

RÉGIMES DES PRÉCIPITATIONS ET RELATIONS PLUIES-NIVEAUX D'EAU-DÉBITS DANS LE BASSIN VERSANT DU KOMO (GABON)



International Chair in Mathematical Physics and Applications.

(ICMPA-UNESCO Chair)

Master of Science in Physical Oceanography and Applications.

Présenté par :

NJUTAPVOUI FOKOUOP Nourdi

Faculté des Sciences et Techniques (FAST)

Université d'Abomey-Calavi (UAC)

Cotonou, République du Bénin





Université d'Abomey-Calavi (UAC), BENIN

Faculté des Sciences et Techniques (FAST)

Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications

CIPMA-Chaire UNESCO)

M.Sc N° M.Sc/CIPMA/FAST/UAC/2017.

**RÉGIMES DES PRÉCIPITATIONS ET RELATIONS PLUIES-NIVEAUX
D'EAU-DÉBITS DANS LE BASSIN VERSANT DU KOMO (GABON)**

Mémoire de Master of Science En Océanographie Physique et Applications

Présenté par :

NJUTAPVOUI FOKOUOP Nourdi

Superviseurs :

Dr. Alexis Chaigneau (IRD/LEGOS)

Dr. Jean-Pierre Lefebvre (IRD/LEGOS)

Jury :

Président :

Examineur :

Rapporteur :

Cotonou, Rép. du Bénin, septembre 2017

SPONSORS



**Chaire Internationale en Physique
Mathématique et Applications**

UNIVERSITE
PAUL
SABATIER



TOULOUSE III

**Université Paul Sabatier/
Chaires croisées**



Institut de Recherche
pour le Développement

**Programme Chaires croisées
(Formation et Recherche en
Océanographie Physique et
Applications en Afrique de**



**Fugro GEOS
(Global Environmental
and Ocean Sciences)**

Dédicaces

À mon défunt père Ngougoue Adamou Imam de la Mosqué Centrale de Kouoptamo.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à rendre grâce à ALLAH, détenteur de toute science pour m'avoir donné la force et le courage d'accomplir ce travail.

Ce travail a également été réalisé, grâce aux conseils et à l'aide de beaucoup des personnes, leurs soutiens moraux, pédagogiques et matériels. C'est donc une grande joie de remercier :

Dr Alexis CHAIGNEAU, et Dr Jean-Pierre lefebvre pour leurs encadrements et leurs idées qui m'ont permis de prendre en main mon projet de stage.

Pr Norbert MAHOUTON HOUNKONNOU, président titulaire de la Chaire Internationale de Physique Mathématiques et Applications.

Je voudrais dire un grand merci à tous mes enseignants : Gaël ALORY, Yves Morel, Rémy CHUCHLA, Nick HALL, Alex Da-costa, Pieter VAN BEEK, Moacyr ARAUJO, Marie-Hélène RADENAC, Donatus, Alexei Kouraev, Ezinvi BALOÏTCHA, Bughsin Djath. Merci pour votre volonté et surtout votre capacité à transmettre. Sans oublier Serge THOMETY et Frédéric Bonou pour leur assistance.

Dr. Ing Raphael Onguéné, coordonnateur JEAI- RELIFOME pour son soutien et ses investissements pour ce stage.

Je dis un grand merci M. Mama Crépin, enseignant chercheur à l'ISH, pour les conseils et les encouragements

A tous mes collègues étudiants promotionnels : ABOUGA BODO Willy Karol, KOM Olivia, BONGA NYETEM MANFRED Désiré, DOUVI Gbénontchi Gilles, HOUNDEGNONTO Odilon Joël, AMEMOU Yago Hilaire, LELIWA Tchézoutéma, SABAGA Logueminda, AGUEDJOU Micaël Agnédjo.

Mes Mamans NDOSSOU Amsétou et NGOUTANE Pasma Epse NDAM ;

Tous mes frères et sœurs Père Moustapha, Ahmed, Béchir, Directeur, Nji bou, Sabine, Camara, Awa, Diane, Mazou, Seigneur, Samira.

Je remercie également l'Imam de la Mosquée de Zogbo ainsi que tous les fidèles de cette Mosquée. Le grand frère et compatriote Melon Fridolin pour son accueil et son aide.

Nous ne pouvons-nous empêcher de remercier nos camarades de promotion Manfouo, Langoul, Said, Tony, Nkouefut, Le papi, Delanho, Samo et ceux dont les noms ne sont pas mentionnés.

Résumé

La modélisation réaliste de la circulation hydro-sédimentaire de l'estuaire du Komo au Gabon est l'un des objectifs du projet scientifique international Arc d'Emeraude. Pour atteindre cet objectif, une connaissance des apports continentaux via les bassins versants alimentant l'estuaire est indispensable. Ce stage, qui portait sur l'analyse des séries historiques de précipitations, de niveaux d'eau et de débits de rivières autour de l'estuaire du Komo, a permis de quantifier et de caractériser la variabilité pluviométrique et hydrométrique dans la région d'étude. Nous avons montré que l'évolution moyenne des précipitations diminue du nord au sud et de la zone côtière vers l'intérieur des terres. Ces précipitations moyennes varient entre 2400 mm/an et 3400 mm/an dans la région d'étude tandis que les débits moyens varient de $3\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ dans la Nzémé, de $3,97\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ dans l'Assango et de $61\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ dans la Mbei et le Komo.

Le cycle saisonnier de ces paramètres montre effectivement un cycle semi-annuel bien marqué qui correspond à l'alternance des deux saisons sèches (décembre à janvier et de juin à août) et deux saisons des pluies (septembre à novembre et de février à mai). Le ruissellement moyen et la variabilité temporelle des débits dans les sous-bassins du Komo, Assango et la Mondah montrent des comportements spécifiques à chaque site. L'analyse en ondelettes de ces séries a révélé une grande concentration d'énergie dans la bande de 4-8 mois indiquant une périodicité semi-annuelle des pluies et des débits. Une augmentation progressive des débits du Komo entre 1959 et 1975 a également été observée mais de plus longues séries seraient nécessaires pour conclure sur la significativité de cette tendance à long terme.

Des relations entre taux mensuels de précipitations et les débits ont finalement été établies au moyen de régressions linéaires. Ces relations ont montrées que l'intensité des écoulements est directement liée à celle de la pluviométrie. Par contre des déphasages entre précipitations et débits sont observés dans le sous-bassin versant de la Mbèi après 1975, date à laquelle la construction du barrage de Tchimbélé a été achevée. Dans le bassin versant de l'Assango la relation pluies-débits est moins significative. Une approche de modèles pluies-débits beaucoup plus robustes serait nécessaire dans le prolongement de cette étude.

Mots clés : modélisation, hydrosédimentaire, ondelette, bassin versant.

Abstract

The realistic modeling of the hydro-sedimentary circulation of the estuary of the Komo in Gabon is one of the objectives of the international scientific project Arc d'Emeraude. To achieve this objective, knowledge of continental inputs via watersheds that feed the estuary is essential. This course, which focused on the analysis of historical series of precipitation, water levels and river flows around the Komo estuary, made it possible to quantify and characterize rainfall and hydrometric variability in the region study. We have shown that the average evolution of precipitation decreases from the north to the south and from the coastal zone towards the interior of the land. Average rainfall ranges from 2400 *mm/year* to 3500 *mm/year* in the study area, while average flows vary from 3 m^3s^{-1} in Nzémé, 3.97 m^3s^{-1} in Assango and 61 m^3s^{-1} in the Mbei and the Komo.

The seasonal cycle of these parameters shows a well-marked semi-annual cycle, corresponding to the alternation of the two dry seasons (December to January and June to August) and two rainy seasons (September to November and February to May) . Average runoff and temporal variability of flows in the Komo, Assango and Mondah sub-basins show site-specific behavior. Wavelet analysis of these series revealed a high energy concentration in the 4-8 month band indicating semi-annual rainfall and flow intervals. A gradual increase in Komo flows between 1959 and 1975 was also observed but longer series would be necessary to conclude on the significance of this long-term trend.

Relations between monthly precipitation rates and flows were finally established using linear regressions. These relationships have shown that the intensity of flows is directly related to that of rainfall. On the other hand, phase differences between precipitations and flows are observed in the Mbèi sub-basin after 1975, when the construction of the Tchimbélé dam was completed. In the watershed of the Assango, the rainfall-to-flow ratio is less significant. A much more robust approach to rainfall-flow models would be needed as a follow-up to this study.

Keywords : modeling, hydrosedimentary, wavelet, watershed

Liste des tableaux

1	données disponibles sur chaque station du fleuve Komo	24
2	corrélation de Spearman sur les débits.	24
3	corrélation aux stations pluviométriques de la Nzémé.	24
4	corrélation de pluies à Libreville.	25
5	corrélation de pluies proches du Bassin versant.	25
6	paramètres statistiques.	25

Table des figures

1.1	<i>Cumul annuel des précipitations moyennes au Gabon [Richard et Leonard, 1993[?]]</i>	2
1.2	<i>Principaux affluents de l'estuaire du Komo (ANPN, 2017[1])</i>	2
1.3	<i>La Mondah et ses affluents (ANPN, 2017[1])</i>	3
2.1	<i>Localisation des stations climatologiques.</i>	6
2.2	<i>stations pluviométriques retenues.</i>	6
2.3	<i>distribution temporelle des données de pluviométrie</i>	7
2.4	<i>Hauteur d'eau journalière (en cm) pour l'année 1966-1967 à la station d'Andok-Foula LMNG extraite d'un annuaire hydrologique de l'ORSTOM.</i>	8
2.5	<i>Localisation des stations hydrométriques</i>	8
2.6	<i>Chronogramme des enregistrements hydrologiques disponibles</i>	9
2.7	<i>Spatialisation des sous bassins versants et stations de précipitations</i>	10
3.1	<i>Répartition spatiale des précipitations annuelles moyennes.</i>	11
3.2	<i>variation temporelle des pluies annuelles et saisonnières</i>	12
3.3	<i>variation saisonnière des précipitations</i>	13
3.4	<i>courbe de tarage aux stations hydrométriques de l'étude.</i>	13
3.5	<i>Distribution moyenne des débits dans la zone d'étude.</i>	14
3.6	<i>Variations interannuelle et spectrale des débits dans les sous bassins</i>	15
3.7	<i>variations mensuelles des débits</i>	16
3.8	<i>relations pluies-débits dans les trois sous-bassins : à gauche, précipitations journalières (bleu), débits mesurés (rouge) et estimés (vert) ; à droite, régression linéaire entre précipitations et débits mesurés.</i>	17
3.9	<i>carte spatiale des variations mensuelles entre précipitations et débits dans chaque segment.</i>	18
1	<i>localisation de l'estuaire du Gabon</i>	26
2	<i>boîte à moustache(de Turkey)</i>	26

Liste des Acronymes et Abréviations

BV	Bassin versant
EHAS	Évaluation Hydrologique de l’Afrique Sub-Saharienne
FIT	Front Inter-Tropical
ITCZ	Zone de Convergence Intertropicale
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer
SEEG	Société d’Eau et d’Énergie du Gabon
SIEREM	Système d’informations Environnementales sur les Ressources en Eau et Leur Mo- délisation
SNMG	Service National de Météorologie du Gabon

Liste des annexes

Annexe 1 : Récapitulatif des stations disponibles dans le Bassin versant du Komo

Annexe 2 : Localisation Estuaire du Komo.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des tableaux	v
Table des figures	vi
Liste des Acronymes et Abréviations	vii
Liste des annexes	viii
1 INTRODUCTION	1
2 DONNÉES ET MÉTHODES	5
2.1 DONNÉES	5
2.1.1 Données pluviométriques	5
2.1.2 Données hydrologiques	8
2.2 MÉTHODES	9
2.2.1 Détermination des courbes de tarage	10
2.2.2 Relations pluies-niveaux d'eau-débits dans le bassin versant du Komo :	10
3 RÉSULTATS	11
3.1 Distribution moyenne et variabilité des précipitations	11
3.2 Relation débits-hauteur d'eau : courbe de tarage	13
3.3 Etude de la variabilité des débits intra sous-bassins et entre sous-bassins	14
3.4 Relations pluies-débits	16
4 DISCUSSION ET CONCLUSIONS	19
Bibliographie	21

INTRODUCTION

Indépendant depuis 1960, le Gabon partage ses frontières avec le Cameroun et la Guinée équatoriale au Nord, et avec le Congo au Sud et à l'Est. En 2016, sa population avoisinait 1.9 millions d'habitants, soit une densité proche de $7.2 \text{ habitants/km}^2$, dont un peu moins d'un million pour la seule ville de Libreville (EHAS Gabon, 1992[?]). Le Gabon occupe une superficie de $268,000 \text{ km}^2$, recouverte à 85% par la forêt équatoriale. Situé entre la latitude $2^{\circ}30' \text{ N}$ et $3^{\circ}55' \text{ S}$, le pays est ouvert sur le golfe de Guinée par un bassin sédimentaire côtier de 20 à 300 km de largeur et de 800 km de long.

Le climat du Gabon se caractérise par, une température moyenne variant entre 22° et 32° C et un taux de précipitations élevé. Dépourvu de relief susceptible d'impacter significativement la circulation atmosphérique grande-échelle, il est soumis principalement à une combinaison de deux régimes climatiques :

- Un climat de type équatorial caractérisé toute l'année par une forte chaleur et par une humidité élevée,
- un climat tropical, régit par le déplacement annuel de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), appelé aussi localement Front Intertropical (FIT).

Ces deux influences se traduisent au Gabon par un climat dont le cycle saisonnier comporte quatre saisons (Lerique, 1983[8]) :

Une petite saison sèche de décembre à février, une petite saison des pluies de mars à mai, une grande saison sèche de juin à août et une grande saison des pluies de septembre à novembre (Carré, 1978[4]). Seule la grande saison sèche, d'influence australe, est bien marquée et sa durée augmente vers le sud du pays. Au contraire, la petite saison sèche de décembre à février correspond au repli de la grande saison des pluies mais les précipitations restent non négligeables. Cette variation saisonnière est due essentiellement à i) la position géographique du pays qui est situé toute l'année au sud de l'équateur thermique et ii) aux centres d'actions qui régissent les mouvements saisonniers d'air atmosphérique, établis de part et d'autre de la zone des basses pressions équatoriales (Carré, 1978[4]).

Le régime pluviométrique Gabonais est très contrasté (Mahé, 1993[10]), avec de fortes variations spatio-temporelles du cumul annuel des précipitations et un fort gradient spatiale des pluies annuelles (Fig. 1.1). La pluviométrie varie de 1500 à 3000mm d'eau par an, en diminuant du nord au sud du Gabon et entre la façade maritime et l'intérieur du pays sauf autour de reliefs montagneux localisés (Fig. 1.1).

À Libreville, les précipitations annuelles moyennes sont environ de 2900 mm réparties sur approximativement 180 jours de pluies (Fig. 1.1). À l'échelle diurne, la fréquence des pluies augmente la nuit, à cause de la convergence entre les alizés et la brise de terre qui crée de la convection atmosphérique.

Les précipitations abondantes et fréquentes assurent une hygrométrie élevée, constamment supérieure à 80% et atteignant parfois 98%, et alimentent un important réseau hydrographique. Le réseau hydrographique gabonais se répartit entre cinq grands ensembles : le bassin de l'Ogooué (drainant 75% du territoire) et ses affluents d'importance majeure, puis les bassins de la Nyanga (8.5%), du Komo (2%), du Ntem, et les petits fleuves côtiers de la plaine sédimentaire. L'ensemble du réseau fluvial est navigable sur 3000 km environ. Le principal fleuve, l'Ogooué, long de 1200 km dont 800 km au Gabon, se jette dans l'océan Atlantique à Port-Gentil (1.1°S). La Nyanga, second fleuve gabonais et long de 600 km, rejoint l'Atlantique à la latitude 2.6°S . Finalement, le Komo, objet de cette étude, prend sa source en Guinée Équatoriale, dans la partie sud-ouest du plateau du Woleu-Ntem, et s'écoule sur 230 km pour déboucher sur l'océan Atlantique à la latitude 0.3°N . À ce niveau, il forme l'estuaire du Gabon (ou estuaire du



FIGURE 1.1 – Cumul annuel des précipitations moyennes au Gabon [Richard et Leonard, 1993[?]]

Komo) dans lequel s'est développé Libreville.

L'estuaire du Komo est la terminaison de deux affluents principaux, le Komo et la Remboué, et de nombreux autres cours d'eau de moindre importance, sur les deux rives de l'estuaire (Fig.1.2). L'apport de ces affluents secondaires reste très faible comparé à celui du Komo seul.

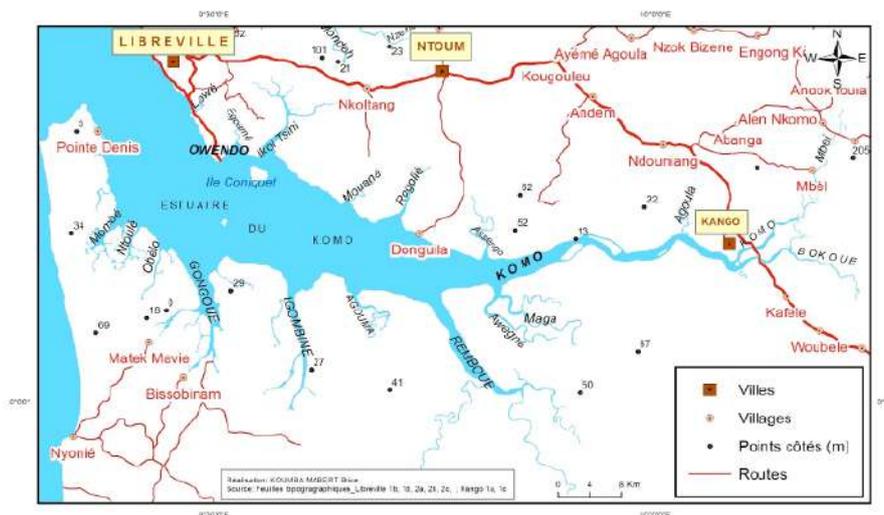


FIGURE 1.2 – Principaux affluents de l'estuaire du Komo (ANPN, 2017[1])

Le bassin versant du fleuve Komo couvre une superficie de 5000 km^2 dont la plus grande partie (3000 km^2) est en territoire gabonais (Lerique, 1983[8]). La rivière Mbèi, qui est l'affluent le plus important du Komo, draine une surface de 1800 km^2 . Son cours est perturbé par quelques accidents comme les chutes de Tchimbélé et de Kinguélé. Celles-ci ont été aménagées sur un rejet de faille dont la dénivellation totale atteint 110 m (Peeters et al., 2010[18]).

Le régime hydrographique du Komo est de type équatorial de transition qui se caractérise par une période de basses eaux (juillet-septembre) et deux périodes de hautes eaux séparées par une période de récession en janvier. Son débit moyen est de $65 m^3.s^{-1}$, avec un débit d'étiage de $20 m^3.s^{-1}$ et un débit de crue de $250 m^3.s^{-1}$ (Peeters et al., 2010[18]). Au niveau des chutes de Tchimbélé et Kingulé, le débit moyen est de l'ordre de $35 m^3.s^{-1}$ et $50 m^3.s^{-1}$ respectivement. Les variations saisonnières de l'écoulement fluvial au Gabon reflètent celles de la pluviométrie, mais avec un léger retard. Les débits maximums sont observés en novembre-décembre durant la grande saison des pluies, puis entre mars et mai durant la petite saison des pluies. Dans le Komo, le moment des basses eaux survient généralement en août à la fin de la grande saison sèche.

Au Nord de Libreville, et de l'estuaire du Komo, se trouve la baie de la Mondah qui couvre une superficie de $350 km^2$ (Ndotit Manguiengha, 2013[?]) dont le bassin versant occupe une superficie de $1220 km^2$ (Lebigre et Marius, 1984[6]). Les cours d'eau qui alimentent la baie de la Mondah charrient des volumes d'eau relativement faibles, malgré de fortes précipitations (Fig.1.3). Le débit de l'ensemble de ces affluents a été estimé à $74 m^3.s^{-1}$ (Lebigre et Marius, 1984[6]). Le fleuve Nzémé est le cours d'eau le plus important avec un bassin versant occupant environ $100 km^2$ (Muller, 1973[?]). Ce fleuve a un débit moyen annuel faible de $3 m^3.s^{-1}$ (Lerique et Tourne, 1972[7]), mais ne connaît jamais de période d'assec mais présente de fortes variations saisonnières. Lerique et Tourne (1972) ont enregistré au niveau des installations de la Société d'Énergie et d'Eau du Gabon (SEEG) à Ntoum des hauteurs d'étiage de 20 cm et de crue de 375 cm.

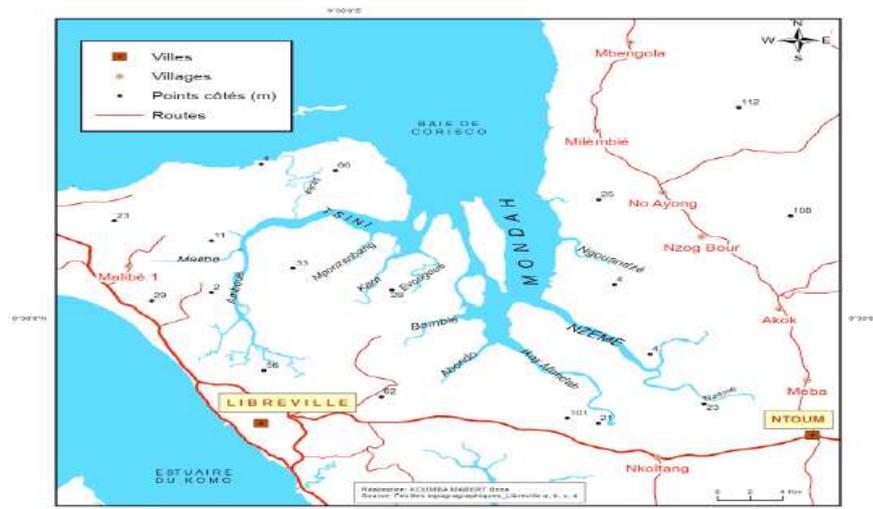


FIGURE 1.3 – La Mondah et ses affluents (ANPN, 2017[1])

Si les grands traits climatologiques (saisonnalité des précipitations) et hydrographiques (débits moyens, etc.) du bassin versant du Komo sont assez bien connus, (ORSTOM, 1964[17] ; Lerique et Tourne, 1972[?] ; EHAS : Gabon, 1992[?]), aucune étude détaillée n'a été menée pour étudier l'impact des variations saisonnières et interannuelles des précipitations sur les caractéristiques hydrographiques (débits, hauteurs d'eau) de cette région. En particulier, aucune relation pluies-débits n'est disponible dans le bassin versant du Komo. A partir de l'analyse de données historiques de précipitations, de hauteur d'eau et de débit, cette étude a donc pour objectif d'exploiter les données historiques afin :

- de reconstruire des séries temporelles mise en évidence par des courbes de tarage hauteurs d'eau / débits.
- d'analyser statistiquement l'ensemble de ces séries afin de mettre en évidences les principaux modes de variabilités et de déceler éventuellement des tendances de variations à l'échelle décennale ;
- de proposer des fonctions pluie/débit dans le bassin versant du Komo, chaque fois que la densité des informations disponibles le permet.

Ces données disponibles sont extrêmement rares et datent principalement des années 1960-1970. Toutes les données hydrologiques (hauteurs d'eau et débits) présentées ci-dessous et exploitées durant ce stage n'étaient disponibles qu'en format papier et un long travail préparatoire a consisté à digitaliser l'ensemble de ces séries chronologiques. Ce travail s'insère dans la composante recherche du projet Arc d'Emeraude financé par l'Agence Nationale des Parcs Nationaux du Gabon (ANPN), dont l'un des objectifs vise à modéliser la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire du Gabon. Ce stage qui vise à apporter une meilleure connaissance des forçages hydrologiques du bassin versant du Komo est un prérequis à l'obtention d'une modélisation hydrodynamique réaliste.

DONNÉES ET MÉTHODES

2.1 DONNÉES

Les données historiques exploitées dans le cadre de cette étude sont de deux types :

- Des données pluviométriques acquises en différentes stations et,
- des données hydrologiques qui consistent en des mesures de hauteurs d'eau ou de débits dans différents cours d'eau.

2.1.1 Données pluviométriques

L'étude de la pluviométrie dans la région d'étude est rendue problématique par l'insuffisance des données disponibles. Ceci est due à des réseaux de stations peu denses, à de nombreuses lacunes dans les séries chronologiques et parfois à la mauvaise qualité des données archivées (Arvor et *al.*, 2008[2] ; Maloba, 2014[15]). Pour mener à bien cette étude, nous disposons des données historiques acquises par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM) et le Service National de Météorologie du Gabon (SNMG) et archivées par le Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (SIEREM). Ces dernières sont accessibles via le site : <http://www.hydrosociences.fr/sierem/>.

Les données sont issues de 42 sites, équipés soit de pluviomètres (appareils à mesures directes), soit de pluviographes (appareils dotés d'enregistreurs automatiques) (Fig.2.1). Les données s'étendent sur des périodes d'enregistrement très disparates. Elles peuvent présenter de nombreuses lacunes ainsi que des degrés de fiabilités très variables. De plus, des stations, sont parfois extrêmement proches : 12 stations autour de la Nzémé ; 2 stations à Kango ; 6 stations non loin de Libreville, (Fig.2.1). Il est donc nécessaire d'effectuer un prétraitement et validation de ces données historiques afin de réduire le nombre de séries et de former une base pleinement exploitable.

Les données de 12 stations (2 pluviographes et 10 pluviomètres) sont disponibles à la Nzémé sur le bassin versant de la Mondah. Une analyse statistique basée sur les corrélations de Spearman a été menée afin d'observer le comportement inter-sites de ces précipitations. Cette analyse a permis de révéler que la série issue de la station Nzémé PGF différait significativement des 11 autres séries, fortement corrélées entre elles (ρ toujours supérieur à 0,95). Cette série a été exclue de l'analyse et une série temporelle de précipitation à la Nzémé a été obtenue par moyenne des 11 séries retenues.

De même, deux stations pluviométriques sont situées à Kango (Kango-CCAEF et Kango-Centre). La corrélation entre ces 2 séries temporelles étant de 0.91, nous avons décidé d'exploiter uniquement la série de Kango-Centre qui est la plus complète entre 1958 et 1976. Cette station est située à l'embouchure de la Mbèi et du Bokoué (Fig.2.2). Finalement, les stations situées à Librevilles sont aux nombres de 8 dont 2 stations pluviométriques au nord-ouest (Cap Estérias), 2 stations à l'aéroport de Libreville (nommées Libreville AERO), et 4 stations pluviométriques à Libreville ville. Compte tenu de la densité et la qualité des données, seules les stations de Libreville AERO et de Cap Estérias ont été retenues dans cette étude.

Les stations situées dans le bassin versant du Komo ont fait l'objet d'une analyse à la fois statistique et quantitative. La densité des données issues des stations pluviométriques d'Anzem, Aza-avebe, Engo-

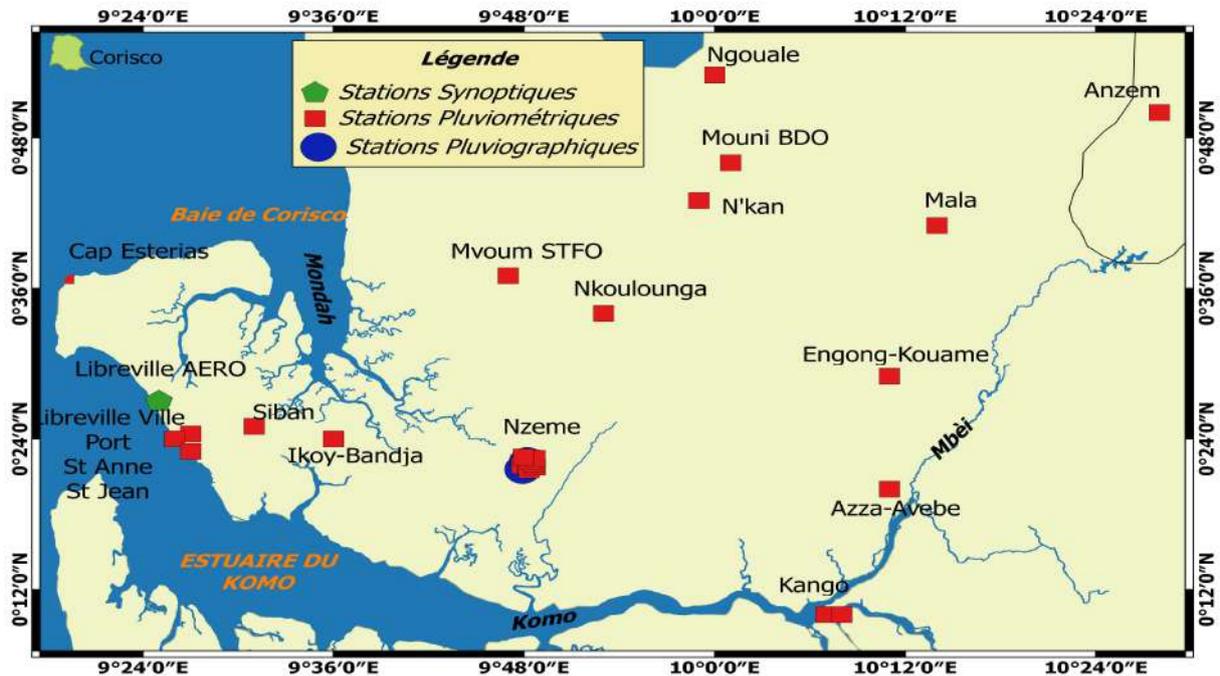


FIGURE 2.1 – Localisation des stations climatologiques.

Nkouame et Mala situées dans le bassin versant de la Mbèi et du Komo-Ndoua, sont insuffisantes prises séparément, mais trois de ces stations présentent une période commune d'observation de mars 1966 à février 1967. Du fait de la similarité et leurs proximités aux bassins versants. Nous avons également retenu les stations de Mvoum STFO, Mouni et Ngouale afin d'établir l'évolution générale des précipitations annuelles.

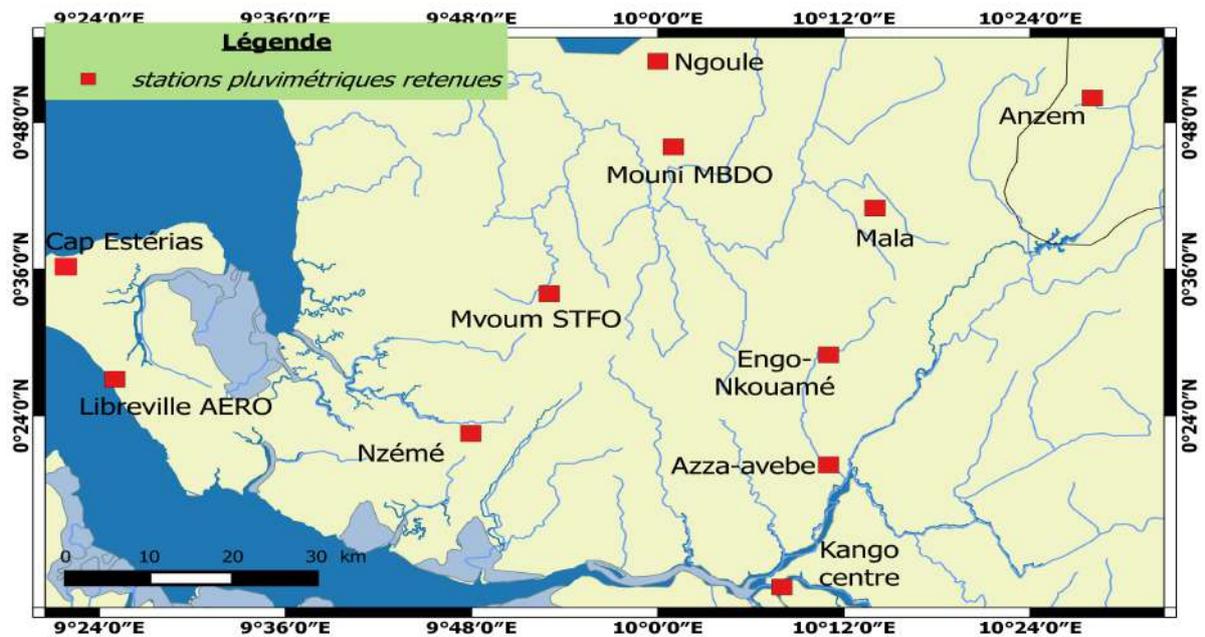


FIGURE 2.2 – stations pluviométriques retenues.

Un chronogramme des plages de mesures disponibles pour chaque station sur la période 1950 à 1980,

ainsi que le type d'instrument utilisé sont présentés sur la figure 2.3. Plusieurs stations sont caractérisées par des densités faibles et des lacunes dans les observations. Seule la station de Libreville AERO fait exception, et dans une moindre mesure celle de Kango, et est considérée comme station de référence pour cette étude.

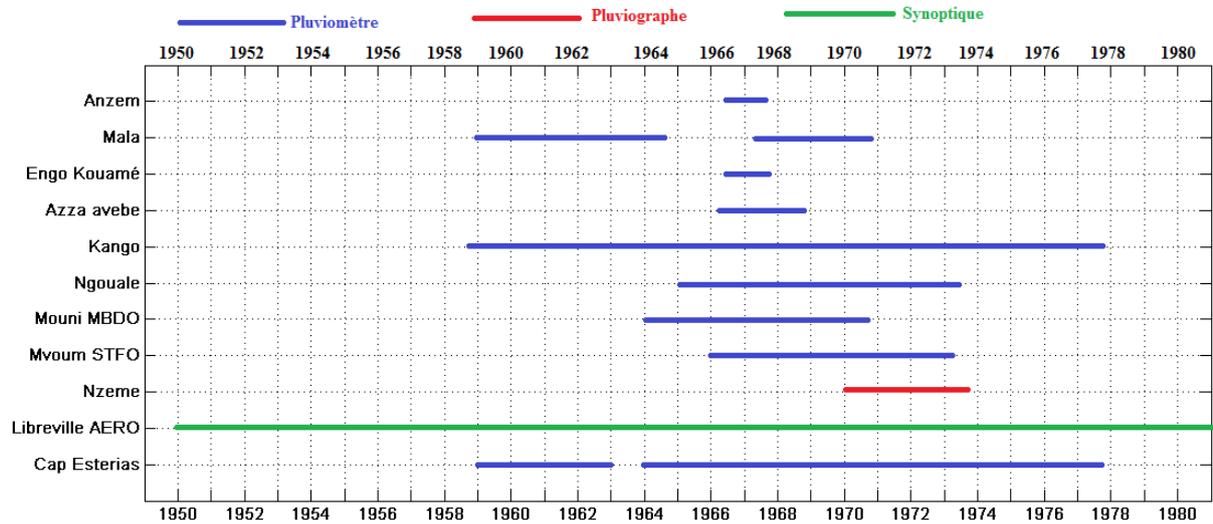


FIGURE 2.3 – distribution temporelle des données de pluviométrie

2.1.2 Données hydrologiques

Les données hydrologiques (hauteur d'eau et de débits) utilisées dans cette étude, proviennent de deux sources :

- des données consignées en format papier dans les annuaires hydrologiques de l'ORSTOM,
- des mesures de débits turbinés journaliers sur la période 1999 - 2015, réalisées par la Société d'Eau et d'Énergie Gabon (SEEG) aux barrages de Tchimbélé et Kinguéle.

Comme mentionné précédemment, un travail préalable de digitalisation des données a été nécessaire. Les données digitalisées seront mises à la disposition de la communauté scientifique. A titre d'illustration, les données telles qu'elles figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Office de la Recherche Scientifique et techniques d'Outre-mer (ORSTOM) sont présentées sur la figure 2.4.

ANNÉE HYDROLOGIQUE 1966-1967
Relevés limnimétriques moyens journaliers en cm

Jours	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
1	81	162	222	291	179	172	122	132	126	190	105	79
2	80	145	239	295	175	169	113	123	128	174	100	78
3	92	172	305	281	153	165	152	135	121	164	95	77
4	96	187	300	285	181	157	159	141	201	148	91	76
5	80	181	281	299	165	151	132	152	180	133	89	77
6	81	161	230	275	160	140	126	126	179	128	87	77
7	83	159	189	247	146	147	125	117	150	123	84	78
8	76	149	184	249	139	136	133	129	178	117	82	75
9	78	147	253	244	155	133	179	145	171	127	81	77
10	81	136	233	235	151	142	158	136	162	132	84	77
11	70	154	227	228	147	157	144	122	153	123	83	76
12	64	166	310	210	142	169	129	131	147	120	82	75
13	87	172	318	209	139	180	122	121	129	115	81	75
14	192	287	405	204	138	174	143	103	124	109	82	74
15	190	291	392	200	146	162	150	101	104	86	72	73
16	189	274	403	193	166	149	149	102	205	101	85	73
17	188	190	384	223	153	146	156	106	202	117	84	72
18	187	146	327	217	165	164	122	101	227	101	83	73
19	184	152	405	210	166	175	143	95	301	106	84	72
20	176	155	395	201	145	136	151	95	311	103	83	70
21	173	168	353	200	133	144	131	189	232	114	81	69
22	162	174	356	158	142	124	126	164	156	106	79	68
23	161	192	249	195	156	121	152	146	142	104	78	69
24	150	219	247	181	153	118	116	245	129	101	76	70
25	144	210	246	184	135	116	126	234	128	110	74	71
26	131	229	239	169	131	115	203	192	126	101	72	72
27	132	225	245	163	130	114	138	189	134	98	72	68
28	170	238	400	161	135	112	118	165	260	97	78	67
29	191	234	316	174	127	111	158	147	190	97	78	66
30	190	241	230	158	125	137	132	195	102	102	77	66
31	190	245	156	121	121	121	121	194	194	77	66	66

FIGURE 2.4 – Hauteur d'eau journalière (en cm) pour l'année 1966-1967 à la station d'Andok-Foula LMNG extraite d'un annuaire hydrologique de l'ORSTOM.

Les mesures journalières historiques de hauteur d'eau ont été obtenues à partir de la lecture d'échelles limnimétriques (mesures discontinues) ou de limnigraphes (enregistrement automatiques continus) déployés sur le réseau hydrographique gabonais. Les débits des cours d'eau ont été estimés par des mesures de vitesses à l'aide de micro-moulinets (M) et courbes de tarage. Plusieurs stations ont été installées en différents point du réseau hydrographique du bassin versant du Komo (Fig.2.5).

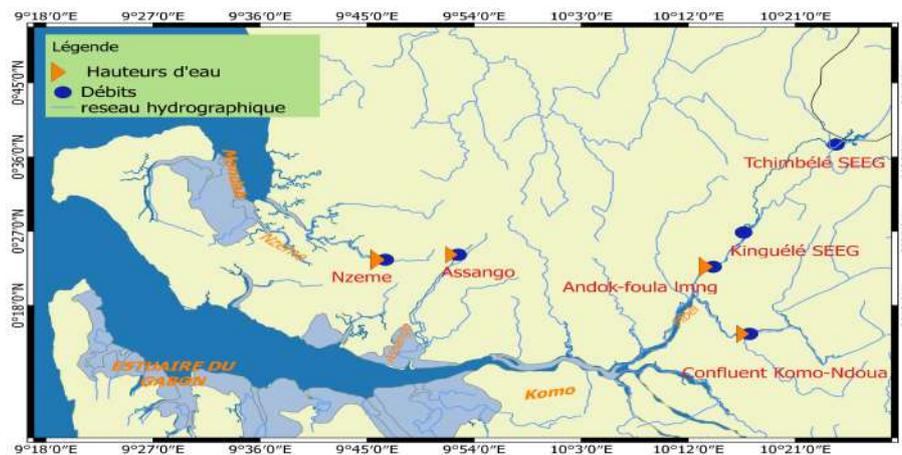


FIGURE 2.5 – Localisation des stations hydrométriques

Comme pour les mesures de précipitation, un premier travail a consisté à réduire le jeu de données en se basant sur des critères qualitatifs ainsi que statistiques afin d'éliminer les redondances (Fig.2.6).

Les données issues des stations de l'échelle limnimétriques et du limnigraphe d'Andok-Foula (dénommées respectivement Andok-Foula échelle aval et Andok-Foula LMNG) présentent un coefficient de corrélation de Spearman $\rho = 0.90$ sur la période commune (1968 – 1971), et une différence (± 1 déviation standard) de $2.48 \pm 0.5 m^3 s^{-1}$. Une série complète des débits de la Mbèi à Andok-Foula sur la période 1959 1975 a été obtenue en complétant les mesures limnigraphiques d'Andok-Foula LMNG par les données rectifiées de la station Andok-Foula échelle aval. Similairement, seules les données provenant d'une des deux stations installées entre le confluent Komo-Ndoua et celui de Mbèi-Komo ont pu être conservées. Celles provenant de la station Nzamaligue n'ont pas été conservées car cette série présentait une densité insuffisante (septembre 1966 à août 1968) avec de nombreuses lacunes parfois de plusieurs mois.

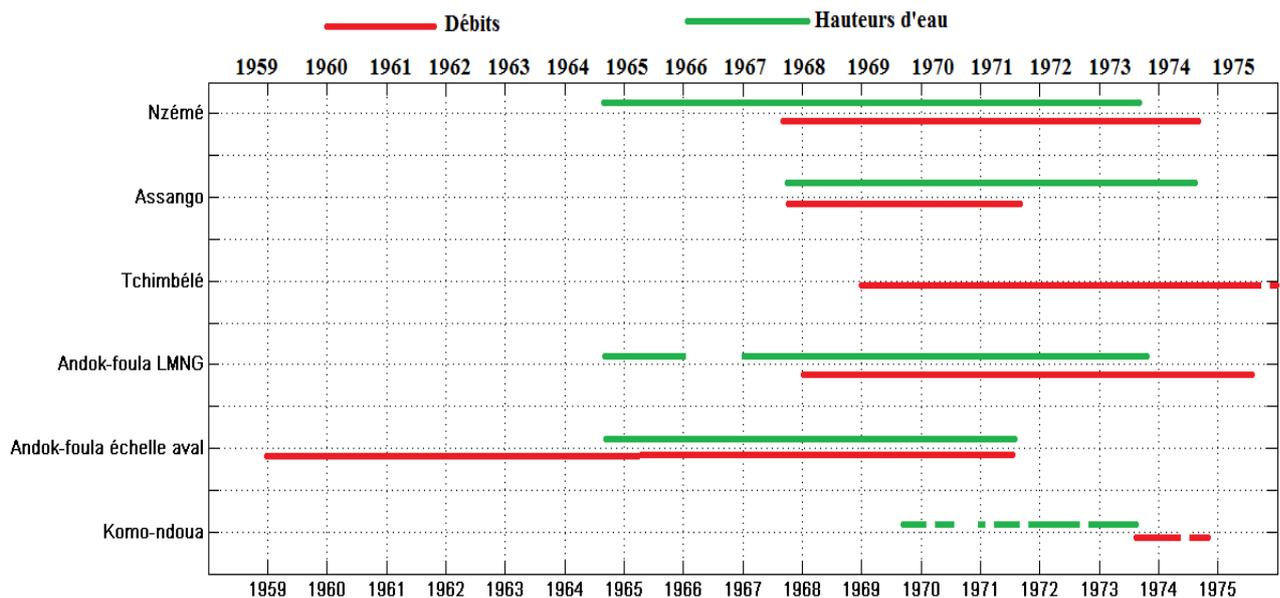


FIGURE 2.6 – Chronogramme des enregistrements hydrologiques disponibles

Après traitement, 6 stations hydrométriques ont été retenues dans la zone d'étude, 4 stations fournissant à la fois des données de débits et hauteurs d'eau et 2 ne fournissant que des données de débits (Tchimbélé SEEG et Kinguélé SEEG en amont de l'affluent Mbèi). La plus longue série est celle d'Andok-Foula qui s'étend entre 1959 et 1975. (Fig.2.6)

Après digitalisation et réduction des jeux de données, la zone d'étude est décrite par 4 sous-bassins versants, auxquels sont associés des données hydrologiques et de précipitations (Fig.2.7). Trois sous-bassins versants alimentent l'estuaire du Gabon : celui de la Mbèi (en vert Fig.2.7) qui contient 3 stations entre les chutes de Kinguélé et le confluent Mbèi-Komo ; celui du Komo (en rouge Fig.2.7) qui contient une station au niveau du confluent Ndou-Komo ; et celui de l'Assango (en jaune Fig.2.7) qui contient une station entre Kougouleu et l'estuaire. Auxquels s'ajoute, un sous-bassin versant alimentant la « Baie de la Mondah » : Il s'agit du bassin de la Nzémé (en bleu Fig.2.7) qui contient une station entre Ntoum et la Mondah.

2.2 MÉTHODES

Deux approches sont utilisées dans le cadre de cette étude :

- La méthode statistique d'analyses de données visant à caractériser les distributions des données mesurées, au moyen de grandeur telles que la médiane, la dispersion ainsi qu'à quantifier les degrés de corrélation inter-séries. Pour un paramètre donné, on analysera :

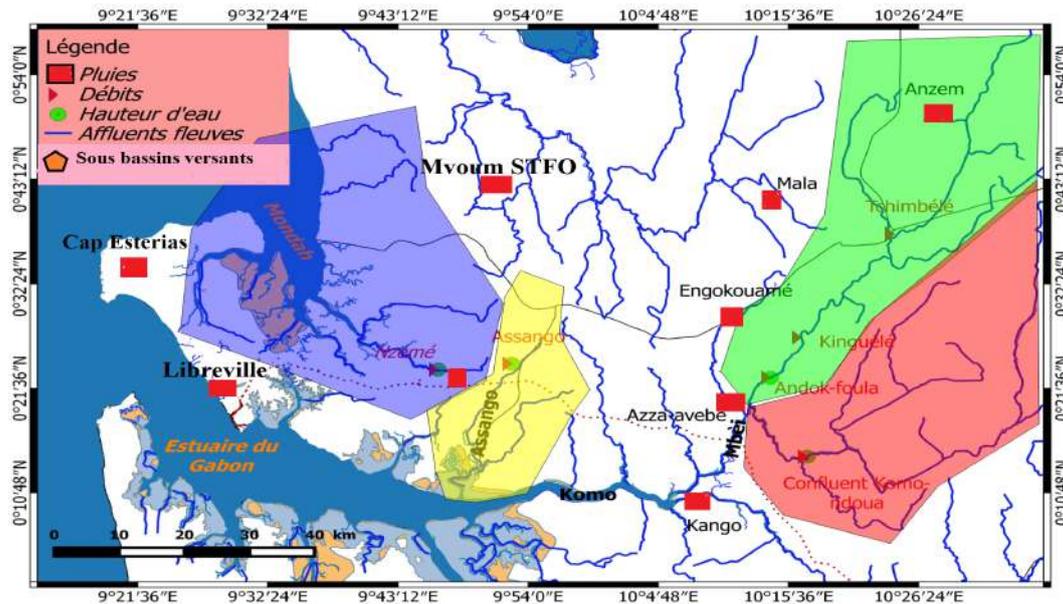


FIGURE 2.7 – Spatialisation des sous bassins versants et stations de précipitations

La variabilité sur l'ensemble des stations,
 La variabilité par groupe,
 La variabilité par segment.

- Les techniques de traitement du signal, ayant pour objectif de décrire les propriétés de distribution. Ainsi l'analyse en ondelette (Torrence et Compo, 1998) permet de faire une représentation temps fréquence d'une série temporelle et d'extraire les périodes dominantes des signaux au travers leurs spectres d'énergie. Au contraire de la transformée de fourrier qui permet d'extraire les fréquences dominante d'un signal stationnaire, l'analyse en ondelette permet de localiser dans le temps les fréquences dominantes d'un signal transitoire.

2.2.1 Détermination des courbes de tarage

Comme mentionné précédemment, les données hydrologiques consistent soit en des mesures de hauteurs d'eau (h), soit de débit (Q). Dans cette étude, il a été choisi d'exprimer toutes les données hydrologiques sous forme de débits. Lorsque seules, les données de hauteurs d'eau sont disponibles pendant un laps de temps donné, il est possible de les convertir en débit, si une courbe de tarage a été déterminée pour le site considéré. Débits et hauteurs d'eau sont liés par une fonction caractéristique du site considéré, appelée courbe de tarage. Nous choisissons de modéliser la courbe de tarage en chaque station au moyen d'un polynôme du premier degré sans le terme constant :

$$Q(h) = a * h + b \quad (2.1)$$

a est le coefficients du polynôme, b la constante et h la hauteur d'eau.

2.2.2 Relations pluies-niveaux d'eau-débits dans le bassin versant du Komo :

Les relations entre les précipitations et les débits, constituent une partie essentielle pour la modélisation des écoulements dans un bassin versant. Ces relations peuvent être très sophistiquées à très petites échelles de temps ou assez simple comme de simples régressions liant les lames d'eau écoulées aux hauteurs de précipitations à l'échelle annuelle. Dans cette étude, nous estimerons les débits mensuels (Q) au moyen de simple régression linéaire des hauteurs de précipitation.

médiane du cumul mensuel des précipitations varie entre 180 à Anzem et 300 mm/mois à Azza avebe. De fortes variations sont observées et les maxima sont de l'ordre de 600 mm de pluies dans toutes les stations. Les séries temporelles des précipitations montrent de fortes variations mensuelles et interannuelles. Sur la période 1958-1977, les précipitations maximales ont été observées à Kango lors des saisons de pluies de 1961, 1962 et 1967. Les années les plus sèches ont été observées en 1974 et 1975. L'analyse en ondelettes montre un fort signal semi-annuel pour toutes les séries avec des pics de concentrations d'énergie dans la bande 4-8 mois. Un second pic d'énergie moins significatif correspondant aux périodes annuelles d'environ 12. Cette distribution spectrale, dominée par les périodes de 4-8 et 12 mois correspondent aux variations attendues d'un régime pluviométrique rythmé par l'alternance de 2 saisons des pluies et 2 saisons sèches par an. Bien que non significative sur l'analyse en ondelettes, une variabilité à l'échelle décennale semble être observé sur la série mensuelle des précipitations à Kango.

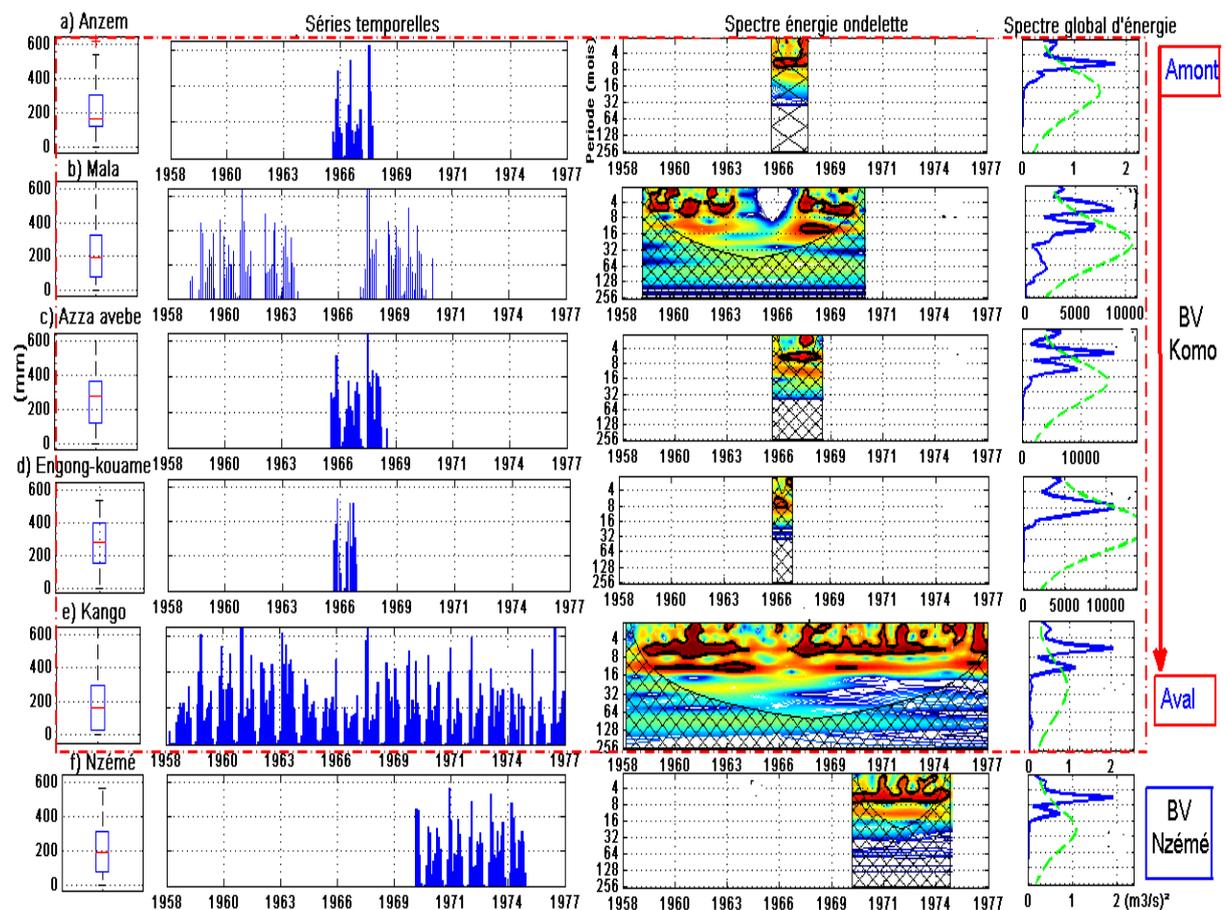


FIGURE 3.2 – variation temporelle des pluies annuelles et saisonnières

La variation mensuelle moyenne des précipitations (Fig.3.3) reflète clairement le cycle semi-annuel suggéré par l'analyse en ondelettes. Ces variations saisonnières, qui sont directement liées à la migration de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT), montrent bien les quatre saisons caractéristiques du climat équatorial. Les périodes de mars à mai et de septembre à novembre correspondent respectivement à la petite et grande saison des pluies avec des maximums locaux des précipitations observées en Avril (300 mm/mois) et octobre novembre (supérieur à 400 mm/mois). Il est à noter que les résultats obtenus à Engong-kouame sont moins fiables ; car cette série ne s'étend que sur 13 mois de données. La station de Kango présente la plus période d'observation, les précipitations ont une valeur médiane de 190 mm/mois, un écart-type de 150 mm/mois et des maxima de 500 mm atteint en novembre. La station de la Nzémé a une valeur médiane 190 mm/mois avec des maxima atteignant en octobre 440 mm.

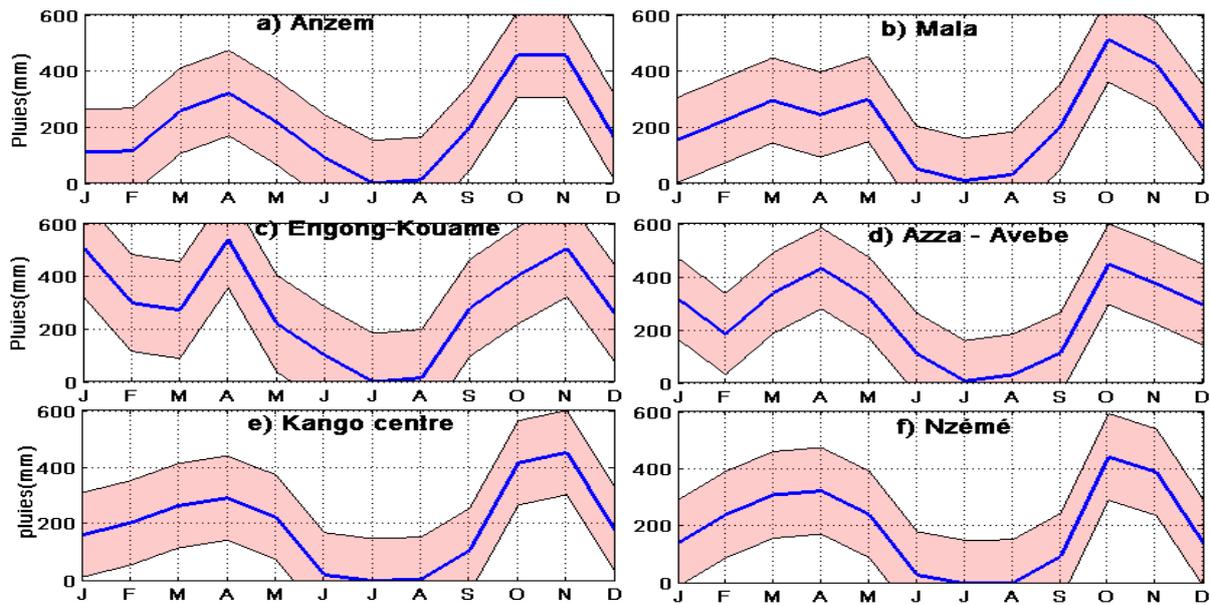


FIGURE 3.3 – variation saisonnière des précipitations

3.2 Relation débits-hauteur d'eau : courbe de tarage

Les courbes de tarage des 4 stations hydrométriques sont présentées sur la Figure3.4. Comme mentionné précédemment, les courbes de tarage sont spécifiques au site considéré. Ces relations sont utilisées pour extrapoler des séries de débits à partir de mesures de hauteurs d'eau. Le modèle reproduit correctement la plus grande partie de la variance des mesures (r^2 compris entre 0.88 et 0.99), et une différence déviation standard de 0.05 et 0.14 et une différence moyenne de 0.01 et 0.05 $m^3 s^{-1}$.

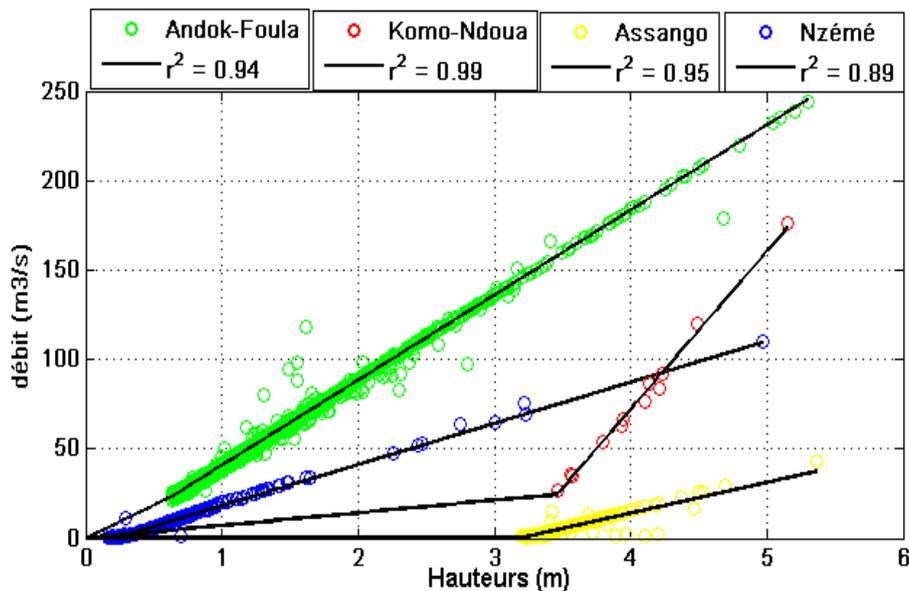


FIGURE 3.4 – courbe de tarage aux stations hydrométriques de l'étude.

Les hauteurs à l'Assango : crues maximales observées en Avril 1969 et novembre 1970 ont atteint 3.82 m à l'échelle. L'étiage absolu en aout 1970 avec 3.21 m. le niveau d'eau ne varie pas fortement dans

cette station, médiane varie entre 330 à 358m entre 1968 et 1972.

3.3 Etude de la variabilité des débits intra sous-bassins et entre sous-bassins

Les distributions moyennes des débits dans les sous-bassins versants du Komo (vert), de l'Assango (jaune) et de la Mondah (bleu) sont présentées sur la Figure 3.5. La distribution des débits sur les 6 stations permet de distinguer deux zones : les sous-bassins de la Mondah et de l'Assango, qui ont des débits relativement faibles pendant toute l'année ($3 \text{ à } 4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et les deux sous-bassins de la Mbèi et du Komo, où les débits moyens dépassent les $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (et peuvent atteindre $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en période des crues). Les coefficients de variations (Cv), qui correspondent au rapport entre les écart-types des débits et leurs valeurs moyennes, varient entre 40 – 95%, excepté à Tchimbélé et Kinguéle où Cv=10 – 20%. En ces deux sites, les séries temporelles récentes (1998-2015) sont à considérer avec précaution car il s'agit de débits turbinés aux centrales hydro-électriques et elles ne reflètent probablement pas complètement la variabilité naturelle du régime hydrologique

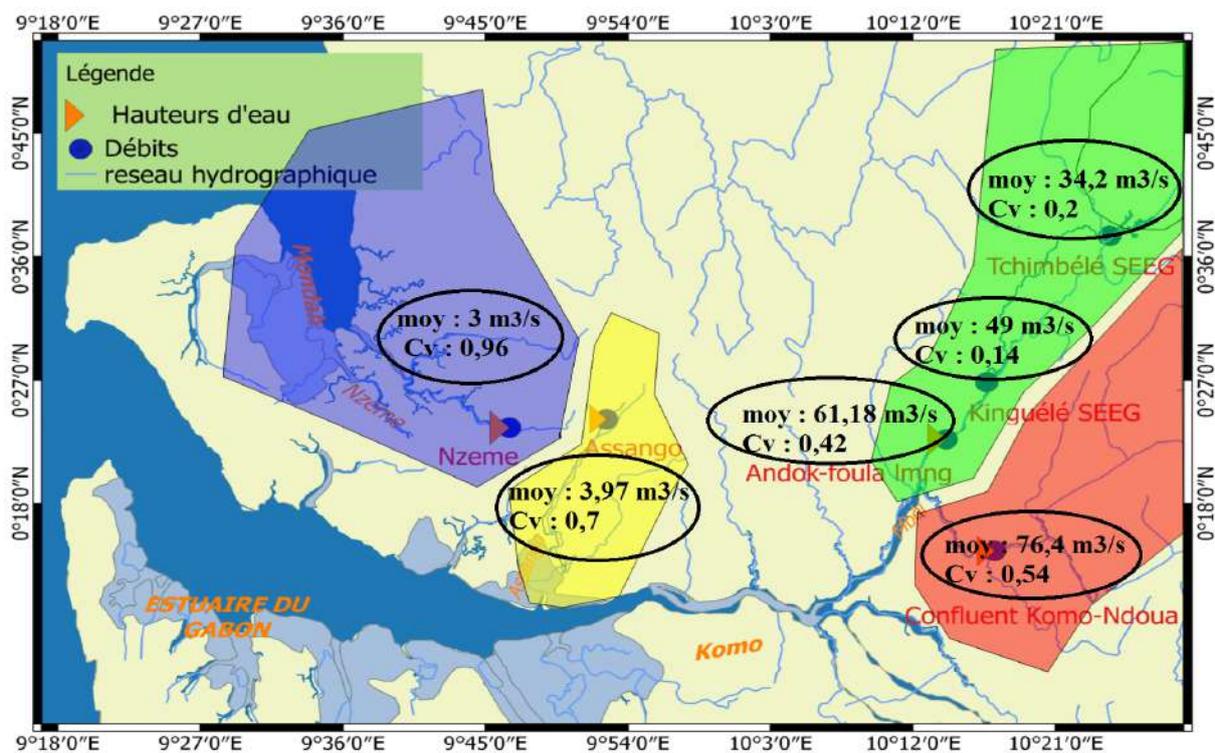


FIGURE 3.5 – Distribution moyenne des débits dans la zone d'étude.

Les résultats de l'analyse des séries temporelles des débits (Fig.3.6) sont présentés de manière similaire à ceux des précipitations. Les données de débits extrapolées des hauteurs d'eau par les courbes de tarage, sont indiquées en rouge sur la seconde colonne des stations Andok-Foula, Assango et Nzémé et le Komo-Ndoua. Cette dernière station sera exclue du reste de l'étude car elle n'a pas une densité fiable et suffisante des données. Les enregistrements aux stations Kinguéle et Tchimbélé s'étendent de 1999 à 2015, contrairement aux autres séries qui sont présentées entre 1958 et 1976. Ils sont caractérisés par des cotes extrêmes de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à Kinguéle et $53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à Tchimbélé en novembre 2003 et par des étiages absolus en aout 2005, de 30 et $19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivement. Les données obtenues à Andok foula présentent des écarts importants entre les crues (maximum de $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et les étiages ($20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). En cette station, on note une augmentation continue des débits sur la période 1959-1975, estimée à m^3/an .

Sur la période 1967-1974, le débit annuel moyen sur la Mondah (station de Nzémé) est très faible (débit médian $2.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ avec une valeur annuelle maximale de $12,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 1972). On observe entre 1965 à 1967 une nette diminution de la valeur médiane des débits; de 25 à $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Le sous-bassin de l'Assango, présente une rupture similaire dans les débits estimés entre 1971 et 1972.

Les résultats de l'analyse en ondelettes indiquent principalement la présence de régimes semi-annuels et annuels dans les spectres d'énergie de toutes les stations analysées. L'importance relative de ces deux composantes varie suivant la station. Seule la composante annuelle est significative à la station Tchimbélé. A Kinguélé, la composante interannuelle est présente mais son intensité est très inférieure à la composante annuelle. Cette tendance est inverse aux stations d'Andok-Foula, Assango et Nzémé et caractérisée par la présence de deux saison, une assez prononcée.

Aucune composante pluriannuelle significative n'a été mise en évidence par l'analyse en ondelettes.

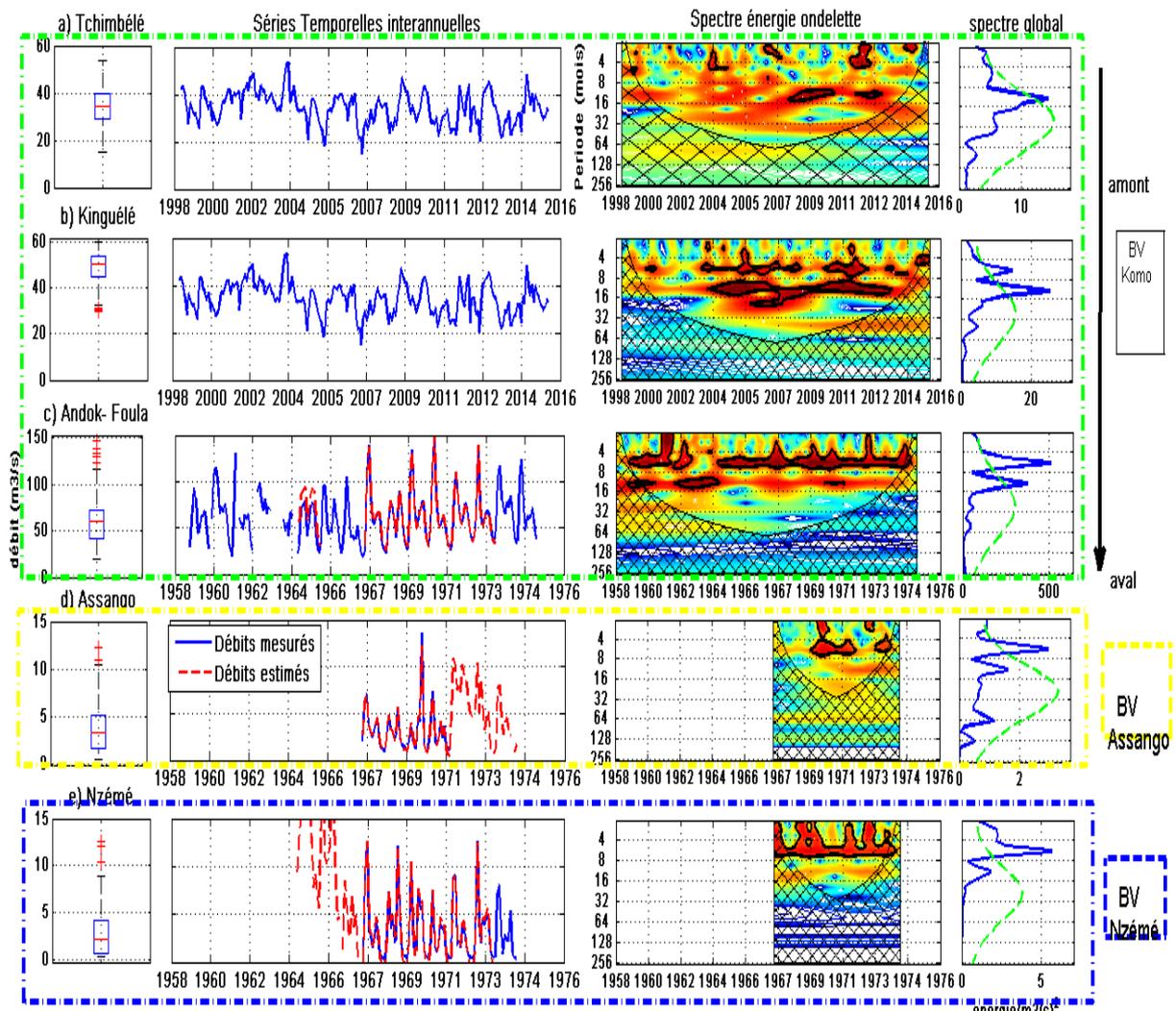


FIGURE 3.6 – Variations interannuelle et spectrale des débits dans les sous bassins

L'analyse en ondelettes est confirmée par les moyennes des débits calculés sur 12 mois (Fig.3.7). Les maxima des débits ont lieu en mars, avril et octobre, novembre ; périodes qui correspondent respectivement à la petite et grande saison des pluies, sauf à la station Tchimbélé où le débit maximum est mesuré en mars, diminue jusqu'en août-septembre pour augmenter de nouveau jusqu'à mars. L'évolution annuelle des débits est relativement comparable à la station Kinguélé, avec toutefois une légère diminution des débits en décembre ; les débits en avril et novembre restant pratiquement égaux.

Aux autres stations, les débits maximum atteints durant la grande saison des pluies (octobre, novembre) sont plus important d'un facteur 1.5 à 2.0 que ceux atteints durant la petite saison des pluies. A la station Andok Foula, les débits de crues moyens en novembre excèdent $100m^3s^{-1}$. Les deux saisons des pluies sont séparées par deux périodes d'étiage : de décembre à février et de juin à août, Les débits minimum étant toujours mesurés en été.

Les débits médians dans les sous- bassins versants de l'Assongo et de la Mondah, sont plus faibles d'un ordre de grandeur, 3 et $4m^3s^{-1}$, respectivement.

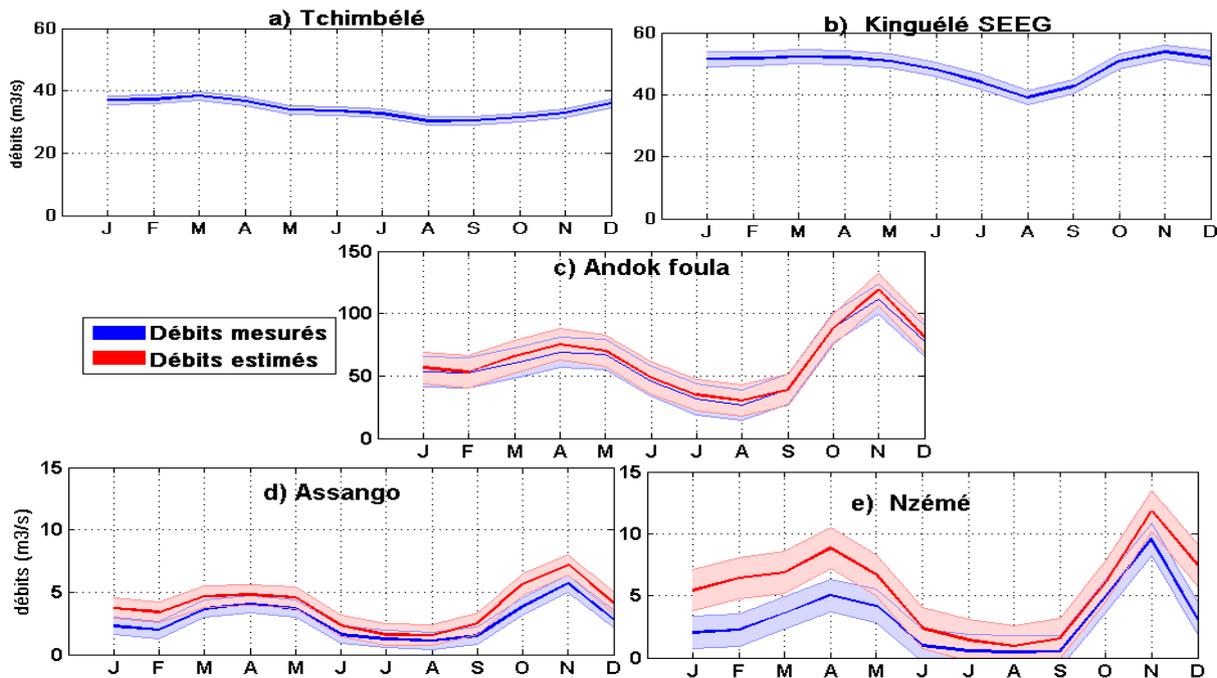


FIGURE 3.7 – variations mensuelles des débits

3.4 Relations pluies-débits

Les séries temporelles des précipitations et de débits mesurés dans les trois sous bassins versants ou des données sont disponibles simultanément sont tracées sur la figure 3.8. Les régressions linéaires entre ces séries; relations pluies-débits, sont présentées sur la colonne de droite. Les relations pluies-débits permettent d'expliquer la plus grande part des variations de débits journaliers : r^2 de 0,55 dans le sous-bassin versant d'Andok-Foula à 0.84 pour le sous-bassin versant de la Mondah. Dans le sous-bassin versant de l'Assango, la partie non expliquée des variations de débits reste élevée ($r^2 = 0.57$), néanmoins, aucun déphasage entre les maxima de précipitations et de débits n'est observé. On observe une surestimation systématique des débits d'étiage par cette méthode

La figure3.8 présente la série temporelle reliant les débits en fonction des précipitations dans les sous-bassins du Mbèi Andok-Foula, la Mondah et l'Assango par régression linéaire. Dans le sous bassin d'Andok-Foula, l'estimation des débits présente une assez bonne simulation ($r^2 = 0,51$) des débits estimés avec les débits observés, elle est bien marquée à partir de 1968 à 1975 (Fig2.7 a). La relation entre les débits (Andok-Foula) et pluies (Kango) est influencée par un décalage temporelle d'un mois observable entre octobre et novembre. Dans le sous bassin de la Mondah, les débits estimés sont significativement bien corrélés ($r^2 = 0.84$) au débits mesurés pendant toute la chronique d'observation (figure3.8 b). Le sous bassin de l'Assango est quand-elle marqué par une sous-estimation du model sur les débits mesurés, mais on note tout de même une tendance régulière entre le maximum de débit e le maximum de précipitation à la Nzémé. Néanmoins, il faut noter que cette méthode n'arrive pas à reproduire correctement les étiages ;

les écarts observés étant dû au fait que tous les critères d'évaluation de débits n'étant pas prise en compte dans notre modèle.

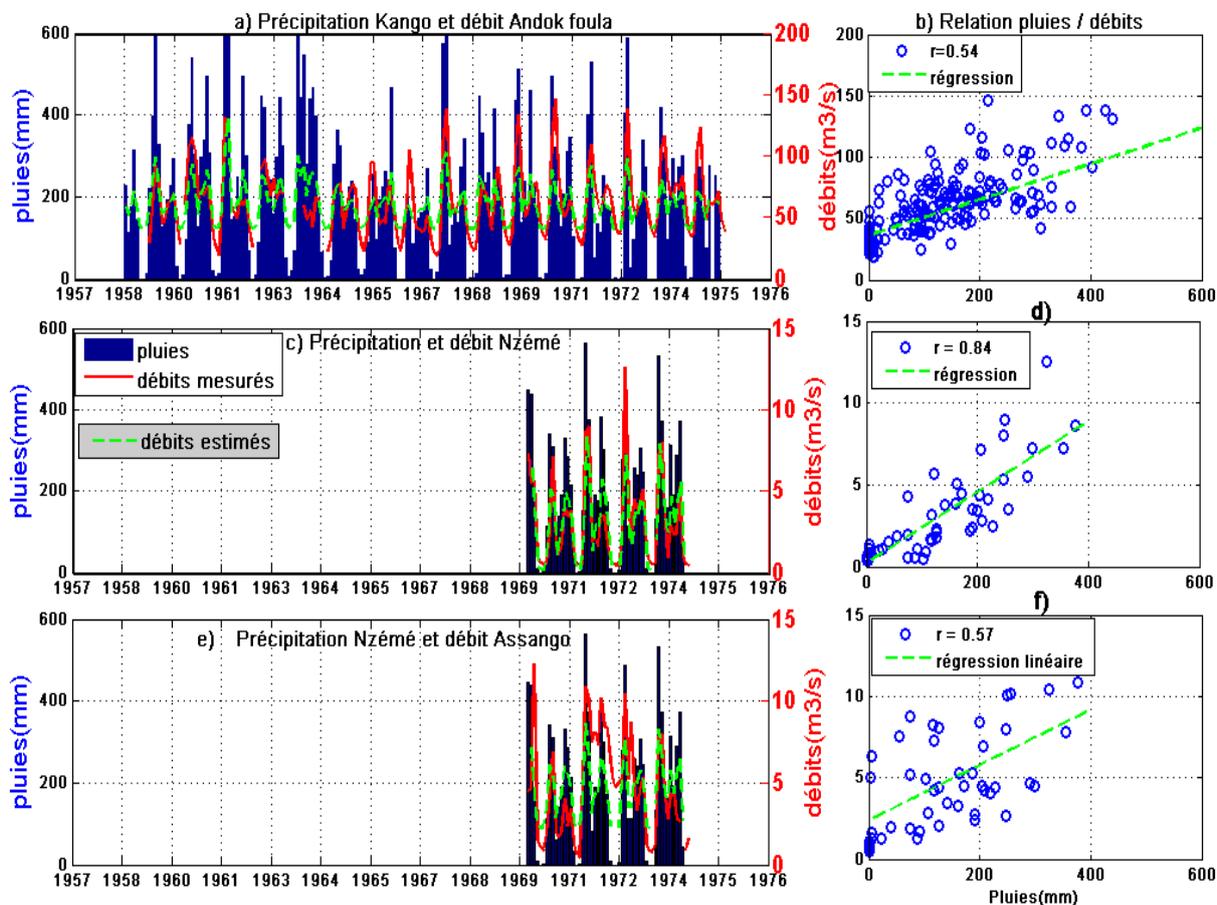


FIGURE 3.8 – relations pluies-débits dans les trois sous-bassins : à gauche, précipitations journalières (bleu), débits mesurés (rouge) et estimés (vert) ; à droite, régression linéaire entre précipitations et débits mesurés.

La figure 3.9, montre le comportement mensuel du régime pluviométriques et hydrologiques dans chaque segment des bassins versants. Il ressort de cette représentation, que les régimes semi-annuels des précipitations qui se distingue par deux maxima, le premier en avril pour l'ensemble des stations pluviométriques et second intervient en octobre pour les stations Nzémé, Azza avebe, et Mala et en novembre pour les stations Engong Kouame, Anzem et Kango. Les débits maximums surviennent quant à eux en novembre sur l'ensemble des stations hydrométriques. Au vu de la très forte saisonnalité des précipitations en amont des centrales hydroélectriques de Tchimbélé et Kinguéle il est donc anormal que les débits en ces stations ne montrent pas un signal semi-annuel beaucoup plus marqué. Comme mentionné précédemment, les débits turbinés ne rendent pas compte de la variabilité naturelle du cours d'eau en ces stations. Les relations pluies débits sur la Nzémé et le confluent Komo Ndoua montre un retard d'un mois entre le pic de pluies en octobre et le maximum de débits qui survient en novembre.

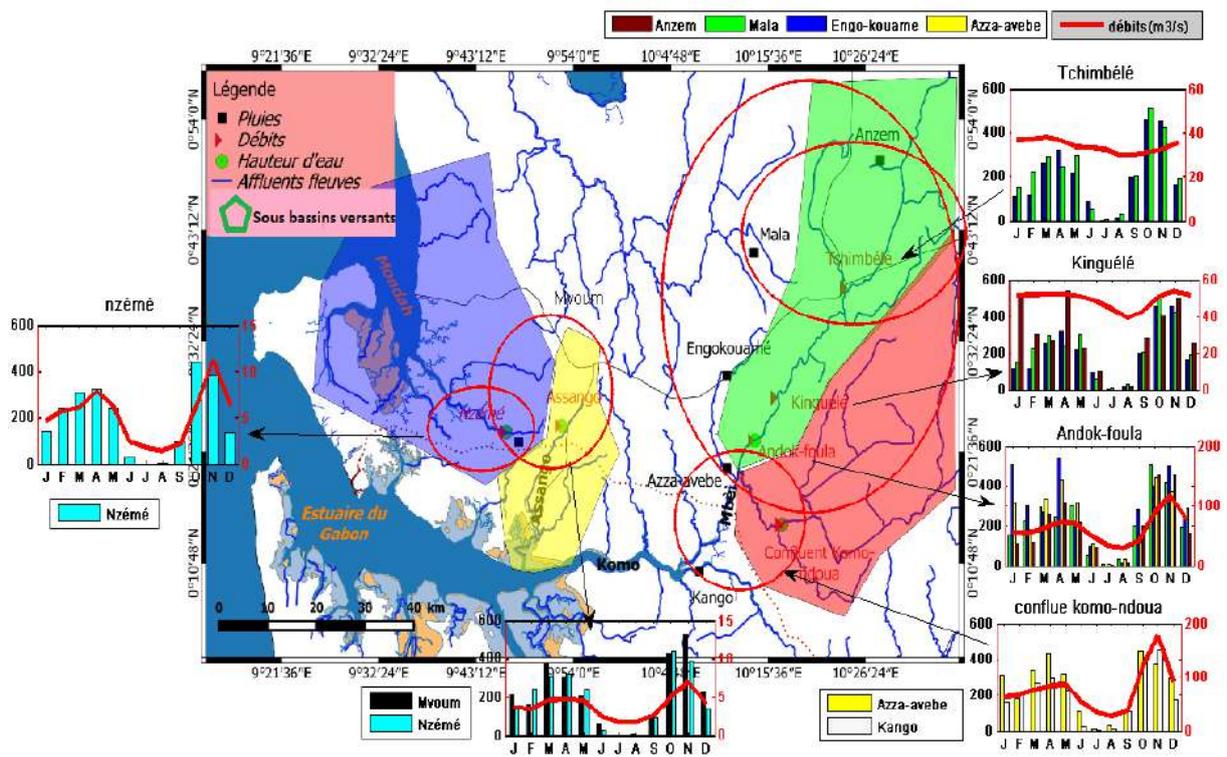


FIGURE 3.9 – carte spatiale des variations mensuelles entre précipitations et débits dans chaque segment.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Cette étude avait pour objectif d'analyser des séries historiques de précipitations, hauteurs d'eau et débits mesurées dans les bassins versants du Komo et de la Mondah au Gabon. Un travail préliminaire a consisté à numériser l'ensemble des données disponibles, et de faire un pré-traitement de ces données afin de former une base exploitable. Nous avons pu quantifier et caractériser la variabilité hydrométrique et pluviométrique dans la région d'étude et déterminer des relations pluies-débits.

Nous avons d'abord montré, en accord avec Maloba (2007[12]), que la distribution moyenne des précipitations diminue du nord au sud et de la zone côtière vers l'intérieur des terres. Le régime moyen des précipitations et des débits des cours d'eau montre de fortes variations temporelles. Une analyse en ondelettes de ces séries a révélé une grande concentration d'énergie dans la bande de 4 - 8 mois, indiquant une périodicité semi-annuelle des pluies et des débits. Cette périodicité reflète le cycle saisonnier des précipitations qui montre quatre saisons pluviométriques bien marquées au Gabon comme décrit par Lérique (1983[8]) et Mahé *al.*, 1990[9] : deux saisons de pluie de septembre à novembre et de février à mai associées à des périodes de crues, et deux saisons sèches (décembre à janvier et de juin à août) durant laquelle le régime des écoulements (débits) diminue. Les précipitations et débits sont moins intenses durant le pic de la petite saison des pluies (février-mai) que durant celui de la grande saison des pluies (septembre-novembre). Ceci est en accord avec les plus faibles précipitations dues au flux de mousson observées lors de la montée septentrionale de la ITCZ, que lors de sa redescente (Mahé et Citeau, 1993[11]). Aux échelles interannuelles, le régime montre par contre une faible variabilité. Ce résultat est cohérent avec l'étude de Maloba (2010[14]) qui suggère que la variabilité interannuelle des précipitations au Gabon est l'une des plus faibles au monde (Maloba, 2010[14]). Les variations interannuelles des débits obtenues lors de cette étude, sont également conformes aux observations des débits des rivières voisines en territoire gabonais (Mahé et al., 1990), et congolais (Bricquet *al.*, 1997[3]). Outre ces variations semi-annuelles et interannuelles, une variabilité à l'échelle décennale a été décelée sur la série mensuelle des précipitations à Kango. Cependant, l'intensité du pic d'énergie n'est pas significatif dans l'étude en ondelette et ne permet donc pas de juger de la vraisemblance de l'existence de cette composante basse fréquence. Cette incertitude illustre le problème de l'insuffisance des données météorologiques au Gabon, décrit par Maloba (2009[13]). Des relations pluies-débits ont ensuite été déterminées par une régression linéaire entre précipitations et débits des cours d'eau. Nous avons montré que l'intensité des écoulements était directement lié à celui de la lame d'eau précipitée. Si un retard dans l'apparition des pics de débit après un pic de précipitation peut être observé certains mois, sur certains sites, globalement, on peut considérer que la variation des débits est synchrone à celle des précipitations aux échelles des périodes de mesures. Sur la base de ces relations, il est clair que la variabilité hydrologique est calquée sur la variabilité pluviométrique. La relation pluies-débits la moins significative est obtenue dans le bassin versant de l'Assango. Cette erreur de prédiction pourrait être imputée à l'utilisation de mesures de précipitation obtenues à Nzémé, station appartenant au sous-bassin versant voisin de la Mondah, bien qu'aucun déphasage entre les maxima de précipitations à Nzémé et de débits à Assango ne soit observé.

Comme mentionné plus haut, les résultats obtenus dans cette étude peuvent être biaisés par la relativement faible densité des mesures disponibles, mais également par la fiabilité des données utilisées. Celle-ci est difficile à évaluer, faute d'informations précises sur les protocoles employés. Ce manque de fiabilité et rareté des données peuvent être à l'origine de l'impossibilité d'établir de relation hauteur

d'eau-débit (courbe de tarage) par la méthode classique d'extrapolation logarithmique (projet Volta-Hycos, 2007[19]). Une autre raison de la difficulté d'établir cette relation est une instabilité géométrique et/ou hydraulique des portions de rivières (bief) étudiées.

Cette étude a fourni une description précise des précipitations et des régimes hydrologiques autour de l'estuaire du Gabon qui est la zone cible des projets scientifiques du programme « Arc d'Émeraude » commandité par l'Agence Nationale des Parcs Nationaux du Gabon. Les résultats obtenus, notamment la variabilité saisonnière des débits, une quantification réaliste des forçages nécessaires à l'implémentation d'un modèle hydrodynamique de l'estuaire. Cette étude pourra être prolongée en complétant les données historiques de précipitations (1960-1970) par des données satellitales récentes et actuelles. Ceci permettra de confirmer ou infirmer l'hypothèse de variations décennales insuffisamment étayée dans le cadre de cette étude. La comparaison entre le résultat des modèles pluies-débits appliqués à des données satellitales actuelles et les mesures de débits qui seront réalisées dans le cadre de ce programme, permettra d'amender ces modèles dans les bassins versants du Komo, de l'Assango et de la Mondah. De plus ces modèles pluies-débits pourront être rendus plus robustes en y intégrant les caractéristiques physiographiques des bassins, par exemple : la nature géologique du substratum, les grands types de sols qui le constituent, le couvert végétal, la pente et les indices de compacité ou l'occupation du sol).

Bibliographie

- [1] ANPN, (2017) : Livrable A2 du Lot no1 du projet Arc d'Émeraude, réalisé par l'IRD, le CENAREST et l'Université de Douala, Juin 2017.
- [2] Arvor D., Dubreuil V., Ronchail J., Meirelles M., 2008 : Apport des données TRMM 3B42 à l'étude des précipitations au Mato Grosso. *Climatologie*, 5, 49-69.
- [3] Bricquet, J.P., Bamba, F., Mahé, G., Touré, M., Olivry, J.C. (1997) Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *Revue des sciences de l'eau* (3), 321-337.
- [4] CARRÉ P., (1978). - Fleuves et rivières du Gabon. Diversité des régimes hydrologiques. 24 p., 2 cartes. République gabonaise. Centre national de la recherche scientifique et technologique. Section d'études et recherches en hydrologie.
- [5] Dhonneur G., (1985) : L'équateur météorologique : une structure planétaire. Dans *Climatologie tropicale et Etablissements Humains. Actes de Symposium*, n°23, 27-40.
- [6] Lebigre, J.--M and C. Marius (1984). Etude d'une séquence mangrove--tanne en milieu équatorial, baie de la Mondah (Gabon). Bordeaux : CEGET, 1984, p.132--144.
- [7] Lérique, J. and M.Tourne (1972). Etude hydropluviométrique du bassin versant de la Nzeme : rapport définitif : tome1. Texte.Tome2. Annexes et croquis.Libreville : ORSTOM,126 +7p.
- [8] Lérique, J. (1983). Hydrographie, hydrologie.In :Barret J.,Walter R. (ill.). Géographie et cartographie du Gabon : atlas illustré. Paris : EDICEF, 1983, p. 14--17.
- [9] Mahé, G., Lérique, J., Olivry, J.C. (1990) Le fleuve Ogooue au Gabon. Reconstitution des débits manquants et mise en évidence de variations climatiques à l'équateur. *Hydrol.Cont.* 5(2), 105-124.
- [10] Mahé, G., (1993) Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations 10hydroclimatiques moyennes et extrêmes. ORSTOM, eds. Coll. Etudes et Thèses, Paris, 438 p.
- [11] . Mahé G., Citeau J. (1993) Relations océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique Satellitaire Ed. ORSTOM-METEO FRANCE*, 44, 34 :54
- [12] Maloba Makanga J. D., (2007) : Quelques traits climatiques du Gabon : le cas de la distribution des précipitations mensuelles. *Revue Gabonaise de Géographie*, 2, 109-127.
- [13] Maloba Makanga J.D. (2009) Réseaux de mesures météorologiques au Gabon : Pour quelle évaluation des changements climatiques? *Annales de l'Univ. Omar Bongo*, 14, 17-39, ISBN : 978-2-912603-21-0
- [14] Maloba Makanga J. D., (2010) : Précipitations au Gabon : climatologie analytique en Afrique. *L'Harmattan*, 143 p.
- [15] Maloba Makanga J. D., (2014) : À propos des prévisions météorologiques. Plaidoyer pour une amélioration des conditions d'observation des éléments du temps. Dans *les enjeux et défis du Gabon au XXIe siècle.Connaissances et Savoir*, 193-214
- [16] Moron V., (1994) : Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère. Thèse pour le doctorat,CRC, Univ. de Bourgogne, 219 p. + Atlas.

-
- [17] ORSTOM (1964). Régime hydrologique de la M'Bei : conditions hydrologiques. Paris : ORSTOM, 21 p.
- [18] Peeters, P., C. Tessier and P. Thômé (2010). Comportement hydro-sédimentaire de l'Estuaire du Gabon. Rapport de DHI préparé pour Gabon Port Management, 103 p.
- [19] Projet Volta-Hycos (2007) Séminaire de formation sur les courbes de tarage, Tarage d'une station Hydrométrique - Ministère Environnement, 19 pp.
- [20] Suchel, J. B. (1987) Les climats du Cameroun. Thèse doctorat d'état, Université de Bordeaux III, France.
- [21] <http://www.hydrosciences.fr/sierem/>. [Citation : 14 Mai 2017].

ANNEXES

Tableau 1 – données disponibles sur chaque station du fleuve Komo

Stations	Lon°E-Lat°N	Hauteurs d'eau	Débits	Appareils	Fréq
Andok-Foula échl	10.2258-0.3728	09-1964 au 08-1971	01-1959 au 08-1971	E	Jr
Andok-Foula LMNG	10.235-0.3781	09-1964 au 08-1973	01-1968 au 12-1975	L	Jr
Nzamaligüe	10.22609-0.306543	09-1966 au 09-1968	absent	E	Jr
Confluent Komo-Ndoua	10.285981-0.242482	09-1969 au 08-1973	09-1973 au 12-1976	L	Jr
Tchimbélé LMNG	10.406989-0.625202	absent	09-1969 au 08-1976	L	Jr
Nzémé	9.775433-0.392255	09-1964 au 08-1973	09-1967 au 08-1974	E	Jr
Assango	9.887222-0.416389	09-1967 au 08-1974	09-1967 au 08-1971	L	Jr
Kinguélé SEEG	10.277778-0.4475	absent	01-1999 au 12-2015	L	Jr
Tchimbélé SEEG	10.406989-0.625202	absent	01-1999 au 12-2015	L	Jr

Tableau 2 – corrélation de Spearman sur les débits.

Stations	Tchimbélé	Kinguélé	Andok-foula	Komo-ndoua	Assango	Nzémé
Tchimbélé	1					
Kinguélé	0,720	1				
Andok-foula	0,287	0,755	1			
Komo-ndoua	0,280	0,734	0,986	1		
Assango	0,322	0,776	0,944	0,923	1	
Nzémé	0,378	0,832	0,965	0,951	0,923	1

Tableau 3 – corrélation aux stations pluviométriques de la Nzémé.

Stations	P06	P07	P20	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P93	PG23	PGF
P06	1											
P07	0,996	1,000										
P20	0,996	1,000	1									
P24	0,999	0,997	0,997	1								
P25	0,998	0,998	0,997	0,999	1							
P26	0,995	0,999	0,998	0,997	0,998	1						
P27	0,994	0,999	0,998	0,997	0,997	0,999	1					
P28	0,994	0,999	0,999	0,996	0,997	0,999	1,000	1				
P29	0,999	1,000	1,000	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	1			
P93	0,995	0,999	0,999	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000	0,999	1		
PG23	0,999	0,996	0,996	0,999	0,999	0,996	0,995	0,995	0,997	0,996	1	
PGF	0,568	0,555	0,566	0,561	0,545	0,540	0,556	0,570	0,561	0,562	0,558	1

Niveau de significativité $\alpha = 0,05$;

Tableau 4 – corrélation de pluies à Libreville.

Stations	Libr AERO1	Libr AERO2	Libr PORT	Libr St Anne	Ikoy-Bandja	Libr Ville	Libr St Jean
Libr AERO1	1						
Libr AERO2	1,000	1					
Libr PORT	0,969	0,969	1				
Libr St Anne	0,951	0,950	0,907	1			
Ikoy-Bandja	0,824	0,824	0,823	0,866	1		
Libr Ville	0,984	0,984	0,982	0,942	0,821	1	
Libr St Jean	0,973	0,973	0,988	0,943	0,885	0,985	1

Tableau 5 – corrélation de pluies proches du Bassin versant.

Stations	Ngouale	Anzem	Azza-avebe	Kango C	Mouni	Engong-Kouame	Mvoum	Nkoungounga
Ngouale	1							
Anzem	0,636	1						
Azza-avebe	0,686	0,820	1					
Kango C	0,622	0,341	0,605	1				
Mouni	0,845	0,652	0,585	0,432	1			
Engong-Kouame	0,579	0,741	0,689	0,338	0,557	1		
Mvoum	0,569	0,903	0,842	0,380	0,644	0,711	1	
Nkoungounga	0,689	0,883	0,816	0,474	0,768	0,725	0,969	1

Tableau 6 – paramètres statistiques.

Stations	Minimum	Maximum	Moyenne	écart-type	Coefficient de variation (Cv)
Ngouale	3,000	974,0000	406,833	280,754	0,691
Anzem	1,000	543,000	199,750	166,212	0,833
Azza-avebe	6,000	522,000	219,500	147,812	0,676
Kango C	0,000	466,000	134,750	127,917	0,951
Mouni	5	1050,000	350,750	298,837	0,850
Engong-Kouame	0,000	537,000	273,250	186,436	0,683
Mvoum	0,000	643,000	219,917	188,146	0,850
Nkoungounga	0,000	530,000	188,000	156,400	0,831

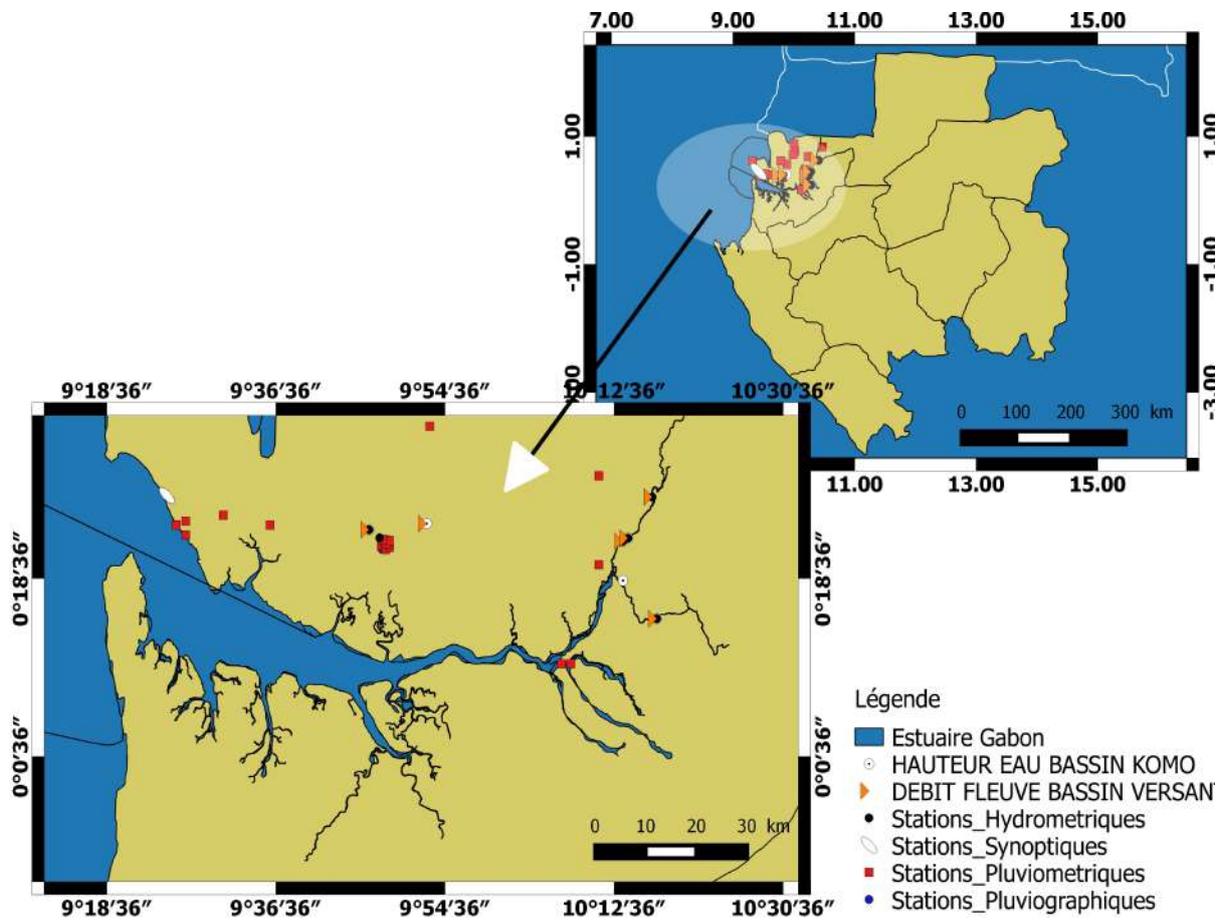


FIGURE 1 – localisation de l'estuaire du Gabon

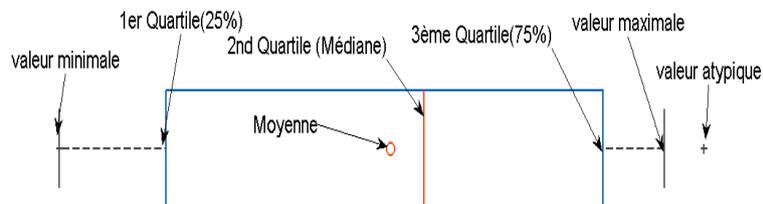


FIGURE 2 – boite à moustache(de Turkey)