the last 50 years around small endorheic ponds and rivers [5] [7].

The catchment area of Kadey is a sub-watershed of the Congo drained by the river with many tributaries Kadey as Boumbe II, Mama, Kudu and Doume rivers. The aim is to better characterize climate variability through rainfall across the basin and assess its hydrological response from the flow variations at the outlet.

On Presentation of the Study Area

The catchment area of Kadey (2 647 km²) is located in Eastern Cameroon, between longitudes 14°29'E and 14°45'E and the latitudes 4°12'N and 4°36'N (Figure 1). The basin is located in the equatorial climate transition upstream from the part of the basin located south of the Sanaga. As for the entire Congo Basin, annual average rainfall is 1428.9 mm between 1960s and 2013s. The rainfall pattern has four seasons marking the equatorial influence. The distribution of seasons varies following stations. However, the aspect “camel’s back” characterizes all stations of the Sangha Basin, with two maxima and two minima well marked. The second maxima is always most powerful. The highest temperatures are observed between March and April and are respectively 25.4°C Batouri, 25.9°C to 26°C and Dem Bertoua. In terms of the lowest temperatures, they correspond to the months of July and August, with 23°C in Batouri, Bertoua 23.4°C and 23.9°C to Dem. The hydrographic network of the basin narrows upstream downstream. The relief consists of upstream basin plateaus, plains in the middle and downstream lowlands whose altitude varies between 600 m and average 880 m. However, there are isolated ancient massifs whose peaks reach around 927 m. The geology of the watershed consists of base for the most part [8]. The population is predominantly rural and relatively dense. The main economic activity remains artisanal gold mining although agriculture remains the main activity in the whole of Congo.

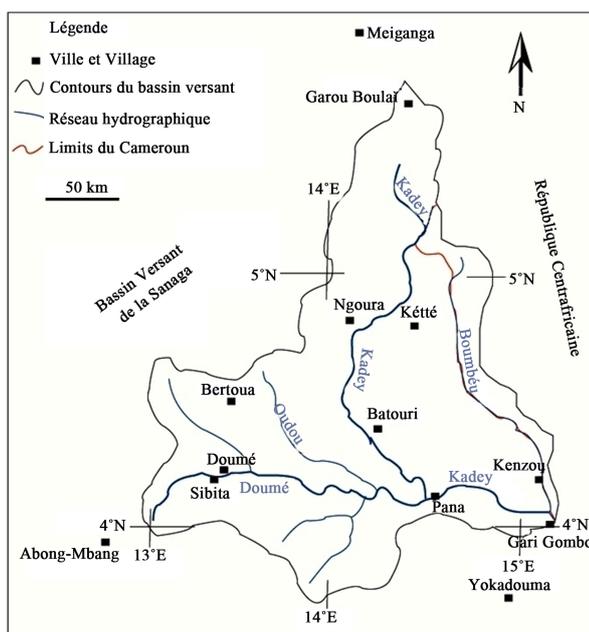


Figure 1. Location of catchment area of Kadey.

2. Data and Methods

2.1. Data Acquisition

Rainfall data come from the service of the Agency's documentation for the Safety of Air Navigation in Africa and Madagascar (ASCENA) at the airport of Bertoua and the National Meteorology of Cameroon. They are recorded from 5 rainfall stations distributed over the basin and whose observations sizes vary from one station to another. The Longest chronicle (1969-2014) is recorded in the rainfall station in Bertoua, located in the North East of the basin. This long series will better appreciate the long-term rainfall variability.

Hydrometrics data are from the 1972-2013 period stations Bertoua and Batouri, extracted from the database of the hydrological research centre of Cameroon and field descents.

2.2. Methods

2.2.1. Calculations of Rainfall and Hydrometrics Indices

In time series, rainfall and hydrometric is evidence to identify the major trends. They are calculated by the method of weighted moving average filter or low-pass Hanning 2nd order.

To do this, we first proceed to data filtering to remove seasonal variations using the non-recursive low-pass filter Hanning 2nd order (it is a application of weighted moving averages). The implementation and determination of this filter is carried out by means of mathematical equations that permit to estimate each term in the series as follows:

$$x(t) = 0.06x(t-2) + 0.20x(t-1) + 0.38x(t) + 0.25x(t+1) + 0.06x(t+2) \quad (1)$$

$$\text{with: } 3 \leq t \leq (n-2)$$

where: $x(t)$ is the total rainfall weighted for term t , $x(t-2)$ and $x(t-1)$ are observed total of two out above the term t immediately, $x(t+2)$ and $x(t+1)$ are the observed total of two terms that follows the term t immediately.

The weighted total of the first two [$x(1)$, $x(2)$] and the last two [$x(n-1)$, $x(n)$] terms of the series are determined by the following expressions (n being the size series):

$$\begin{aligned} x_{(1)} &= 0.54x_{(1)} + 0.46x_{(2)} \\ x_{(2)} &= 0.25x_{(1)} + 0.50x_{(2)} + 0.25x_{(3)} \\ x_{(n-1)} &= 0.25x_{(n-2)} + 0.50x_{(n-1)} + 0.25x_{(n)} \\ x_{(n)} &= 0.54x_{(n)} + 0.46x_{(n-1)} \end{aligned} \quad (2)$$

To better visualize the periods of surplus and deficit in inter annual, the calculated moving averages have been centered and reduced from the following formula:

$$Vcr = \frac{(P - \bar{P})}{\sigma} \quad (3)$$

With: Vcr is reduced centered variable (rainfall and hydrometric Index according to the studied variable), P is the sum of the variable over a given period t , \bar{P} is the average of the time series over the period of study and σ is the standard deviation of the series on the study period.

2.2.2. Ruptures Detection Tests in Time Series

In this study, breaks tests permits to determine the various pivotal years of climate change in a watershed. Their roles come in supplement to rainfall and hydrometric evidence collected at weather stations. The existence of abrupt changes in hydroclimatic series is a possible cause of the heterogeneity of these series [9]-[12].

These tests are essentially based on the Bayesian method of Lee and Heghinian, Pettitt and segmentation Hubert [13] [14]. Tests Lee and Heghinian and Pettitt designed to detect breakage maximum while segmentation Hubert allows in turn to identify more if they exist in a time series data [15]-[17]. Their application is carried out using the KhronoStat 1.01 software developed by the French Institute of Research for Development (IRD).

2.2.3. Estimated Periods of Rains Back around Breaks

With HYFRAN 1.1 software developed by the Canadian Institute (INRS-ETE) and used here, we did a fre-

quency analysis of rainfall totals on each break period to be identified. The goal is to determine any variation in the return period of a P rain due to the rupture. The purpose of this calculation is to better assess the impact of climate variability on the choice of the rains (and flows) project in the design of hydraulic structures.

2.2.4. Determination of the Magnitude Drought

1) SPI and ranges of values meaning

In hydroclimatology, standard ranges of SPI index values used to assess the extent of moisture (or dryness) for each year of the time series. After this operation, it is possible to determine the number of years in line SPI and the corresponding meanings in terms of scale of the climate phenomenon (**Table 1**) from the following equation:

$$A_i = \left(\frac{ni}{N} \right) \quad (4)$$

A_i is the percentage of the years concerned by the class i (**Table 1**), ni is the number of years of class i and N , the total number of years over the study period.

2) Deficit (or excess) rainfall and hydrometric

In the catchment area of the Kadey as in the whole of the Congo Basin, the dominant phenomenon throughout the time series is finally obtained for the SPI range for which we records the highest percentage.

Here, the magnitude of drought can also be assessed from the deficit calculation. For hydroclimatic for which variables time series presents a break, this method specifies the percentage change in the average around the break date [18]-[21]. This deficit is obtained by the following formula:

$$D = \left[\left(\frac{x_j}{x_i} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (5)$$

D is the hydrometric or rainfall deficit, x_i is the average of the period before the break, x_j average for the period after the break.

3. Results and Discussion

3.1. Hydrometric and Rainfall Indices

Changing rainfall indices between 1960 and 2012 suggests three possible ruptures. Before the first break that marks the end of the 1960s, there have been positive rainfall indices. This is typical annual rainfall above the average interannual due to an excess rainfall regime during this period. For the 1970-1992 sequence, almost 90% of the years concerned correspond to negative rainfall and hydrometric index reflecting a deficit rainfall pattern (**Figure 2**). A return to surplus occurs years after this deficit sequence in deficit until 2000. The decade 2010 is not yet complete, is characterized by alternating positive and negative indices. Subsequent monitoring of the rest of the series will better identify the trend of this decade.

3.2. Tests of Rainfall and Hydrometric Breaks

In deciding on the number of disruptions in rainfall to retain, the application of tests and Lee Heghinian, Pettitt (**Table 2**) have permitted to detect a single break in 1969 while the segmentation Hubert has detected one in

Table 1. Different classes indices SPI and their meanings.

N° of Classes	Classes SPI	Interpretation
1	SPI > 2	Humidity extreme
2	1 < SPI < 2	High humidity
3	0 < SPI < 1	Moderate humidity
4	-1 < SPI < 0	Moderate drought
5	-2 < SPI < -1	With drought
6	SPI < -2	Extreme drought

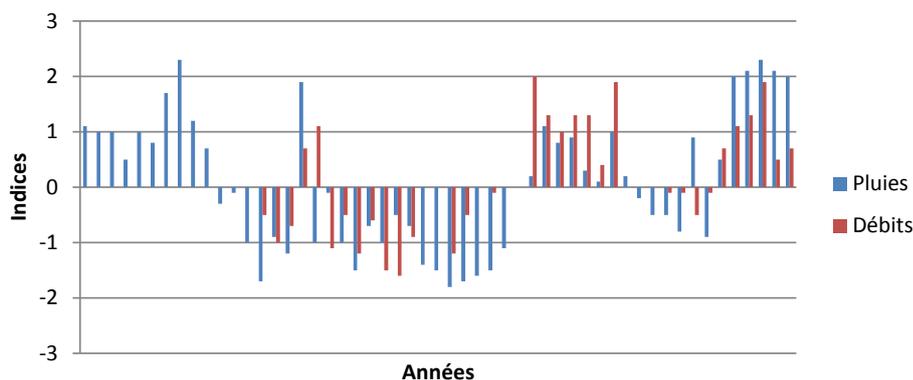


Figure 2. Indices of rainfall and hydrometric 1960-2013.

Table 2. Results of tests applied to breaking rainfall and hydrometric data.

	Tests breaks	Year average or break	Period before the first break (mm)	Average speed after the first break (mm)	Average speed after the second break (mm)
Rainfall (1960-2012)	Lee e and Heghinian	1969	1405	1117	
	Pettitt	1969	1405	1117	
	Segmentation Hubert	[1960-1969] [1970-1991] [1992-2012]	1405	1034	1263
Hydrometry (1972-2012)	Lee and Heghinian	1988	27	59	
	Pettitt	1992	31	75	
	Segmentation Hubert	[1992-2012] [1993-2012]	31	75	

1969 and another in 1992 in line with the indices previously observed. Ndam *et al.* (2016) in their study of the Sanaga and Mfochivé (2011) on the catchment area of So'o, observed rainfall ruptures between the years 1968 and 1970. This is also the case Kpoumié and al. (2009) on the Sangha basin. This breakdown shows that the catchment area of Kadey fits well in general changes in rainfall patterns observed in the late 1960s in Central Africa in general and in the Congo Basin in particular.

Breaks tests applied to hydrometric data (**Table 2**) confirmed a single break on the two observed from rainfall indices. That of Lee and Heghinian detected a break in 1988 while those of Pettitt and Hubert confirmed that of 1992. After the breaks as well as gauging rainfall observed in 1969 by Lebel and Vischel (2005); Servat *et al.* (1995); Goula *et al.* (2006) and by Mahe *et al.* (2000) in 1991, the 1988 break seems specific to data quality and tests used. On three tests applied, that of Lee and Heghinian is the only to detect.

3.3. Variability of Recurrence Rains around Breaks

The annual rainfall totals are, in general, the more important they are rare (**Figure 3**). So we can see that before the break of 1970, annual rainfall less than 1350 mm showed a recurrence of at least 1 time every 5 years (**Figure 3(a)**). Beyond this value, precisely from 1420 mm, annual totals have long return periods (20 years) to very long (100 years). During the period 1970-1992, for the same return periods, annual rainfall has significantly decreased accumulation (**Figure 3(b)**). This is the case when there is a return of 3-year period before 1970. At this level, the cumulative rainfall of 1300 mm became centennial.

In short, we can say that the climate change that has occurred during the 1970s has had the impact of a variation of the recurrence of rainfall annually until 1992 on the whole basin. However, at the beginning of the 90s and especially after 1992, it is noted that the recurrence of annual rainfall has shifted to the behavior observed during the decade 60 (**Figure 3(c)**). This new trend reflects a rainfall recovery that seems to break the long “drought” highlighted by many authors [20] [22]-[25].

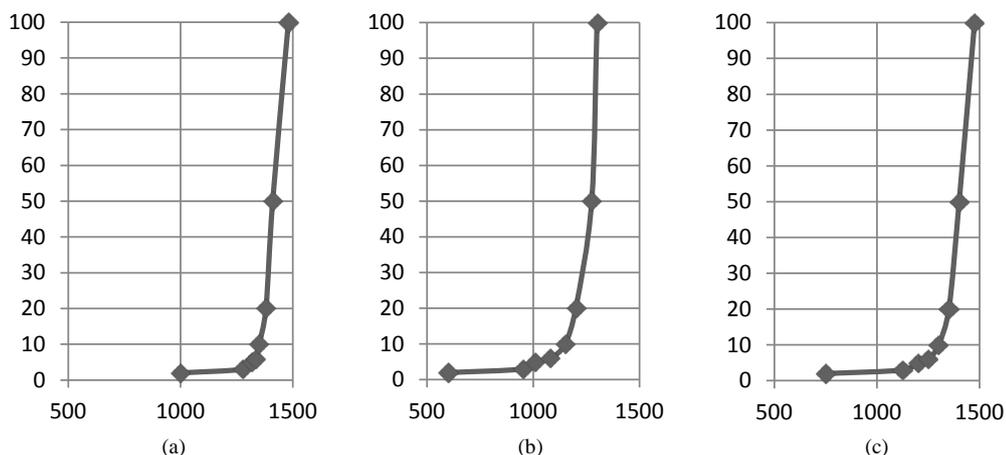


Figure 3. Impact of disruptions on the recurrence of rainfall annual rainfall; (a) period of 1960-1969, (b) 1970 to 1991 period and (c) period of 1992-2013.

3.4. Extent of Drought

1) SPI and ranges of values meaning

Fluctuating hydro data observed on the Kadey basin materialized by alternating wet and dry years as shown by the evolution of SPI indices. In this way, on the basis of these indices expressed by rainfall data for the study period (1960-2013), 25% of years of observation have suffered a moderate drought and only 11% correspond to a severe drought plan. In contrast, we note that over the same period, 47% of years running under a moderate moisture regime and the remaining 17% correspond to a moisture content ranging from high to extreme (**Table 3**). On the pelvis, SPI expressed from flows are characteristic of a “drought” (42%) from high (15%) to moderate (27%). The 58% of the remaining years undergoes moisture to varying degrees (**Table 3**).

Out of all the two hydroclimatical parameters, the “drought” has a generally moderate nature. However, a considerable number of years have suffered very heavy periods “drought”, this number also appears higher for the flow.

2) Deficit (or excess) rainfall and hydrometric

Observations, we note: before 1970, the average annual rainfall is 1477 mm. It increased to 1 268 mm between 1970 and 1992. This corresponds to a deficit of about 14% which is in the same range as that observed elsewhere in the other basins in South Cameroon [26]-[30]. After 1992, the trend has shifted to an excess of about 18, 5% until 2008 and 20% in 2012. In contrast to rainfall, hydrometric series is truncated because it starts in 1972 and ends more or less between 2004 and 2005.

A break is observed in 1990 by the test Lee, but this is not confirmed by the two other rather that hold 1992 agreement with the rainfall. This rupture generated a gain of over 108% runoff. We can therefore infer that excess rainfall for 18, 5% - 20% or about 19%, you get a 108% surge in flows is 5, 5 times the rainfall surplus (**Table 4**). Everything resulting nonlinearity between rain and flow in the watershed Kadey as is the case in Equatorial area general and Southern Cameroon in particular [29]-[31].

4. Conclusions

The main purpose of this study was to better explain and understand climate variability to better assess its impact on surface runoff. Indeed, from 1960 to 2012, the climatic variability on watershed Kadey was characterized by two major breaks rainfall occurred in 1969 and 1992. The first break, characteristic of a scheme deficit has caused the loss of rainfall order of 14% and a scarcity of annual rains becoming stronger. The second rupture generated excess rainfall nearly 19% and an increase in the recurrence of heavy rains, reflecting a return to surplus trend. The hydrological response to this rainfall amount is over 100%. In terms of number of years, drought nevertheless has a moderate nature. The present work is to highlight the non-linearity of the relationship between rainfall and flow in the equatorial areas.

In a medium- and maybe even in the short term, a more detailed analysis of the contribution of underground tanks with flow production process will better understand this relationship.

Table 3. Extent of drought (and moisture) between 1960-2013.

Variables	SPI ranges	Interpretation	% Years
Rainfall (1960-2013)	SPI > 2	Humidity extreme	4
	1 < SPI < 2	High humidity	13
	0 < SPI < 1	Moderate humidity	47
	-1 < SPI < 0	Moderate drought	25
	-2 < SPI < -1	With drought	11
Hydrometry (1972-2013)	SPI > 2	Humidity extreme	5
	1 < SPI < 2	High humidity	29
	0 < SPI < 1	Moderate humidity	24
	-1 < SPI < 0	Moderate drought	27
	-2 < SPI < -1	With drought	15

Table 4. Deficits (excess) rainfall and hydrometric around breaking years.

	Average or break year period	Before the first break (mm)	Average speed after the first break (mm)	Average speed after the second break (mm)	Deficit/surplus (%)
Rainfall (1960-2013)	1969	1405	1117		-20%
	1969	1405	1117		-20%
	[1960-1969]	1405			
	[1970-1991]		1034		-26%
	[1992-2013]			1263	+22%
Hydrometry (1972-2013)	1988	27	59		+118%
	1992	31	75		+141%
	[1972-1992]	31			
	[1993-2013]		75		+141%

Acknowledgements

We thank the Hydrologic Research Centre and the National Meteorology Direction respectively for the flow and rainfall data used in this work. We thank Mireille Zebza, Christelle Djomo and Mfochivé Oumarou for excellent research assistance, and Raïssa Dorette Matchonga, Levy Maxime and Bouelet Sandrine Isabelle for useful discussions. All authors contributed to the statistical analysis, drafting and critical review of the manuscript. The authors declare no competing financial interests.

References

- [1] Mahé, G., Olivry, J.-C., Dessouassi, R., Orange, D., Bamba, F. and Servat, E. (2000) Relation eaux de surface—Eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **330**, 689-692. [http://dx.doi.org/10.1016/s1251-8050\(00\)00188-9](http://dx.doi.org/10.1016/s1251-8050(00)00188-9)
- [2] Sighomnou, D., Sigha Nkamdjou, L., Liéno, G., Dezetter, A., Mahé, G., Servat, E., Patrel, J.E., Olivry, J.C., Tchoua, F. and Ekodeck, G.E. (2007) Impacts des fluctuations climatiques sur le régime des écoulements du fleuve Sanaga au Cameroun, perspectives pour le XXIème siècle. In: Mahé, G., Ed., *Climatic and Anthropogenic Impacts on the Variability of Water Resources*, Technical Document in Hydrology 80, Paris, UNESCO, 173-182.
- [3] Bricquet, J.P., Bamba, F., Mahé, G., Toure, M. and Olivry, J.C. (1996) Evolution récente des ressources en eau de

- l'Afrique atlantique. *Revue des Sciences de l'Eau*, **3**, 321-337.
- [4] Paturel, J.E., Servat, E., Kouame, B., Lubes-Niel, H., Fritsch, J.M. and Masson, J.M. (1997) Manifestation d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *IASH*, **240**, 21-30.
- [5] Diello, P., Paturel, J.E., Mahé, G., Barbier, B., Karambiri, H. and Servat, E. (2006) Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'Ouest. In: Demuth, S., Gustard, A., Planos, E., Scatena, F. and Servat, E., Eds., *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts*, IAHS Publ. 308, Wallingford, 691-697.
- [6] Leduc, C., Favreau, G. and Schroeter, P. (2001) Long-Term Rise in a Sahelian Water-Table: The Continental Terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology*, **243**, 43-54. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00403-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00403-0)
- [7] Favreau, G., Leduc, C., Marlin, C. and Guero, A. (2002) Une dépression piézométrique naturelle en hausse au Sahel (Sud-Ouest du Niger). *Comptes Rendus Geoscience*, **334**, 395-401. [http://dx.doi.org/10.1016/S1631-0713\(02\)01763-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1631-0713(02)01763-7)
- [8] Ndam Ngoupayou, J.R., Braun, J.J., Meybeck, M. and Bedimo Bedimo, J.P. (1998) Réactualisation des données hydroclimatologiques des bassins fluviaux de la Sanaga et du Nyong (Sud Cameroun). In: Vicat and Bilong, Eds., *Collect. GEOCAM, 2/1999*, Presses Universitaires de Yaoundé, 51-64.
- [9] PU-AMI (2014).
- [10] Sigha-Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Liéno, G., Ndam Ngoupayou, J.R., Bello, M., Kamgang, G.R., Ekodeck, G.E., Ouafou Mendo, M.R., Patural, J.E. and Servat, E. (2005) Impacts des modifications climatiques et anthropiques sur les flux de matières de quelques bassins fluviaux du Cameroun. In: Horowitz, A.J. and Walling, D.E., Eds., *Sediment Budgets 2*. IAHS Publication 292, IAHS Press, Wallingford, 291-298.
- [11] Liéno, G., Mahé, G., Paturel, J.E., Servat, E., Ekodeck, G.E. and Tchoua, F. (2009) Variabilité climatique et transport de matières en suspension sur le bassin versant de Mayo-Tsanaga (Extrême-Nord Cameroun). *Sécheresse*, **20**, 1-6.
- [12] Kouakou, K.E. Goula, B.T.A. and Savane, I. (2007) Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide: cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte D'ivoire—Burkina Faso). *Euro. Journal of Sciences Research*, **16**, 31-43.
- [13] Lebel, T. and Vischel, T. (2005) Climat et cycle de l'eau en zone tropicale: Un problème d'échelle. *Comptes Rendus Geoscience*, **337**, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.08.011>
- [14] Kpoumié, A., Ndam Ngoupayou, J.R., Rusu, E., Sfica, L., Ichm, P. and Ekodeck, G.E. (2012) Spatiotemporal Evolution of Rainfall Regimes in the Sanaga Basin-Cameroon in Deficit Context. *Present Environment and Sustainable Development Journal*, **6**, 55-68. <http://pesd.ro/article/nr.6/2/06SEORRITSBCIADC151020125568.pdf>
- [15] Bélélé (2007) Etudes piézométriques et caractérisation physico-chimiques des nappes en zone de socle cristallin: Cas du bassin versant de la Djadombé à Bertoua (Est-Cameroun), Mém. DEA, Université de Yaoundé 1, 87 p.
- [16] Ndam Ngoupayou, J.R., Dzana, J.G., Kpoumie, A., Tanwi Ghogomu, R., Fouepe Takounjou, A., Braun, J.J. and Ekodeck, G.E. (2016) Present-Day Sediment Dynamics of the Sanaga Catchment (Cameroun): From the Total Suspended Sediment (TSS) to Erosion Balance. *Hydrological Sciences Journal*. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.968572>
- [17] Wu, H., Hayes, M.J., Wilhite, D.A. and Svoboda, M.D. (2005) The Effect of the Length of Record on the Standardized Precipitation Index Calculation. *International Journal of Climatology*, **25**, 505-520. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1142>
- [18] L'Hôte, Y., Mahé, G., Some, B. and Triboule, J.P. (2002) Analysis of a Sahelian Annual Rainfall Index from 1896 to 2000; The Drought Continues. *Journal of Hydrology*, **47**, 563-572. <http://dx.doi.org/10.1080/02626660209492960>
- [19] Goula, B.T., Brou, K., Brou, T., Savané, I., Vamoryba, F. and Bernard, S. (2007) Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale: cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois lognormale et de Gumbel. *Hydrological Sciences Journal*, **52**, 49-67. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.1.49>
- [20] Braun, J.J., Bedimo Bedimo, J.P., Robain, H., Nyeck, B., Ndam Ngoupayou, J.R., Viers, J., Dupré, B., Olivie-lauquet, G., Yene Atangana, Q. and Tankeu, A. (1998) Fonctionnement des écosystèmes tropicaux humides: Influences sur les ressources hydriques et la qualité des eaux, exemple du bassin fluvial du Nyong (Sud-Cameroun). In: Vicat, J.P. and Bilong, P., Eds., *Collection GEOCAM*, Presses Universitaires de Yaoundé, 23-40.
- [21] Wotling, G., Mahé, G., L'Hôte, Y. and Le Barbé, L. (1995) Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine. *Veille Climatique Satellitaire*; Ed. ORSTOM, Météo-France, No. 52, 58-73.
- [22] Kamagaté, B. (2006) Fonctionnement hydrologique et origines des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin: Bassin versant de la Donga (Haute Vallée de l'Ouémé). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier.
- [23] Lebel, T. and Vischel, T. (2005) Climat et cycle de l'eau en zone tropicale: Un problème d'échelle. *Comptes Rendus Geoscience*, **337**, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.08.011>
- [24] Mahé G. and Olivry J.C. (1995) Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de

1951 à 1989. *Sécheresse*, **6**, 109-117.

- [25] Kalnay, E., Kanamitsu, M. and Kistler, R. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-471.
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- [26] Matsindjou Djoumessi, V. (2004) Etude des caractéristiques physico-chimiques et piézométrie des nappes de la région d'Abong-Mbang, Mémoire de DEA, Université de Yaoundé I, Cameroun, 66 p.
- [27] Servat, E., Paturol, J.E., Brou, K. and Boyer J.F. (1995) Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne: Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, **6**, 95-102.
- [28] Savané, I., Kapo, C. and Gion, P. (2001) Variabilité climatiques et ressources en eau souterraine dans la région semi montagneuse de Man. *Sécheresse*, **12**, 232-237.
- [29] Zebsa, M., Kouassy Kalédjé, P.S., Ndam Ngoupayou, J.R. and Mvondo Ondoua, J. (2014) Exploitations minières dans la région de l'Est-Cameroun: Facteurs de changements climatiques et risques d'insécurité alimentaire (cas spécifique de l'exploitation de l'or à Batouri), Actes du 1^{er} Coll. Inter. Pluridisciplinaires de l'IUCSJD, 8-10 Janv 2014, Douala, Cameroun.
- [30] Ndam Ngoupayou, J.R., Boeglin, J.-L., Bedimo Bedimo, J.P., Braun, J.-J., Amanabenogo, A. and Bineli, E.E. (2008) Influence of Climatic Variability and Anthropic Activities on the Water Resource of the Nyong Forestry Watershed in South Cameroon, in AMMA. *3rd International Conference*, Ouagadougou, 20-24 July 2008, 516-517.
- [31] Sigha, N.L., Sighomnou, D. and Bedimo Bedimo, J.P. (1998) Variabilité des régimes hydrologiques des cours d'eau de la bande méridionale du plateau sud-Camerounais. Publication AISH. No. 252-222.



The Catchment Area of Kadey in East-Cameroon: Assessment of Arsenic Contamination in Deep Groundwater Resources

Kouassy Kalédjé PS^{1,2*}, Ndam Noupayou JR¹, Djomou Djomga PN³ and Mvondo Ondoua J¹

¹Laboratory of Engineering Geology and Alterology, Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaounde 1, PO Box: 812, Yaounde, Cameroon

²Department of Mining and Geological, Sub-Regional Bilingual University of Mining, Sciences, Technology, Management and Professional Training, PO Box: 863, Yaounde, Cameroon

³Laboratory of Material and Inorganic Industrial Chemistry, Department of Applied Chemistry, National School of Agro-Industrial Sciences (ENSAI), University of Ngaoundéré, PO Box: 455 Ngaoundere, Cameroon

Abstract

This present study, in general, was carried out to assess arsenic in deep groundwater resources in the catchment area of Kadey, East-Cameroon and to predict arsenic mobilization process in relation to copper (indicatives aspects), iron, manganese, pH and ORP. Seventy-two (72) deep groundwater samples were collected during twenty four months between January 2014 and December 2015. The depths of the wells were ranged from 7 to 34 m. In year 2014 and year 2015, arsenic concentration in 17% and 26% of examined groundwater wells, respectively exceeded permissible World Health Organization (WHO) guideline value of 0.010 mg/L for drinking water. The concentrations of arsenic were in the range between <0.003 to 0.137 mg/L. The study demonstrated elevated concentrations of iron and manganese in the groundwater. Arsenic is highly correlated with iron and manganese in the first time and in the second time, arsenic is medium correlated with copper. The strong negative correlation between arsenic and ORP indicates that arsenic mobilization occurs under reducing condition. These distinct relationships indicate that arsenic release is considered to be affected by the reductive dissolution of Fe/Mn oxides in the groundwater. Arsenic has very weak negative correlation with pH suggesting less effect of pH on arsenic mobilization. Arsenic is not significantly correlated with the season which infers similar distribution of arsenic in both seasons. Arsenic varies spatially in groundwater of the valley showing high concentrations in central groundwater district.

Keywords: Deep groundwater; Reductive dissolution; Arsenic; Catchment area of Kadey; WHO

Introduction

Today, heavy metal contamination of groundwater is one of the major problems in the world. The heavy metals that occur as natural contaminants of groundwater and are potentially bio-hazardous include manganese (Mn), lead (Pb), cadmium (Cd), mercury (Hg), cyanide (Cn) and arsenic (As) [1,2]. Like cyanide and mercury, arsenic is recognized as a toxic element and has been classified as a human carcinogen affecting skin and lungs [3]. Arsenic has strong toxicity at even low concentrations and can accumulate in body tissues over long periods of time and is nonessential for human health [4,5]. So, elevated levels of arsenic constitute problems for water supplies around the world [6]. In recent past years, the occurrence of high concentrations of arsenic has been detected in groundwater from a number of regions across the world. The problem has increased greatly in recent years in several regions of Africa. In those regions, countries affected with arsenic in groundwater include South Africa, several states of Nigeria (Kano, Adamawa, Taraba, Oyo, Delta Imo Lagos and Edo), Chad, Central Africa Republic, Gabon and Cameroon (East and South regions) [7,8].

The demand for water is increasing due to rapid growth of urban population and industrial activities (mining exploration; mining extraction and treatment of precious stones) in the Kadey catchment. There is a high decadal population growth rate found in Kadey district i.e., 57.19% [9]. As a result there is an immense pressure on groundwater resources in the catchment. Groundwater was first exploited for water supply in 1990 in the catchment. Mechanized extraction of groundwater resources began in 2005 with the implantation of Non-Governmental Organizations (NGOs). Groundwater is an important water resource in the Kadey catchment. It contributes about 57% of the total water supply in the catchment [10]. In dry season, 67% to 74% of the water supply is met by ground water [11].

There have not been several studies of assessment of arsenic in groundwater of Cameroon in general and specially in groundwater of the Kadey catchment. Groundwater survey of the catchment reported the presence of arsenic and the concentrations were below World Health Organization (1993) guideline values [12]. Similar study revealed that the ground water resource in the Delta state of Nigeria is contaminated with arsenic in deep aquifers [13]. Likewise, other studies have reported elevated levels of arsenic in groundwater of Bouar and Mbaïki (Central Africa Republic) [14]. With the mercury and cyanide, arsenic in groundwater wells in the Kadey catchment is one of the major environmental issues due to its negative health impact and more than 55% of water supply in the area is derived from groundwater resources. So, this paper presents an overall study on the occurrence, mobilization and distribution of arsenic in deep groundwater resources in the catchment. The study attempted to visualize spatial distribution pattern of arsenic in Kadey catchment groundwater in GIS environment. The study also aimed to demonstrate temporal (seasonal) variation of arsenic. The possible relationship between arsenic and depth of the groundwater was also examined.

***Corresponding author:** Kouassy Kalédjé PS, Laboratory of Engineering Geology and Alterology, Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaounde 1, PO Box: 812 Yaounde, Cameroon, Department of Mining and Geological, Sub-Regional Bilingual University of Mining, Sciences, Technology, Management and Professional Training, PO Box: 863 Yaounde, Cameroon, Tel: +237699095620; E-mail: kkaledje@yahoo.fr

Received April 09, 2016; **Accepted** June 29, 2016; **Published** July 04, 2016

Citation: Kalédjé PSK, Noupayou JRN, Djomga PND, Ondoua JM (2016) The Catchment Area of Kadey in East-Cameroon: Assessment of Arsenic Contamination in Deep Groundwater Resources. J Geol Geophys 5: 250. doi:[10.4172/2381-8719.1000250](https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000250)

Copyright: © 2016 Kalédjé PSK, et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Materials and Methods

Study area

The Kadey catchment area (2 647 km²) is located in Eastern Cameroon, between longitudes 14°29'E and 14°45'E and the latitudes 4°12'N and 4°36'N (Figure 1). The basin is located in the equatorial climate transition upstream from the part of the basin located south of the Sanaga. As for the entire Congo Basin, annual average rainfall is 1 428.9 mm between 1960s and 2015s. The rainfall pattern has four seasons marking the equatorial influence. The distribution of seasons varies following stations (Bertoua; Abong-Mbang; Batouri and Meiganga). However, the aspect “camel’s back” characterizes all stations of the Sangha Basin, with two maxima and two minima well marked, the second maxima always been the most powerful. The highest temperatures are observed between March and April and are respectively 25.4°C Batouri, 25.9°C Dem and 26°C to Bertoua [15]. In terms of the lowest temperatures, they correspond to the months of July and August, with 23°C in Batouri, Bertoua 23.4°C and 23.9°C to Dem (Figure 2). The hydrographic network of the basin narrows upstream downstream. The relief consists of upstream basin plateaus, plains in the middle and downstream lowlands whose altitude varies between 600 m and average 880 m. However, there are isolated ancient massifs whose peaks reach around 927 m (Figure 1). The geology of the catchment area consists of base for the most part [15]. The population is predominantly rural and relatively dense. The main economic activity remains artisanal gold mining although agriculture remains the main activity in the whole of Congo.

Water sampling and analysis

The study was carried out in 72 deep groundwater wells, six points in the Kadey river and two sources during the years 2014 and 2015 (Figure 3). The study covered the groundwater wells of 7 to 34 m depth. The geo-positions of groundwater sampling locations were determined using global positioning system (GPS). Random sampling technique was used to collect groundwater samples. The locations of all the samples were recorded by handheld Garmin-E GPS and referenced to WGS 84 coordinate system. The high density polyethylene (HDPE) sampling bottles were treated with 5% HNO and then rinsed with double distilled water. Samples from wells were collected by using 500-mL Nalgene (UK) HDPE bottles. A set of samples were collected in sampling bottles after pumping water for five minutes to get the representative samples of groundwater wells. The bottles were labeled with the sample code number. These samples were preserved as per APHA-AWWA-WEF [13] and then brought to the laboratory for the analysis. The samples were kept at 4°C prior to analysis. Oxidation reduction potential (ORP), electrical conductivity (EC), pH and temperature were measured *in situ* at each sampling locations. The ORP and pH were measured by Hanna HI 8314 pH/ORP meter (Italy). The EC was measured by Jenway 4200 conductivity meter (UK).

The analysis of total arsenic, total iron, total manganese, total copper and total lead were carried out in Tanzania standard (NS) certified-CEMAT Water Laboratory by using Varian AA 240 atomic absorption spectrometer (AAS). The analysis of arsenic was carried out using Varian AA 240 atomic absorption spectrometer (Nigeria) with vapor generation accessory VGA-77 (Nigeria). The standard solutions produced by Merck, Germany traceable to standard reference material (SRM) of NIST (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA) were used to prepare calibration standards.

The samples for the analysis of arsenic, iron and manganese were digested with high purity HNO₃ (Merck) within a week of sample collection as per APHA-AWWA-WEF (2005). Sample digestion with the HNO₃ allows total extraction of the metals from the samples. Three replications of each analysis were performed and mean values were used for calculations. Analytical reagent blanks were prepared for each batch of the digestion set and then analyzed for the same elements as the samples. Analytical precision was in good agreement, generally better than 5% RSD. SPSS version 18 was used for all statistical analyses.

Today, Cameroon adopted universal transverse mercator (UTM) projection for the base mapping of the country with some modifications suited to its shape. This is named as modified universal transverse mercator projection. So, all the spatial data layers were maintained in a standard Cameroonian coordinate system of modified universal transverse mercator, central meridian 84° longitude (i.e., MUTM 84). The software used for mapping and spatial analysis was ArcGIS version 9.3.

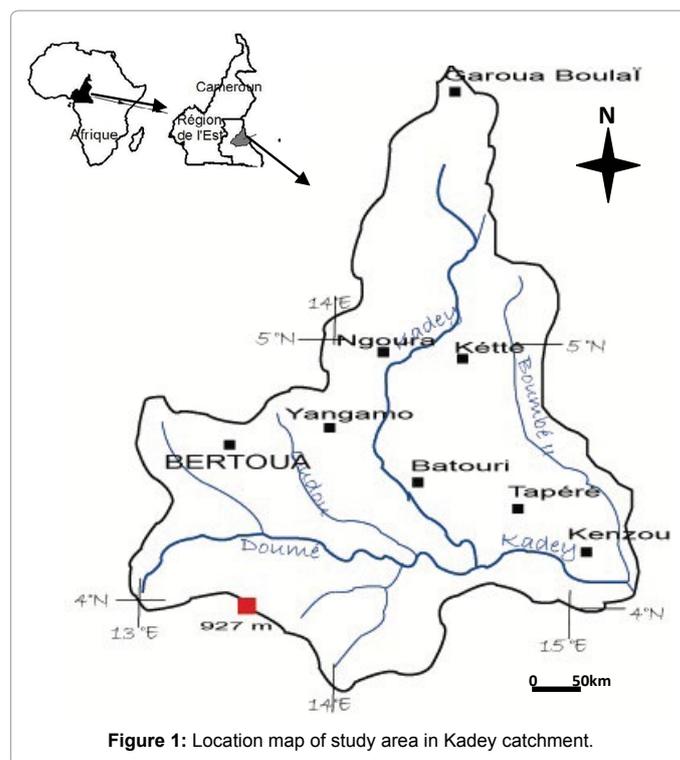


Figure 1: Location map of study area in Kadey catchment.

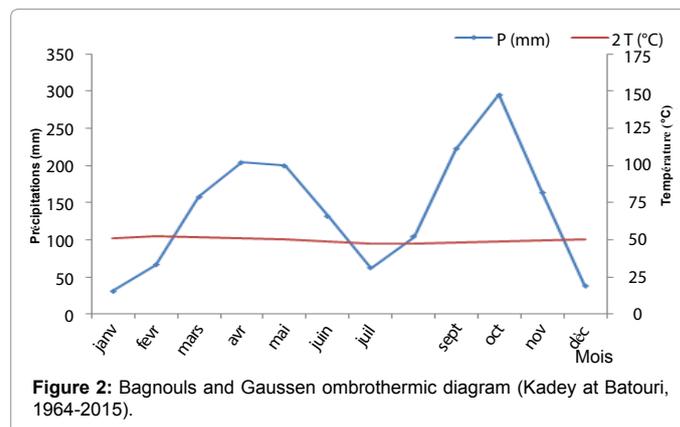


Figure 2: Bagnouls and Gausson ombrothermic diagram (Kadey at Batouri, 1964-2015).

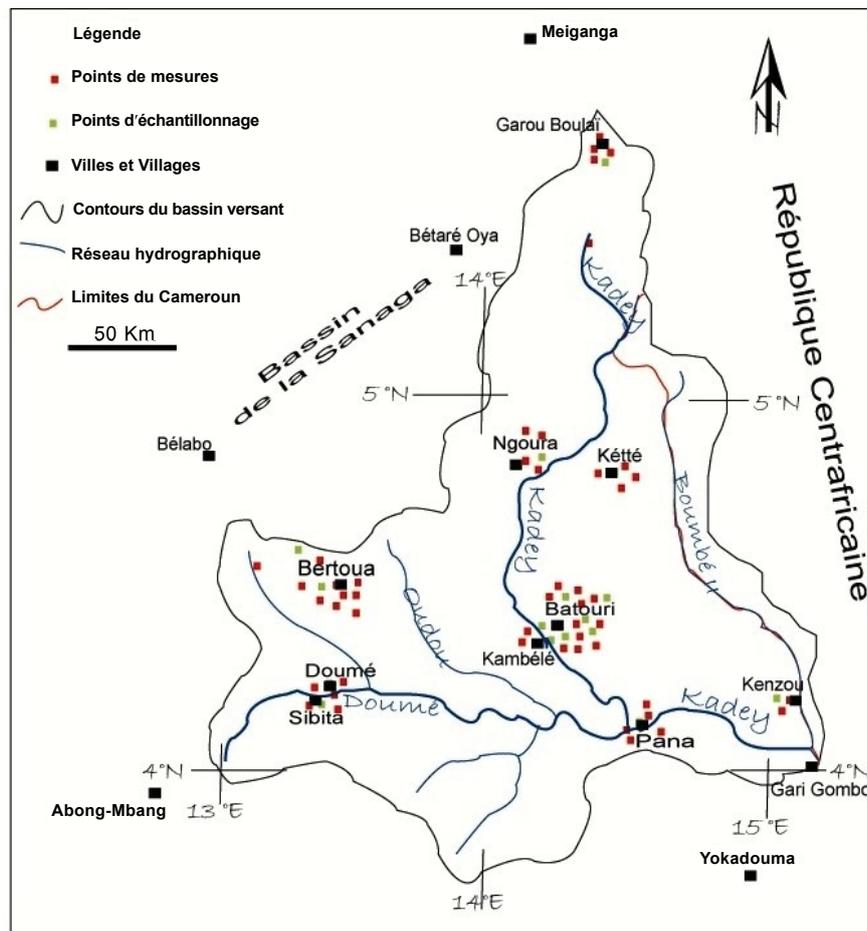


Figure 3: Sampling locations map.

Variable	Unit	Year 2014					Year 2015				
		Min.	Max.	Mean	Med.	SD	Min.	Max.	Mean	Med.	SD
PH		5.4	6.4	5.7	5.6	0.5	5.2	6.4	5.6	5.4	0.5
EC	$\mu\text{S/cm}$	92	1715	567	452	381	93	1665	567	456	379
ORP	mV	-161	134	-59	-76	68	-120	135	-49	-56	55
Depth	m	7	34	13	17	57	7	34	13	17	57
As	mg/L	BDL	0.137	0.011	0.003	0.024	BDL	0.131	0.013	0.005	0.023
Fe	mg/L	BDL	11.09	3.61	2.88	2.88	0.1	12.99	3.76	2.79	2.87
Mn	mg/L	BDL	1.55	0.44	0.37	0.35	BDL	1.75	0.42	0.31	0.4

Min. = Minimum; Max. = Maximum; Med. = Median; SD = Standard Déviation; BDL = Below Detection Limit.

Table 1: Summary of statistical data for physicochemical parameters and metals.

Results and Discussion

Physicochemical parameters and metals

In the Table 1, we have presented the synthesis of values of pH, EC, ORP and the concentrations of metals in the groundwater wells. All the pH was acid and ranged from 5.4 to 6.4. The EC ranged from 92 to 1715 $\mu\text{S/cm}$ (mean = 567 $\mu\text{S/cm}$), 93 to 1666 $\mu\text{S/cm}$ (mean = 565 $\mu\text{S/cm}$) in pre monsoon and post monsoon, respectively. The elevated EC value is mainly due to geological sources since groundwater contamination is less in deep aquifers due to presence of widespread thick lacustrine clay beds that significantly restrict downward percolation [16] and leaching of ions contributing conductivity would be limited.

The mean values for ORP in the groundwater wells were -59 mV in pre monsoon and -49 mV in post monsoon. The negative ORP value was up to -161 mV indicates that the groundwater wells are under reducing condition. A study reported negative ORP value up to -195 mV in deep groundwater [14]. Likewise, another study indicated low ORP value in deep groundwater with mean value of -82 mV in pre monsoon and -56 mV in monsoon [17]. The groundwater wells in the study area are relatively anoxic, as indicated by low ORP values. The dominance of thick lacustrine clay probably restricts the downward diffusion of oxidants such as oxygen in deep groundwater [16].

The mean iron concentration in deep groundwater wells were 3.61 mg/L in pre monsoon and 3.76 mg/L in post monsoon with the highest

concentration of 12.99 mg/L in post monsoon. Iron oxides dissolve under strongly acidic and reducing environment. If present in water in excessive amounts, it forms red Fe oxyhydroxide. Reductive dissolution of Fe (III) oxides accounts for the high Fe (II) content in anaerobic water [17,18]. The chemical composition of the major elements of the sediments, i.e., Fe₂O₃ ranged from 1.48 to 9.55 wt% [12] could be the source of iron in groundwater of the valley. A similar study indicated the Fe₂O₃ contents of the sediments are generally high (ranges < 0.5 to 15 wt%), and are uniformly higher in the fine sediments of the central basin (average 7 wt%) [8]. The overall bulk elemental concentrations in the central basin are greater in comparison with the northern part. The total iron content in the black sticky clay is high (>7 wt%) [19]. The variation in Fe₂O₃% and redox state of groundwater might have affected the levels of iron concentration in the groundwater.

Manganese concentration ranged from <0.02 to 1.55 mg/L (mean = 0.44 mg/L) in pre monsoon, whereas <0.02 to 1.75 mg/L (mean = 0.42 mg/L) in post monsoon. The chemical composition of the major element of the sediments, i.e., MnO from 0.01 to 0.18 wt% [20] is probable source of manganese in the groundwater of the valley. In the study area, arsenic concentration in the groundwater wells ranged from < 0.003 to 0.137 mg/L (mean = 0.013 mg/L) in pre monsoon and <0.003 to 0.131 mg/L (mean = 0.011 mg/L) in post monsoon. Arsenic concentration in 17% in pre monsoon and 26% in post monsoon exceeded provisional World Health Organization guideline value for drinking water of 0.010 mg/L [17]. A similar study reported arsenic concentration up to 0.265 mg/L [13]. Iron oxyhydroxides are the common host matter for arsenic, either adsorbed into the surface or co-precipitated [14] and reductive process is responsible for arsenic mobilization by dissolution or desorption in the groundwater [15,19], so it is possible that the higher concentration of arsenic in the groundwater is due to the more reducing environment as indicated by lower ORP value. Likewise, under the aerobic and acidic to near neutral conditions typical of many natural environments, arsenic is strongly adsorbed by oxide minerals as the arsenate ion and the concentrations in solution are low [20].

The groundwater wells observed elevated concentrations of iron and manganese. It is observed that the concentrations of iron and manganese are pH dependent and higher aggressiveness of iron and manganese in low pH [11]. Likewise, it is suggested that presence of a reductant (such as organic carbon) is a dominant factor controlling iron and manganese concentrations in groundwater. The oxidation of the reductant would leads to the reduction and solubilisation of iron and manganese [20] and the lacustrine clay in the Kadey catchment area is rich in organic matter [13] would contribute to the reducing environment. The organic matter may play an important role in the mobilization of arsenic, as reported by many studies from West Bengal (India) many states in Nigeria and Central Africa Republic [5,14,15]. It has been indicated that the fluvio-lacustrine sediments in the Catchment are rich in organic matter, and this organic matter may contribute in mobilization of arsenic.

Correlation between physicochemical parameters and arsenic

All the relationships of pH, EC, ORP and metals in the groundwater were examined by Spearman's rank correlation coefficient (Table 1).

The pH has strong negative correlations with iron and manganese, and weak negative correlation with arsenic ($r = -0.534$, $p < 0.01$; $r = -0.402$, $p < 0.01$; $r = -0.169$, $p < 0.129$) which can be explained by the higher aggressiveness of acidic media towards soil and host rocks that increase the concentrations of the rest of the ions [11]. Though arsenic

has negative correlation, p -value suggests that there is an insignificant negative correlation between arsenic concentration and pH in the groundwater.

The EC shows strong positive correlations (at $p < 0.01$) with iron, manganese and arsenic. Arsenic has strong positive correlations with iron and manganese ($r = 0.384$, $p < 0.01$; $r = 0.447$, $p < 0.01$), which is attributed to common geogenic origin of these metals.

The ORP has strong negative correlation with arsenic ($r = -0.492$, $p < 0.01$), which can be explained by reductive arsenic mobilization mechanisms in the groundwater. Likewise, ORP also shows negative correlations with iron and manganese. Reducing environment is responsible for the release of iron as well as manganese through the reduction of Mn (III, IV) hydroxides to soluble Mn (II) and of Fe (III) hydroxides to soluble Fe (II), respectively.

Correlation between arsenic and depth of groundwater

The depth of the deep groundwater wells tested arsenic ranged from 84 to 304 m. The mean and standard deviation (SD) of depth were 222.0 m and 63.4 m respectively (Table 2). The study showed weak positive correlations between arsenic and depth of groundwater in pre monsoon and post monsoon ($r = 0.206$, $p = 0.196$; $r = 0.178$, $p = 0.266$), respectively. Though, it showed positive correlations in both seasons, p -values suggest that there are insignificant positive correlations between arsenic concentration and depth of groundwater. However, it contradicts with the results shown by the some previous studies [13,15].

Temporal (seasonal) variation of arsenic

The temporal (seasonal) variation of the physicochemical parameters and metals were evaluated through season-parameter Spearman's correlation matrix in the groundwater. The measured parameters are not significantly ($p > 0.05$) correlated with the season except for pH ($r = -0.238$, $p < 0.05$), which infers similar distribution of arsenic in both seasons. Arsenic concentrations were insignificantly varied between seasonal groundwater. A study also reported very similar distributions of arsenic for pre monsoon and monsoon [15].

The lack of temporal (seasonal) variation is attributed to less dilution effect of monsoon rainfall in the groundwater. Additionally, contribution of anthropogenic metal contaminations is reluctant in the studied time-series in the groundwater wells. These findings are consistent with the results of previous study which pointed out seasonal variability has no significant effect on deep groundwater quality [17]. The similar studies also indicated no seasonal variability of arsenic in the groundwater [15,16]. The reports on the temporal variation of arsenic concentration in other parts of the world are inconsistent. Significant variation in arsenic concentration among the seasons was observed in a study [20]. A study spotted no significant monsoonal effects on arsenic distribution [17]. The seasonal variability has little effect in the groundwater [18]. Likewise, limited temporal variability observed in arsenic concentrations in groundwater [21-23].

Parameters	As	Mn	Fe	ORP	EC	PH
As	1					
Mn	0.447*	1				
Fe	0.384*	0.656*	1			
ORP	-0.492*	-0.447*	-0.570*	1		
EC	0.463*	0.654*	0.591*	-0.664*	1	
PH	-0.169	-0.402	-0.534*	0.052	-0.332*	1

Table 2: Spearman's rank correlation coefficients of physicochemical parameters and metals.

Spatial distribution of arsenic

The concentration of arsenic, iron, manganese and ORP value vary significantly in central, northern and southern groundwater districts in the valley. The spatial distribution pattern reveals higher values of arsenic, iron and manganese in central groundwater district. Northern and southern groundwater districts have lower arsenic concentrations in most of the groundwater wells. The concentration of the arsenic in groundwater of the study area increases from northern to southern and showing highest towards central groundwater district. Arsenic concentration was relatively lower in southern groundwater district in comparison with central groundwater district. The spatial distribution of ORP in the groundwater clearly shows most of the groundwater wells have lower ORP value.

The variations of elemental concentration are mainly clay controlled in both the margin and central parts. There is progressive increase in the finer particles and trace elements towards the central part of the sediments from the northern part in the valley [21] which is attributed to decrease in grain size and the concentration of metals in sediments tend to increase in fine grained sediments [2,11,12]. The larger particles in sediments have less surface area available for metal hydroxide coatings to form and adsorb arsenic and less adsorbed arsenic contributes a smaller amount of aqueous arsenic in equilibrium with adsorbed arsenic. Therefore, there is less potential for release of arsenic through reductive mobilization mechanisms [19]. The variation in grain size has role in mobilization of metals in groundwater. Therefore, higher metal concentration is associated with the fine grained sediments in the central groundwater district. Furthermore, higher concentrations of metals in central groundwater district might be due to the fact that the central groundwater district is considered as poorly recharging due to the presence of a thick black clay layer [22].

Groundwater quality depends on the composition of recharging water, the mineralogy and reactivity of the geological formations in aquifers, anthropogenic activities and environmental conditions that may affect the geochemical mobility of certain constituents [23-25]. Arsenic concentrations in groundwater of the Kadey catchment area show a wide range and some of groundwater sources investigated were found to be in elevated levels in some parts of the basin could be due to the nature of the sediments there. The high degree of spatial variability in groundwater quality over short distances indicates that groundwater movement has been limited and is poorly mixed [24].

Arsenic concentrations in the sediments of the Kadey catchment area averaged 8 mg/kg (ranging 3 to 25 mg/kg) similar to the general level seen in modern unconsolidated sediments, typically 5 to 10 mg/kg [26,27]. The widespread lacustrine clay of the Kadey catchment area could have greater potentiality for arsenic release [28]. Arsenic mobilization is high in the reducing conditions [17,26,29]. The higher concentration of arsenic under reduced groundwater environment may be due to Fe/Mn oxides and direct reduction of As (V) into As (III). After an initial increase, arsenic concentration often decreases again as a function of time below water table due to sulfide precipitation, whereas it increases with increasing sulfate concentrations above water table [30]. Under moderately reduced environment (0 to 100 mV), arsenic solubility seemed to be controlled by the dissolution of Fe oxyhydroxides. But at highly reduced condition, e.g., at -250 mV, arsenic chemistry is dominated by the formation of insoluble sulfides FeAsS, AsS, As₂S₃ [22] attenuating concentration of arsenic in the groundwater.

Conclusion

Firstly, this study has confirmed the presence of higher levels of arsenic in deep groundwater of the Kadey catchment area. Arsenic showed wide spatial variation ranged from <0.003 to 0.137 mg/L. In pre monsoon and post monsoon, 17% and 26% of groundwater wells, respectively exceeded arsenic concentration of permissible WHO guideline value of 0.010 mg/L for drinking water. The arsenic varies spatially with high concentration towards central groundwater district. Strong negative correlation between arsenic and ORP demonstrated reductive arsenic mobilization mechanisms in deep groundwater. Arsenic showed strong correlations with iron, manganese and EC. Iron and manganese are presumably the main factors in regulating release of As in groundwater through reductive mobilization mechanism. Secondly, the study revealed weak positive correlation between arsenic concentration and depth of deep groundwater. Arsenic is not significantly correlated with season suggesting similar distribution of arsenic in both seasons. The high concentration of arsenic in deep groundwater of some parts of study area particularly in central groundwater district is attributed to the groundwater geochemistry of the study area. Release of arsenic into the groundwater is considered to be due to the natural source under the reductive process.

Acknowledgements

The authors would highly acknowledge Sub-Regional Bilingual University of Mining, Sciences, Technology, Yaounde-Cameroon for the support of this research work. We would like to thank First Aid – International Medical Assistance (PU-AMI).

References

1. Chapagain SK, Shrestha S, Nakamura T, Pandey VP, Kazama F (2009) Arsenic Occurrence in Ground water of Kathmandu Valley, Nepal. *Desalination and Water Treatment* 4: 248-254.
2. Garbarino JR, Hayes HC, Roth DA, Antweiler RC, Brinton TI, et al. (1995) Heavy Metals in the Mississippi River. US Geological Survey Circular 1133, Virginia.
3. IARC (2004) IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some Drinking-water Disinfectants and Contaminants, Including Arsenic. International Agency for Research on Cancer, Lyons 84.
4. Sigha-Nkamdjou L (1994) Hydrochemical functioning of forest ecosystems in Central Africa: Ngoko to Moloundou (Southeast of Cameroon) 380.
5. Marcovecchio JE, Botte SE, Freije RH (2007) In: Nolle ML (ed.) Heavy Metals, Major Metals, Trace Elements. Handbook of Water Analysis. 2nd Edition, CRC Press, London pp: 275-311.
6. Appelo CAJ, Postma D (2005) In: Balkema AA (ed.) Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd Edition, Publishers, Amsterdam.
7. Mitchell E, Frisbie S, Sarkar B (2011) Exposure to Multiple Metals from Groundwater - A Global Crisis: Geology, Climate Change, Health Effects, Testing and Mitigation. *Metallomics* 3: 874-908.
8. Hossain MF (2006) Arsenic Contamination in Bangladesh - An Overview. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113: 1-16.
9. Mukherjee A, Sengupta MK, Hossain MA, Ahamed S, Das B, et al. (2006) Arsenic Contamination in Groundwater: A Global Perspective with Emphasis on the Asian Scenario. *J Health, Popul Nutr* 24: 142-163.
10. Acres International (2004) Optimizing Water Use in Kathmandu Valley (ADB-TA) Project. Final Report. Acres International in Association with Arcadis Euroconsult Land and Water Product Management Group, East Consult (P) Ltd. and Water Asia (P) Ltd.
11. ICIMOD (2007) Kathmandu Valley Environment Outlook. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu.
12. CBS (2012) National Population and Housing Census 2011. National Report. NPHC 2011. Nepal Bureau of Statistics, Kathmandu 1.
13. JICA/ENPHO (2005) Arsenic Vulnerability in Groundwater Resources in Nigeria Delta. National Final Report II. Japan International Cooperation Agency / Environment and Public Health Organization, Nigeria.

14. Khatiwada NR, Takizawa S, Tran TVN, Inoue M (2002) Groundwater Contamination Assessment for Sustainable Water Supply in Kathmandu Valley, Nepal. *Water Science Technology* 46: 147-154.
15. Kalédjé PSK, Noupayou JRN, Kpoumié A, Takounjou AF, Ondoua JM (2016) Analysis of climate variability and its influence on the hydrological response of the catchment area of Kadey (east Cameroon). *International Journal of Geosciences* 47: 127-138.
16. Jha MG, Khadka MS, Shrestha MP, Regmi S, Bauld J, et al. (1997) The Assessment of Groundwater Pollution in Kathmandu, Nepal. Report on Joint Nepal-Australia Project, 1995-96. Australian Geological Survey Organization.
17. CBS (2013) Environment Statistics of Nigeria. Nigeria Bureau of Statistics, Lagos.
18. Shrestha SM, Rijal K, Pokhrel MR (2013) Arsenic Contamination in the Deep and Shallow Groundwater of Kathmandu Valley, Nepal. *Scientific World* 10: 25-31.
19. Shrestha SM, Rijal K, Pokhrel MR (2014) Spatial Distribution and Seasonal Variation of Arsenic in Groundwater of Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Institute of Science and Technology* 19: 7-13.
20. APHA-AWWA-WEF (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington DC.
21. Yoshida M, Igarashi Y (1984) Neogene to Quaternary Lacustrine Sediments in the Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Nepal Geological Society* 4: 73-100.
22. Shrestha SD, Karmacharya R, Rao GK (1996) Estimation of Groundwater Resources in Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Groundwater Hydrology* 38: 29-40.
23. JICA (1990) Groundwater Management Project in the Kathmandu Valley. Final Report to Nepal Water Supply Corporation. Japan International Cooperation Agency, Kathmandu.
24. Chapagain SK, Pandey VP, Shrestha S, Nakamura T, Kazama F (2010) Assessment of Deep Groundwater Quality in Kathmandu Valley Using Multivariate Statistical Techniques. *Water Air Soil Pollution* 210: 277-288.
25. Smedley PL, Kinniburgh DG (2013) In: Selinus O (ed.) Arsenic in Groundwater and the Environment. *Essential of Medical Geology* pp: 279-310.
26. Sakai T, Gajurel AP, Tabata H, Uprety BN (2001) Small Amplitude Lake-Level Fluctuations Recorded in Aggrading Deltaic of the Upper Pleistocene Thimi and Gokarna Formations, Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Nepal Geological Society* 25: 43-52.
27. Kalédjé PSK, Noupayou JRN, Kpoumié A, Takounjou AF, Ondoua JM (2016) Hydrogeology of the watershed of the river Kadey: approach of the water exchange surface area/underground continuous medium. *Journal of Water Resources and Protection*.
28. Gurung JK (2007) Geochemical Studies of Sediments and Water, and Implications for Mobilization of Arsenic into Groundwater in Nepal and Japan. Ph.D. Thesis, Shimane University, Japan.
29. Hem JD (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. 3rd Edition, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254.
30. Dixit A, Upadhyaya M (2005) Augmenting Groundwater in Kathmandu Valley: Challenges and Possibilities. Report to Nepal Water Conservation Foundation, Kathmandu, Nepal.

Citation: Kalédjé PSK, Noupayou JRN, Djomga PND, Ondoua JM (2016) The Catchment Area of Kadey in East-Cameroon: Assessment of Arsenic Contamination in Deep Groundwater Resources. *J Geol Geophys* 5: 250. doi:[10.4172/2381-8719.1000250](https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000250)

OMICS International: Publication Benefits & Features

Unique features:

- Increased global visibility of articles through worldwide distribution and indexing
- Showcasing recent research output in a timely and updated manner
- Special issues on the current trends of scientific research

Special features:

- 700+ Open Access Journals
- 50,000+ Editorial team
- Rapid review process
- Quality and quick editorial, review and publication processing
- Indexing at major indexing services
- Sharing Option: Social Networking Enabled
- Authors, Reviewers and Editors rewarded with online Scientific Credits
- Better discount for your subsequent articles

Submit your manuscript at: <http://www.omicsgroup.org/journals/submission>

Annexes II : Participation à des Colloques et Séminaires Nationaux et Internationaux

II.1. Colloque International « World Forum on Climate Justice, Changing the narrative » on the 19th – 21st June 2019, Glasgow, United Kingdom.

II.2. Colloque « Entre Géoscience et Chimie », 4ème édition, du 12 au 13 décembre 2018 à l'Université de Yaoundé I – Cameroun.

II.3. Colloque International Ressources en Eau, Environnement et Changement Climatique Sciences de l'Eau du Climat et de l'Environnement « Eau-Environnement-Climat'2018 » du 22 au 24 Octobre 2018 à Hammamet – Tunisie.

II.4. Colloquium of Geosciences Society of Cameroon Colloque de la Société Camerounaise de Géosciences (SCG) 29th - 31st March 2017, University of Douala - Cameroon.

II.5. 1st annual meeting of the International Geosciences Project 646, from 17-21 November 2015, Yaoundé – Cameroon.

II.6. Colloque International Pluridisciplinaire organisé par l'Institut Universitaire Catholique Saint Jérôme, du 08 au 10 janvier 2014 à Douala – Cameroun.



World Forum on Climate Justice

Changing the narrative



19–21 June 2019
Glasgow, UK

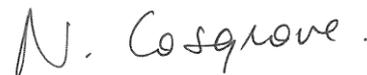
pskaledje@yahoo.fr

Certificate of Presentation

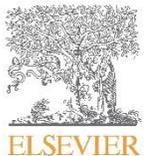
We hereby confirm that
Paulin Sainclair KOUASSY KALEDJÉ

Presented
*Analyze of the Hydro-meteorological Parameters and Historical Context
of the Post-event Survey Episode: Floods of 18 and 19 November 2016 in
Batouri (East Cameroon)*

At the World Forum on Climate Justice, 19th – 21st June, Glasgow



Nina Cosgrove
For and on behalf of Elsevier



UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTÉ DES SCIENCES

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCES

Entre Géosciences et Chimie
Fourth Edition (EGC-4)

ACCEPTATION Letter N° 015/EGC-2018

Dear Paulin Sainclair **KOUASSY KALÉDJÉ**,

Your abstract proposal, was selected for an Oral presentation during the fourth edition of *Entre Géosciences et Chimie* (EGC-4) to be held on the 12th to the 13th December 2018.

The presentation are going to take place on the 13th December and the presentation time, including questions is 20 minutes.

The organizing committee can't wait to welcome you at this event.

The president of the Organizing committee



Jean Aimé MBEY, PhD



Colloque International
Ressources en Eau, Environnement et Changement Climatique
Sciences de l'Eau du Climat et de l'Environnement
Eau-Environnement-Climat'2018
22 au 24 Octobre 2018 Hammamet (Tunisie)



Tunis le 12 Mai 2018

Invitation au Colloque Eau-Environnement-Climat'2018

Mr Paulin KALEDJÉ

Email : pskaledje@yahoo.fr

Objet : Notification d'acceptation de participation Colloque Eau-Environnement-Climat'2018 (STEE'2018)

Réf : Orale 99-STEE'2018

Cher(e) participant(e)

Nous avons l'immense plaisir de vous informer que votre résumé intitulé :

Le bassin versant de Kadey dans l'est du Cameroun: évaluation de la contamination par l'arsenic dans les eaux souterraines profondes

Co-auteurs: Kouassy Kalédjé Paulin Sainclair¹, Ndam Ngoupayou Jules Rémy¹, Rakotondrabe Felaniainaz, Fouébé Tankounjou Alain³, Bouelet Sandrine⁴, Djomou Paul Nestor⁵, Mvondo Ondoa Joseph¹

a été retenu par le Comité Scientifique International pour être présenté en tant que communication (Orale) lors du Colloque International Eau-Environnement-Climat'2018 (STEE'2018), Ressources en Eau, Environnement et Changement Climatique : Sciences de l'Eau du Climat et de l'Environnement se tiendra du 22 au 24 octobre 2018 à Hammamet (Tunisie)

A cet effet, veuillez soumettre votre article **suivant le modèle attaché** avant le **31 Juillet 2018** via l'adresse email : stee2018@iresa.agrinet.tn et en Cc stee2018@yahoo.com

NB : - Une photo d'identité est nécessaire pour préparer votre badge (Nom-Prenom-Pays.jpg)

Au plaisir de vous accueillir à Hammamet, veuillez agréer l'expression de nos meilleures salutations.

Cordialement

Comité d'organisation du Colloque International Eau-Environnement-Climat'2018 (STEE'2018).



En vous remerciant de votre contribution, je vous souhaite à toutes et à tous plein succès.

Cordialement

Pour tout complément d'information, prière de s'adresser à :

Pr. Nouredine Gaaloul

Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF-IRESA-Université de Carthage, Tunis)

Rédacteur en Chef de la Revue Journal International Sciences et Techniques de l'Eau & de l'Environnement (JISTEE)

Président et Coordinateur Colloque-Formation International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (STEE'2018)

Président de l'Association Scientifique & Technique pour l'Eau et l'Environnement en Tunisie (ASTEE Tunisie)

Tel : + 216 98 435 772 ; Fax : + 216 71 717 951

E-mail : stee2018@iresa.agrinet.tn Cc stee2018@yahoo.com





GEOSCIENCES DOUALA 2017

The Colloquium of Geosciences Society of Cameroon
Colloque de la Société Camerounaise de Géosciences
29th 31st March 2017 - University of Douala

www.univ-douala.com, E-mail : geosciences2016@univ-douala.com



Geoscience contributions for reaching emergence by 2035 - Apport des Géosciences pour l'atteinte de l'émergence à l'horizon 2035

Comité d'Organisation

Sécretariat Exécutif

Douala, le 18/03/2017

LETTRE D'ACCEPTATION

Professeur/Docteur/Madame/Mademoiselle/Monsieur : **KOUASSY KALEDJÉ Paulin Sainclair**

Acceptation pour une communication orale

Cher Auteur,

Par la présente, nous avons le plaisir de porter à votre connaissance que votre résumé intitulé « **Hydrogéologie du bassin versant de la Kadey : une approche des échanges hydriques surface/souterrain en milieu continu** », avec comme auteurs **Kouassy Kalédjé Paulin Sainclair^{12*}, Ndam Ngoupayou Jules-Rémy¹, Mfochivé Oumarou¹, Rakotondrabe Felaniaina³, Kpoumié Amidou⁴, Mvondo Ondo Joseph¹** ; a été accepté pour une présentation orale, par le Comité Scientifique du colloque **GEOSCIENCES 2017** de la Société Camerounaise des Géosciences qu'organise sous le haut patronage de Monsieur le Ministre de l'Enseignement Supérieur, Chancelier des Ordres Académiques, l'Université de Douala du 29-31 Mars 2017, sur le thème « **Apport des Géosciences pour l'atteinte de l'émergence à l'horizon 2035** ». Vous recevrez en temps opportun, le programme détaillé du colloque et toutes les informations nécessaires pour votre présentation.

Cordialement.

Fait à Douala, le 22/03/2017

Le Secrétaire du Comité d'Organisation

Pr Sébastien OWONA



GEOSCIENCES DOUALA 2017

The Colloquium of Geosciences Society of Cameroon
Colloque de la Société Camerounaise de Géosciences

29th 31st March 2017 - University of Douala

www.univ-douala.com, E-mail : geosciences2016@univ-douala.com



Geoscience contributions for reaching emergence by 2035 - Apport des Géosciences pour l'atteinte de l'émergence à l'horizon 2035

Comité d'Organisation

Sécretariat Exécutif

Douala, le 18/03/2017

LETTRE D'ACCEPTATION

Professeur/Docteur/Madame/Mademoiselle/Monsieur : **KOUASSY KALELJE Paulin Sainclair**

Acceptation pour une communication orale

Cher Auteur,

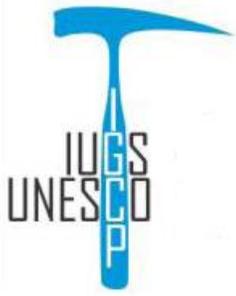
Par la présente, nous avons le plaisir de porter à votre connaissance que votre résumé intitulé « **Le bassin versant de la Kadey : données nouvelles sur l'évaluation de la contamination par l'arsenic des eaux souterraines** », avec comme auteurs **Kouassy Kalédje Paulin Sainclair^{12*}, Ndam Ngoupayou Jules-Rémy¹, Djomou Djomga Paul Nestor³, Fouépé Takounjou Alain⁴, Mvondo Ondo Joseph¹**; a été accepté pour une présentation orale, par le Comité Scientifique du colloque **GEOSCIENCES 2017** de la Société Camerounaise des Géosciences qu'organise sous le haut patronage de Monsieur le Ministre de l'Enseignement Supérieur, Chancelier des Ordres Académiques, l'Université de Douala du 29-31 Mars 2017, sur le thème « **Apport des Géosciences pour l'atteinte de l'émergence à l'horizon 2035** ». Vous recevrez en temps opportun, le programme détaillé du colloque et toutes les informations nécessaires pour votre présentation.

Cordialement.

Fait à Douala, le 22/03/2017

Le Secrétaire du Comité d'Organisation

Pr Sébastien OWONA



International
Geosciences
Program
(IGCP)

UNESCO/IUGS/IGCP Project 646
Dynamic interaction in tropical Africa

From: Dr Kankeu Boniface

Project Leader UNESCO/IUGS/IGCP-646

Tel (237)6 96 49 37 96/678 74 50 33

Email: bonifacekankeu@yahoo.fr

Yaoundé, October 17 , 2015

To Mr. Kouassy Kaledje P. S.

Department of Geology, University of Yaoundé I

Yaoundé – Cameroon pskaledje@yahoo.fr

INVITATION LETTER

This is an official invitation letter to Mr. Kouassy Kaledje P. S. to attend the 1st annual meeting of the International Geosciences Project 646 to be held at Yaoundé, Cameroon, from 17-21 November 2015.

Mr. Kouassy Kaledje P. S., will give a presentation on his on-going research on: *New data on the climate variability and its influence on the hydrological response of the catchment area of Kadey (Cameroon) AND Hydrogeology of the catchment area of the Kadey River: approach of the hydric exchanges surface/underground passage continuous environment.*

If further information is needed, please don't hesitate to contact us.

We look forward to meeting you in Yaoundé soon

Yours sincerely

Dr Kankeu Boniface

Chair 1st UNESCO/ IGCP/646 annual meeting

Institute for Geological and Mining Research



BP 4110

Nlongkak, Yaoundé-Cameroon

Tel:(237) 222 22 24 32/Fax:(237)2 22 22 24 31



Du 08 au 10 janvier 2014 à Douala

Lettre d'invitation

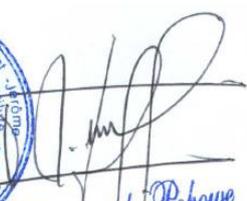
Chèr(e) **Paulin Sainclair KOUASSY KALELJE**,

Votre communication intitulée « **Exploitations minières dans la région de l'est cameroun : facteurs de changements climatiques et risques d'insécurité alimentaire (cas spécifique de l'exploitation de l'or à batouri)** » a été retenue pour être présentée au colloque international pluridisciplinaire que l'Institut Universitaire Catholique St Jérôme de Douala organise du 08 au 10 janvier 2014 prochain dans la ville de Douala, en partenariat avec l'Université de Ngaoundéré (Cameroun) et le LEM - Lille Economie Management - de l'université de Lille (France).

Les différents comités scientifiques ayant constaté que nombre des travaux reçus sont au stade de "work in progress", en vue de contribuer à la présence effective des auteurs afin de bénéficier des critiques constructives de leurs pairs, le comité d'organisation alloue un per diem unique minimum de prise en charge de 50000Fcfa à 100000Fcfa par communication* et selon le niveau de finalisation du papier. Il est prévu qu'un forfait complémentaire soit accordé aux auteurs dès l'achèvement des papiers et selon les droits qu'ils voudront bien y concéder à l'Institut Universitaire Catholique St Jérôme qui envisage d'en publier aussi bien dans les "Cahiers de Recherches Scientifiques de la Catho St Jérôme de Douala" que dans des ouvrages collectifs aux "Presses Universitaires de la Catho St Jérôme de Douala".

Comme vous le constaterez dans le programme ci-joint, les présentations des communications dans les différents ateliers se feront au second jour du colloque, jeudi le 09 janvier 2014, dans l'après-midi. Accessible à partir de tout point de la ville de Douala, le campus de l'Institut Universitaire Catholique St Jérôme de Douala où se déroulera le colloque est situé en face de la Cathédrale Sts Pierre et Paul.

En espérant que vous serez des nôtres du 08 au 09 janvier prochain, nous vous remercions d'avance. En vous souhaitant nos vœux les meilleurs pour l'année 2014, veuillez agréer nos salutations distinguées.



Emmanuel Pohoue
Administrateur Général

* Sans possibilité de cumul pour les auteurs ayant plusieurs papiers et pour les auteurs jouissant d'un statut d'invité spécial. Ces Per diem seront servis le 09 Janvier 2014 dans l'après-midi, avant le début des ateliers.