

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONALE DE L'EAU (INE)

=====

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN
EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

Etienne Gbêtongbo ZANOU

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

**EXPLORATION DES PREVISIONS SAISONNIERES
HYDROLOGIQUES A PARTIR DES INDICES
CLIMATIQUES**

=====

Maître de Mémoire

Dr. Jean HOUNKPE

Enseignant Chercheur (INE/UAC)



PROMOTION 2021-2022

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONALE DE L'EAU (INE)

=====

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN
EAU

Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme de
licence professionnelle en hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

**EXPLORATION DES PREVISIONS SAISONNIERES
HYDROLOGIQUES A PARTIR DES INDICES
CLIMATIQUES**

=====

Réalisé par :

Etienne Gbê tongbo ZANOU

Mention : **Excellente**

Membres du Jury	Emargement
Dr. Ing. AHOUANSSOU Maurice	
Dr. OBADA Ezéckiel	
Dr. HOUNKPE Jean	

PROMOTION 2021-2022

IN MEMORIUM

Qu'il me soit permis de dédier ce travail à mon père Feu Roger ZANOUE, pour le goût à l'effort suscité en moi. Puisse Dieu, le Tout Puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.

DEDICACE

Je dédie cette œuvre, fruit de nombreux efforts et de sacrifices à ma génitrice, Solange GOUGLA et à Léa DJEBOU. Que Dieu vous bénisse, que sa grâce et son amour vous accompagne tous les jours.

REMERCIEMENTS

Le travail présenté ici a été mené à son terme grâce à l'appui et aux encouragements de maintes personnes. Qu'il me soit permis ici d'exprimer mes remerciements à tous. Je tiens à remercier particulièrement :

- ✚ DIEU Tout Puissant pour ses bienfaits, sa protection, son amour et sa grâce dans ma vie. Je ne crains aucun mal car tu es là Eternel, ta grâce m'accompagne tous les jours de ma vie. Merci de m'avoir permis d'accomplir ce travail et fais-moi encore grâce Seigneur ;
- ✚ Les Professeurs Daouda MAMA et Abdoukarim ALASSANE, respectivement Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE) et Chef du département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau ;
- ✚ Dr Jean HOUNKPE. Qu'il reçoive ici mes sincères et profonds remerciements pour m'avoir proposé ce thème et surtout pour l'encadrement si précieux qu'il m'a fourni, aussi pour sa disponibilité, ses précieux conseils tout au long de ce stage, ses grandes qualités scientifiques et son sens humain. Il m'a beaucoup facilité le travail par son attention et son encadrement permanent ; ses remarques pertinentes et ses connaissances dans le domaine de l'hydrologie m'ont été d'un apport très appréciable ;
- ✚ Dr Djigbo Félicien BADOU, pour ses conseils et encouragements ;
- ✚ Les enseignants de l'Institut National de l'Eau pour leurs enseignements et conseils durant ces trois années d'études ;
- ✚ Les Honorables membres du Jury qui apprécieront ce modeste travail ; Merci pour le temps que vous sacrifierez au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- ✚ Mon Oncle Jean ZANOU. Pour moi, vous êtes mon second papa. Merci pour l'amour, l'éducation, le soutien, l'orientation et les conseils de tous les jours dont vous avez fait preuve tout au long de ma formation à l'INE. Je dis également merci à tous mes frères, sœurs et cousins, Marcel ZANOU, Angèle ZANOU, Fidèle ZANOU, Mathias ZANOU, Augustine ZANOU, Léonie ZANOU, Roméo ZANOU ;
- ✚ Monsieur Gabriel LANMAGNI et son épouse pour ses conseils et encouragements ;

✚ Mes camarades de promotion et également aux aînés pour l'ambiance ; la collaboration, l'entraide et les bons moments passés ensemble en particulier Jean de Dieu AKPACA, Freddy HOUNNONDAHO, Dieudonné ADJAMAIDOTOME, Serge DOSSOU, Xavy AFFOIGNON, Luc BIO YARA pour votre amitié, toute aide qu'ils m'ont apporté tout au long de cette formation sans oublier Blanchard ZANOU, Eustache ABAOUNBA, Chaabane SIDI.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire. Merci pour avoir toujours cru en moi, merci pour m'avoir toujours soutenu, même à distance, vous avez toujours été là.

« Plus on partage, plus on possède. Voilà le miracle. » Leonard Nimoy.

RESUME

La problématique de la disponibilité des ressources en eau dans un contexte de changements climatiques est devenue un sujet préoccupant tant pour les autorités que pour les populations rurales. En Afrique tropicale et dans le bassin béninois de l'Ouémé, de nombreuses études montrent que les eaux de surface et leur gestion sont très tributaires de la variabilité climatique. Bien que la prévision saisonnière soit opérationnelle depuis quelques années, son application à l'hydrologie reste encore aujourd'hui moins développée surtout au Bénin. La prévision saisonnière hydrologique peut pourtant se révéler être un outil utile pour prévoir quelques mois à l'avance les caractéristiques hydrologiques, comme les conditions d'humidité des sols ou les débits des rivières. La présente étude évalue les performances prévisionnelles des débits moyens annuels à partir des indices climatiques sur les stations du bassin de l'Ouémé. Huit indices climatiques régionaux ont été examinés pour leur potentiel de prédiction des débits de crue de 07 stations hydrométriques du bassin-versant de l'Ouémé. Les corrélations ont été calculées pour les années ayant moins de 10% de données manquantes en utilisant le test non paramétrique de Spearman. L'évaluation de la possibilité de prévision des débits saisonnières à partir des indices climatiques a été faite en considérant les débits moyens annuels ayant une corrélation significative avec les SSTs. L'utilisation des anomalies de températures de surface de la mer de la fenêtre 8°W-12°W/2°N-2°S améliore les performances prévisionnelles des modèles de régression linéaire considérés. On en déduit donc qu'il y a une forte connexion entre les débits de la zone d'étude et les indices climatiques de Multivariate ENSO et Tropical Southern Atlantic (TSA). Ces résultats plaident en faveur de l'exploration d'autres prédicteurs en vue d'améliorer les prévisions.

Mots clés : Météorologie, Hydrologie, Prévision saisonnière, Indices climatiques.

ABSTRACT

The problem of the availability of water resources in a context of climate change has become a matter of concern both for the authorities and for the rural populations. Many studies in tropical Africa and Benin's Ouémé basin show that surface water and its management are highly dependent on climatic variability. Although seasonal forecasting has been operational for a few years, its application to hydrology remains less developed in Benin. The seasonal hydrological forecast has been proven to be useful for forecasting hydrological characteristics, such as soil moisture conditions or river flows, a few months in advance. This study assesses the forecast performance of average annual flows from climatic indices at stations in the Ouémé basin. Eight regional climatic indices were examined for their potential for predicting flood flows from 07 river gauging stations in the Ouémé watershed. The correlations were calculated for the years having less than 10% of missing data using the non-parametric test of Spearman. The evaluation of the possibility of forecasting the seasonal flows from the climatic indices was made by considering the average annual flows having a significant correlation with SSTs. The use of sea surface temperature anomalies in the 8°W-12°W/2°N-2°S window improves the predictive performance of the linear regression models considered. It was, therefore, deduced that there is a strong connection between the flows in the study area and the climate indices of Multivariate ENSO and Tropical Southern Atlantic (TSA). These results argue in favor of exploring other predictors to improve predictions.

Keywords: Meteorology, Hydrology, Seasonal forecast, Climatic indices.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

DG-Eau	: Direction Générale de l'Eau
DMI	: Dipôle Mode Index
DMIE	: Dipôle Mode Index East
DMIW	: Dipôle Mode Index West
EM	: Equateur Météorologique
ENSO	: El Niño Southern Oscillation Multivariate
GRDC	: Global Runoff Data Centre
INE	: Institut National de l'Eau
IPCC	: Intergovernmental Panel of Climate Change
NTA	: North Tropical Atlantic
OMM	: Office Météorologique Mondial
PRESAO	: PRévisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest
SSTs	: Sea Surface Temperatures
TNA	: Tropical Northern Atlantic
TSA	: Tropical Southern Atlantic
VOS	: Bateaux d'Observation Volontaire
ZCIT	: Zone de Convergence Intertropicale

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma du système climatique [IPCC, 2007].	6
Figure 2: Situation géographique du bassin-versant de l'Ouémé l'exutoire de Bonou.....	16
Figure 3: Réseaux hydrographiques du bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou. ...	18
Figure 4: Aspects géologiques du bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.	21
Figure 5: Circulation atmosphérique et mousson ouest-africaine (a : modèle de circulation générale ; b : position au sol des saisons ; c : schéma du fonctionnement atmosphérique général sur l'Afrique de l'Ouest en saison sèche et saison des pluies.	22
Figure 6: Types de sol du bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.....	24
Figure 7: Variabilité des débits moyens annuels sur les stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé.	32
Figure 8: Variabilité des débits moyens annuels sur les stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé.	33
Figure 9: Relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur la station du bassin de l'Ouémé.	39
Figure 10 : Relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur la station du bassin de l'Ouémé.	40
Figure 11 : Relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur la station du bassin de l'Ouémé.	41
Figure 12 : Évolution des débits moyens annuels simulés (Qsim) pour les mois ayant une corrélation significative des indices climatiques sur la station du bassin de l'Ouémé.	42
Figure 13: Évolution des débits moyens annuels calculés pour les mois ayant une corrélation significative des indices climatiques sur la station de Atchakpa	43
Figure 14: Évolution des débits moyens annuels calculés pour les mois ayant une corrélation significative des indices climatiques sur les stations de Bétérou et de Bonou.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Significativité des corrélations entre les débits moyens annuels et les indices climatiques mensuels pour les stations hydrométriques du bassin-versant de l'Ouémé avec les astérisques (*) indiquant différents niveaux de significativité.....	35
Tableau 2 : Significativité des corrélations entre les débits moyens annuels et les indices climatiques mensuels pour les stations hydrométriques du bassin-versant de l'Ouémé.....	36
Tableau 3 : Significativité des corrélations entre les débits moyens annuels et les indices climatiques mensuels pour les stations hydrométriques du bassin-versant de l'Ouémé.....	36
Tableau 4 : Débits moyens annuels simulés pour les années ayant moins de 10% de données manquantes des stations de Ahlan, Atchérigbé, Atchakpa et Bétérou.	II
Tableau 5 : Débits moyens annuels simulés pour les années ayant moins de 10% de données manquantes des stations de Bonou, Domè, et Kaboua.....	III
Tableau 6 : Résultats du test de corrélation entre les indices climatiques et les débits moyens annuels par la méthode de Spearman sur chaque station du bassin de l'Ouémé.....	IV
Tableau 7 : Résultats du test de corrélation entre les indices climatiques et les débits moyens annuels par la méthode de Spearman sur chaque station du bassin de l'Ouémé.....	V
Tableau 8 : Liste des sept stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé traiter.....	VI

Table des matières	
IN MEMORIUM.....	i
DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME.....	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
Table des matières	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Contexte et justification	3
2. Revue de littérature	3
2.1. Clarification des concepts.....	4
2.1.1. Notion de prévision saisonnière	4
2.1.2. Le système climatique et sa prévisibilité	5
2.1.3. La circulation atmosphérique.....	5
2.1.4. Variabilité du climat	6
2.1.5. L'eau et le cycle de l'eau : quelques chiffres.....	6
2.1.6. Les principaux termes du bilan hydrologique.....	7
2.1.7. La modélisation hydrologique pour prévenir les débits.....	10
2.2. Synthèse bibliographique sur l'exploration des prévisions saisonnières hydrologiques à partir des indices climatiques.....	10
3. But de la recherche.....	14
4. Objectifs	14
5. Grandes divisions du mémoire.....	14
CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES	15
1. Localisation et description du milieu d'étude	16

1.1.	Présentation : hydrographie, contexte géologique, climat et relief, pédologie.	17
1.1.1.	Hydrographie	17
1.1.2.	Contexte géologique	20
1.1.3.	Le climat	22
1.1.4.	Pédologie	23
1.1.5.	La végétation et la faune.....	25
2.	Données utilisées et méthodologie.....	26
2.1.	Matériel utilisé.	26
2.2.	Méthodologie.....	26
2.2.1.	Collecte des données	27
2.2.2.	Correction/qualité des données	27
2.2.3.	Calcul des débits moyens annuels (Qmoy).	27
2.2.4.	Identification de la relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques.	27
2.2.5.	Le coefficient de détermination.....	28
2.2.6.	Estimation des débits à partir des indices climatiques.	29
CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSIONS		30
1.	Les débits moyens annuels pour les années ayant moins de 10% de données manquantes.	31
2.	Identification de la relation entre les débits moyens et les indices climatiques.	34
3.	Identification de la relation entre les débits moyens et les indices climatiques à partir des régressions linéaires simples.	39
4.	Evaluation de la possibilité de prévision des débits moyens annuels à partir des indices climatiques.....	43
CHAPITRE 3 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES		47
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		51
ANNEXES		I

INTRODUCTION GENERALE

La relation existante entre la variabilité climatique et l'évolution des ressources en eau et leur gestion est au cœur de ce thème. Les interconnexions entre le climat et les ressources en eau font ici ressortir l'étroite dépendance des écoulements de surface par rapport à la pluviométrie. L'étude approfondie des écoulements de surface au travers de cas concrets de bassins versants dans trois régions d'Afrique (Afrique du Nord, Afrique Centrale et Afrique de l'Ouest) mettent en avant le rôle prépondérant des pluies et de leur évolution spatio-temporelle sur les ressources en eau du continent. En effet, une diminution conséquente de la pluviométrie entraîne un tarissement rapide des cours d'eau et des zones inondables propices à l'agriculture de contre-saison. Bien que la géologie et la géomorphologie puissent aussi influencer les ressources en eau, le rôle joué par le climat et ses évolutions reste prédominant. Connaître les ressources en eau et les éléments qui peuvent les affecter constitue un enjeu de développement fondamental pour le continent africain, ses populations et ses secteurs économiques clés (agriculture, pêche, élevages, foresterie...). Leur gestion est donc un enjeu majeur pour les activités humaines (alimentation en eau potable, production d'électricité, irrigation pour l'agriculture, risques d'inondations...) mais aussi pour la préservation de l'environnement (qualité et quantité de l'eau, faune aquatique, écosystèmes...). De plus, l'évolution de la pression anthropique sur les ressources en eau (accroissement de la population, modification de l'usage des sols et des pratiques agricoles ...), conjuguée aux variations récentes du climat, fait que la demande en eau ne cesse de croître. La gestion de l'eau est donc devenue un enjeu grandissant dans de nombreuses régions du Bénin comme dans le monde. Les organismes de gestion des ressources en eau (services institutionnels, gestionnaires de barrages...) ont besoin d'outils d'aide à la décision pour le suivi et/ou la prévision des ressources en eau. Si de plus en plus d'outils existent pour le suivi, les outils de prévision à l'échelle de la saison pour l'hydrologie sont encore très peu développés, notamment au Bénin. Or, justement prévoir les étiages et d'éventuelles sécheresses agricoles ou hydrologiques quelques mois à l'avance est crucial pour ces organismes. Une prévision de bonne qualité permettrait alors de prendre des mesures préventives pour anticiper voire éviter une crise. Les prévisions du climat à l'échelle de la saison sont rendues possibles grâce à l'évolution lente de certaines des composantes du système climatique (océan, humidité des sols...). Elles sont opérationnelles dans plusieurs centres météorologiques dans le monde, dont Météo-Bénin, et sont des prévisions d'ensemble par nature probabiliste, afin de permettre un meilleur échantillonnage des incertitudes liées aux conditions initiales atmosphériques et océaniques. Les prévisions saisonnières issues de modèles de climat, peuvent alors être utilisées pour fournir les conditions météorologiques aux modèles

hydrologiques, qui à leur tour, vont simuler la réponse des débits du ou des bassins versants concernés.

1. Contexte et justification

L'eau est à la base de toute forme de vie et soutient presque toutes les activités humaines de développements. Cependant, sa rareté et les modes inadaptés de sa gestion sont sources de tragédie. En effet à la fin du XX^e siècle, 70% environ des catastrophes dans le monde étaient dues à des phénomènes hydrométéorologiques. La prévision des risques liés à ces phénomènes est devenue depuis plusieurs décennies un sujet d'intérêt prioritaire à l'échelle planétaire. Au Bénin, cette problématique est liée à la faible capacité en matière de prévision de catastrophes à la variabilité et aux changements climatiques.

Dans la recherche de solutions à mettre en place pour la prévision saisonnière, l'élaboration et la mise en place d'une méthodologie s'avère une première étape nécessaire dans le cadre d'un programme de préservation des différents milieux, et de gestion de ce fléau.

Certaines études antérieures ont eu pour objectif, la détermination des indicateurs climatiques pouvant être utilisés pour prévoir à l'avance, un à plusieurs mois avant la saison des crues, les débits de crue supérieurs ou inférieurs à la normale en Afrique de l'Ouest. Notre étude sera accentuée sur l'exploration de ces prévisions saisonnières à partir des indices climatiques sur le bassin-versant de l'Ouémé Bénin.

2. Revue de littérature

L'étude du fonctionnement hydrologique des cours d'eau en rapport avec les modifications du climat fait l'objet d'une attention croissante, aussi bien au plan national qu'international. Nous faisons ici une synthèse de quelques-unes de ces études.

La prévision des variations des précipitations à l'horizon 2025 au Bénin par Blalogue et al (2017) montre dans l'ensemble du pays, l'augmentation de la fréquence des inondations qui implique des impacts majeurs sur la qualité de l'eau et l'augmentation des séquences sèches à l'intérieur de la saison des pluies entraînant la baisse des rendements agricoles ; dans la région méridionale, on note une légère tendance à la hausse des précipitations dans la zone côtière,

un déficit et raccourcissement de la seconde saison pluvieuse ainsi qu'une jonction de la seconde saison des pluies, certaines années, avec la grande saison .

Plus particulièrement, sur le bassin versant du Zou à Atchérigbé, sous bassin de l'Ouémé, les travaux de Bossa (2007) contribuant à l'utilisation durable des ressources en eau dans le bassin par l'évaluation de la disponibilité et du renouvellement annuel de la ressource grâce au modèle SWAT et des données MNT et de climat sur la période 1974-2003 ont permis de déterminer le bilan hydrologique du bassin qui présente un coefficient de ruissellement de 7%, une recharge totale de l'aquifère d'environ 18% et une évapotranspiration couvrant 72%. L'érosion dans le bassin a été caractérisée, et sa perte moyenne annuelle est de 17 tonnes/ha/an dans les zones agricoles et de 0,6 tonnes/ha/an dans les forêts classées. Atchadé et al. (2015) ont prouvé qu'avec les scénarii climatiques et les formes d'occupations du sol, on assistera à l'horizon 2030, à une baisse des ressources en eau de surface de 34 %, souterraine de 31 % et que la recharge des aquifères et la disponibilité en eau du bassin seront confrontées à une diminution respective de 35 % et de 38 %. Ce qui présage un accès pénible à la ressource en eau à l'horizon.

Le dérèglement et les déficits pluviométriques saisonniers enregistrés ont perturbé les cycles culturels, bouleversé le calendrier agricole paysan et rendu non fonctionnelles les normes culturelles empiriques en vigueur chez les populations paysannes (Houndénou, 1999 ; Ogounwalé, 2001).

2.1. Clarification des concepts

2.1.1. Notion de prévision saisonnière

La prévision saisonnière est définie comme une prévision du climat, c'est-à-dire une prévision d'un état moyen d'une des composantes du système climatique quelques mois à l'avance. Or, le climat est très sensible à des variations ou des modifications de ses conditions aux limites. La prévision saisonnière est donc basée sur l'évolution des composantes lentes du système climatique (Singla, 2012).

Les prévisions saisonnières sont des prévisions climatiques qui ont pour objectif de prévoir les tendances des paramètres météorologiques tels que la température et les précipitations dans les trois mois à venir ou plus (jusqu'à 6 mois), à l'échelle du pays, d'une région ou d'une localité. Contrairement aux prévisions à échéance de quelques jours. L'information n'est pas détaillée, mais présentée sous forme de prévisions qualitatives et probabilistes qui renseignent sur les grandes tendances avec des valeurs probables. Ces tendances sont exprimées sous

forme de trois scénarios types correspondant à trois classes : proche, en dessous ou au-dessus de la moyenne. Ce qui donne pour les précipitations, « humide », « normal » ou « déficitaire ». La normale considérée est la moyenne pluviométrique allant de 1991 à 2020 (Didier KAKPA, 2021).

2.1.2. Le système climatique et sa prévisibilité

Le système climatique est un système dynamique dont les composantes interagissent entre elles en permanence. Ses différentes composantes sont principalement constituées de : l'atmosphère, les océans et les mers, la cryosphère (la neige, les glaciers et banquises...), la biomasse (tous les êtres vivants) ainsi que la lithosphère (surfaces continentales). Le système climatique est donc un système avec plusieurs processus complexes se déroulant à différentes échelles spatio-temporelles. La connaissance de ces différents processus et de leurs interactions permet cependant de prévoir, sous certaines conditions, l'évolution du climat. La prévision saisonnière est une prévision d'un état moyen de l'atmosphère quelques mois à l'avance. Elle est ainsi possible grâce à l'évolution lente des conditions aux limites de l'atmosphère : température de surface des océans tropicaux, humidité des sols, couverture neigeuse, et végétation sur les surfaces continentales. Les prévisions saisonnières (par exemple, de températures et de précipitations) constituent alors un outil d'aide pour les organisations qui doivent prendre des décisions sur des intervalles de temps du mois à quelques mois, comme pour la gestion de la ressource en eau (Singla, 2012).

2.1.3. La circulation atmosphérique

L'atmosphère est une des composantes essentielles du système climatique, interagissant principalement avec les océans et les surfaces continentales, mais aussi la biosphère. Comprendre la circulation atmosphérique générale est donc essentiel pour comprendre comment fonctionne le système climatique. Ce phénomène est la conséquence de la rotation de la Terre et de déséquilibres énergétiques existants sur la Terre : ce sont les mécanismes moteurs qui mettent en place la circulation atmosphérique (IPCC, 2007).

2.1.4. Variabilité du climat

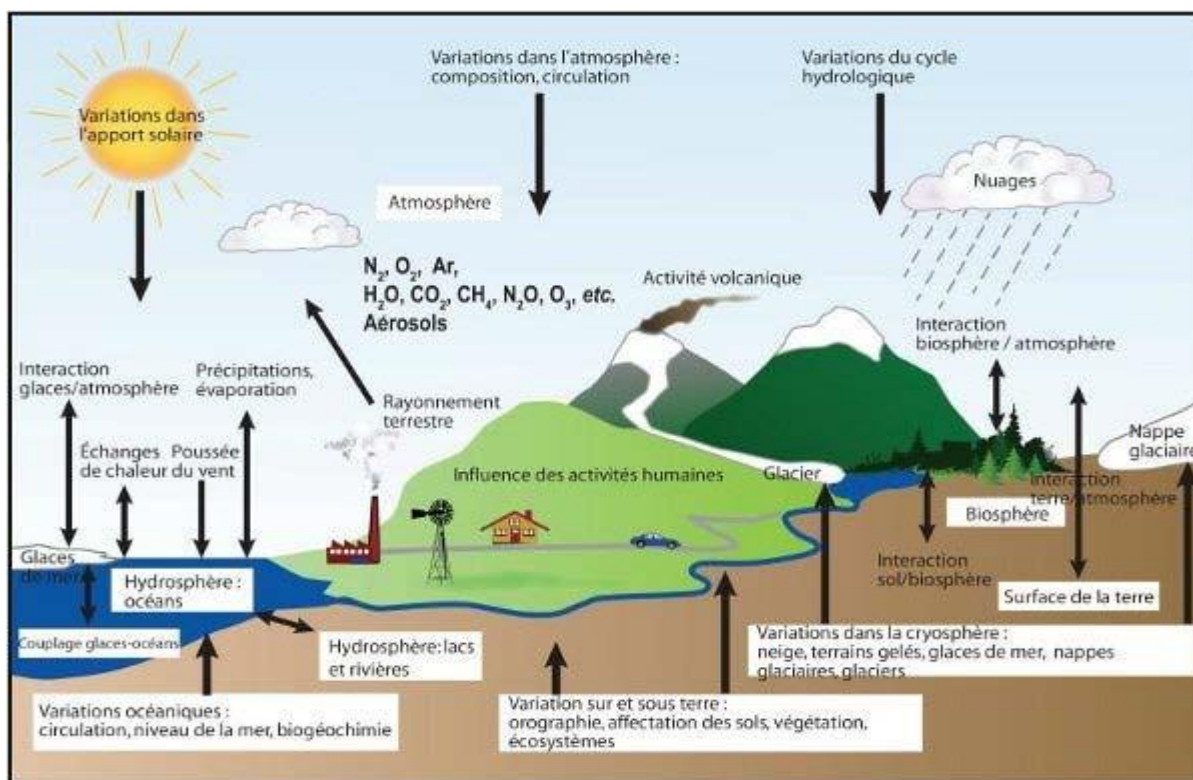


Figure 1 : Schéma du système climatique [IPCC, 2007].

L'atmosphère est l'une des composantes essentielles du système climatique pour prévoir le climat, mais l'océan a aussi une grande importance pour la prévision climatique comme nous allons le voir au cours de notre étude. Le climat connaît des variations en permanence. Pour le prévoir, il faut donc connaître ses variations, définies par des structures spatiales caractéristiques évoluant sur des échelles de temps interannuelles correspondantes (IPCC, 2007).

2.1.5. L'eau et le cycle de l'eau : quelques chiffres

L'eau est la condition de la vie et indispensable au fonctionnement de tout être vivant sur Terre. Elle fait partie du système climatique et est présente dans toutes ses différentes composantes : mers et océans, surfaces continentales (eaux superficielles et souterraines), atmosphère et biosphère. Plus précisément, les océans occupent environ 70% de la surface de la Terre et constituent environ 96.5% de la masse totale d'eau dans l'hydrosphère. Les stocks d'eau salée des océans et des mers sont donc considérables par rapport aux autres réservoirs d'eau : 1.74 % des eaux sur Terre sont glacées, 1.7% concerne les eaux souterraines, environ 0.014% concerne les eaux de surface, 0.001% est dans l'humidité du sol, 0.001% d'eau sont dans l'atmosphère, et enfin 0.0001% d'eau est présente au sein des êtres vivants (Gleick H, P,

1996). Or, la ressource en eau concerne les eaux seulement accessibles et utiles pour les hommes et les êtres vivants, soit environ 3 % de la masse d'eau totale sur Terre. De plus, parmi ces ressources en eaux douces, seule une mineure partie concerne les eaux superficielles par rapport aux eaux souterraines. Même si les eaux superficielles sont plus faciles d'accès, elles sont aussi plus vulnérables aux pressions climatiques (variabilité dans l'espace et dans le temps) et anthropiques (prélèvements et pollutions). Ainsi, malgré l'importante quantité d'eau disponible sur Terre, seule une infime partie peut être consommée. Les différents réservoirs en eau sur Terre sont toutefois connectés entre eux par le cycle de l'eau à travers plusieurs processus. Le temps de résidence de l'eau varie ainsi selon le réservoir :

- pour les océans et les glaciers, le temps de résidence se compte en milliers d'années;
- pour les eaux souterraines, l'eau réside entre quelques jours jusqu'à un millier d'années;
- pour l'humidité des sols, le temps de résidence de l'eau est de deux semaines jusqu'à un an;
- pour les lacs, l'eau a des temps de résidence très variables, en fonction de la taille et de la dynamique des lacs. L'eau peut résider jusqu'à 100 ans pour les grands lacs du continent américain ;
- pour les rivières, le temps de résidence de l'eau dure en général de quelques jours à une vingtaine de jours;
- pour l'atmosphère, l'eau réside en moyenne 8-10 jours;
- et enfin pour la biosphère, l'eau ne réside que quelques heures.

Nous pouvons donc d'ores et déjà identifier les réservoirs en eau potentiels sur les surfaces continentales dont le temps de résidence est de l'échelle de la saison : eaux souterraines, humidité du sol.

2.1.6. Les principaux termes du bilan hydrologique

Nous allons à présent décrire brièvement les principaux termes du bilan hydrologique, pour que le lecteur ait une idée globale des processus importants se déroulant dans le cycle de l'eau, à l'échelle du bassin versant.

➤ **Les précipitations totales**

Les précipitations totales regroupent les précipitations liquides (pluies, bruines) et solides (neige, grêle) et caractérisent en grande partie le climat d'une région géographique donnée (avec les températures associées). Elles constituent le principal flux d'entrée en eau sur le bassin versant et sont très variables dans le temps et dans l'espace. Elles constituent cependant une des variables hydrologiques bien connue. La mesure issue de pluviomètre n'est pas parfaite et de nombreuses applications comme en hydrologie nécessitent des champs de précipitation spatialisés sur un bassin versant. Le réseau de mesures doit donc être suffisamment dense pour traduire une bonne variabilité spatiale de la pluie. En fait, deux types de précipitations sont le plus souvent distinguées : les précipitations stratiformes qui sont de grande échelle et durent longtemps se produisant lors de passage de dépressions ; et les précipitations convectives, qui sont intenses mais durent peu.

➤ **Evapotranspiration**

L'évapotranspiration est un des principaux flux d'eau en sortie de bassin. Elle se décompose en évaporation de l'eau du sol, évaporation des surfaces d'eau libre et transpiration des végétaux. L'évapotranspiration dépend donc de nombreux facteurs liés à l'état et aux propriétés de l'atmosphère (vent, température, humidité...), du sol (humidité, structure, présence de biomasse ...) et de la végétation. Cette variable est plus difficile à mesurer que les précipitations. Les techniques de mesure par corrélation de tourbillon (eddy correlation) permettent une estimation ponctuelle. Les mesures par scintillométrie permettent une mesure intégrée sur un transect. Il est également possible d'estimer l'évapotranspiration à partir de mesures de vent, température et humidité grâce à des formules aérodynamiques simples.

➤ **L'eau dans le sol**

L'eau qui arrive sur le sol, peut s'infiltrer dans le sol ou ruisseler à la surface. L'infiltration est la pénétration de l'eau à la surface du sol. Une fois dans le sol, l'eau peut continuer de s'enfoncer dans le sol, on parle alors plutôt de « drainage » gravitationnel (le flux d'eau vertical lié au poids de l'eau). Le drainage est déclenché lorsque le contenu en eau du sol dépasse la capacité au champ (seuil au-dessus duquel les forces de gravité l'emportent sur les forces de capillarité, et la végétation ne subit pas de stress hydrique). Il est donc caractérisé par sa vitesse (taux ou capacité d'infiltration exprimée en mm/h) et dépend ainsi du régime d'alimentation (pluie très temporaire, irrigation continue...), de l'état d'humidité du sol et des propriétés du sol. L'eau contenue dans la zone non saturée du sol, pourra alors percoler,

rejoindre les nappes souterraines profondes éventuelles ou encore être absorbée par les racines de la végétation.

➤ **Les eaux souterraines**

L'eau qui percole dans le sol peut atteindre un aquifère. L'aquifère peut être libre (sa limite supérieure est définie par le niveau de l'eau), ou confiné (l'aquifère est alors limité par des formations géologiques avec une conductivité hydraulique très faible). Des nappes alluviales en surface existent aussi et sont souvent en relation avec les eaux superficielles constituées de sables et de graviers. L'aquifère peut donc échanger de l'eau avec les lacs, les rivières ou la mer et/ou les océans en surface : soit l'aquifère alimente les eaux de surface, soit ce sont les eaux de surface qui l'alimentent.

➤ **Le ruissellement**

Le ruissellement, ou écoulement de surface, apparaît lorsqu'une précipitation ne peut s'infiltrer dans le sol : elle s'écoule donc à la surface du sol. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol. Le ruissellement peut se produire : soit par excès d'infiltration (l'intensité des précipitations est supérieure au taux d'infiltration maximal du sol, un front de saturation se forme alors à la proximité de la surface du sol) (Horton, 1933), soit par saturation par le bas (le sol est totalement saturé en eau et ne peut plus en accepter, l'eau va donc ruisseler) (Dunne & Black, 1970). Ces deux processus sont les plus importants pour expliquer le ruissellement même si d'autres phénomènes peuvent ensuite entrer en jeu (exemple, la formation de croûte lors de premières gouttes de pluie sur sol sec, empêchant alors l'eau de s'infiltrer dans le sol ; ou encore les drains agricoles qui peuvent produire du ruissellement en absence d'excès d'infiltration et de saturation par le bas).

➤ **Le débit**

Le débit à l'exutoire du bassin versant, est la principale variable de sortie que l'on cherche le plus souvent à prévoir. Il dépend des caractéristiques morphologiques du bassin (la surface, la forme, le relief), du réseau hydrographique, des caractéristiques agro-pédo-géologiques (couvert végétal, plan d'eau, neige, surface urbanisée, nature et géologie du sous-sol et du sol). Autres paramètres agissant sur le débit, il s'agit évidemment du climat (température, précipitations totales...) mais aussi de la présence humaine à travers la modification de l'occupation des sols, la présence d'ouvrages le long des cours d'eau (digues, routes, réseaux

d'eaux usées ou potables...), en résumé toute activité influençant et modifiant le cycle hydrologique. Les débits peuvent être cependant mesurés grâce à plusieurs méthodes et instruments plus ou moins complexes (Singla, 2012).

2.1.7. La modélisation hydrologique pour prévenir les débits

La modélisation du cycle de l'eau, ou modélisation hydrologique, a plusieurs objectifs dont les principaux sont : la gestion des ressources en eau (crues et inondations, étiages et sécheresses, gestion des barrages et retenues) ; l'impact de phénomènes naturels (changements climatiques) ou l'impact de phénomènes d'aménagements (modification de l'occupation des sols) ; la prévision sur des sites non jaugés ; ou encore les mouvements de polluants et d'érosion. Prévoir les débits pour prévoir les crues et inondations : Beaucoup de modèles hydrométéorologiques sont utilisés à courte ou moyenne échéance, notamment pour la prévision d'inondations.

Prévoir les débits pour prévoir les étiages et sécheresses

Les sécheresses proviennent le plus couramment d'une quantité insuffisante de précipitations, et peuvent être amplifiées par des températures élevées, une augmentation de l'évaporation, une augmentation de la demande en eau par les hommes (alimentation en eau potable, irrigation pour l'agriculture...). Elles peuvent aussi être amplifiées par des événements climatiques tels que le phénomène El Niño, affectant les Etats-Unis et certains pays en Afrique, Asie et du sud de l'Amérique. La prévision des sécheresses est donc facilitée et de meilleure qualité dans certaines régions car elles sont en relations directes avec des phénomènes de circulation de grande échelle dans le système climatique (Singla, 2012).

2.2. Synthèse bibliographique sur l'exploration des prévisions saisonnières hydrologiques à partir des indices climatiques.

L'étude du fonctionnement hydrologique des cours d'eau en rapport avec les modifications du climat fait l'objet d'une attention croissante, aussi bien au plan national qu'international. Nous faisons ici une synthèse de quelques-unes de ces études.

La compréhension et la prévision des changements apportés ou non-par l'homme dans le régime des eaux et le bilan hydrologique posent des problèmes complexes. Un des enjeux de cette complexité réside, sans doute, dans le fait que, des trois grandes moussons existantes (mousson africaine, indienne et sud-américaine), la mousson africaine paraît la moins bien

connue. Or, elle est la source première d'eau et ses caprices (en termes de variabilité ou changement climatique par exemple) ont des répercussions dramatiques pour des populations déjà vulnérables. La baisse très remarquable de la pluviométrie observée dans la région ouest africaine au cours des décennies 1970 et 1980, a eu des conséquences importantes tant aux plans hydrologique et agricole, qu'aux plans économique, social, voire politique. A cette situation déplorable, s'ajoute le fait qu'en Afrique, très peu de données existent pour appréhender et mesurer l'impact des changements apportés par l'homme sur son environnement et les rétroactions avec la mousson. Cette situation inquiète scientifiques et gestionnaires des bassins versants qui doivent faire face aux conséquences des modifications des rythmes climatiques (Degan, 2019). En effet, les statistiques montrent qu'environ 70% des catastrophes dans le monde sont associées à des phénomènes hydrométéorologiques. Les inondations font partie des plus grandes catastrophes naturelles que connaît l'humanité (Ouikotan, 2009).

Houngpè et al. (2022) dans la recherche du potentiel de prévision des inondations saisonnières par le biais d'indices climatiques ont montré que la combinaison des indices climatiques par le biais de régressions linéaires multiples est plus performante que les indices climatiques individuels pour la prévision des crues supérieures et inférieures à la normale. Les modèles montrent des capacités de prévision jusqu'à 4 mois avant la crue. La connaissance de la chronologie des inondations, c'est-à-dire de la période pendant laquelle elles se produisent, est une information clé pour la réduction des risques d'inondation, la planification de l'eau et la gestion des réservoirs.

Rome et al., (2015) ont montré à travers l'identification de tendances récentes et ruptures d'homogénéité des températures : exemple en Afrique de l'ouest et sur le golfe de guinée qu'en revanche la SST ne présente pas de rupture de tendance nette, mais une tendance positive continue et significative depuis 1964. Ce réchauffement océanique n'a pas une origine locale car il a été mis en évidence sur l'ensemble du bassin Atlantique tropical Servain et al., (2014). Les raisons ne sont pas clairement établies, mais il pourrait être associé à un changement de la circulation océanique locale ou de plus grande échelle Rahmstorf et al., (2015).

(Yabi, 2018) dans l'étude de la Disponibilité de la ressource en eau et variabilité climatique dans la basse vallée de l'Ouémé, au sud Bénin (Afrique de l'Ouest) ont estimé qu'il ressort un caractère irrégulier de la pluviométrie bien que le front pluvieux ait pris une prépondérance sur les fronts déficitaires au niveau de la série 1987-2016.

Les recherches effectuées par Atchadé et al., (2015) indique que la variabilité climatique et la dégradation du couvert végétal auront des répercussions sur les écoulements et la disponibilité des ressources en eau du milieu d'étude à l'horizon 2030. Une telle situation se manifestera par une baisse sensible des ressources en eau aussi bien souterraines que de la production en eau du bassin, ce qui impactera la vie des populations et les activités tributaires de l'eau.

De surcroît, beaucoup de travaux des climatologues, des hydrologues et des océanographes se sont intéressés à cette zone afin de mieux comprendre les mécanismes du climat dans cette région (Mahe, 1995; Mahe et al., 2004).

A l'inverse de la pluie, la ressource en eau que représentent les écoulements, est discontinue dans l'espace et son importance comme sa répartition saisonnière sont liées aux surfaces des bassins versants. La régionalisation des écoulements ne peut donc se faire par simple interpolation spatiale (Linsoussi, 2000). La mise en place et l'exploitation des réseaux hydrométriques coûte cher et ils ne peuvent contrôler tous les marigots, toutes les rivières et tous les fleuves. Ceci est particulièrement vrai au Bénin où les stations du réseau sont en nombre limité et implantées presque uniquement aux exutoires de bassins relativement grands. La description des régimes hydrologiques à ces stations, déduites des observations, n'est donc pas suffisante puisqu'elle ne permet pas une évaluation de la ressource partout où elle est disponible. La régionalisation des écoulements passe donc par la mise au point de méthodes, pour estimer, à partir des données hydro-pluviométriques existantes, certaines caractéristiques des régimes aux sites non jaugés. Il s'agit donc ici de l'analyse des données collectées sur le réseau hydrométrique en utilisant une méthodologie mise en place par Le Barbé et al. (1993) pour une appréciation de l'évolution des résultats. L'étude antérieure menée, s'était effectuée sur la période de 1952- 1984. Celle-ci est faite sur la période 1960-2010 pour cinq stations à savoir : Bétérou, Savè, 75 Atchéribé, Kaboua, Bonou et sur la période 1986-2010 pour la station de Ahlan. L'étude est essentiellement orientée vers la description la plus exhaustive possible des régimes hydrologiques pour chaque station. Elle est donc spécifiquement constituée de la détermination de l'évolution dans le temps des lames écoulées ainsi que des débits et caractéristiques de crue, des dates de démarrage des écoulements, des dates d'apparition des maxima journaliers interannuels, du nombre de jours sans écoulement, des corrélations considérées pour compléter les séries d'observations des stations, de la répartition saisonnière, et enfin de la détermination des différents profils caractéristiques puis l'obtention des débits classés. La caractérisation des débits d'étiages n'est pas prise en compte ni l'analyse fréquentielle des extrêmes hydrologiques et la caractérisation du tarissement.

O. Koudamilo et al. (2017) dans la caractérisation des risques hydro-climatiques dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou au Bénin, ont estimé que les pluies maximales dans le bassin sont marquées par une forte fréquence sur la série d'analyse. Cette forte fréquence des pluies maximales est en partie responsable de l'augmentation de celle des débits maximaux du bassin. Il faut aussi signaler que les trois indices de sécheresse météorologique obtenus à partir des moyennes annuelles de précipitations et de températures ont permis d'identifier les mêmes années de sécheresse.

La plupart de ces travaux ont été faites sur la base des données de précipitations observées au sol. Il apparaît donc que la forte variabilité des hauteurs de pluie au cours de la période 1987-2016 a eu des répercussions considérables sur l'écoulement moyen de la vallée de l'Ouémé. Ainsi la disponibilité de la ressource en eau reste hypothéquée au fur et à mesure que cette tendance baissière continue au fil des années. Ces résultats sont similaires à celui projeté à l'horizon 2050, cette situation devra être plus difficile sous la triple menace, d'une baisse des hauteurs de précipitation, d'une augmentation des températures minimales et maximales et d'une pression accrue de populations, sur les ressources naturelles en général et les ressources en eau en particulier (Yabi, 2018).

Les lignes de grains peuvent parfois ne pas provoquer des pluies, car elles n'utilisent que le potentiel qu'elles trouvent sur place. L'importance climatique des lignes de grain sur le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou au Bénin, pays du golfe de Guinée, sont à l'origine des averses orageuses abondantes de pluies qu'accompagnent des vents forts, une forte énergie cinétique des gouttes de pluie, des éclairs et de tonnerre (Kodja, 2018). (Mohamed, 2002) dans la Synthèse et Evaluation des Prévisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest constate à partir des analyses le non fondé d'une prévision saisonnière à partir des indices pluviométriques et hydrologiques pour les pays du golfe de Guinée, surtout quand on observe en certains mois de l'année, plus de 4 fois ces indices. Il montre également que l'action de l'océan global sur les précipitations en Afrique de l'Ouest, à travers la circulation générale, est une action de synthèse résultant des interactions entre les différents océans. Ceci justifie sa domination sur les autres indicateurs.

Ces chiffres reflètent l'existence d'un gradient sud-nord positif des tendances, ce qui signifie que les contrastes méridiens entre l'océan et le continent se sont accrus de manière significative au cours des 30 dernières années.

3. But de la recherche

Le but de notre recherche est d'exploiter les possibilités de prévision des débits saisonniers sur le bassin de l'Ouémé au Bénin à partir des indices climatiques. Cette étude permet donc de favoriser la connaissance des indices climatiques prédictifs des prévisions saisonnières hydrologiques pour diverses applications (gestion des inondations et sécheresses, hydrologie etc...).

4. Objectifs

Cette étude a pour principal objectif d'évaluer le potentiel de prévision saisonnière hydrologique dans le bassin de l'Ouémé dans le cadre de la gestion des ressources en eau.

Pour cela, une analyse de la variabilité des débits moyens annuels au niveau des stations considérées est menée, avant de déterminer la corrélation entre les indices climatiques et les débits moyens annuels sur chacune des stations, afin d'évaluer la possibilité de prévision des débits saisonniers à partir des indices climatiques.

5. Grandes divisions du mémoire

La première partie de ce mémoire est consacrée à une introduction générale présentant le contexte et justification, le système climatique et sa prévisibilité, la synthèse des études antérieures sur les prévisions saisonnières et les objectifs de notre étude. La suite du mémoire s'articule autour de trois grands chapitres. Le premier chapitre intitulé « Données, matériels et méthodes » s'intéressera aux caractéristiques de la zone de recherche, en passant par sa situation géographique, l'hydrographie, son climat et sa géologie vers un bref aperçu des sols et de la végétation. Les données qui ont été collectées pour ce travail, et les méthodes appliquées aux séries de données pour aboutir aux résultats observés constituent les points essentiels abordés dans ce chapitre. Ensuite, le chapitre 2 « Résultats et discussions », rend compte des divers résultats obtenus et les différentes discussions. Enfin, le dernier chapitre « Conclusion et perspectives » documentera sur d'éventuel possibilité de la prévision saisonnière à partir des indices climatiques pour aider les décideurs et gestionnaires des ressources en eau accompagnée de quelques perspectives.

CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES

Dans ce chapitre, nous allons à présent nous intéresser à la description du milieu d'étude, c'est-à-dire sa situation géographique, son climat, son relief et son hydrographie. Dans la seconde partie, nous allons présenter l'ensemble des données utilisées, les matériels exploités. La pertinence des résultats en hydrologie est directement dépendante de la qualité des données disponibles. Ainsi nous présenterons la méthodologie adoptée dans cette étude.

1. Localisation et description du milieu d'étude

Le bassin-versant de l'Ouémé à Bonou est situé en Afrique de l'Ouest en République du Bénin. La figure 2, montre la situation géographique du bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.

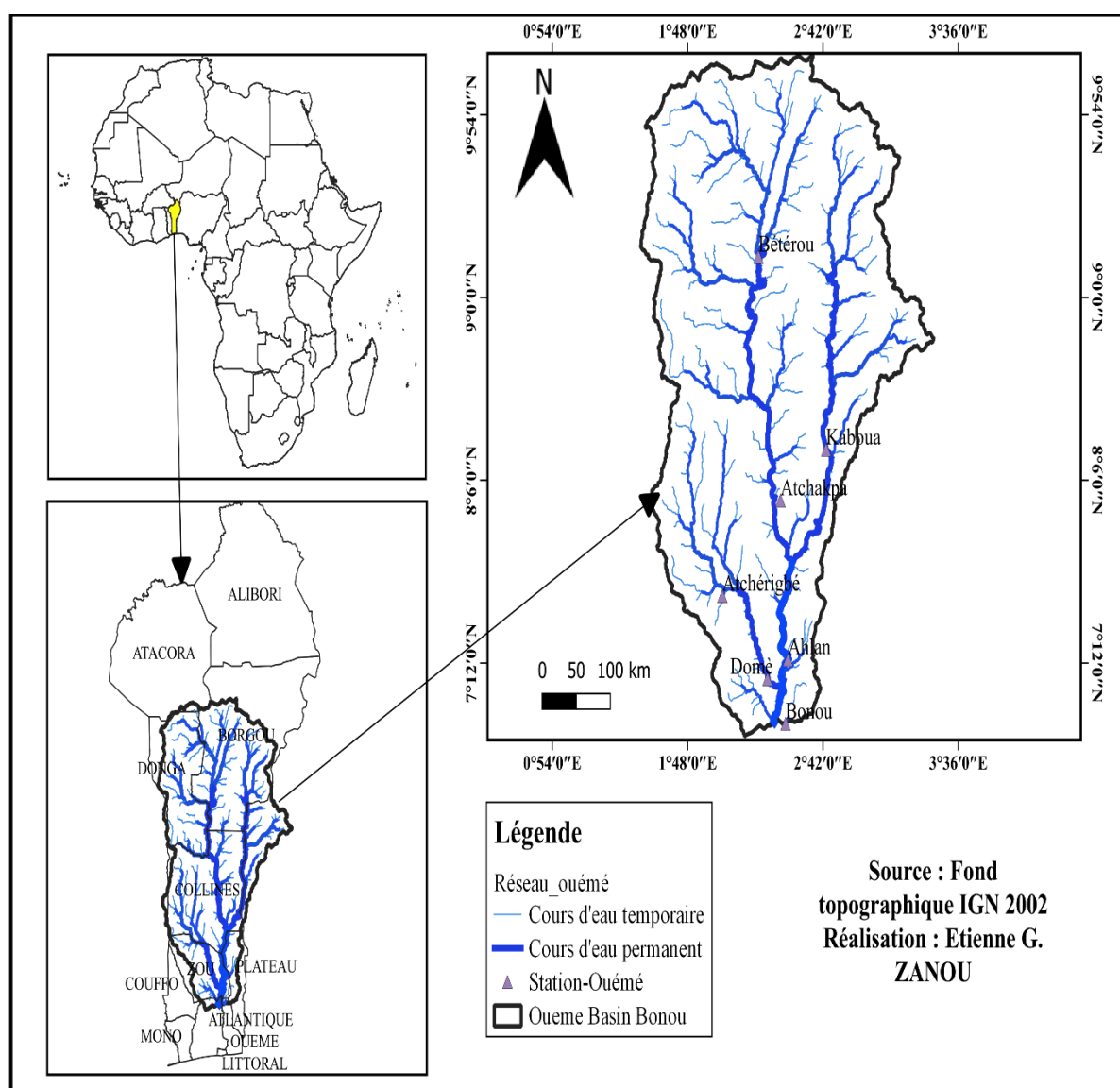


Figure 2 : Carte de localisation du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

Le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou est compris 10°12' et 7°58' de latitude nord et 1°35' et 3°05' de longitude et avec un léger débordement à l'est vers le Nigéria Le Barbé et al., (1993). Le secteur d'étude est à cheval sur les départements de la Donga, du Borgou, des Collines, du Zou, de l'Ouémé et du Plateau et compte en son sein 38 communes soit 49,35 % sur les 77 communes du Bénin. Avec ses affluents, dont le Zou et l'Okpara, il couvre une superficie de 46 200 km² répartis d'une part sur le socle Dahoméyen, partie supérieure du bassin et d'autre part sur les formations sédimentaires du bassin côtier, appelé l'Ouémé inférieur (Atchadé, 2014; Le Barbé et al., 1993; Moniod, 1973). La diversité de ces substratums géologiques influence directement ou indirectement la manifestation des événements extrêmes hydro-climatiques (Atchadé, 2014; Vissin, 2007). La connaissance des caractéristiques physiques du bassin de l'Ouémé permet de mieux cerner la dynamique ou le fonctionnement des événements hydro-climatiques extrêmes du secteur d'étude.

1.1. Présentation : hydrographie, contexte géologique, climat et relief, pédologie.

Situé en Afrique de l'Ouest, le Bénin est arrosé par un réseau hydrographique assez dense et avec comme principal cours d'eau, le fleuve Ouémé (510 Km). Le bassin du fleuve Ouémé, couvre une superficie d'environ 46 200 km², formant ainsi le bassin versant le plus important du pays.

1.1.1. Hydrographie

Le régime de l'Ouémé est tropical malgré l'extension du bassin versant dans des régions différentes, par leur régime pluviométrique : les hautes eaux et les inondations se produisent dans la seconde moitié de l'hivernage, entre juillet et novembre. La faiblesse des précipitations qui affectent le centre du Bénin (faiblesse relative à la pluviométrie enregistrée aux mêmes latitudes) accentue la rigueur des étiages et réduit l'abondance des volumes d'eau écoulés. Les pluies arrosent le Bénin méridional pendant 6 mois et leur répartition au cours de cette période joue un grand rôle sur le ruissellement et l'écoulement. Le fleuve Ouémé prend sa source dans les monts Tanéka à 550 m d'altitude et coule d'abord vers l'est sur 70 km puis vers le sud jusqu'à Cotonou sur 580 km (Moniod, 1973). En amont, il reçoit de nombreux affluents sur ses deux rives. Il est rejoint à l'est par la rivière de l'Okpara dont le cours lui est parallèle avec débordement sur le Nigéria et à l'Ouest le Zou qui s'étend légèrement sur le territoire togolais Le Barbé et al., (1993). La figure 3, montre le réseau hydrographique de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.

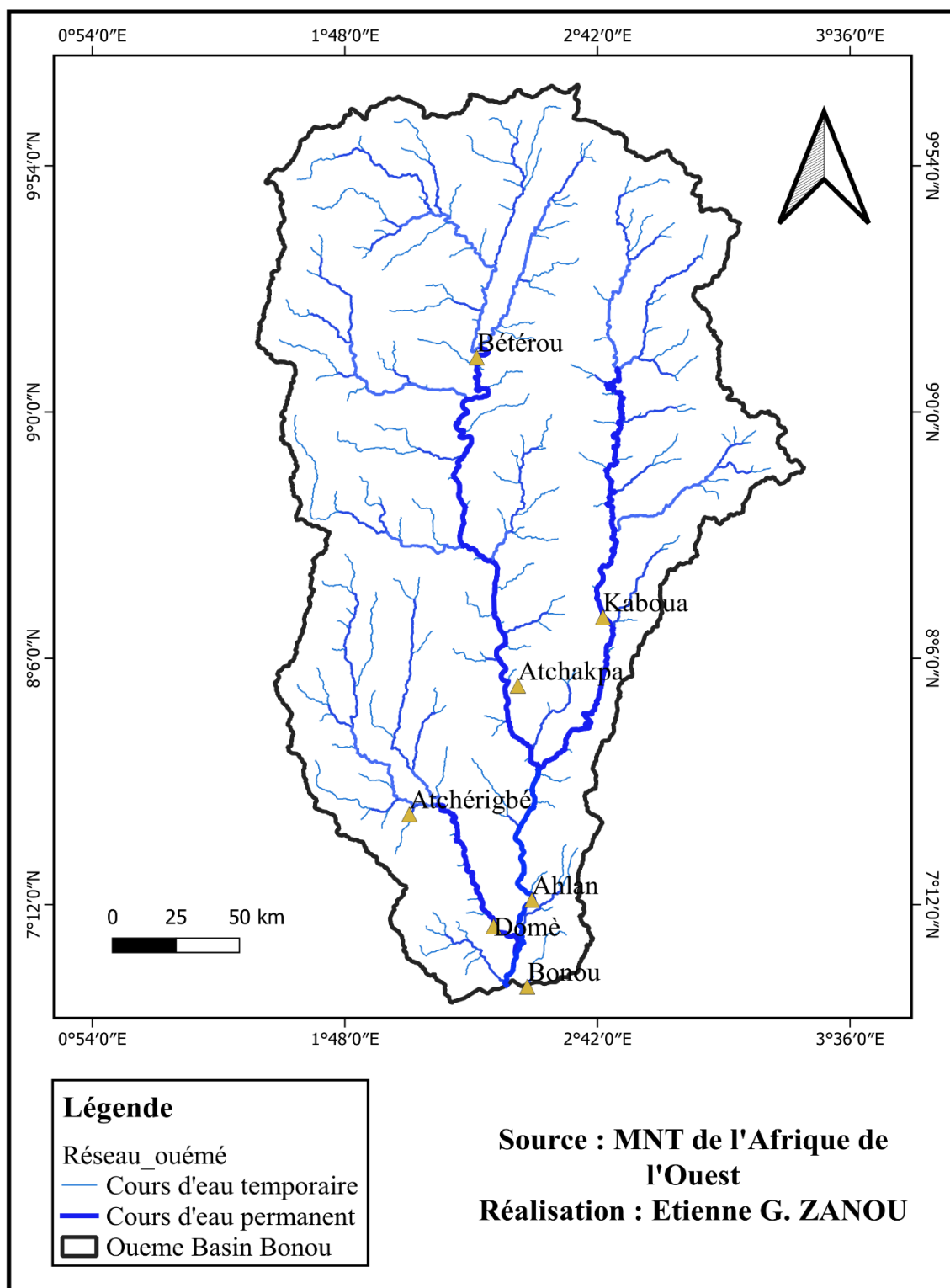


Figure 3 : Réseau hydrographique du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

Le fleuve Ouémé développe une zone deltaïque sur 95 km de longueur jusqu'à la lagune de Cotonou. Sur la rive droite du delta, un petit affluent de la Sô prend naissance dans la dépression de la Lama, traverse les marais et le lac Hlan, circule parallèlement à l'Ouémé et en reçoit les déversements latéraux pendant les hautes de l'Ouémé avant de se déverser dans le lac Nokoué. Le bassin-versant de l'Ouémé et ses affluents couvrent une superficie de 46 990 km² tandis que la partie deltaïque occupe une superficie de 9 000 km² (Moniod, 1973). Ces différentes entités sont réparties dans l'Ouémé supérieur et l'Ouémé inférieur. Cependant, l'Ouémé supérieur est scindé en trois dont le réseau de la rive gauche, le réseau nord-ouest et le bassin du zou Le Barbé et al., (1993). Quant à l'Ouémé inférieur, il prend en compte l'exutoire de Bonou, qui est en amont de la zone deltaïque.

- ✚ Réseau rive gauche : les rivières ici suivent la direction nord-sud imposée par les formations du socle. Les pentes sont relativement importantes (1 à 2 m/km) et peuvent s'accroître au passage d'accidents géologiques. Les affluents les plus importants de cette rive sont l'Alpouro (2010 km² pour une longueur de 86 km), le Yérou Marou (2590 km² pour une longueur de 120 km) ; la Beffa (1990 km² pour une longueur de 78 km), l'Okpara plus de 10 000 km² dont la longueur est de 362 km.
- ✚ Réseau nord-ouest : son réseau hydrographique est très dense et s'étale sur les flancs des massifs de l'Atacora au nord et d'Alédjo à l'ouest. Les rivières suivent les directions imposées par les reliefs dont ouest/est et nord-ouest/sud-est avant de rejoindre le l'Ouémé. Les pentes sont également très élevées et restent toujours relativement fortes (1 à 2 m/km). D'amont en aval, les rivières les plus importantes, l'Ouémé jusqu'à sa confluence avec l'Alpouro sur le parcours de Affon (4320 km² pour une distance de 152 km), la Donga (1285 km² pour une longueur de 74 km), la Wewé (617 km² pour longueur de 49 km), la Térou (3320 km² pour une longueur de 139 km), l'Odola (1076 km² pour une longueur de 74 km) et l'Adjiro (2151 km² pour une longueur de 160 km).
- ✚ Bassin du zou : il est séparé du réseau nord-ouest par un alignement de relief d'axe ouest passant à la latitude de Bantè. Dans cette direction, il va d'abord être constitué de deux axes parallèles. Le zou (8440 km² pour 250 km) et l'Agbado (2703 km² pour 109 km). Ils suivent tous les deux une direction N-S puis NW-SE, après 120 km de parcours, le Zou longe sur 15 km les collines quartzitiques de Badagba avant de les traverser, reçoit l'Agbado et suit une direction NNW-SSE pour rejoindre l'Ouémé plus loin sur 107 km. Les pentes du lit du cours sont relativement importantes sur les 10

premiers kilomètres et deviennent très modérées (inférieur à 1m/km). Le bassin du Zou aussi a ses affluents, dont l'Otio (442 km²), la Bogui (450 km²), le Kouffo (806 km²) et l'Agbla (479 km²).

✚ Ouémé inférieur : Après sa confluence avec le Zou, l'Ouémé entaille profondément les formations du Continental Terminal. La pente de la rivière devient alors extrême faible (5 m de dénivelée sur 85 km) et la vallée de l'Ouémé se présente alors comme une large zone inondable où le système hydrographique est fort complexe. Dans cette partie que se trouve l'exutoire Bonou, d'où le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou qui constitue le milieu de la présente étude. Du point de vue géologique, le bassin-versant de l'Ouémé présente une spécificité naturelle marquée par le socle précambrien du centre au nord du bassin et le sédimentaire de la zone côtière qui s'étale sur la partie sud (Kodja, 2018).

1.1.2. Contexte géologique

Le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou est entre le socle métamorphique du Nord et la couverture sédimentaire du Sud (Moniod, 1973) comme l'illustre la figure 4. En effet, le haut du secteur d'étude repose sur un socle fracturé granito gneissique dit dahoméen, constitué essentiellement de migmatites et gneiss. Au fil des années, ce socle a été altéré et fissuré dans sa partie supérieure puis de moins en moins en profondeur et agit comme un réservoir de stockage, avec une transmissivité faible de l'ordre de $10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. De ce fait, la structure géologique du bassin-versant de l'Ouémé est constituée d'une part par le Précambrien qui comprend le Dahoméen, l'Atacorien, les granites et les intrusions basiques. Toutes ces roches sont imperméables en dessous d'une altération importante. La carapace latéritique est assez peu représentée de sorte qu'en général la capacité de rétention est assez faible. Il s'en suit que les réserves souterraines s'épuisent vite et que les rivières sont à sec plusieurs mois par an. Les zones fissurées dans les granites et les arènes granitiques emmagasinent rarement assez d'eau pour alimenter sans défaillance les débits d'étiage. Cet ensemble géologique est altéré par les facteurs climatiques notamment l'eau et la température. Ainsi la circulation de l'eau dans les fractures du sous-bassement diffuse le processus d'altération plus en profondeur vers le cœur de la roche saine, en isolant les galets dans une matrice de régolite. Aussi, l'accumulation de ces eaux enrichit les aquifères. Ces aquifères, notamment du Dahoméen, sont répartis dans les fractures des roches qui contribuent à l'écoulement de fleuve. Leur recharge est assurée à près de 325 mm dans la plupart du secteur

amont du secteur d'étude. La plaine d'inondation dans le secteur d'étude est de type alluvial et constitue une grande potentialité agricole qui justifie les différentes formes d'occupation des terres sur le bassin. Cependant, la forte anthropisation du secteur d'étude ajoutée aux récents évènements pluvieux de fortes intensités amplifient les phénomènes d'inondations dans le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou (Kodja, 2018).

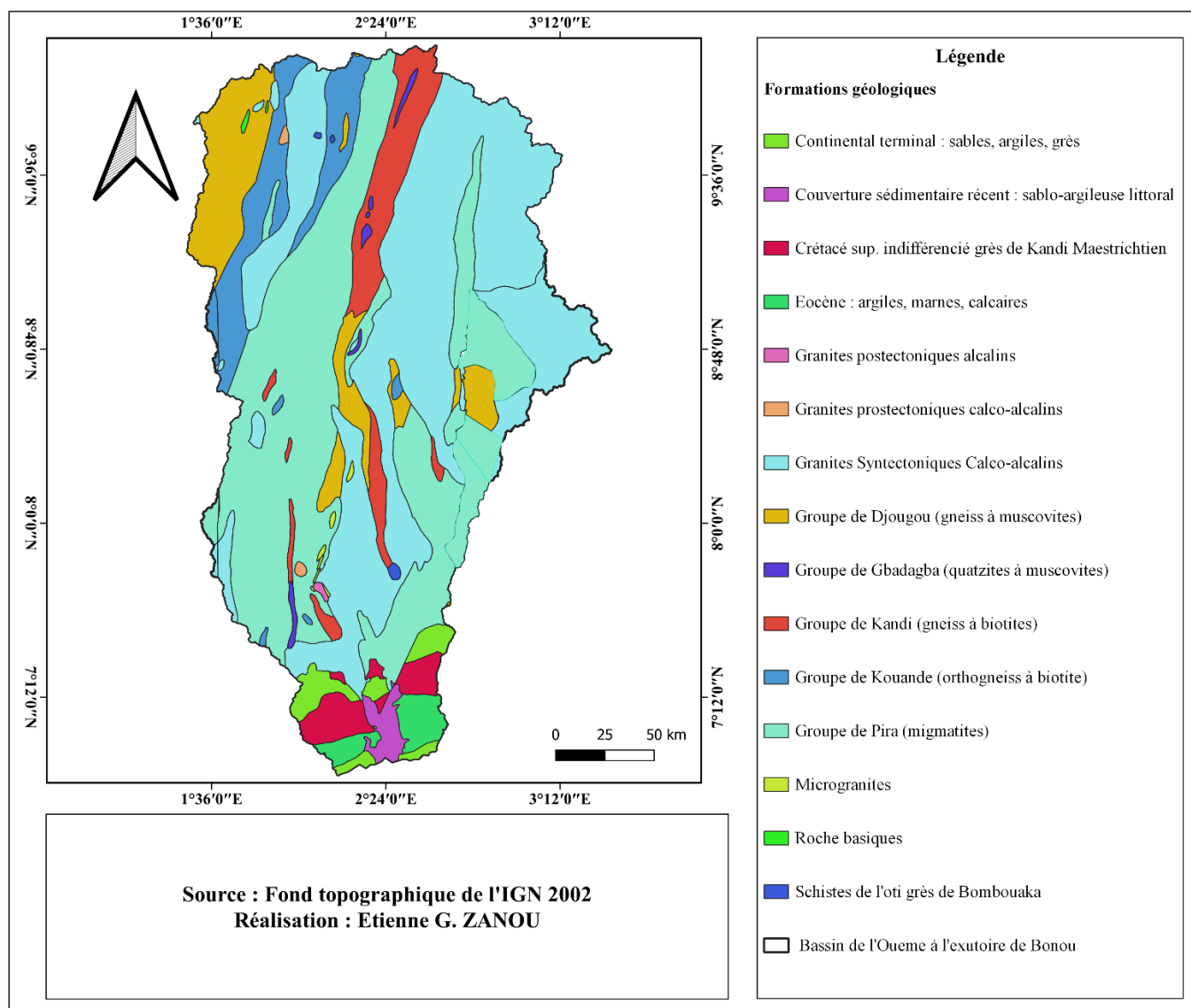


Figure 4 : Aspects géologiques du bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.

1.1.3. Le climat

La circulation atmosphérique ouest-africaine est commandée par des centres d'action qui déterminent les climats du Bénin (Causeret et Sarrazin, 2001 ; Tabeaud, 2008 ; Godard et Tabeau, 2009 ; Tabeaud, 2009) repris par (Kodja, 2018). En effet, dans les basses couches de l'hémisphère nord, deux centres de pression gouvernent la circulation atmosphérique ouest-africaine et caractérisent le climat du Bénin (Amoussou et al., 2015; Vissin, 2007): les hautes pressions de l'Atlantique Nord ou l'anticyclone des Açores et l'anticyclone semi-permanent égypto-libyen. L'anticyclone des Açores draine vers l'Afrique Occidentale et le Bénin des flux océaniques et continentaux et définit les types de temps sur la façade ouest du continent. L'anticyclone semi permanent égypto-libyen dirige sur le Bénin l'alizé continental sec du nord-est, connu sous le nom d'harmattan (Kodja, 2018).

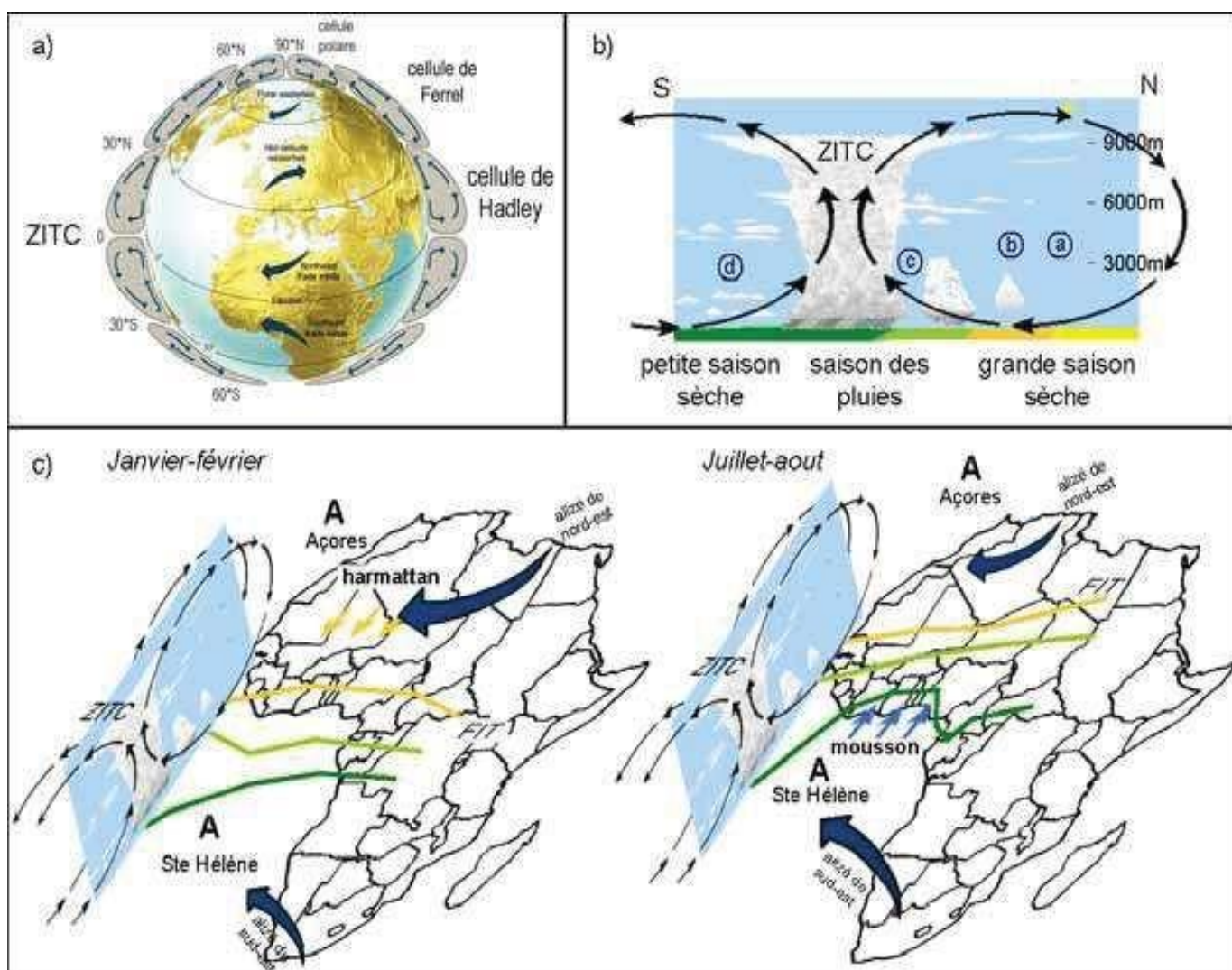


Figure 5 : Circulation atmosphérique et mousson ouest-africaine (a : modèle de circulation générale ; b : position au sol des saisons ; c : schéma du fonctionnement atmosphérique général sur l'Afrique de l'Ouest en saison sèche et saison des pluies).

L'anticyclone de Sainte-Hélène dans l'hémisphère sud, ou haute pression australe du golfe de Guinée, gouverne le flux de mousson et le dirige sur le Bénin. Il faut noter que les pluies de mousson peuvent précipiter une journée au lieu d'être réparties sur tout un mois (Amoussou, 2010). La mousson ouest-africaine est le résultat d'interactions complexes intervenant à différentes échelles dont les conséquences sur la répartition spatio-temporelle de la pluviométrie deviennent de plus en plus préoccupantes depuis les années 1970. Cependant, le régime climatique de l'Afrique de l'Ouest est déterminé par une cellule thermique caractérisée par une expansion ascendante près de l'équateur météorologique (EM) et divergent en altitude vers les pôles, appelée "cellule convective de Hadley". Cette zone convective crée une région de basses pressions, appelée Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT).

1.1.4. Pédologie

Selon Kamagaté (2006), les formations pédologiques résultent de l'action combinée de plusieurs facteurs tels que le climat, les formations végétales, la roche mère, le type d'altération, l'histoire géomorphologique et les actions anthropiques. Cependant, le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou, présente dans sa partie septentrionale des sols très variés, répartis en fonction des conditions topographiques et édaphiques du milieu Le Barbé et al., (1993). Les sols du bassin-versant de l'Ouémé au nord résultent essentiellement des processus de ferrugination et de ferrallitisation. A cela, s'ajoutent trois types de remaniement, dont le lessivage, l'érosion et l'induration (Houndénou, 1999). Sur l'Ouémé supérieur, ce sont les sols ferrugineux avec leurs dérivés qui dominent ensuite viennent les sols ferrallitiques et hydromorphes. Les sols ferrugineux sont constitués de sols peu lessivés en argile (faible migration des colloïdes argileux, de forte migration des sesquioxydes), des sols hydromorphes (proches des sols peu lessivés, faibles épaisseurs, faible perméabilité) et des sols lessivés (lessivés en argile et en sesquioxydes) reposants sur un substratum de nature granito gneissique à muscovite et à deux micas (Faure, 1977). Les sols ferrallitiques sont quant à eux des sols profonds, caractérisés par une altération complète des minéraux primaires de la roche et une élimination importante des bases aboutissant à la formation des minéraux kaolinitiques et des oxydes métalliques (Faure et Volkoff, 1998).

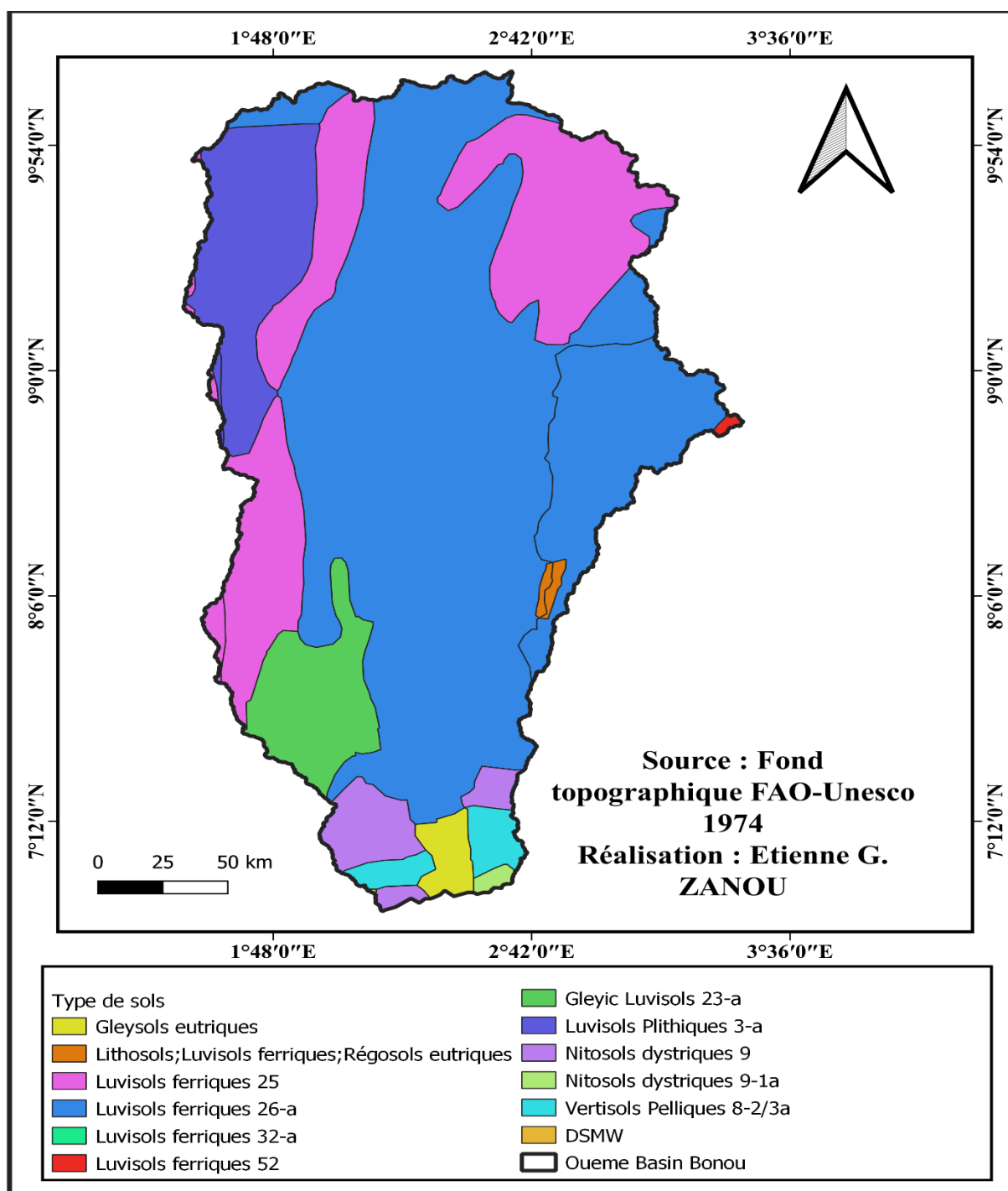


Figure 6 : Types de sols du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

- Au sud du secteur d'étude, les sols dominants observés sont les sols ferrugineux tropicaux appauvris, des sols ferrallitiques, sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à pseudo-gley et enfin des sols sur sédiments meubles argilo-sableux (Azontondé, 1991).

- Sols ferrugineux tropicaux : Ils sont localisés sur le socle et sont caractéristiques d'un régime pluviométrique unimodal (Vissin, 2007). Ils sont marqués par un lessivage intense et une forte altération. Leurs propriétés hydrodynamiques sont moins bonnes que celles des sols ferrallitiques. Ce sont des sols peu profonds, souvent concrétionnés, avec des horizons bien différenciés et une couche humifère peu épaisse. Leur faible épaisseur, sur un substratum magmatique et cristallophyllien, induit l'absence de nappe phréatique.
- Sols ferrallitiques : Ils sont rencontrés dans les régions de plateau. Les sols ferrallitiques sont peu profonds, cuirassés, formés par le processus d'induration des horizons d'accumulation suite à l'alternance de détrempe et de dessiccation. La plupart de ces sols offrent d'assez bonnes propriétés chimiques, d'où leur intense exploitation pour les cultures (Akognongbé, 2014).
- Sols hydromorphes, sols à pseudogley : Ils sont rencontrés dans les vallées et les basfonds. Les sols hydromorphes sont souvent plus de texture sableuse à sable grossier, grumeleux ou grumelo-polyédriques en surface, avec un indice d'instabilité structurale inférieure à 1.
- Sols sableux : Ils se déposent dans la plaine alluviale, assez riche du fait de l'apport en matières organiques par la crue du fleuve Ouémé. Ils sont propices aux cultures de contre saison et aux cultures maraîchères.

Ces principaux types de sols sont caractérisés par une différenciation texturale qui donne naissance à plusieurs autres sous catégories de sols sur lesquels s'édifient la présence des formations végétales dans le secteur d'étude. De même, l'aptitude pédologique des différents types de sols explique non seulement la diversité des cultures pratiquées, mais aussi ils contribuent à la manifestation des événements hydro-climatiques extrêmes liés aux inondations dans le bassin-versant.

1.1.5. La végétation et la faune.

Le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou est caractérisé en matière de végétation par de formations naturelles dégradées constituées de savanes arborées et arbustives avec *Isoberlinia* spp. *Butyrospermum parkii* en abondance (Adjanohoun, 1989), de galeries forestières, de plantation et surtout de Forêts classées (Adam et al., 1993 ; Tossa et al., 2009 ; Atchadé, 2014). Les formations observées résultent des caractéristiques hydro-pluviométriques, édaphiques qui sont exposées à une forte emprise humaine ces dernières décennies dans le bassin-versant (Abdoulaye, 2015). La végétation naturelle est en voie de

disparition au détriment des champs, les jachères, les agglomérations voire habitation humaine. Cette situation s'explique par les besoins à satisfaire pour une population en augmentation, une demande très forte en bois pour la fabrication de charbon. À cela, il faut ajouter les demandes en bois de feu, bois de service et de bois d'œuvre des centres urbains. Les forêts classées sont dans un état de dégradation avancée et ne disposent pas de stratégie de protection ni d'un schéma d'aménagement approprié. Dans le chenal du fleuve poussent des plantes aquatiques comme la jacinthe d'eau. Ces plantes contribuent à l'eutrophisation, au comblement du lit du cours d'eau et par conséquent à l'accroissement des terres inondées. En somme, le couvert végétal joue un rôle très important dont la régulation de la température, de l'évapotranspiration et du ruissellement, ce qui freine les effets d'érosion en contribuant à la réduction du comblement du lit du cours d'eau. Mais, au regard des activités socioéconomiques, voire la forte anthropisation du bassin, il y a une régression des unités naturelles du sol dans le bassin ce qui amplifie les phénomènes de ruissellement, d'érosion (Kodja, 2018).

2. Données utilisées et méthodologie

2.1. Matériel utilisé.

L'outil principal de travail qui a permis de mener à bien cette recherche scientifique est un ordinateur portable muni des logiciels :

- Logiciel R dans l'interface RStudio pour le traitement des données ;
- Excel 2019 qui est un tableur intégrant graphique, tableau et base de données. Cet outil a permis d'organiser les résultats du travail dans des tableaux, la réalisation des graphes et des droites de régressions ;
- QGIS 3.12.3 pour la réalisation des cartes ;
- Word 2013 pour le traitement de texte ;

2.2. Méthodologie

La présente étude s'intéressera à l'évaluation qualitative de la moyenne du cumul saisonnier des débits. Cela permettra de définir des stratégies en matière de gestion des ressources en eau du fait que la quantité d'eau évaporée dépend fortement de la température à la surface de l'océan.

2.2.1. Collecte des données

Elle intègre d'abord la recherche des documents scientifiques généraux et spécifiques et autres documents ayant permis de mieux cerner les aspects du sujet. Les données hydrologiques utilisées dans cette étude sont les données d'observations quotidiennes de débits journaliers de certaines stations hydrologiques du Bénin. Ces données ont été obtenues auprès des services hydrologiques nationaux tels que : la DG-Eau. Une autre base de données concerne les températures de surface océanique (SSTs pour Sea Surface Temperatures) au large des côtes ouest-africaines sur le domaine (12° - 8° O ; 0° - 3° N). Les indices climatiques de SST ont été téléchargés le 01/09/2021 sur le site www.esrl.noaa.gov.com. Les séries proviennent d'analyses objectives effectuées par la Funceme (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Brésil) sur l'ensemble de l'Atlantique tropical. Ces analyses de type Cressman sont réalisées tous les mois à partir de données mensuelles in-situ collectées par des bateaux d'observation volontaire (VOS) de l'Office Météorologique Mondial (OMM) sur des boîtes de 2° de latitude et de 5° de longitude Servain et al., (2014). Les séries de SSTs utilisées couvrent la période 1979-2020.

2.2.2. Correction/qualité des données

En analyse statistique, la pertinence des résultats dépend de la qualité des données disponibles. Les données hydrométriques ont été traitées avec soin pour constituer une série de données fiable. En effet, les données manquantes au niveau de chaque station ont été remplacées par « NA » pour faciliter la manipulation dans RStudio. Nous avons supprimé toutes les valeurs aberrantes de moyennes annuelles obtenus et considéré les années où nous avons moins de 10% de données manquantes pour calculer les débits moyens annuels.

2.2.3. Calcul des débits moyens annuels (Qmoy).

Pour calculer les débits moyens annuels au niveau de chaque station, la période pluvieuse (juin à novembre) a été considérée. Ensuite, nous avons calculé la moyenne annuelle afin de déterminer le pourcentage des valeurs manquantes sur chaque année. Seules les années ayant moins de dix-pourcent (10%) de données manquantes ont été retenues pour la suite du travail.

2.2.4. Identification de la relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques.

Pour identifier la relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques, nous avons déterminé les années communes entre les années ayant moins de 10% de valeurs manquantes dans la série des débits moyens annuels et les indices climatiques. Le test non

paramétrique de Spearman permet de calculer la corrélation entre les indices climatiques et les débits moyens annuels. Les résultats issus du test de Spearman sont vérifiés par le test non paramétrique de Kendall. Le coefficient de corrélation noté ρ est la mesure spécifique qui quantifie la force de la relation linéaire entre deux variables. C'est une valeur sans unité comprise entre -1 et 1. La significativité statistique est indiquée par une p-value. Par conséquent, les corrélations sont généralement exprimées à l'aide de deux chiffres clés : ρ et p-value. Ainsi donc :

- Plus, ρ est proche de zéro, plus la relation linéaire est faible.
- Les valeurs positives de ρ indiquent une corrélation positive lorsque les valeurs des deux variables tendent à varier dans le même sens.
- Les valeurs négatives de ρ indiquent une corrélation négative lorsque les valeurs d'une variable tendent à augmenter et que les valeurs de l'autre variable diminuent.
- Les valeurs 1 et -1 représentent chacune les corrélations « parfaites », positive et négative respectivement. Deux variables présentant une corrélation parfaite évoluent ensemble à une vitesse fixe. On dit que la relation est linéaire ; reportés dans un nuage de points, tous les points des données peuvent être reliés par une ligne droite.
- La p-value indique si l'on peut ou non significativement conclure que le coefficient de corrélation de la population est différent de zéro, d'après nos observations de l'échantillon.

Dans le cadre de cette étude, nous allons dans un premier temps, calculer le coefficient de corrélation ρ entre les débits moyens annuels et les indices climatiques mensuels (SST). Cette corrélation ne sera calculée qu'avec les années où nous avons moins de 10% de données manquantes. Ensuite, nous allons déterminer les p-values pour connaître les mois dans lesquels la corrélation entre les débits moyens annuels et les SST est significative. Le seuil de significativité de la corrélation est de 5%.

2.2.5. Le coefficient de détermination.

Le coefficient de détermination est le carré du r (coefficient de régression linéaire) et détermine à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points. Il a été utilisé dans beaucoup de domaines, dont la caractérisation hydrométéorologique, aux fins de mieux apprécier les liens entre les paramètres (Kodja, 2018). Il est obtenu par la formule : $R=r^2$.

Si $R = 0$: cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0 % de la distribution des points et justifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des points ;

Si $R = 1$: cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer la distribution des points. Il justifie donc que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres a et b de la droite de régression simulés sont ceux qui déterminent la distribution des points. De manière graphique, plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus les nuages de points sont diffus autour de la droite de régression et plus le R tend vers 1, plus les nuages de points se rapprochent de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression 1.

2.2.6. Estimation des débits à partir des indices climatiques.

Une corrélation significative entre les indices climatiques et les séries chronologiques d'une station donnée suggère que sa série de débits moyens annuels peut être approximée à l'aide d'une fonction linéaire des indices climatiques. Par conséquent, les moyennes annuelles des crues Q_{sim} ont été estimés en constituant une série contenant les indices mensuels ayant une corrélation significative et les débits moyens annuels associés. Ensuite nous avons divisé la série en deux parties égales dont la première est utilisée pour la détermination de la droite de régression entre les deux séries. La validation a été faite à partir de la seconde série avec les coefficients de l'équation de la droite de régression et des indices associés.

$$Q_{sim} = a \cdot IM + b$$

Les coefficients de régression a et b a été évaluée à l'aide d'une analyse de régression linéaire et IM les indices mensuels.

CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le présent chapitre présente les résultats issus de l'application de la méthodologie énoncée dans le chapitre précédent. Ces résultats prennent en compte les débits moyens annuels des années ayant moins de 10% de données manquantes, la relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur chaque station, et les débits prédits à partir des indices climatiques.

1. Les débits moyens annuels pour les années ayant moins de 10% de données manquantes.

Les figures 7 et 8 présentent les débits moyens annuels, de chacune des sept (07) stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé étudiées, des années ayant moins de 10% des données manquantes. L'analyse des champs moyens annuels des débits révèle une augmentation des débits moyens annuels observées au niveau de chaque station de la zone d'étude, ce qui explique l'augmentation de l'occurrence des phénomènes hydrométéorologiques observés au cours de ces dernières années. Nous disposons des chroniques de données de 1949 à 2019 généralement sur toutes les stations étudiées. Les débits moyens annuels variant de 33,27 en 1995 à 460,09 en 2019 sur la station de Ahlan ; de 1,77 en 1982 à 683,28 en 2019 sur la station d'Atchérigbé ; de 4,54 en 1958 à 683,28 en 2019 sur la station d'Atchakpa ; de 3,51 en 1958 à 197,37 en 1955 sur la station de Bétérou ; de 6,03 en 2015 à 551,66 en 1963 sur la station de Bonou ; de 3,53 en 1982 à 89,56 en 1962 sur la station de Domè ; de 12,61 en 1987 à 151,29 en 1963 sur la station de Kaboua. Sur la période de 1968 à 2006, les débits ont été particulièrement faibles à la station de Kaboua questionnant sa validité. Cela pourrait être due aux fautes que ces années présentent un pourcentage de données manquantes supérieur à 10% sur cette période à la station de Kaboua. L'analyse de ces données montre une croissance évidente des débits moyens annuels sur les stations d'Ahlan, d'Atchérigbé, d'Atchakpa et Kaboua.

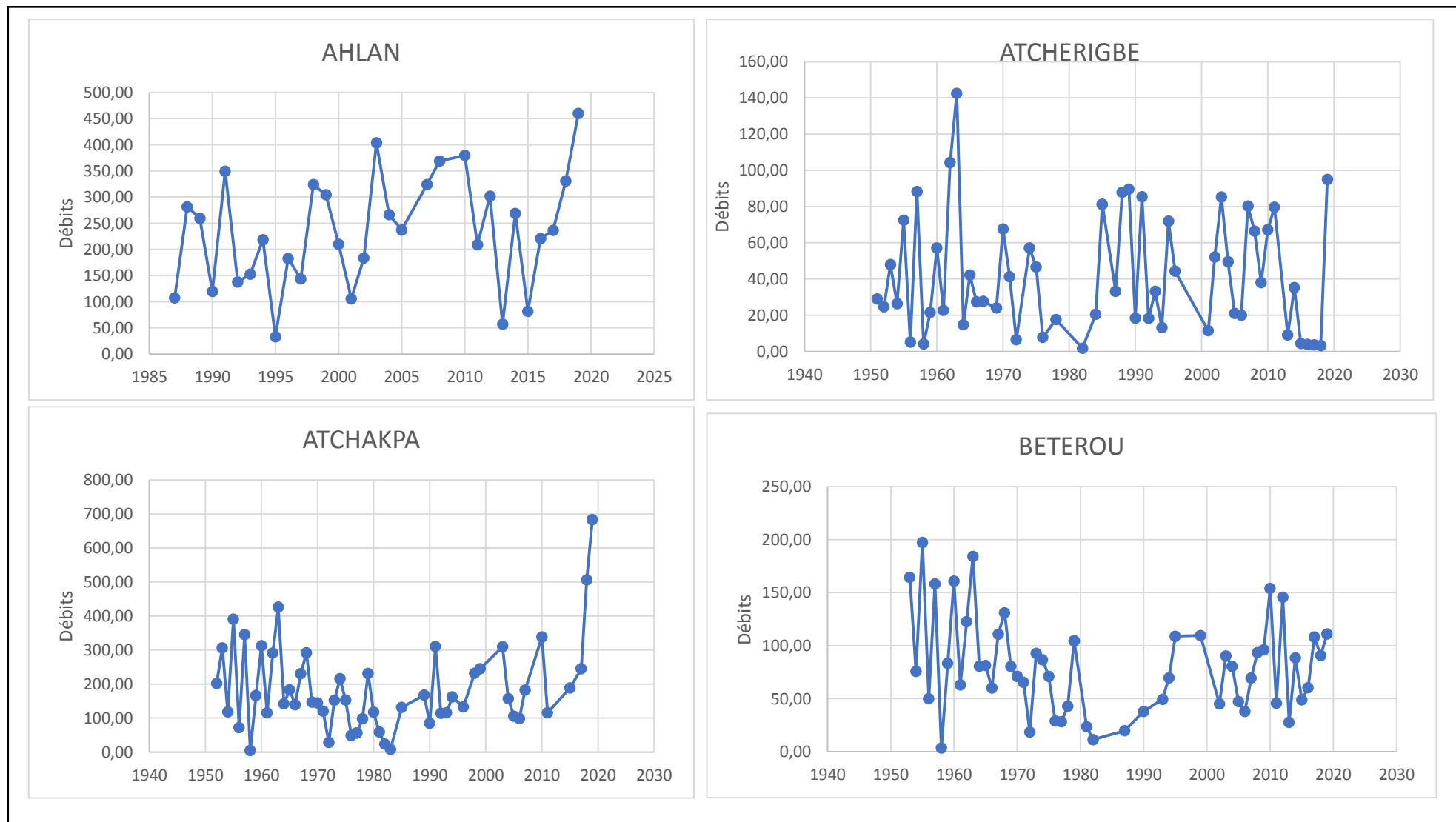


Figure 7 : Variabilité des débits moyens annuels sur les stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé.

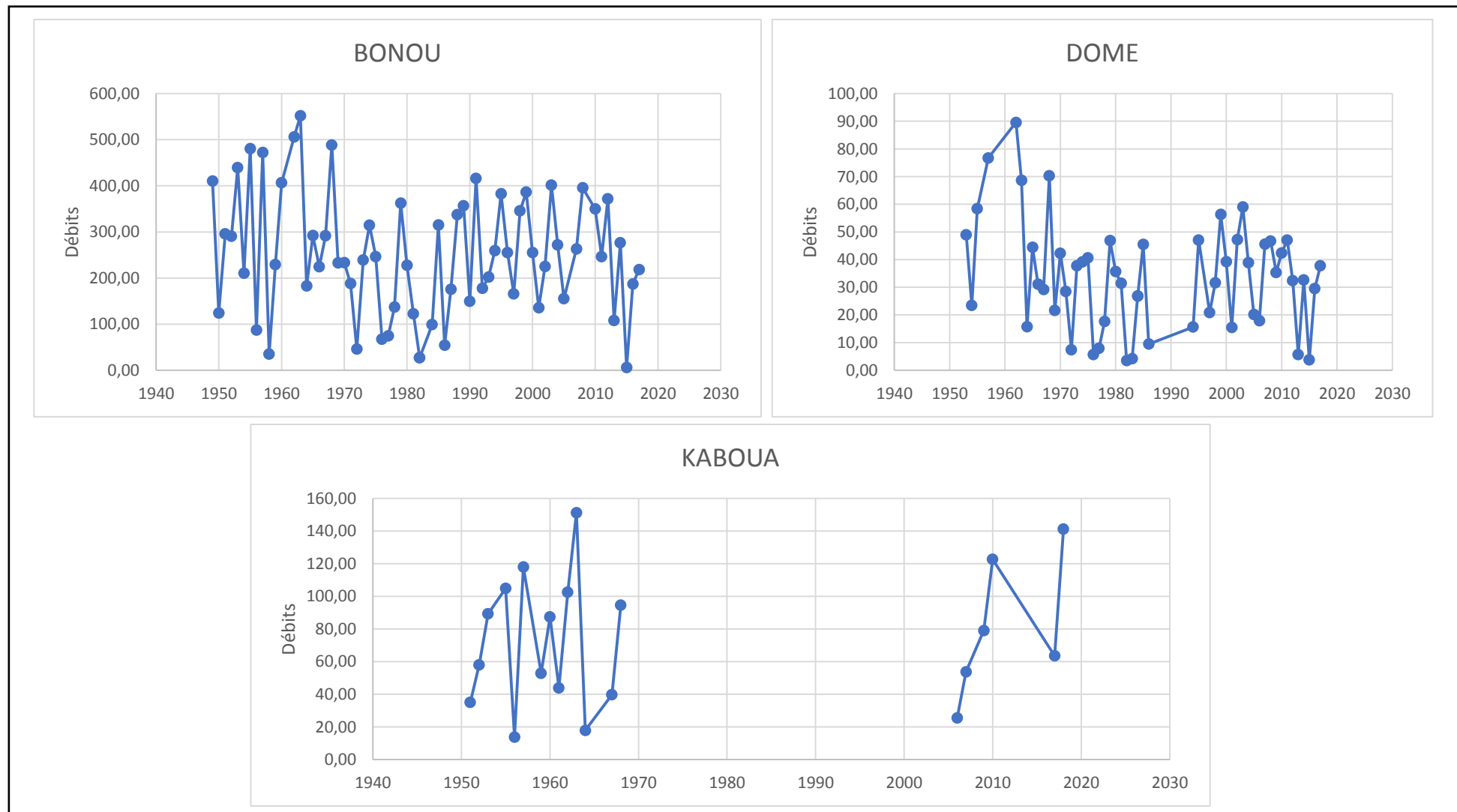


Figure 8 : Variabilité des débits moyens annuels sur les stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé.

2. Identification de la relation entre les débits moyens et les indices climatiques.

Les tableaux 1 ; 2 et 3 présentent les p-values des corrélations calculées entre les débits moyens annuels et les indices climatiques au niveau des stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé étudiées. Il permet d'inférer sur la qualité des coefficients de corrélation obtenus dans les Tableaux 6 et 7 (ANNEXE). Seuls les mois présentant au moins une corrélation significative entre les indices et les débits moyens annuels sont présentés dans les tableaux des résultats. De l'analyse de ces tableaux, il en résulte que des huit (08) indices climatiques (Dipôle Mode Index West (DMIW), Dipôle Mode Index East (DMIE), Dipôle Mode Index (DMI), El Niño Southern Oscillation Multivariate (ENSO), North Tropical Atlantic (NTA), Oceanic Niño, Tropical Northern Atlantic (TNA), Tropical Southern Atlantic (TSA)) utilisés présentent au moins une corrélation significative à l'exception de l'indice Dipôle Mode Index East (DMIE) pour toutes les stations d'étude.

L'association entre les débits moyens annuels et les indices climatiques a été évalué à l'aide de la corrélation de Spearman et testé au niveau de significativité de 10%.

De ces tableaux, des corrélations positives et négatives significatives ont été trouvé avec les indices climatiques utilisés. Les p-Values sont hautement significatives entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur la période de basse eau (Janvier à Juin), avec TSA en mai sur la station d'Atchérigbé et celle de Bonou, et avec l'indice DMI et TSA respectivement aux mois de février et mars, avril, mai sur la station d'Atchakpa. Quant aux autres stations, les débits moyens annuels sont soit significatives ou peu significatives avec les indices. En ce qui concerne la période des hautes eaux (Juin à Septembre), des indices utilisés, seuls TSA, Oceanic Niño et ENSO présentent des significativités sur cinq (06) des sept (07) stations de notre étude (Ahlan, Atchakpa, Atchérigbé, Bétérou, Bonou et Domè).

Tableau 1 : Significativité des corrélations entre les débits moyens annuels et les indices climatiques mensuels pour les stations hydrométriques du bassin-versant de l'Ouémé avec les astérisques (*) indiquant différents niveaux de significativité.

Significativité des p-values de l'indice DMI avec la méthode de Spearman.							Significativité des p-values de l'indice DMI avec la méthode de Kendall.							p-Value	Symbole	Significativité					
Station	J	F	M	A	J	D	Station	J	F	M	A	J	D	<0,01	***	Très significative					
Ahlan	*			**	*		Ahlan	*			*	*		[0,01 ; 0,05]	**	Significative					
Atchakpa	**	***	**				Atchakpa	**	***	**				[0,05 ; 0,1]	*	Peu significative					
Atchérigbé	**	*					Atchérigbé	**	*					>0,1		Non-significative					
Bétérou	*	*	**				Bétérou	*	*	**											
Bonou	**	**	*				Bonou	**	***	*											
Domè	**	**	**			*	Domè	**	***	**			*								
Kaboua		*	**				Kaboua		**	**											
Significativité des p-values de l'indice ENSO avec la méthode de Spearman.									Significativité des p-values de l'indice ENSO avec la méthode de Kendall.												
Station	AM	MJ	JJ	JA	AS	SO	ON	ND	Station	FM	AM	MJ	JJ	JA	AS	SO	ON	ND			
Ahlan			**	**	*	*			Ahlan				*	**	*	*					
Atchakpa			*						Atchakpa				*								
Atchérigbé				**	**	*			Atchérigbé					**	**	*					
Bétérou		*	*	**	**	**	*	*	Bétérou	**											
Bonou		*	**	***	***	**	**	**	Bonou			*	**	***	***	**	**	**			
Domè	**	**	***	***	**	**	**	**	Domè		**	**	***	***	**	**	**	**			
Kaboua	*	*							Kaboua	*	*	*									

Tableau 2 : Significativité des corrélations entre les débits moyens annuels et les indices climatiques mensuels pour les stations hydrométriques du bassin-versant de l'Ouémé.

Significativité des p-values de l'indice Oceanic Nino avec la méthode de Spearman.					Significativité des p-values de l'indice Oceanic Nino avec la méthode de Kendall.				Significativité des p-values de l'indice TNA avec la méthode de Spearman.							Significativité des p-values de l'indice TNA avec la méthode de Kendall.						
Station	AMJ	MJJ	JJA	OND	Station	AMJ	MJJ	OND	Station	J	A	S	O	N	D	Station	J	A	S	O	N	D
Ahlan		**	*		Ahlan	*	**		Atchakpa		*	**	**	**	**	Atchakpa		*	**	**	*	**
Atchérigbé	*				Atchérigbé	*			Bonou	*	*				*	Bonou	*	*				*
Domè				*	Domè	*		*	Domè		*					Domè		*				*
Significativité des p-values de l'indice DMIW par la méthode de Spearman.					Significativité des p-values de l'indice DMIW par la méthode de Kendall.				Significativité des p-values de l'indice NTA avec la méthode de Spearman.							Significativité des p-values de l'indice NTA avec la méthode de Kendall.						
Station	J	A	J	N	D	Station	J	A	J	N	Station	S	O	N	D	Station	S	O	N	D		
Ahlan	**	*	*			Ahlan	**	*	*		Atchakpa	*	*	**	**	Atchakpa	*	*	*	**		
Domè				*	*	Domè				*	Bonou				*	Bonou				*		

Tableau 3 : Significativité des corrélations entre les débits moyens annuels et les indices climatiques mensuels pour les stations hydrométriques du bassin-versant de l'Ouémé.

Significativité des p-values de l'indice TSA avec la méthode de Spearman.											Significativité des p-values de l'indice TSA avec la méthode de Kendall.										
Station	J	M	A	M	J	J	A	S	O	N	Station	J	M	A	M	J	J	A	S	O	N
Ahlan	**				*	**	***	***			Ahlan	**				*	*	**	***		
Atchakpa	**	***	***	***	***	***	**	**	**	**	Atchakpa	**	**	***	***	***	***	**	**	**	**
Atchéribé				***	**	**					Atchéribé		*		***	**	**				
Bétérou				*	*						Bétérou				*	*					
Bonou				***	**	**	*				Bonou				***	**	**	*			

Domè				**	*	**					Domè				**	*	**	*			
Kaboua					*				*	*	Kaboua				**		**				

Les mois d'octobre, novembre et décembre n'ont pas été pris en compte car il se retrouve après la période des hautes eaux. Utiliser les données de ces mois n'aurait donc aucun impact sur les prévisions.

Au vu des résultats obtenus, on retient que sur le bassin de l'Ouémé, il existe des corrélations hautement significatives entre les débits moyens annuels et les indices climatiques d'ENSO et de TSA généralement sur la période pluvieuse (Juin à septembre) sur les stations d'Ahlan, d'Atchakpa, d'Atchérigbé, de Bonou et celle de Domè.

Il faut noter que les différentes méthodes de corrélations non paramétrique (Spearman et Kendall) utilisées dans notre étude reproduisent efficacement et de la même manière la relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur toutes les stations de l'étude.

En se basant sur les résultats précédents, il existe, en moyenne, une corrélation hautement significative entre les débits moyens annuels et indices climatiques d'ENSO et de TSA sur cinq des stations d'étude. Ceci indique que la disponibilité des débits moyens annuels pourrait servir à d'éventuelles prévisions. C'est le cas par exemple pour les stations de Ahlan et de Atchakpa où des corrélations très significatives sont obtenues entre les débits moyens annuels observés avec l'indice climatique de TSA respectivement en août, septembre et juin, juillet (Tableau 1). Il en est de même pour les stations d'Atchérigbé et de Domè où il existe des corrélations très significatives entre les débits moyens annuels observés avec l'indice climatique d'ENSO au mois d'août et septembre (Tableau 3). A Bonou, les débits moyens annuels sont très bien corrélés avec les indices d'ENSO en août et septembre (Tableau 3). En effet, l'existence d'une corrélation significative indique la présence d'une relation linéaire significative entre les deux variables. Ainsi donc, on pourrait obtenir quelques informations très utiles sur le débit moyen annuel à cette station jusqu'à quelques mois à l'avance. De ces résultats, nous pouvons dire que les indices climatiques d'El Niño Southern Oscillation (ENSO) et de Tropical Southern Atlantic (TSA) sont les principales covariables pouvant être considérées pour la prévision saisonnière des débits sur le bassin de l'Ouémé.

3. Identification de la relation entre les débits moyens et les indices climatiques à partir des régressions linéaires simples.

Les Figures 9, 10 et 11 présentent la relation entre les débits moyens annuels aux différentes stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé avec les indices climatiques.

Pour l'évaluation des possibilités de prévisions à partir des indices climatiques nous avons déterminé la distribution des points tout en ajoutant les droites de régression linéaire.

La corrélation significative entre les débits moyens annuels observés (Q_{obs}) et les indices climatiques suggère que les débits moyens annuels observés (Q_{obs}) peuvent être écrit comme une fonction linéaire de ces indices climatiques. De l'analyse de ces figures, on observe une régression linéaire entre les débits moyens annuels et les indices climatiques. Les coefficients de détermination sont compris généralement entre 0,0142 sur la station d'Atchéribé jusqu'à 0,5091 sur la station d'Atchakpa avec des coefficients de corrélation généralement inférieur à 0,6 ; ce qui nous amène à vérifier la significativité de ces valeurs avant de procéder à l'analyse de la possibilité de prévisions des débits moyens annuels à partir des indices climatiques. Les coefficients de détermination supérieur ou égaux à 0,2 sont pris en compte. La station d'Atchakpa ne présente aucun R^2 supérieur ou égal à 0,2 et l'indice climatique d'ENSO présente au moins un R^2 supérieur ou égal à 0,2 pour toutes les stations d'étude.

Comme le montre ces figures, les indices climatiques sont habiles pour prédire si Q_{obs} dans les mois à venir seront anormalement bas ou élevés.

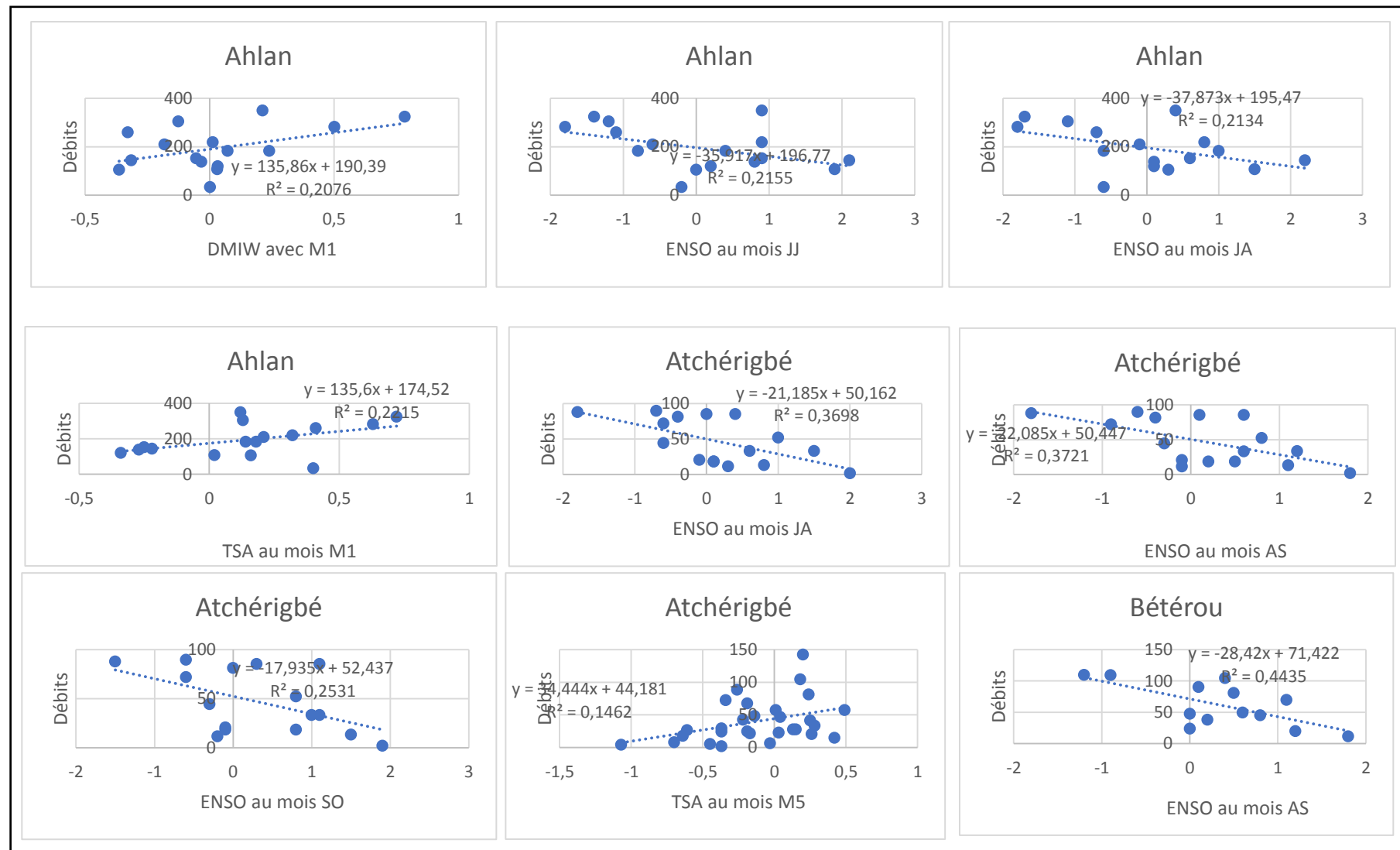


Figure 9 : Relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur les stations du bassin de l'Ouémé.

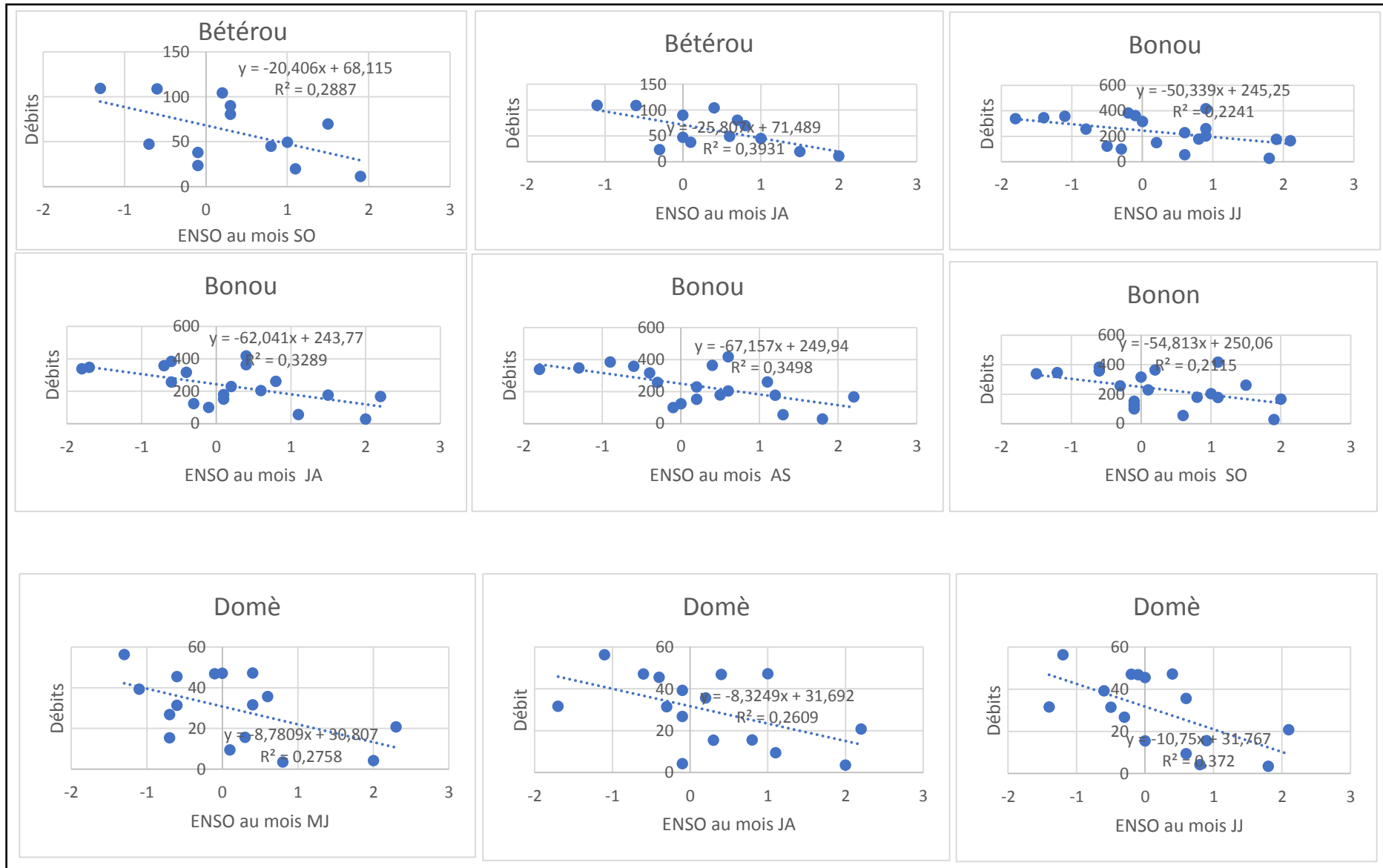


Figure 10 : Relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur les stations du bassin de l'Ouémé.

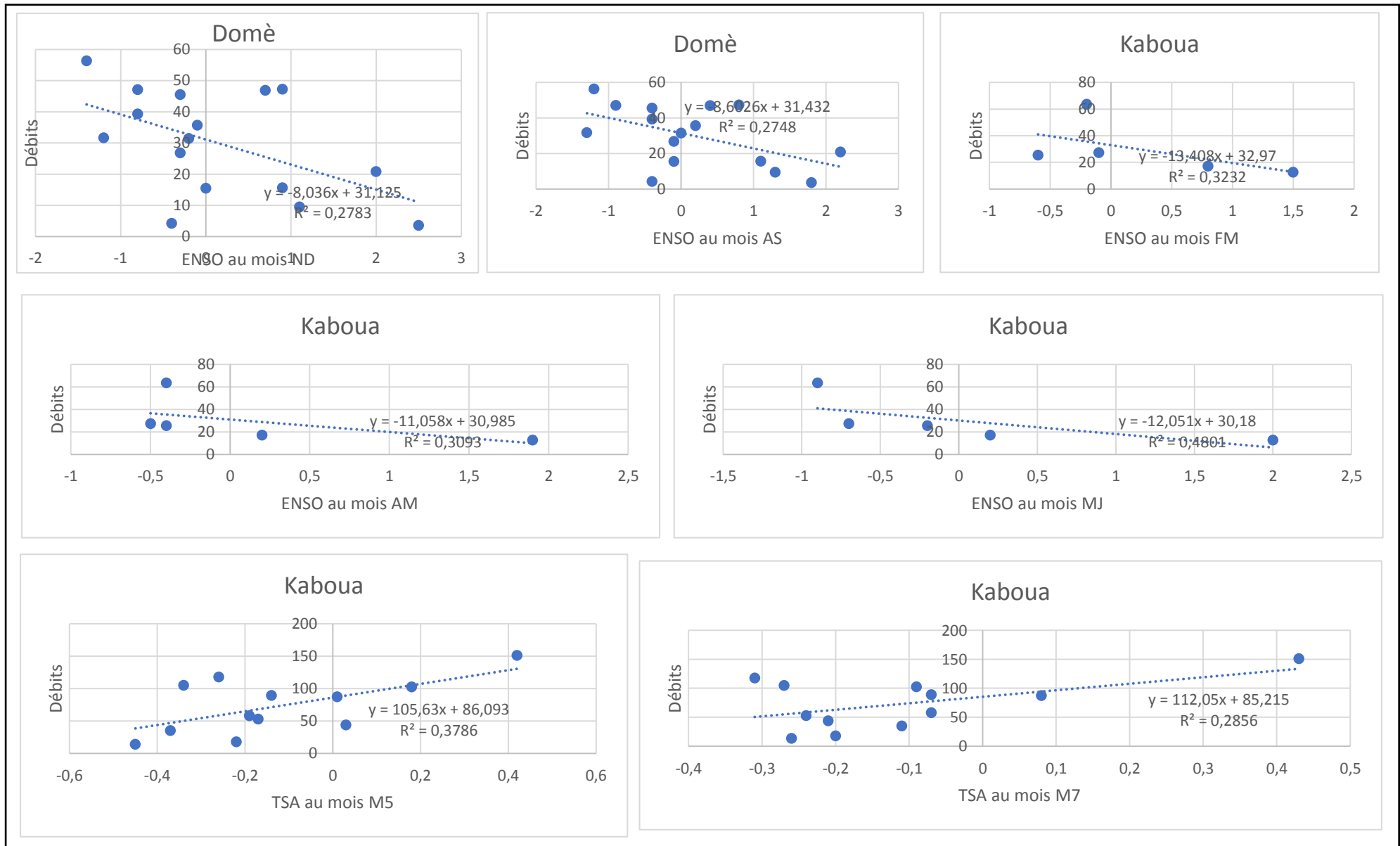


Figure 11 : Relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques sur les stations du bassin de l'Ouémé.

4. Evaluation de la possibilité de prévision des débits moyens annuels à partir des indices climatiques.

La Figure 12, 13 et 14 présentent l'évolution des débits moyens annuels observés sur les stations du bassin de l'Ouémé et des débits moyens annuels simulés (Q_{sim}) à partir des mois significatifs des indices climatiques (SST).



Figure 12 : Évolution des débits moyens annuels simulés (Q_{sim}) pour les mois ayant une corrélation significative avec les indices climatiques.

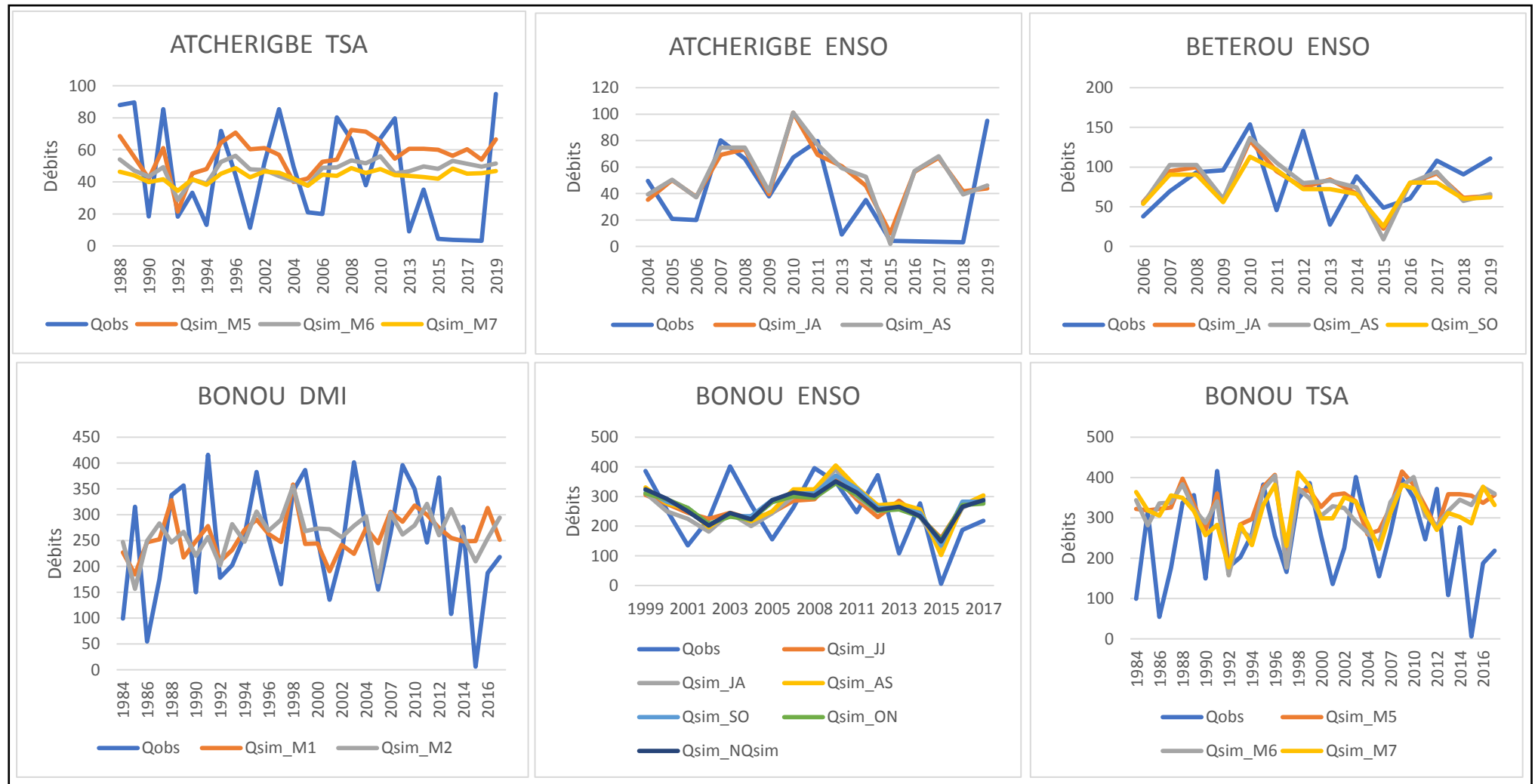


Figure 13 : Évolution des débits moyens annuels simulés (Qsim) pour les mois ayant une corrélation significative avec les indices climatiques sur les stations du bassin de l'Ouémé.

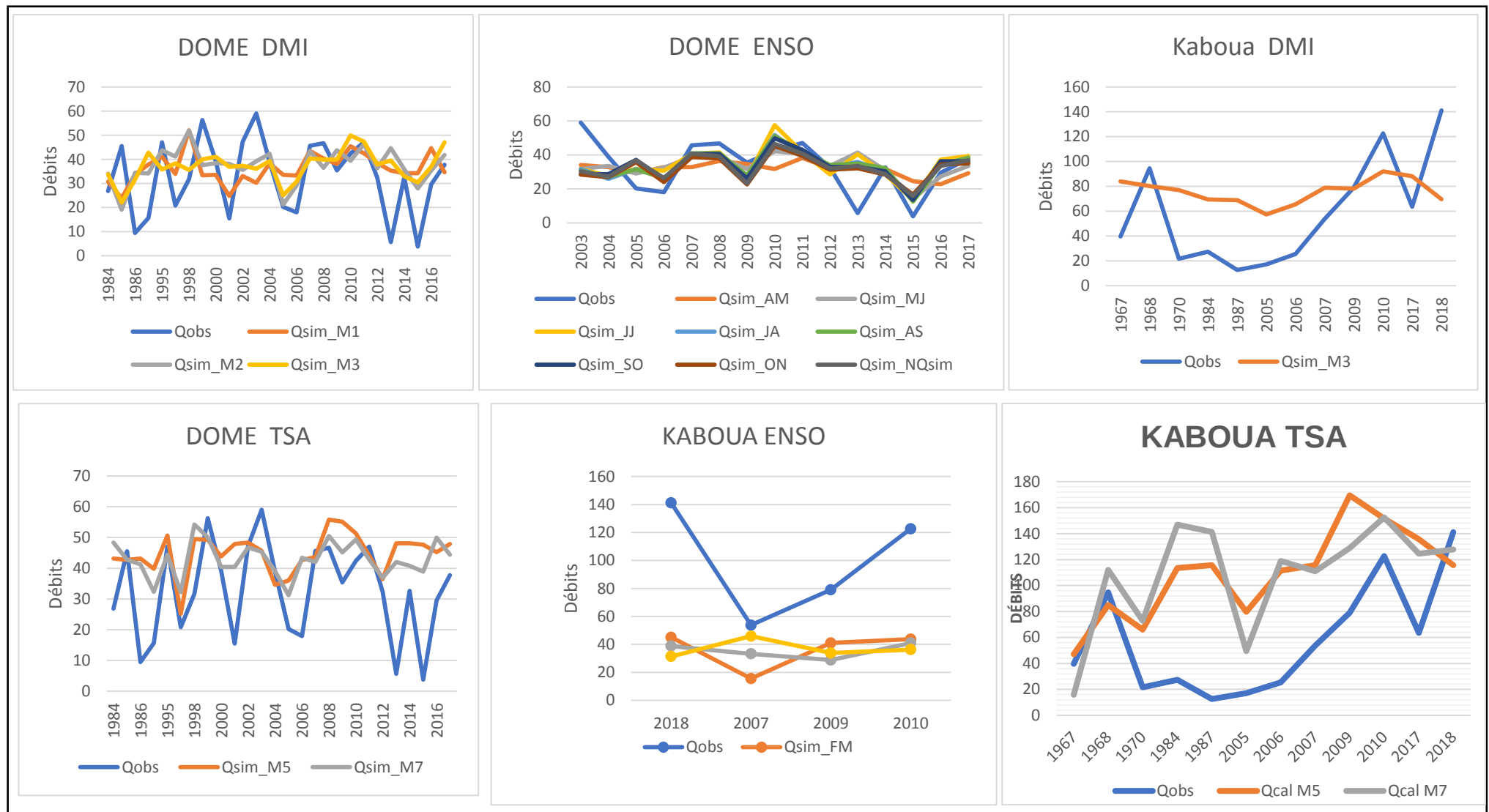


Figure 14 : Évolution des débits moyens annuels simulés (Qsim) pour les mois ayant une corrélation significative avec les indices climatiques sur les stations du bassin de l'Ouémé.

Les résultats de l'analyse des figures 12, 13 et 14, indiquent que les débits moyens annuels simulés (Q_{sim}) à partir des mois ayant une corrélation significative pour les indices climatiques présentent des variabilités par rapport à la réalité (les débits moyens annuels observés (Q_{obs})). Les analyses indiquent que l'évolution des Q_{sim} présente une variabilité quasi identique avec les Q_{obs} pour certaines stations notamment les stations de Ahlan, Atchakpa, Bétérou, Bonou et celle de Domè. Il est remarqué qu'il y a des débits moyens annuels simulés qui sont en-dessous de la réalité et donc sous-estimés tandis que d'autres débits moyens annuels simulés sont surestimés, par exemple l'indice DMI au mois M3 sur la station de Kaboua.

Les débits moyens annuels simulés présentent généralement une évolution quasi identique avec les débits observés et ils sont en dessus des débits moyens annuels observés associées aux indices DMI, NTA, TNA, et TAS sur la station de Atchakpa et TSA, DMI et ENSO sur la station de Bonou. Les débits moyens annuels simulés sont surestimés par rapport aux débits moyens annuels observés sur les stations de Atchakpa et de Bonou dans le bassin de l'Ouémé.

De même, la comparaison entre les débits moyens annuels simulés à partir des mois d'indices climatiques significatifs et les débits moyens annuels observés montre que les débits moyens annuels observés et simulés présentent une variabilité relativement identique. Cependant, les débits moyens annuels simulés sont parfois sous-estimés par rapport aux débits moyens annuels observés sur les stations concernées du bassin-versant de l'Ouémé.

Par contre au niveau des indices TSA sur les stations d'Atchakpa et de Bonou, et ENSO sur les stations de Bétérou, Bonou et Domè, les débits moyens annuels simulés présentent une allure qui converge vers les débits moyens annuels observés. Ce qui permet de dire que dans le secteur d'étude, les débits simulés à partir des indices climatiques variant d'un indice à un autre mais ceux-ci n'arrivent généralement pas à reproduire les débits moyens annuels observés sur les stations de notre étude.

Les valeurs des débits moyens annuels sont présentées dans les Annexes tableau 4 et 5.

CHAPITRE 3 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

Les prévisions fournissent une évaluation qualitative de la saison à venir, et contribue de ce fait à une bonne gestion des ressources en eau. A partir de la catégorie de la saison à venir, on peut proposer aux agriculteurs, les types de terrains à exploiter. Au vu des avantages que présentent les prévisions, il convient d'élaborer des modèles sur la base des variables qui expliquent au mieux les précipitations et aussi les écoulements des grands fleuves du Bénin. L'étude de l'exploration des prévisions saisonnières hydrologiques à partir des indices climatiques dans le bassin-versant de l'Ouémé est une étude qui s'inscrit dans le contexte des changements globaux. Elle a permis de mettre en évidence les différents indices climatiques sur lesquels nous pouvons nous baser pour faire la prévision des débits moyens annuels. Les prévisions sont basées sur des relations linéaires simples entre les débits moyens annuels observés (Qobs) et les indices climatiques pour les corrélations statistiquement significatives au niveau de signification de 10%. L'analyse de résultats montre une croissance évidente des débits moyens annuels sur les stations d'Ahlan, d'Atchérigbé, d'Atchakpa et celle de Kaboua. Au vu des résultats obtenus, on retient que sur le bassin de l'Ouémé, il existe des corrélations hautement significatives entre les débits moyens annuels et les indices climatiques d'ENSO et de TSA généralement sur la période pluvieuse (Juin à septembre) sur les stations d'Ahlan, d'Atchakpa, d'Atchérigbé, de Bonou et celle de Domè. Il faut noter que les différentes méthodes de corrélations non paramétrique (Spearman et Kendall) utilisées dans cette étude reproduisent efficacement et de la même manière la relation entre les débits moyens annuels et les indices climatiques. Les analyses indiquent que l'évolution des débits moyens annuels simulés présente une variabilité assez proche des débits moyens annuels observées. Il est remarqué qu'il y a des débits moyens annuels simulés qui sont en-dessous de la réalité et les sous-estiment tandis que d'autres débits moyens annuels simulés sont surestimés comparativement aux débits moyens observés. Au regard des résultats, il convient de dire que les indices climatiques El Niño Southern Oscillation (ENSO) et de Tropical Southern Atlantic (TSA) sont les principales sources de prévisibilité la plus étudiée à l'échelle de la saison. Li et al. (2016) ont analysé les inondations dans 55 pays d'Afrique par rapport aux années ENSO (SOI) et ont trouvé une relation statistiquement significative au niveau continental. Une forte corrélation linéaire entre les débits annuels et l'ENSO a également été trouvée en Afrique du Sud Alemaw et Chaoka (2006) et dans le bassin du Nil Siam et Eltahir (2015). Enfin, en ce qui concerne l'estimation des débits moyens annuels à partir des indices climatiques, les résultats mitigés obtenus montrent en effet le besoin d'intégrer d'autres

paramètres atmosphériques (vents, vapeur d'eau, ... etc.) avant de pouvoir en tirer tous les bénéfices escomptés dans le domaine de la prévision saisonnière.

Il serait intéressant d'explorer comment les liens identifiés entre la variabilité climatique et le débit pourraient être exploités pour la gestion des risques d'inondation et de sécheresse mais aussi pour d'autres secteurs liés à l'eau. Au vu des résultats de notre étude, les indices climatiques d'ENSO et TSA se sont avérées particulièrement efficaces pour l'estimation des débits moyens annuels sur le bassin de l'Ouémé à Bonou. Néanmoins, certaines dispositions peuvent être proposées pour une meilleure évaluation des débits moyens annuels.

Perspectives

De nombreuses perspectives pour l'exploration des prévisions saisonnières hydrologiques à partir des indices climatiques au Bénin se dégagent de ces travaux.

Nous avons commencé à explorer la problématique de relations linéaires simples existant entre les débits moyens annuels observés (Qobs) et les indices climatiques. Cependant, la relation linéaire simple à l'aide des corrélations entre les SSTs et les Qobs, n'a été réalisée que sur les paramètres de débits moyens annuels et températures de la surface de la mer mais à partir de relations statistiques non paramétriques. Il serait donc intéressant d'appliquer cette méthode en utilisant des relations statistiques paramétriques également basées sur les débits moyens annuels, les moyennes trimestrielles pondérées des indices climatiques, et autre paramètre important pour les prévisions saisonnières hydrologiques. De plus, d'autres tests de sensibilité de la méthode pourraient être utilisés dans le cadre de la prévision saisonnière comme sur les tendances d'homogénéités et ruptures de stationnarité des données utilisés.

L'importance des conditions initiales du sol pour le système hydrologique au Bénin n'est plus à démontrer. Une meilleure estimation de ces conditions aiderait donc probablement à l'amélioration des scores de prévisions saisonnières hydrologiques. Ces conditions n'étant pas abordé dans cette étude. Aussi l'analyse fréquentielle des moyennes hydrométéorologiques des données n'ont pas été prise en compte.

Pour améliorer les prévisions saisonnières hydrologiques, une amélioration du modèle hydrologique utilisé dans le processus de la PRESAO pourrait également être réalisée. Par exemple, utiliser les modèles de prévision élaborer par la PRESAO pour l'exploitation des résultats des travaux déjà effectués dans le domaine.

De manière similaire, il serait aussi très intéressant d'explorer les prévisions saisonnières hydrologiques avec une régression linéaire multiple des indices climatiques. Poursuivre cette étude pour exploiter cette approche qui met en évidence l'existence d'autres zones influençant les précipitations en Afrique de l'Ouest, sur tous les autres grands bassins d'une part et les sous-bassins du Bénin avec d'autres indices climatiques.

Un autre paramètre à prendre en compte est la position à 28°W de la Zone de Convergence Intertropicale. Sa position en avril-mai a été identifiée comme bon indicateur de la qualité de la saison des pluies à venir au Sahel Mahé et Citeau (1993). Il convient enfin d'analyser les données d'Energie Statique Humide ; un paramètre déterminant dans les prévisions des précipitations en Afrique de l'Ouest.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amoussou, E., Totin V. S., H., Allagbé, S., Japhet, K., Akognongbé S. J., A., Sohoun, B., Vissin, E. W., Boko, M., Houndénou, C., & Mahé, G. (2015). Péjoration climatique et dynamique hydroécologique dans le bassin-versant du fleuve Ouémé à Bonou au Bénin. *Conférence Internationale Sur l'hydrologie Des Grands Bassins Fluviaux de l'Afrique*, 12.
- Atchadé A. A. G., 2014. Impacts de la dynamique du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin-versant de la rivière zou dans le Bénin méridional, Thèse de Doctorat, EDP/FLASH, 235p.
- Atchadé, A. A. G., Dossou-Yovo, E. R., Kodja, D. J., Vissin, E. W., & Boukari, M. (2015). DYNAMIQUE DE L' OCCUPATION DES TERRES ET RESSOURCE EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE DU ZOU À L' EXUTOIRE. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie , Liège 2015, figure 1*, 301–306.
- Azontondé H. A., 1991. Propriétés physiques et hydrauliques des sols du Bénin. Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone. IAHS, n° 199, pp 249-258.
- Blalogoe, Stratégie de lutte contre les inondations dans le Grand Cotonou : diagnostic et alternative pour une gestion durable. Thèse de Doctorat Unique, UAC, 2014.
- Bossa Y. A., Modélisation du bilan hydrologique dans le bassin du Zou à l'exutoire d'Atchérigbé : contribution à l'utilisation durable des ressources en eau. 2007.
- Causseret, P., Sarrazin, L., 2001. Les saisons et les mouvements de la Terre. Paris : Belin - Pour La Science, 127 p.
- DEGAN, B. A. S. (2019). *Impact de la variabilité climatique sur l'évolution des crues du fleuve Ouémé au BENIN de 1952 à 2011*. Université d'Abomey-Calavi.
- Didier KAKPA. (2021). Agence Nationale de la Météorologie du Bénin 1^{er} Semestre 2021 Edition N ° 6 PREVISION SAISONNIERE DES PARAMETRES AGRO-HYDRO-. *Bulletin de Prévision*.
- Dunne, T., & Black, R. D. (1970). Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershe. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 6(5).
- Faure P., 1977. Carte pédologique de reconnaissance de la république Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille de Djougou. ORSTOM. Notice explicative n°66 (4), 49p 155.
- Faure, P., & Volkoff, B. 1998. Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa). *Catena*, 32(3-4), 281-306.
- Gleick H, P. (1996). *Water resources*. In *Encyclopedia of climate and weather* (Vol. 2, pp. 817–823). Schneider S H.
- Godard, A., & Tabeaud, M. 2009. Les Climats-mécanismes, variabilités, répartition, 4^e édition. ed, Cursus, série géographie. Armand Colin, Paris, ISBN : 9782200246044, 216p.
- Horton, R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions-American Geophysical. Union*, 14 : 446-460.

- Houndénou C., 1999. Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide. l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne Dijon. 390 pages.
- Houknpè, J., Merz, B., Badou, F. D., Bossa, A. Y., Yacouba, Y., & Lawin, E. A. (2022). Potential for seasonal flood forecasting in West Africa using climate indexes. *Journal of Flood Risk Management*, e12833. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12833>
- IPCC 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of working group II to the fourth Assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, pp 391-431.
- Kamagaté, B., 2006. « Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin-versant en milieu tropical de socle au Bénin : bassin-versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé) ». Phdthesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00193895/document>.
- Kodja, D. J. (2018). *Indicateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l' Ouémé à l' exutoire de Bonou en Afrique de l' Ouest*. Université Montpellier; Université d'Abomey-Calavi (Bénin).
- Le Barbé, L., G.Alé, R., G., Millet, B., Texier, H., & Borel, Y. (1993). *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*.
- Linsoussi A. C., Evaluation des risques en matière de gestion des ressources : contribution à la caractérisation événementielle des régimes Ouest-Africain et de leurs fluctuations., in Dissertation, 2000, University of Abomey-Calavi : Cotonou.
- Mahe, G. (1995). *Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989*. 6(January).
- Mahe, G., Servat, E., Paturel, J., Amani, A., & Educational, U. N. (2004). *Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l' Ouest*. December 2014.
- Mohamed, H. (2002). *Synthèse et Evaluation des Prévisions Saisonnières en Afrique de l' Ouest*. UNIVERSITE MONTPELLIER II/ INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT.
- Moniod, F. (1973). Régime hydrologique de l'Ouémé (Dahomey). *Cah. ORSTOM, Série Hydrol*, X(2), 171–183.
- O. Koudamiloro et al. (2017). Caractérisation Des Risques Hydroclimatiques Dans Le Bassin Versant De L' Ouémé A L' exutoire De Bétérou Au Bénin ... *European Scientific Journal*, Vol.13, No(ISSN 1857-7431). <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n15p101>.
- Ogouwalé, E. (2001) Vulnérabilité/Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques dans le Département des collines. Mémoire de maîtrise de Géographie. UAC/FLASH.DGAT, 119p.
- Ouikotan, B. (2009). *ETUDE DE LA PROPAGATION DES CRUES DU FLEUVE OUEME ENTRE BETEROU ET SAVE*. UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI.
- Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., & Schaffernich, E. J. (2015). Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change*, 5(May), 475–956. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2554>

- Rome, S., Caniaux, G., Ringard, J., Dieppois, B., & Diedhiou, A. (2015). *Identification De Tendances Récentes Et Ruptures D ' Homogénéité Des Températures : Exemple En Afrique De L ' Ouest Et Sur Le Golfe De Guinée*. 1, 591–596.
- Servain, J., Caniaux, G., Kouadio, Y. K., Mcphaden, M. J., & Araujo, M. (2014). Recent climatic trends in the tropical Atlantic. *Clim Dyn* (2014) 43:3071–3089, 3071–3089. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2168-7>
- Singla, S. (2012). *Prévisibilité des ressources en eau à l'échelle saisonnière en France* [Université de Toulouse]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00798280>.
- Tabeaud, M., 2008. La climatologie générale. Armand Colin, 128p.
- Tossa A., Tonouhéwa A., 2009. Profil du bassin de l'Ouémé et caractérisation des sites pilotes (analyse des données), Rapport final du PROJET GCP/GLO/207/ITA, 64p.
- Vissin, E. W. (2007). Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surfacesur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. *Centre de Recherches En Climatologie (CNRS-UMR 5210), Thèse de d*, 310p.
- Yabi, J. A. (2018). *vallée de l ' Ouémé , au sud Bénin (Afrique de l ' Ouest) [Availability of water resources and climatic var ... Disponibilité de la ressource en eau et variabilité climatique dans la basse vallée de l ' Ouémé , au sud Bénin (Afrique de l ' Ouest) [A. March 2021.*

ANNEXES

EXPLORATION DES PREVISIONS SAISONNIERES HYDROLOGIQUES A PARTIR DES INDICES CLIMATIQUES

STATION													
AHLAN		ATCHERIGBE				ATCHAKPA				Bétérou			
Année	Débit	Année	Débit			Année	Débit			Année	Débit		
1987	107.26	1951	28.99	1987	33.20	1952	201.34	1978	97.52	1953	164.42	1979	104.46
1988	281.60	1952	24.67	1988	87.88	1953	306.46	1979	230.68	1954	75.71	1981	23.58
1989	259.26	1953	47.93	1989	89.61	1954	118.13	1980	117.02	1955	197.37	1982	11.32
1990	119.41	1954	26.38	1990	18.40	1955	390.78	1981	58.95	1956	50.10	1987	19.81
1991	349.56	1955	72.47	1991	85.34	1956	72.05	1982	22.86	1957	158.18	1990	38.00
1992	137.74	1956	5.10	1992	18.28	1957	344.99	1983	8.00	1958	3.52	1993	49.40
1993	152.49	1957	88.29	1993	33.15	1958	4.54	1985	131.24	1959	83.29	1994	69.73
1994	218.57	1958	4.08	1994	13.16	1959	165.88	1989	167.14	1960	160.87	1995	108.91
1995	33.27	1959	21.46	1995	71.86	1960	312.53	1990	84.71	1961	62.87	1999	109.52
1996	182.80	1960	57.08	1996	44.23	1961	115.24	1991	310.01	1962	122.78	2002	45.00
1997	143.60	1961	22.72	2001	11.42	1962	290.64	1992	113.54	1963	184.11	2003	90.24
1998	323.81	1962	104.19	2002	52.17	1963	426.04	1993	115.41	1964	80.57	2004	80.49
1999	304.31	1963	142.42	2003	85.32	1964	141.40	1994	161.99	1965	81.26	2005	47.29
2000	209.79	1964	14.66	2004	49.57	1965	182.97	1996	132.47	1966	59.97	2006	37.90
2001	105.61	1965	42.24	2005	20.96	1966	138.91	1998	231.60	1967	110.92	2007	69.40
2002	183.33	1966	27.42	2006	19.91	1967	230.49	1999	245.03	1968	130.95	2008	93.43
2003	403.61	1967	27.72	2007	80.23	1968	291.66	2003	309.55	1969	80.50	2009	96.08
2004	266.65	1969	23.98	2008	66.39	1969	146.24	2004	157.06	1970	71.02	2010	153.91
2005	237.06	1970	67.52	2009	37.95	1970	144.24	2005	105.28	1971	65.43	2011	45.64
2007	323.88	1971	41.31	2010	67.19	1971	120.06	2006	98.74	1972	18.50	2012	145.63
2008	368.72	1972	6.43	2011	79.68	1972	28.05	2007	181.93	1973	92.69	2013	27.55
2010	379.51	1974	57.05	2013	9.10	1973	151.93	2010	338.29	1974	86.57	2014	88.40
2011	208.71	1975	46.64	2014	35.21	1974	215.26	2011	115.16	1975	71.12	2015	48.95
2012	301.98	1976	7.71	2015	4.36	1975	153.02	2015	188.20	1976	28.96	2016	60.25
2013	57.03	1978	17.62	2016	3.85	1976	48.37	2017	244.69	1977	28.31	2017	108.11
2014	268.83	1982	1.77	2017	3.54	1977	55.58	2018	506.14	1978	42.85	2018	90.71
2015	81.60	1984	20.50	2018	3.23			2019	683.28			2019	111.03
2016	220.60	1985	81.23	2019	94.95								
2017	236.35												
2018	330.93												
2019	460.09												

Tableau 4 : Débits moyens annuels simulés pour les années ayant moins de 10% de données manquantes des stations de Ahlan, Atchérigbé, Atchakpa et Bétérou.

STATION									
Bonou				DOMÈ				KABOUA	
Année	Débit			Année	Débit			Année	Débit
1949	410.23	1982	27.30	1953	48.96	1984	26.82	1951	34.99
1950	124.33	1984	99.16	1954	23.43	1985	45.53	1952	58.00
1951	295.72	1985	315.32	1955	58.45	1986	9.46	1953	89.26
1952	290.61	1986	54.45	1957	76.74	1994	15.63	1955	104.85
1953	439.49	1987	175.44	1962	89.56	1995	47.09	1956	13.78
1954	210.48	1988	337.72	1963	68.61	1997	20.84	1957	118.01
1955	480.42	1989	356.55	1964	15.72	1998	31.66	1959	52.89
1956	87.27	1990	149.86	1965	44.42	1999	56.30	1960	87.35
1957	472.26	1991	416.14	1966	31.09	2000	39.29	1961	43.89
1958	34.95	1992	177.78	1967	29.16	2001	15.49	1962	102.51
1959	229.37	1993	202.16	1968	70.29	2002	47.23	1963	151.29
1960	406.72	1994	259.42	1969	21.63	2003	59.01	1964	17.86
1962	505.95	1995	382.70	1970	42.27	2004	38.92	1967	39.72
1963	551.66	1996	255.21	1971	28.48	2005	20.19	1968	94.64
1964	182.82	1997	165.58	1972	7.46	2006	17.96	1970	21.66
1965	292.09	1998	345.66	1973	37.80	2007	45.60	1984	27.33
1966	224.82	1999	386.31	1974	39.13	2008	46.71	1987	12.61
1967	291.89	2000	255.11	1975	40.62	2009	35.38	2005	17.14
1968	488.57	2001	135.55	1976	5.70	2010	42.39	2006	25.46
1969	232.92	2002	225.11	1977	7.94	2011	47.06	2007	53.78
1970	233.30	2003	401.33	1978	17.64	2012	32.38	2009	79.09
1971	187.99	2004	271.84	1979	46.88	2013	5.69	2010	122.69
1972	46.32	2005	155.25	1980	35.68	2014	32.63	2017	63.54
1973	238.95	2007	263.14	1981	31.44	2015	3.76	2018	141.20
1974	314.72	2008	395.60	1982	3.53	2016	29.54		
1975	246.45	2010	349.75	1983	4.24	2017	37.74		
1976	67.48	2011	246.37						
1977	74.71	2012	371.99						
1978	136.92	2013	108.01						
1979	362.60	2014	276.51						
1980	227.55	2015	6.03						
1981	122.59	2016	187.27						
		2017	218.44						

Tableau 5 : Débits moyens annuels simulés pour les années ayant moins de 10% de données manquantes des stations de Bonou, Domè, et Kaboua.

Corrélation entre les indices climatiques et les débits moyens annuels

Tableau 6 : Résultats du test de corrélation entre les indices climatiques et les débits moyens annuels par la méthode de Spearman sur chaque station du bassin de l'Ouémé.

Indice de DMIW et de débit par la méthode de Spearman.																		
Station	J		F		M		A		M		J		J		A		S	
Ahlan	0.41	0.02	0.30	0.10	0.27	0.15	0.34	0.06	0.18	0.34	0.31	0.09	0.14	0.45	0.21	0.25	0.24	0.19
Atchakpa	0.07	0.61	0.11	0.45	0.16	0.24	0.07	0.62	0.13	0.36	0.07	0.60	-0.04	0.80	0.01	0.96	0.05	0.75
Atchérigbé	0.08	0.57	0.01	0.96	0.00	1.00	-0.07	0.61	-0.06	0.67	-0.07	0.63	0.00	1.00	-0.01	0.97	-0.03	0.84
Bétérou	-0.05	0.73	-0.06	0.69	-0.05	0.71	-0.09	0.51	-0.04	0.79	-0.06	0.65	-0.15	0.29	-0.12	0.40	-0.13	0.35
Bonou	-0.02	0.90	-0.01	0.91	-0.04	0.78	-0.11	0.40	-0.08	0.54	-0.06	0.63	-0.09	0.48	-0.06	0.65	-0.06	0.64
Domè	-0.02	0.89	-0.03	0.81	-0.05	0.75	-0.18	0.21	-0.19	0.17	-0.18	0.20	-0.19	0.18	-0.14	0.32	-0.12	0.41
Kaboua	-0.06	0.78	0.02	0.93	-0.10	0.65	-0.07	0.73	0.03	0.89	-0.02	0.92	0.07	0.74	0.12	0.57	-0.01	0.95
Indice de DMIE et de débit par la méthode de Spearman.																		
Station	J		F		M		A		M		J		J		A		S	
Ahlan	0,137	0,461	0,114	0,542	0,004	0,982	0,013	0,946	-0,083	0,654	-0,140	0,450	-0,246	0,181	-0,208	0,261	-0,153	0,412
Atchakpa	-0,075	0,593	-0,104	0,458	-0,039	0,780	0,053	0,707	0,080	0,570	0,009	0,948	-0,100	0,474	-0,116	0,406	-0,090	0,522
Atchérigbé	-0,143	0,292	-0,151	0,267	-0,132	0,333	-0,018	0,893	0,020	0,882	0,067	0,623	-0,032	0,814	-0,076	0,578	-0,087	0,526
Bétérou	-0,179	0,199	-0,209	0,132	-0,216	0,121	-0,048	0,732	0,006	0,964	-0,079	0,575	-0,150	0,282	-0,163	0,243	-0,066	0,639
Bonou	-0,174	0,165	-0,143	0,256	-0,190	0,130	-0,053	0,674	-0,013	0,917	-0,091	0,473	-0,158	0,208	-0,193	0,123	-0,118	0,349
Domè	-0,171	0,224	-0,200	0,154	-0,207	0,141	-0,108	0,447	-0,074	0,599	-0,030	0,834	0,000	1,000	0,009	0,948	0,039	0,785
Kaboua	-0,237	0,265	-0,235	0,268	-0,227	0,286	-0,170	0,427	0,023	0,914	-0,133	0,534	-0,232	0,274	-0,100	0,641	-0,172	0,419
Indice de DMI et de débit par la méthode de Spearman.																		
Station	J		F		M		A		M		J		J		A		S	
Ahlan	0,320	0,080	0,142	0,443	0,283	0,123	0,358	0,049	0,221	0,232	0,317	0,083	0,245	0,184	0,165	0,375	0,185	0,318

EXPLORATION DES PREVISIONS SAISONNIERES HYDROLOGIQUES A PARTIR DES INDICES CLIMATIQUES

Atchakpa	0,305	0,027	0,397	0,003	0,341	0,012	0,135	0,336	0,094	0,504	0,120	0,393	0,055	0,697	0,156	0,264	0,142	0,310
Atchérigbé	0,290	0,030	0,249	0,064	0,166	0,220	-0,028	0,835	-0,072	0,596	-0,103	0,451	-0,029	0,834	0,039	0,776	0,023	0,868
Bétérou	0,239	0,085	0,262	0,058	0,282	0,041	-0,027	0,849	-0,057	0,685	-0,024	0,867	-0,069	0,620	-0,008	0,953	-0,052	0,710
Bonou	0,303	0,014	0,315	0,011	0,239	0,055	-0,018	0,884	-0,093	0,463	0,042	0,742	0,034	0,787	0,104	0,409	0,090	0,474
Domè	0,276	0,048	0,341	0,013	0,275	0,048	-0,104	0,464	-0,171	0,226	-0,225	0,109	-0,205	0,144	-0,103	0,466	-0,109	0,440
Kaboua	0,298	0,157	0,380	0,068	0,406	0,049	0,093	0,664	0,012	0,956	0,049	0,821	0,155	0,469	0,155	0,469	0,130	0,542
Indice de TSA et de débit par la méthode de Spearman.																		
Station	J		F		M		A		M		J		J		A		S	
Ahlan	0,392	0,029	0,214	0,248	0,270	0,141	0,252	0,171	0,289	0,115	0,335	0,066	0,364	0,044	0,461	0,009	0,471	0,007
Atchakpa	0,288	0,037	0,186	0,181	0,357	0,009	0,381	0,005	0,509	0,000	0,453	0,001	0,439	0,001	0,342	0,012	0,284	0,039
Atchérigbé	0,037	0,785	0,194	0,152	0,212	0,116	0,221	0,102	0,365	0,006	0,268	0,046	0,299	0,025	0,187	0,168	0,209	0,121
Bétérou	0,106	0,448	0,063	0,655	0,195	0,161	0,175	0,210	0,265	0,055	0,231	0,096	0,228	0,101	0,178	0,201	0,173	0,216
Bonou	0,028	0,822	0,038	0,763	0,143	0,255	0,183	0,145	0,319	0,010	0,248	0,046	0,289	0,020	0,216	0,084	0,197	0,115
Domè	-0,093	0,514	-0,058	0,682	0,110	0,436	0,167	0,238	0,280	0,044	0,252	0,072	0,340	0,014	0,217	0,123	0,209	0,137
Kaboua	-0,051	0,813	-0,137	0,525	-0,047	0,828	0,117	0,586	0,319	0,129	0,376	0,070	0,254	0,232	0,142	0,507	0,195	0,361

Tableau 7 : Résultats du test de corrélation entre les indices climatiques et les débits moyens annuels par la méthode de Spearman sur chaque station du bassin de l'Ouémé.

Indice de ENSO et de débit par la méthode de Spearman.																		
Station	DJ		JF		FM		MA		AM		MJ		JJ		JA		AS	
Ahlan	-0,024	0,900	0,022	0,907	-0,023	0,902	-0,147	0,432	-0,233	0,208	-0,268	0,145	-0,361	0,046	-0,359	0,047	-0,329	0,071
Atchakpa	0,037	0,856	-0,015	0,941	-0,106	0,607	-0,127	0,538	-0,128	0,532	-0,244	0,230	-0,340	0,089	-0,182	0,373	-0,175	0,392
Atchérigbé	0,061	0,743	0,008	0,964	-0,007	0,969	-0,105	0,575	-0,261	0,155	-0,284	0,121	-0,300	0,101	-0,399	0,026	-0,402	0,025
Bétérou	-0,075	0,709	-0,060	0,767	-0,172	0,391	-0,091	0,651	-0,125	0,535	-0,325	0,098	-0,331	0,091	-0,436	0,023	-0,467	0,014
Bonou	0,046	0,791	-0,027	0,878	-0,144	0,401	-0,191	0,263	-0,250	0,141	-0,315	0,062	-0,387	0,020	-0,466	0,004	-0,490	0,002
Domè	-0,019	0,918	-0,102	0,585	-0,213	0,250	-0,272	0,139	-0,382	0,034	-0,420	0,019	-0,492	0,005	-0,457	0,010	-0,449	0,011
Kaboua	-0,417	0,270	-0,360	0,342	-0,544	0,130	-0,487	0,183	-0,622	0,074	-0,617	0,086	-0,500	0,178	-0,450	0,230	-0,417	0,270
Indice de NTA et de débit par la méthode de Spearman.																		

EXPLORATION DES PREVISIONS SAISONNIERES HYDROLOGIQUES A PARTIR DES INDICES CLIMATIQUES

Station	J		F		M		A		M		J		J		A		S	
Ahlan	0,171	0,356	0,077	0,679	0,010	0,959	-0,047	0,803	-0,071	0,704	-0,040	0,830	0,018	0,924	0,092	0,623	0,132	0,480
Atchakpa	0,080	0,571	-0,015	0,915	-0,040	0,773	-0,073	0,603	-0,066	0,639	-0,012	0,932	0,096	0,495	0,202	0,148	0,240	0,084
Atchérigbé	-0,001	0,994	-0,012	0,932	0,009	0,948	-0,012	0,927	-0,013	0,924	0,012	0,931	0,060	0,662	0,071	0,601	0,040	0,769
Bétérou	-0,045	0,750	-0,098	0,487	-0,118	0,399	-0,151	0,281	-0,110	0,432	-0,038	0,787	0,029	0,834	0,115	0,414	0,100	0,475
Bonou	0,003	0,979	-0,017	0,896	-0,015	0,905	-0,030	0,814	-0,002	0,990	0,037	0,770	0,112	0,379	0,171	0,178	0,168	0,184
Domè	0,155	0,272	0,108	0,445	0,057	0,690	0,009	0,947	0,004	0,978	0,013	0,926	0,080	0,575	0,124	0,380	0,128	0,367
Kaboua	0,000	0,998	-0,044	0,840	-0,146	0,496	-0,197	0,357	-0,239	0,260	-0,198	0,355	-0,096	0,656	0,097	0,651	0,187	0,381
Indice de Oceanic NINO et de débit par la méthode de Spearman.																		
Station	DJF		JFM		FMA		MAM		AMJ		MJJ		JJA		JAS		ASO	
Ahlan	0,037	0,845	-0,018	0,922	-0,108	0,562	-0,209	0,259	-0,276	0,134	-0,369	0,041	-0,303	0,097	-0,250	0,174	-0,201	0,279
Atchakpa	-0,079	0,572	-0,065	0,646	-0,039	0,780	-0,066	0,637	-0,085	0,547	-0,082	0,558	-0,031	0,826	0,002	0,988	0,014	0,918
Atchérigbé	-0,074	0,588	-0,085	0,536	-0,124	0,362	-0,195	0,150	-0,255	0,058	-0,218	0,107	-0,152	0,265	-0,169	0,214	-0,162	0,232
Bétérou	-0,124	0,377	-0,107	0,444	-0,107	0,446	-0,163	0,242	-0,187	0,181	-0,166	0,235	-0,132	0,346	-0,138	0,326	-0,171	0,220
Bonou	-0,099	0,437	-0,114	0,371	-0,108	0,395	-0,151	0,233	-0,162	0,201	-0,144	0,258	-0,104	0,412	-0,102	0,422	-0,127	0,317
Domè	-0,128	0,365	-0,138	0,328	-0,130	0,359	-0,203	0,149	-0,226	0,107	-0,203	0,149	-0,151	0,286	-0,151	0,284	-0,178	0,208
Kaboua	-0,150	0,485	-0,173	0,418	-0,096	0,654	0,009	0,968	0,020	0,927	0,080	0,710	0,194	0,365	0,189	0,376	0,153	0,476
Indice de TNA et de débit par la méthode de Spearman.																		
Station	J		F		M		A		M		J		J		A		S	
Ahlan	0,144	0,438	0,160	0,389	0,037	0,843	-0,001	0,997	-0,080	0,670	0,009	0,961	0,092	0,623	0,101	0,589	0,163	0,380
Atchakpa	0,071	0,613	0,038	0,787	-0,008	0,954	-0,057	0,683	-0,046	0,744	0,013	0,927	0,184	0,186	0,255	0,065	0,328	0,017
Atchérigbé	-0,021	0,877	0,018	0,894	0,033	0,810	-0,005	0,973	-0,010	0,940	0,102	0,456	0,186	0,169	0,124	0,362	0,048	0,726
Bétérou	-0,013	0,929	-0,013	0,927	-0,127	0,364	-0,089	0,524	-0,072	0,606	0,030	0,831	0,190	0,174	0,152	0,278	0,140	0,318
Bonou	-0,022	0,861	0,031	0,808	-0,010	0,938	0,017	0,894	-0,003	0,981	0,079	0,531	0,210	0,094	0,226	0,070	0,153	0,222
Domè	0,168	0,234	0,156	0,269	0,078	0,584	0,085	0,550	0,033	0,818	0,094	0,505	0,210	0,136	0,235	0,094	0,149	0,292
Kaboua	0,059	0,784	-0,012	0,957	-0,048	0,823	-0,132	0,538	-0,190	0,375	-0,180	0,401	0,060	0,781	0,147	0,492	0,231	0,277

Tableau 8 : Liste des sept stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé traiter

Code	Nom	Latitude	Longitude
1114500118	Ahlan	7.2166	2.4667
1114500119	Atchakpa	8	2.4167

1114501002	Atchérigbé	7.53	2.03
1110003100	Bétérou	9.2	2.27
1114500107	Bonou	6.9	2.45
1114501005	Domè	7.12	2.33
1114501103	Kaboua	8.25	2.72