



UNIVERSITE D'ABOMEY CALAVI (UAC)

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU (INE)

DEPARTEMENT DE L'EAU POUR L'AGRICULTURE ET LA SOCIETE (DEAS)

MASTER RÉGIONAL RESSOURCES EN EAU ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX
DANS LES METROPOLES AFRICAINES (MAREMA)

OPTION : RESSOURCES EN EAU ET USAGES

MEMOIRE DE FIN DE FORMATION POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Diagnostic de mise en valeur des bas-fonds et modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua.

Réalisé et soutenu le 30 Décembre 2021 par :

Idrissou SINABARIGUI

Superviseur :

Prof. Dr. Ir. SINTONDJI O. Luc
Enseignant-Chercheur à l'Université
d'Abomey-Calavi (UAC).

Co-superviseur :

Dr. Jean-Pierre VANDERVAERE
Enseignant-Chercheur à l'Université de
Grenoble Alpes.

Composition du jury

Président :	Prof. Dr. Ir. Luc O. SINTONDJI
Rapporteur :	Dr. Mathieu B. HOUNSOU
Examineur 1 :	Dr. Maurice AHOUANSOU
Examineur 2 :	Dr. Aymar BOSSA

PREMIERE PROMOTION

Année académique : 2019-2020

REMERCIEMENTS

Mes profondes gratitudee à mon directeur de mémoire Prof. Dr. Ir. Luc O. SINTONDI, Responsable du Laboratoire d'Hydraulique et de Maître de l'Eau (LHME) qui a accepté superviser ce travail malgré ses multiples charges et pour avoir permis que le LMI-REZOC contribue financièrement à la réalisation de la présente étude.

J'adresse mes sincères remerciements au Prof. Ir. Jean-Pierre VANDERVAERE, Enseignant Chercheur à l'Université de Grenoble pour avoir co-supervisé ce mémoire.

Par la même occasion j'adresse mes profonds remerciements aux responsables du **Master Ressources en Eau et Risques Environnementaux dans les Métropoles Africaines**. En particulier le Point Focal du projet MAREMA/UAC, le Dr. HOUNSOU B. Mathieu, Enseignant-Chercheur à l'INE/UAC, Spécialiste en Aménagement Hydro-agricole qui a véritablement œuvré pour la réussite du MAREMA/UAC.

J'adresse aussi mes sincères remerciements au Directeur de l'INE, Prof. Dr. MAMA Daouda pour ses nombreux conseils très pointus.

Ma reconnaissance s'adresse également à tous les enseignants ayant intervenu dans cette formation et plus particulièrement au Dr PLAGBETTO Hermame, Dr. TOGBEVI Fiacre, Dr Y. N'TCHA M'PO et à l'Ir. HOINGBO Mandela.

Sincère remerciement aux doctorants notamment Mme. Awoulath ALLASSANE, M. Bio GUIDAH, M. René BODJRENOU, Mme. Angel, M. Akilou SOKOHOU et Christian ABALLO pour leur soutien moral.

Un grand merci à ma mère ; mes frères et sœurs, pour leurs conseils, ainsi que pour leur soutien inconditionnel, à la fois moral et financier.

Je tiens à remercier également :

L'ensemble des responsables du Laboratoire Mixte International LMI-REZOC

Toute la cinquième promotion du master GRME/DEAS

Toute la première promotion du master MAREMA au Bénin

Tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé dans la réalisation de ce stage.

Nos remerciements vont enfin aux membres du jury qui auront bien voulu juger la qualité scientifique de ce travail.

Résumé

La mise en valeur des bas-fonds est l'une des stratégies d'adaptation aux changements climatiques, prise en compte dans la mise en œuvre de plusieurs programmes et projets de recherche. La caractérisation de ces agroécosystèmes de bas-fonds s'avère nécessaire non seulement pour les perspectives agricoles et agropastorales mais aussi pour la gestion des crises naturelles comme les inondations, les crues et les sécheresses. La présente étude vise à évaluer le potentiel en bas-fond en contribuant à une meilleure connaissance des ressources en eau pour la gestion du bassin versant de l'Okpara. Les images Landsat 8 OLI et SRTM ont été exploitées pour évaluer le potentiel en bas-fonds et les paramètres morphométriques du bassin qui influencent la réponse hydrologique du bassin versant de l'Okpara. Le modèle hydrologique GR4J a été utilisé pour simuler le débit et établir le bilan hydrologique dans ce bassin. De cette étude, on retient que le bassin versant de l'Okpara est pourvu en bas-fonds occupant 24,9 % de sa superficie. Ces bas-fonds, d'une superficie moyenne inférieure ou égale à 25 ha, sont facilement aménageables. L'étude des caractéristiques morphométriques du bassin a révélé que ce dernier, à crue lente, présente un relief peu accidenté et exposé à l'érosion hydrique. Il est caractérisé dans son ensemble par une formation géologique perméable à couvert végétal important favorisant ainsi une bonne infiltration des eaux superficielles et limitant les écoulements. L'étude de ces caractéristiques a montré que l'écoulement de l'eau à l'exutoire de Kaboua est influencé par la géologie et les caractéristiques physiques du bassin versant. En ce qui concerne l'évaluation de la ressource eau, le modèle GR4J a révélé sa forte capacité à simuler les débits moyens et élevés dans le bassin avec un Nash égal à 72,5% en calage sur la période 2005 - 2010 et 65,3% en validation sur la période 2016 - 2019. Les composantes du bilan hydrique ont été correctement estimées et montre un coefficient de ruissellement de 16 % en moyenne. L'évapotranspiration réelle s'élève à 84 % environ de la pluie tombée dans le bassin et seulement 16 % pour la production moyenne en eau (surface et souterraine) pour les divers usages. Le constat sur le terrain couplé à ces résultats indique une disponibilité de la ressource eau dans les bas-fonds pour leur mise en valeur agricole ou pastorale en plein temps mais ne peut être suffisante que si l'on élève le niveau de maîtrise de cette ressource. Ces résultats révèlent également que s'il est correctement calibré, le modèle GR4J peut être utilisé efficacement dans le bassin versant de l'Okpara pour soutenir les politiques de gestion de l'eau.

Mots clés : inventaire, SIG, bas-fonds, modélisation, bassin versant, Okpara.

Abstract

The development of inland valleys is one of the strategies for adaptation to climate change, which is taken into account in the implementation of several research programs and projects. The characterization of these lowland agro-ecosystems is necessary not only for agricultural and agro-pastoral perspectives but also for the management of natural crises such as floods and droughts. The present study aims at assessing the potential of inland valleys by contributing to a better knowledge of water resources for the management of the Okpara watershed. Landsat 8 OLI and SRTM images were used to assess the lowland potential and the morphometric parameters of the basin that influence the hydrological response of the Okpara watershed. The GR4J hydrological model was used to simulate the flow and establish the water balance in this basin. From this study, it is noted that the Okpara watershed is provided with lowlands occupying 24.9% of its area. These lowlands, with an average area of less than or equal to 25 ha, are easily developed. The study of the morphometric characteristics of the basin revealed that the basin, with slow flooding, has a low relief and is exposed to water erosion. It is characterized in its whole by a permeable geological formation with an important vegetal cover thus supporting a good infiltration of surface water and limiting the runoff. The study of these characteristics showed that the flow of water at the Kaboua outlet is influenced by the geology and physical characteristics of the watershed. Regarding the assessment of the water resource, the GR4J model revealed its strong capacity to simulate the average and high flows in the basin with a Nash equal to 72.5% in calibration over the period 2005 - 2010 and 65.3% in validation over the period 2016 - 2019. The components of the water balance have been correctly estimated and show a runoff coefficient of 16% on average. The actual evapotranspiration amounts to about 84% of the rainfall in the basin and only 16% for the average water production (surface and groundwater) for various uses. The field observation coupled with these results indicate that water resources are available in the lowlands for full time agricultural or pastoral development, but that this can only be sufficient if the level of control of these resources is increased. These results also reveal that if properly calibrated, the GR4J model can be used effectively in the Okpara watershed to support water management policies.

Key words : inventory, GIS, inland valleys, modeling, watershed, Okpara.

Table des matières	
REMERCIEMENTS	3
Résumé	4
Table des matières	6
AVANT-PROPOS	9
Liste des Figures.....	10
Liste des tableaux	11
Liste des photos	11
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	12
INTRODUCTION.....	13
1. Contexte et justification	13
2. Problématique	15
3. Objectifs.....	16
4. Hypothèse de travail	16
5. Revue de littérature	17
Chapitre 1 : Clarification conceptuelle et présentation de la zone d'étude.....	21
1.1. Clarification conceptuelle.....	21
1.2. Présentation de la zone d'étude	24
1.2.1. Situation géographique	24
1.2.2. Climat.....	25
1.2.3. Hydrographie du bassin versant de l'Okpara à Kaboua.....	27
1.2.4. Sol	29
1.2.5. Potentialités floristiques et faunistiques.....	30
1.2.6. Les activités socio-économiques.....	31
1.2.7. Démographie des communes du bassin de l'Okpara	32

Chapitre 2 : Matériels et méthodes.....	33
2.1. Données.....	33
2.2. Matériels.....	34
2.3. Méthodes de recherches.....	34
2.3.1. Recherche documentaire.....	34
2.3.2. La collecte des données.....	34
2.4. Méthode d'analyse et de traitement des données.....	34
2.4.1. Méthode de Validation du MNT.....	34
2.4.2. Méthode d'inventaire des bas-fonds.....	36
2.4.3. Méthodes d'étude des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara.....	40
2.4.3.1. Superficie et périmètre du bassin versant.....	40
2.4.3.2. Indice de compacité.....	40
2.4.3.3. Rectangle équivalent.....	40
2.4.3.4. Relief.....	40
2.4.3.5. Altitude.....	41
2.4.3.6. Pente moyenne du bassin versant.....	42
2.4.3.7. Dénivelée.....	42
2.4.3.8. Indice global.....	42
2.4.3.9. Dénivelée spécifique.....	42
2.4.3.10. Réseau hydrographique.....	43
2.4.4. Méthode d'évaluation des ressources en eau du bassin à l'exutoire de Kaboua.....	45
2.4.4.1. Analyse critique des données hydrologiques.....	45
2.4.4.2. Calcul des précipitations moyennes par la méthode de Thiessen.....	46
2.4.4.3. La température.....	48

2.4.4.4. Estimation d'ETP	48
2.4.4.5. Estimation d'ETR	49
2.4.4.6. Description et choix du modèle	49
2.4.4.8. Calage et validation.....	52
2.4.4.9. Evaluation de la qualité du modèle.....	53
2.4.4.10. Etablissement des composantes du bilan hydrologique.....	53
Chapitre 3 : Résultats et discussions	54
3.1-Evaluation du potentiel en bas-fonds du bassin versant de l'Okpara	54
3.1.1. Application des critères	55
3.1.2. Potentiel en bas-fonds du bassin versant de l'Okpara	61
3.1.3. Validation de l'approche de cartographie proposée	63
3.2- Etude des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara.....	64
3.2.1. Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara à Kaboua	64
3.2.2. Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Okpara	65
3.2.3. Réseau hydrographique et paramètres caractéristiques	66
3.3-Evaluation des ressources en eau du bassin à l'exutoire de Kaboua	68
3.3.1. Calage et validation des résultats du modèle GR4J	68
3.3.2. Modélisation pluie-débit dans le bassin versant de l'Okpara	72
3.3.3. Etablissement des composantes du bilan hydrologique.....	73
3.3.4. Appréciation de la disponibilité de l'eau et exploitation des bas-fonds en période d'été.....	74
4. DISCUSSION	77
5. SUGGESTIONS ET PERSPECTIVES	79
CONCLUSION	80
Référence Bibliographique.....	82
ANNEXES	85

AVANT-PROPOS

Ce rapport est le fruit d'un stage d'immersion professionnelle de six mois effectués au sein de l'Institut National de l'Eau. Il a été effectué dans le but de prendre connaissance de la vie professionnelle et de confronter mes connaissances théoriques à la réalité du terrain dans le domaine de la réalisation des études de pré-aménagement des bas-fonds et sites maraichers, de la gestion des bassins versants et de la modélisation hydrologique. Ce travail m'a également permis de renforcer mes compétences dans le domaine des SIG et Télédétection. L'expérience, les relations et les interventions de mon maître de stage ont été très utiles pour recadrer une étude dont le champ est très vaste.

Le choix du sujet « **Diagnostic de mise en valeur des bas-fonds et modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua** » est, en effet, le sujet qui m'a le plus intéressé parmi les sujets de stage proposés par le LMI-REZOC que je remercie au passage.

Ce rapport de stage a pour objectif d'évaluer le potentiel en bas-fond tout en contribuant à une meilleure connaissance des ressources en eau dans la gestion du bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua.

Liste des Figures

Figure 1: Coupe en travers d'un vallon	21
Figure 2: Situation géographique du bassin versant de l'Okpara.....	24
Figure 5: Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station synoptique de Parakou	25
Figure 6: Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station synoptique de Savè	26
Figure 7: Températures et humidités moyennes mensuelles au niveau des stations de Savè et de Parakou.....	27
Figure 8: Réseau hydrographique du bassin de l'Okpara à Kaboua extrait du MNT	28
Figure 9: Variabilité des débits moyens annuels dans le bassin de l'Okpara	29
Figure 10: Pédologie du bassin versant de l'Okpara à Kaboua.....	30
Figure 11: Corrélation des altitudes des bornes géodésiques avec les altitudes du SRTM	36
Figure 12: Etape d'inventaire des bas-fonds.....	39
Figure 13: Découpage du bassin versant de l'Okpara par la méthode de Thiessen.....	47
Figure 14 : Schéma du modèle GR4J.....	50
Figure 15: Application des critères d'indice normalisé de végétation	55
Figure 16: Extraction des fortes valeurs de NDVI.....	56
Figure 17: Distribution des altitudes dans le bassin	57
Figure 18: Distribution des pentes dans le bassin	58
Figure 19: Classification et extraction des zones à faible pente	59
Figure 20: Extraction des zones à forte accumulation d'eau	60
Figure 21: Identification des bas-fonds	61
Figure 22 : Potentiel en bas-fonds aménageables ayant une superficie inférieure ou égale à 25 ha	62
Figure 23 : Validation des résultats.....	63
Figure 24: Courbe hypsométrique du bassin de l'Okpara à Kaboua.....	65
Figure 25: Classification du réseau hydrographique selon le système de Strahler	66
Figure 26: Visualisation de la qualité du calage sur 6 ans	69
Figure 27: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés de la période de calage	70
Figure 28: Visualisation de la qualité de validation sur 4 ans.....	71
Figure 29: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés de la période de validation.....	72

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition de la population du bassin de l'Okpara par commune	32
Tableau 2: Paramètres de validation du MNT	36
Tableau 3: Classement du relief à partir de la dénivelée spécifique selon la classification de l'ORSTOM.....	43
Tableau 4: Lacune des débits journaliers à Kaboua.....	46
Tableau 5: Caractéristiques de forme du bassin versant de l'Okpara à Kaboua	64
Tableau 6: Caractéristiques du réseau hydrographique du bassin versant de l'Okpara à Kaboua.....	67
Tableau 7: Périodes de simulation du modèle GR4J.....	68
Tableau 8: Résultats obtenus pour le calage du modèle GR4J	68
Tableau 9: Résultats obtenus pour la validation du modèle GR4J.....	70
Tableau 10: Performance du modèle GR4J.....	73
Tableau 11: Composantes du bilan hydrologique du bassin versant de l'Okpara	73

Liste des photos

Photo 1 : Trou d'eau exploité dans un périmètre irrigué à Bossi, Tchachou.....	67
Photo 2 : Trou d'eau exploité sur le bas-fond de Adido kparu, Tchaorou.....	67
Photo 3 : Puits exploité dans le bas-fond de Boko à N'dali.....	67
Photo 4 : Mare servant à l'abreuvement du bétail à Parakou.....	67
Photo 5 : Bas-fond de Loko-Gberou, Tchachou	68
Photo 6: Bas-fond de Baka, Parakou	68
Photo 7: Bas-fond de Boko.....	68
Photo 8: Bas-fond de Kika 1, Kika	68

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ABEE	:	Agence B éninoise de l' E nvironnement
CIEH	:	Comité I nterafricain d' E tudes H ydrauliques
CBF	:	Consortium B as-Fond
DGR	:	Direction du G énie R urale
DIARPA	:	D iagnostic R apide de P ré- A ménagement
ETR	:	E vapotranspiration R éelle
ETP	:	E vapotranspiration P otentielle
FAO	:	F ood and A griculture O rganization
GR4J	:	M odèle du G énie R ural à 4 paramètres J ournaliers
HVO	:	H aute V allée de l' O uémé
INSAE	:	I nstitut N ational de la S tatistique et de l' A nalyse E conomique
LHA	:	L aboratoire d' H ydrologie A ppliquée
LHME	:	L aboratoire d' H ydraulique et M aitrise de l' E au
MNA	:	M odèle N umérique d' A ltitude
NDVI	:	N ormalized D ifference V egetation I ndex
OMM	:	O rganisation M étéorologique M ondiale
ORSTOM	:	O ffice de R echerche S cientifique et T echnique d' O utre- M er
PIR	:	R éfectance dans le spectre du proche I nfra- R ouge
R	:	R éfectance dans le spectre du rouge
RGPH	:	R ecensements G énéral de la P opulation et de l' H abitat
SIG	:	S ystème d' I nformation G éographique
SPOT	:	S ystème P robatoire d' O bservation de la T erre
SRTM	:	S huttle R adar T opography M ission
SWAT	:	S oil W ater A ssessment T ool
USGS	:	U nited S tates G eological S urvey

INTRODUCTION

1. Contexte et justification

Les bas-fonds représentent un haut potentiel en ressources naturelles. Ils sont caractérisés par une diversité biologique importante, des sols relativement fertiles avec un potentiel en réserve hydrique important. Compte tenu de ces caractéristiques, les bas-fonds ont une aptitude élevée pour une utilisation diversifiée dans les domaines de l'agriculture, de l'élevage, de la pisciculture, de la mise en place d'aire protégée à des fins de cultes ou de loisirs, de pharmacopée. Ils constituent donc des zones d'intérêts stratégiques pour la conservation des ressources et pour le développement socio-économique. Mais leur mise en valeur est freinée par de nombreuses contraintes relatives au régime hydrologique (excès ou déficit en eau), à la qualité des eaux et des sols.

Au Bénin, les bas-fonds au sens strict du terme sont principalement localisés dans les zones soudaniennes et soudano-Guinéennes. Ils sont rares dans la zone subéquatoriale où les formations géologiques sont essentiellement sédimentaires. Le potentiel agricole du Bénin est estimé à 375.000 hectares de terres irrigables, dont 117.000 hectares de plaines inondables et 258.000 hectares de bas-fond (Cellule Bas-fonds, 2017).

Le développement des ressources des bas-fonds nécessite la conception d'ouvrages hydrauliques assurant le stockage, la distribution de l'eau d'irrigation, la protection contre les crues et la protection contre les inondations.

Chaque aménagement doit être pensé à la fois en fonction de la ressource en eau (risque de défaillance) et en fonction des contraintes qu'il impose à la société qui va l'utiliser : difficultés de gestion, en termes d'eau, de terres et de travail (Lamachere, 1986 ; Serpantie, 1988).

La recherche fondamentale sur les phénomènes de genèse des écoulements, du ruissellement et de l'infiltration sur les bassins a permis la conception de modèles hydrologiques/hydrauliques.

Parmi les modèles appliqués aux bas-fonds en Afrique de l'Ouest on distingue les modèles à discrétisation spatiale d'une part et les modèles globaux d'autre part (Servat, 1986) qui feront ici l'objet de notre travail.

L'accroissement continu et rapide de la population en Afrique et la crise climatique sévère qu'elle a connue au cours des vingt-cinq dernières années ont placé le secteur agricole à la confluence de débats alimentaires, économiques et environnementaux (Vergez, 2011)

Le Bénin, à l'instar des autres pays d'Afrique de l'Ouest, subit les effets néfastes de la variabilité et des changements climatiques dont les manifestations se traduisent par l'accentuation de la

variabilité et la récurrence d'événements météorologiques extrêmes (inondations dévastatrices, longues sécheresses, vagues de chaleur, pluies torrentielles), les pluies tardives, etc. Nous en avons pour preuves les inondations de 2010 et de 2011. En effet, en Août 2010, le Bénin a été frappé par des pluies torrentielles et des inondations qui ont causés d'important dégâts avec environ 50764 ha de cultures détruites et des milliers de mort de bétail (Caroline Wittwer, 2020). En ce qui concerne les sécheresses, le Bénin est autant affecté par les sécheresses hydrologiques que météorologiques. Selon un rapport élaboré par la DGEau en 2015 dans le projet SAP-Bénin, le risque de sécheresse hydrologique dans les 50 prochaines années devrait fort probablement augmenter avec une période de retour inférieure ou égale à 25 ans.

Sur ce, les bas-fonds représentent une alternative pour l'exploitation agro-pastorale, qu'il faut étudier dans le complexe du bassin versant pour une bonne gestion de la ressource Eau et des catastrophes naturelles qu'elle peut engendrer. Or, la mise en valeur des bas-fonds et la gestion de ces catastrophes exigent une connaissance du potentiel disponible à travers leur spatialisation en tenant compte du complexe bassin versant / bas-fonds.

2. Problématique

L'eau est indispensable à tout être vivant. Sa nécessité dans le secteur de la santé, de l'agriculture, de l'industrie, le tourisme, la navigation, etc. n'est plus à démontrer. Sa valeur socio-économique et alimentaire est importante. Mais elle n'est pas seulement source de bonheur. Elle présente des risques naturels qui causent d'énormes pertes en vies humaines, des dégâts matériels et la dégradation de l'environnement. A l'échelle mondiale, le coût annuel des catastrophes représente plus de 380 milliards de dollars (PNUD, 2012). Parmi ces catastrophes, les inondations sont les plus récurrentes à l'échelle mondiale (Carry, 1996 ; Berlioz et Quénet, 2000 ; Blanchard, 2008).

Ces inondations surviennent, causent des dégâts sur leur passage à la recherche d'une cuvette qui peut être un bas-fond ou une plaine inondable.

L'identification et la connaissance du fonctionnement de ces cuvettes naturelles permettront d'entreprendre des actions spécifiques en vue de leur valorisation.

Les bas-fonds focalisent des enjeux importants pour la sécurité alimentaire et le revenu, à travers le maraîchage et la riziculture, mais aussi du fait de leur rôle pour l'élevage, la pêche et la production de bois. Cette multifonctionnalité du bas-fond lui confère une place de choix dans les zones soudaniennes à population dense quand on sait qu'à la pression démographique s'ajoutent les contraintes hydriques, crues, submersions, érosion, sécheresses, une insécurité foncière croissante et des risques environnementaux.

L'agriculture, dominée par les cultures vivrières constitue la principale source de revenus pour la majeure partie de la population du bassin de l'Okpara. Elle occupe environ 52% de la population active (Ousmane Kora, 2016) avec une population estimée à 1174331 habitants en 2013 (INSAE, 2013). Il y a donc une grande menace pour l'approvisionnement en eau et en besoin alimentaire des populations du bassin de l'Okpara surtout que de nouvelles habitudes alimentaires apparaisse avec l'urbanisation.

Aussi, d'autres raisons ont motivé le choix de cette zone d'étude dont les principales sont :

- elle fait partie des 4 zones les plus vulnérables aux changements climatiques au Bénin (Akponikpè et al., 2019) ;
- elle est une zone de forte production des cultures de rente et vivrières(Akponikpè et al, 2019) ;
- les aléas majeurs et impacts potentiels identifiés dans cette zone sont : les extrêmes, pluviométriques, la modification des saisons agricoles, la cessation précoce/tardive des pluies, la réduction/augmentation des totaux pluviométriques, les poches de sécheresse, les

inondations, températures et l'évapotranspiration en hausse (Akponikpe et al., 2019). Ceci amène à demander si :

✓ Connaître le nombre approximatif et la proportion qu'occupent les bas-fonds dans ce bassin versant n'aiderait-t-il pas dans sa gestion ?

✓ Les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara à Kaboua ne sont-elles pas favorables à la mise en valeur des bas-fonds ?

✓ La réponse hydrologique du bassin versant n'a-t-elle pas des implications directes sur l'utilisation durable des bas-fonds ?

Face à ces différentes situations et questionnements, il est impérieux de localiser les écosystèmes de bas-fond dans le bassin versant de l'Okpara dont il faut aussi étudier les aspects géomorphologiques et hydrologiques en vue d'une bonne gestion de son complexe en générale et des bas-fonds en particulier.

C'est dans cette optique que s'inscrit nos travaux de recherche intitulée « Diagnostic de mise en valeur des bas-fonds et modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua ».

3. Objectifs

L'objectif générale de ce travail est d'évaluer le potentiel en bas-fond en contribuant à une meilleure connaissance des ressources en eau pour la gestion du bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- géo-référencer les bas-fonds du bassin versant de l'Okpara à Kaboua ;
- évaluer les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux ;
- évaluer la ressource en eau du bassin à l'exutoire de Kaboua

4. Hypothèse de travail

- Le bassin versant de l'Okpara a un important potentiel en bas-fond ;
- Les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara influencent son fonctionnement hydrologique et ne favorise pas la mise en valeur des bas-fonds ;
- L'évaluation de la ressource en eau de l'Okpara montre une insuffisance et une indisponibilité de cette dernière en toute saison

5. Revue de littérature

Il s'agit d'une synthèse de quelques travaux antérieurs, en particulier ceux dont la ou les méthode(s) et résultats ont été utilisées ou exploitées. Il a été tenu compte de l'aire d'étude, des méthodes d'étude choisies et des problématiques développées pour présenter ces travaux. Les thèmes qui sont abordés sont entre autres : la valorisation des bas-fonds, la cartographie des zones inondables ; la variabilité hydro-climatique et leur impact sur les ressources en eau...

Raunet (1985) définit les bas-fonds en région tropicale comme des fonds plats ou concaves des vallons, petites vallées et gouttières d'écoulement inondable qui constituent les axes de drainage élémentaires emboîtés dans les épaisses altérations des socles cristallins pénéplanés.

-Selon le **Consortium Bas-Fond** (CBF), la surface occupée par les bas-fonds et leurs franges hydromorphes en Afrique de l'Ouest, est estimée à 50 millions d'hectares. Ces bas-fonds présentent des potentialités d'intensification et de diversification agricoles très intéressantes, liés à une meilleure disponibilité en eau que sur les plateaux adjacents et à une meilleure fertilité naturelle.

-Selon toujours le CBF, l'étude de la mise en valeur des bas-fonds ne peut se concevoir que dans le cadre de toute la toposéquence, appelée « continuum », ce qui inclut les fonds de vallée, les petites plaines inondables, les franges hydromorphes, mais aussi les versants, les plateaux et les crêtes qui contribuent à l'alimentation en eau des bas-fonds par ruissellement ou par infiltration.

- Le Bénin dispose de nombreux bas-fonds qui ne sont pas encore suffisamment connus. L'étude d'inventaire et d'aménagement (**Okou et al.**, 1990) initiée par le projet Bas-fonds de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'Agriculture (**FAO**) a permis d'estimer la superficie totale couverte par les bas-fonds à 205000 ha.

La télédétection est alors d'une grande utilité en ce sens qu'elle facilite une visualisation de la répartition des bas-fonds dans le bassin versant. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) sont les seuls outils disponibles qui permettent, à des coûts relativement faibles et en peu de temps (**Chabi et al.**, 2010), d'obtenir les altitudes de surfaces topographiques.

Une base de données géoréférencée sur les bas-fonds du Cercle de Sikasso au Mali et ceux du département du Mono-Couffo au Bénin a été mise en place par le projet RAT d'Africa-Rice (Djagba et Zwart, 2010). Ces résultats ont été rendus possibles par l'utilisation croisée des logiciels de Système d'Informations Géographiques (SIG), le Global Positioning Système (GPS) et les travaux de terrain. La méthodologie utilisée a consisté à faire le tracking des bas-fonds au moyen

de GPS afin de déterminer leur superficie. Une question fondamentale se pose : les bas-fonds étaient-ils accessibles en tous points ? (**Kindjinou**,2013)

Chabi et al., (2010) ont inventorié les bas-fonds de la commune de Dassa-Zoumé par une approche de la télédétection. Cette approche repose sur le calcul du néocanal NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) à partir d'une image Landsat ETM+ et sur la réalisation de cartes de pente générées à partir du modèle numérique de terrain (MNT). C'est cette approche qui fait l'objet de notre étude, mais à partir d'une image Landsat OLI. Il est couplé ici cette approche d'inventaire avec la modélisation pluie-débit du bassin versant dont l'approche méthodologique est basée sur l'utilisation du modèle GR4J.

Houndagba et al., (1998) ont montré qu'au Bénin, le régime hydrologique d'un bas-fond est la combinaison d'apports d'eau venant directement de la pluie, mais aussi du ruissellement, des écoulements hypodermiques, et des nappes phréatiques. La prise en compte de ce fonctionnement hydrologique et du risque lié aux crues conditionne les possibilités de mise en valeur sans aménagement, les objectifs hydrauliques et les caractéristiques des aménagements envisageables (**Consortium Bas-fond**, 1995). Toujours dans le même rapport annuel du CBF, les activités de recherches menées par le volet Hydraulique du projet Bas-fonds IER/CIRAD ont porté au cours de la campagne 1995, sur l'étude du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Kobani (Mali) en vue d'une modélisation des écoulements.

Une description et une cartographie des états de surface des bassins versants de Yatenga et Siné-Saloum ont été effectuées selon une méthodologie développée à l'**ORSTOM** en 1989 **CIEH** (1993) dans le but de faire la caractérisation physique et morpho-pédologique des bas-fonds. Le même rapport mentionne l'utilisation très active de la télédétection pour l'identification des zones humides, des zones engorgées et des cultures dans le Mail-Sud. Par contre, pour la modélisation hydrologique sur les bassins versants en vue de reconstituer les apports et les crues, le modèle GR3 a été utilisé sur les projets Yatenga, Mali-Sud et Siné-Saloum.

La détermination des paramètres physiques et physiographiques de tous les bassins versants a permis leur Insertion dans les grandes classifications utilisées en Afrique de l'Ouest pour la détermination des apports et des crues à l'aide des méthodes **ORSTOM** (**Rodier&Auvray**, 1965) et **CIEH** (**PUECH & Chabi Gonni**, 1984) cité dans le rapport final **CIEH** (1993)

Le bassin de l'Okpara est caractérisé par une très forte irrégularité et une très mauvaise répartition des précipitations (**Ogouwalé**, 2006 ; **Vissin**, 2007) cité par **Ogouwale et al.** (2015) qui a montré

que ce bassin versant est marqué par une forte variabilité des hauteurs des précipitations et parle d'une triple menace sur les ressources en eau en particulier celles de surface : une baisse des hauteurs de précipitation, une augmentation des températures et une pression accrue de populations. Aussi parlent-ils d'une hausse conséquente du pouvoir évaporant de l'atmosphère dans ce bassin versant.

Ogouwale et al. (2015), ont également conclu que les mois de janvier et novembre puis ceux de juin et juillet pourraient connaître respectivement une augmentation et une diminution pluviométrique en 2050.

Codja (2018) dans sa thèse intitulée « Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest » conclut que le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou, est au cours de ces dernières décennies, confrontées à une reprise pluviométrique qui est en régression par rapport à la moyenne interannuelle des hauteurs de pluie des années 1960. Il mentionne également que cette variabilité pluviométrique a eu des répercussions sur le fonctionnement hydrologique du bassin en particulier la récurrence des événements extrêmes, dont les inondations des dernières années.

Le Lay (2002) s'est intéressé à la caractérisation hydrologique et à la simulation numérique des écoulements sur le bassin de la haute vallée de l'Ouémé à travers deux modèles conceptuels simples à pas de temps mensuel (le modèle GR2M et celui de Conway). Il a ensuite tenté une comparaison avec les résultats du modèle hydrologique PLECBEN (**Le Barbé et al.**, 1993).

Vodounnon (2008) a étudié les impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau sur la période 1965-2002. Les résultats issus de ces travaux révèlent que les écoulements dans le bassin de l'Ouémé à Bonou et à Bétérou ont connu une baisse relative due à la récession pluviométrique des décennies 70 et 80. **Vissin** (2001) a montré que les chroniques pluviométriques sur le bassin versant béninois du fleuve Niger ont connu une « rupture de stationnarité » en 1972.

Le modèle SWAT a été utilisé sur le bassin de Térou à Igbomakoro par **Sintondji** (2005) et révèle une réduction moyenne de 8,1% de la précipitation, de 16,2% de l'écoulement de surface, de 33,8% de l'écoulement souterrain et de 24,6% de la production en eau. Les travaux de l'auteur ont été très utiles dans la définition de la méthodologie pour évaluer les ressources en eau.

Dossou-Yovo (2011) a utilisé le modèle SWAT sur le bassin versant de l'Okpara et a noté sur la production future en eau du bassin versant de l'Okpara, une augmentation de l'écoulement de surface (de 10,8 à 14,23%) et une diminution de la production en eau (de 4,3 à 6,1%) comme

effets exclusifs de la dynamique d'occupation des sols. Quand n'est-il de l'utilisation du modèle GR4J et quel est l'état actuel de cette ressource ?

Les bas-fonds sont alimentés en eaux superficielles par les ruissellements et les écoulements souterrains qui proviennent des bassins versants situés topographiquement en amont. Il est donc essentiel d'associer à toute étude hydrologique les descriptions des bassins versants permettant de comprendre la relation qui existe entre le fonctionnement hydrologique des bas-fonds et leur environnement, ceci du point de vue topographique, morphométrique et hydrographique (Albergel, 1988 - Albergel & Claude. 1988). Ce qui n'a pas apparemment fait l'objet d'une étude dans le bassin versant de l'Okpara avec une méthodologie basée sur les SIG et Télédétection.

Chapitre 1 : Clarification conceptuelle et présentation de la zone d'étude

La problématique de la cartographie des bas-fonds, quoique relativement récente, en comparaison avec d'autres domaines de recherche, a fait déjà l'objet d'innombrables travaux à l'échelle nationale et sous régionale. Coupler cette problématique à celle de l'évaluation de la ressource eau du système contenant ces bas-fonds est fastidieux. Le présent chapitre est consacré à la clarification des concepts utilisés et à la présentation du cadre d'étude.

1.1. Clarification conceptuelle

Bas-fond :

Selon Raunet (1985), les bas-fonds sont les fonds plats ou concaves des vallons et petites vallées dans les parties amont des réseaux de drainage (Figure.1). Il définit spécifiquement les bas-fonds en région tropicale comme des fonds plats ou concaves des vallons, petites vallées et gouttières d'écoulement inondable qui constituent les axes de drainage élémentaires emboîtés dans les épaisses altérations des socles cristallins pénéplanés. Les bas-fonds représentent des unités de milieu spécifiques et essentielles au sein des paysages tropicaux. Ce sont les axes de convergence préférentielle des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes. Ils reçoivent également les transports solides des versants.

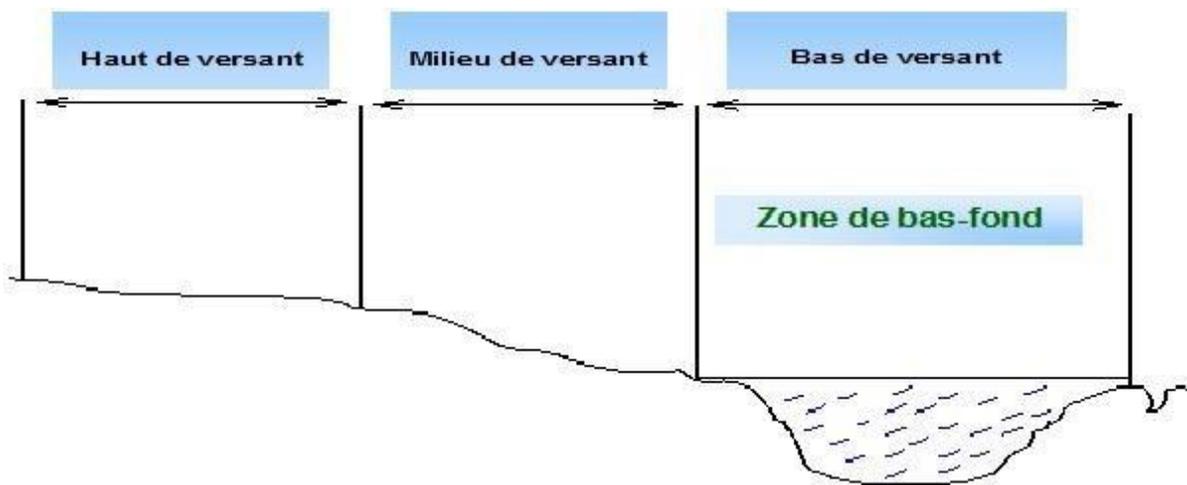


Figure 1: Coupe en travers d'un vallon

Source : Consortium Bas-Fonds, 1997

Les sols des bas-fonds sont engorgés ou submergés pendant une période plus ou moins longue de l'année selon les saisons. Ce sont des lieux où affleurent les nappes d'eau souterraine correspondant aux nappes phréatiques.

Modèle numérique de terrain :

Un MNT, comme son nom l'indique, est une représentation numérique du terrain avec les coordonnées (X, Y, Z) qui peuvent être ordonnées de différentes façons selon la méthode de modélisation employée : raster et TIN (Bouvier, 1994). Parler de MNT dans cette étude, c'est parler uniquement de la représentation de la surface topographique sans tenir compte des bâtiments ou de la végétation. L'échantillon des points X, Y, Z constituant la donnée initiale peut être une image matricielle du relief, avec Z l'altitude du point de coordonnées planimétriques (X, Y) dans une projection définie. Le MNT est utilisé dans ce travail comme une donnée de base sur lequel est appliquée un algorithme afin d'extraire le réseau hydrographique, les altitudes des points et de détecter les zones potentielles de bas-fonds.

Téledétection :

Selon Kurtz (2009), la télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques d'objets, par des mesures effectuées à distance sans contact matériel avec ceux-ci. Les données d'observation de la terre sont caractérisées par leur homogénéité et leur objectivité, ainsi que leur disponibilité à une échelle mondiale. Ces données sont obtenues à partir des capteurs installés à bord du satellite. Certains capteurs, tels que les satellites ASTER, offrent des possibilités d'acquisition de couples stéréoscopiques, conduisant à déterminer le relief d'un objet. Cette nouvelle technologie a permis de construire de nombreux produits dérivés, dont le MNT. La justification du sujet et la clarification des concepts utilisés étant faites, le paragraphe suivant présente la disponibilité en ressources naturelles dans le secteur d'étude et leur importance pour la riziculture.

SIG : un Système d'Information Géographique est un ensemble de données numériques, localisées géographiquement et structurées à l'intérieur d'un système de traitement informatique comprenant des modules fonctionnels permettant de construire, de modifier, d'interroger, de représenter cartographiquement, la base de données, selon des critères sémantiques et spatiaux.

Modélisation hydrologique : c'est un outil qui permet de générer à partir des données de pluie, d'ETP et des caractéristiques du bassin versant, les débits les plus proches possible de ceux réellement ou potentiellement observables sur ce bassin versant ; un modèle pluie-débit est censé représenter la transformation de la pluie tombée sur le bassin versant en débit à son exutoire au cours d'un pas de temps désiré : journalier, mensuel, annuel, pluriannuel. Il permet également de disposer d'une séquence continue de débits généralement plus longs que la série observée et

pouvant être utilisée pour analyser les risques de défaillance d'un ouvrage. L'intérêt de l'utilisation d'un modèle hydrologique pour évaluer les écoulements à partir des précipitations est de confronter le modèle à la 'réalité hydrologique' c'est donc, tout simplement le mettre en œuvre pour le caler et tester sa performance.

Bilan hydrologique d'un bassin versant :

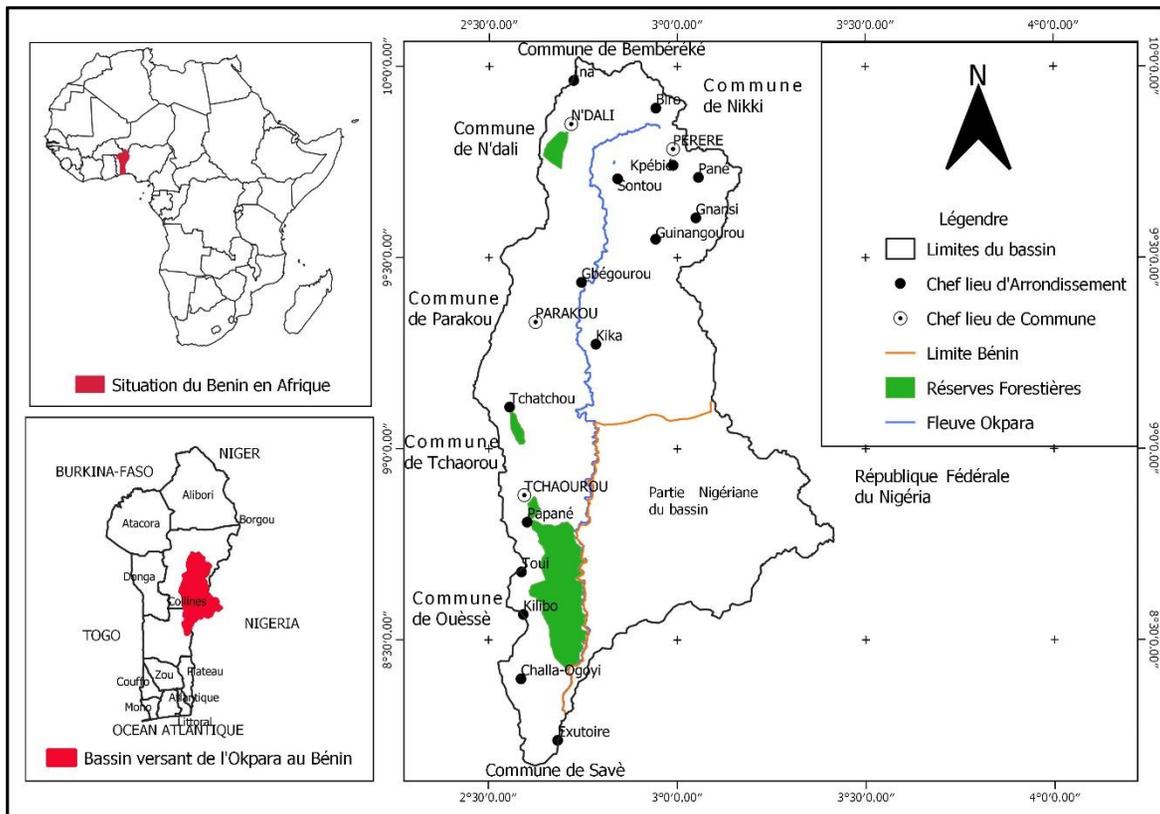
Le bassin versant, ou bassin de drainage, d'une rivière considérée en un point donné de son cours, est défini comme l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel la pluie tombée se dirige vers ce point de la rivière. Toute l'eau qui ruisselle à l'intérieur de ce contour transite donc par la section en ce point appelé exutoire. L'eau précipitée à l'échelle du bassin versant se répartit en eau interceptée, retenue à la surface du sol, infiltrée et ruisselée. La totalité de l'eau interceptée et retenue à la surface du sol et une partie de l'eau infiltrée est perdue par évaporation et évapotranspiration. La hauteur d'eau ruisselée en surface ou pluie nette se transforme en ruissellement direct et constitue l'essentiel de l'écoulement vers l'exutoire. Les autres composantes de l'écoulement à l'exutoire sont l'écoulement retardé et le débit de base qui proviennent respectivement de l'eau infiltrée en zone saturée et de l'eau des nappes souterraines.

Le bilan hydrique est la "différence entre les quantités d'eau fournies à une plante et utilisées par elle". En agriculture, pour l'établissement des bilans hydriques, on comptabilise, au crédit, les apports d'eau pendant le cycle de la plante (pluie ou irrigation) dans la limite de la capacité d'absorption du sol (l'excès est considéré comme inutilisable) et la qualité d'eau présente dans le sol au moment de l'implantation de la culture ; au débit, à l'eau évaporée directement à partir du sol est ajoutée celle qui correspond à la transpiration de la plante. Les bilans hydriques prévisionnels établis à partir de l'étude fréquentielle du climat permettent de mieux adapter les cycles culturaux à la pluviosité. **Le bilan hydrologique** se situe à l'échelle du bassin versant et concerne une démarche hydrologique, **le bilan hydrique** se situe à l'échelle de la plante et participe d'une démarche agronomique (Larousse Encyclopédique). **L'agriculture urbaine** : il s'agit d'une agriculture "localisée dans la ville ou à sa périphérie, dont les produits sont majoritairement destinés à la ville et pour laquelle il existe une alternative entre usage agricole et non agricole des ressources (sol, main d'œuvre, eau)" (Paule Moustier et Alain Mbaye, 1999).

1.2. Présentation de la zone d'étude

1.2.1. Situation géographique

Situé dans la zone ouest-africaine, le Bénin est drainé par un réseau hydrographique assez dense avec comme principal cours d'eau le fleuve Ouémé (510 km). L'Okpara est un affluent important de l'Ouémé. Il prend sa source à Pèrèrè précisément à Daroukpara et se jette dans l'Ouémé dans le village Okpa. Sa longueur approximative est de 362 kilomètres. Le sous-bassin de l'Okpara qui fait l'objet de cette étude a une superficie de 9500 km², dont 6 748 km² de superficie au Bénin. Il est situé entre 8°13' et 10°03' de latitude Nord et entre 2°31' et 3°25' de longitude Est et couvre les départements des Collines et du Borgou. Au sein de ces départements, diverses communes sont drainées par les eaux du bassin. Il s'agit des communes de Bembèrèkè, de N'Dali, de Nikki, de Pèrèrè et de Parakou situées au Nord du bassin et de Tchaourou, de Ouèssè et de Savè situées au Sud du bassin.



Source : Nos travaux, 2020

1.2.2. Climat

Le bassin de l'Okpara est sous l'influence du climat tropical de type soudanien dans sa partie Nord et du climat subéquatorial dans sa partie Sud. Les caractéristiques du climat tropical de transition impliquent la modification du régime des précipitations. Le régime bimodal des pluies s'efface du Sud de ce bassin pour devenir unimodal vers la partie Nord. Il est marqué par une saison des pluies de 7 mois qui s'étend de mi-avril à mi-novembre et une saison sèche de 5 mois qui s'étend de mi-novembre à mi-avril. La moisson y arrive tardivement et se retire tôt.

1.2.2.1. Pluviométrie

Les données de pluie obtenues auprès de METEO-BENIN des stations synoptiques de Parakou et de Savè sur 30 ans (1990 à 2019) ont permis de réaliser les Figure 3 et 4, qui montrent d'une part la répartition des pluies dans une année moyenne et les variabilités interannuelles d'autre part.

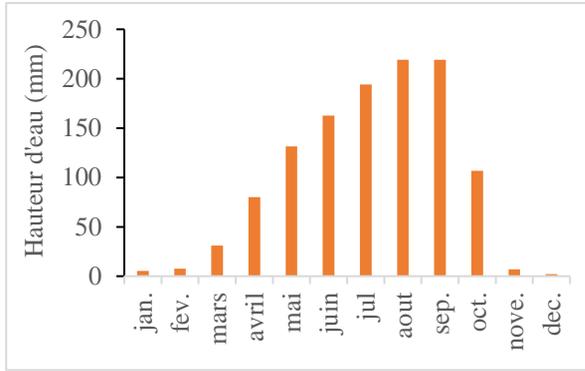


Figure 3 : Pluviométrie mensuelle moyenne à la station synoptique de Parakou (1990 – 2019)

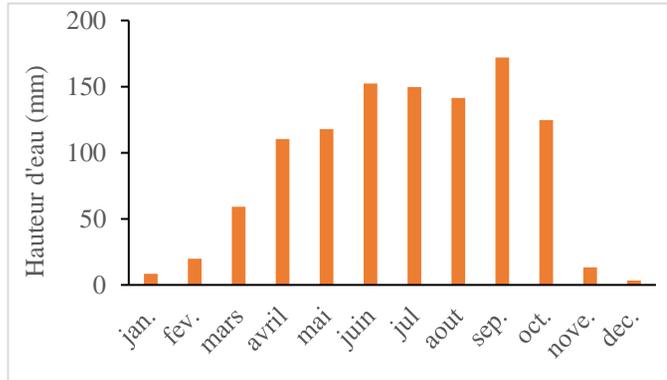


Figure 4 : Pluviométrie mensuelle moyenne à la station synoptique de Savè (1990 - 2019)

Source : METEO-BENIN, 2020

La Figure 3 et 4 présentent l'évolution mensuelle des hauteurs de pluie à Parakou et à Savè.

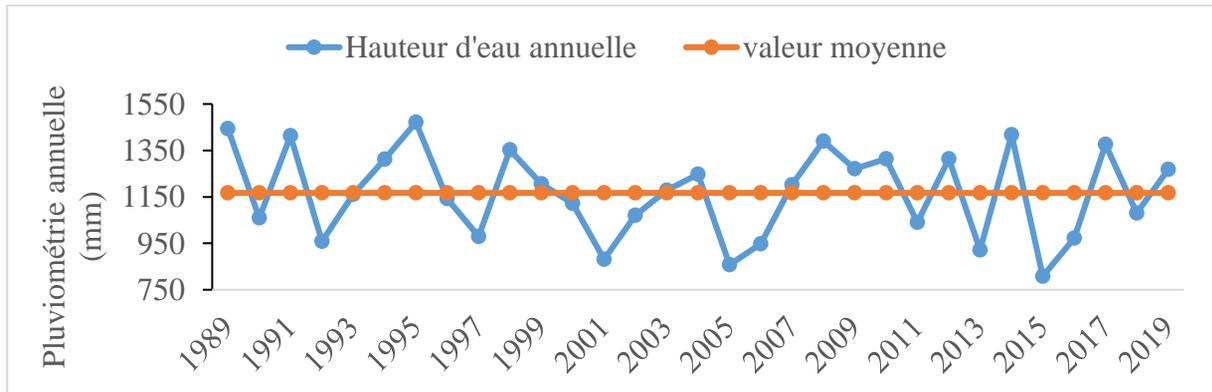


Figure 3: Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station synoptique de Parakou

Source : METEO-BENIN, 2020

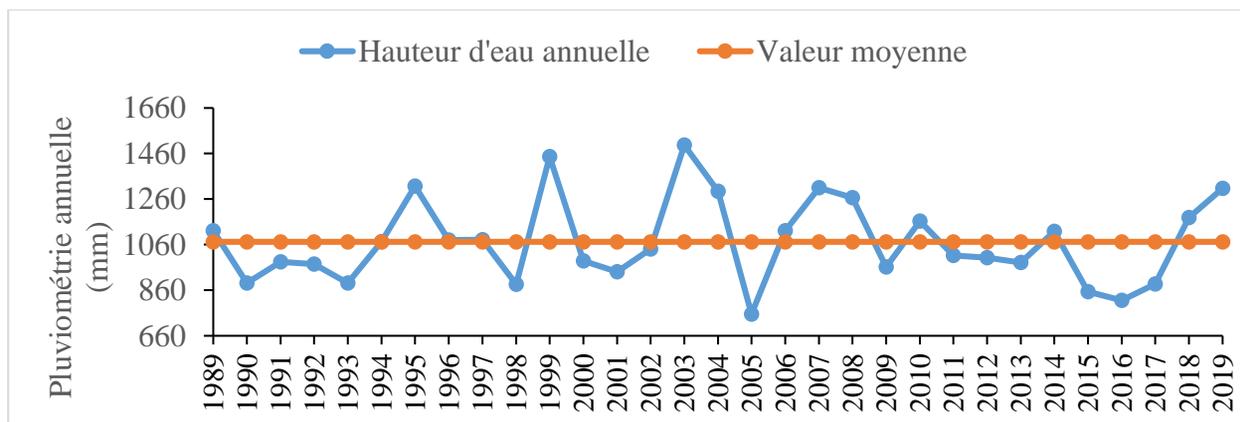


Figure 4: Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station synoptique de Savè (1990-2019)

Source : METEO-BENIN, 2020

De l'analyse de ces Figures, on retient que le mois ayant enregistré plus de pluie dans la région de Savè ces trente dernières années est le mois de septembre pendant lequel, la pluviométrie moyenne est de 171,91 mm ; alors que les mois les plus pluvieux dans la région de Parakou sont ceux d'août et de septembre avec respectivement une pluviométrie moyenne de 219,12 et 219,3 mm

Les hauteurs moyennes annuelles de pluie, déterminées au cours de la période 1989 à 2019 varient de 808 en 2015 à 1471,6 mm en 1996 au Nord du bassin et de 755,2 en 2005 à 1496.8 mm en 2003 au Sud du bassin.

1.2.2.2. Température et Humidité relative

Les données de température et d'humidité obtenues auprès de METEO-BENIN des stations synoptiques de Parakou et de Savè sur 30 ans (1989 à 2019) ont permis de réaliser la Figure 7 qui montre les variations d'une part de la température moyenne mensuelle et celles de l'humidité moyenne mensuelle d'autre part au cours des trente dernières années.

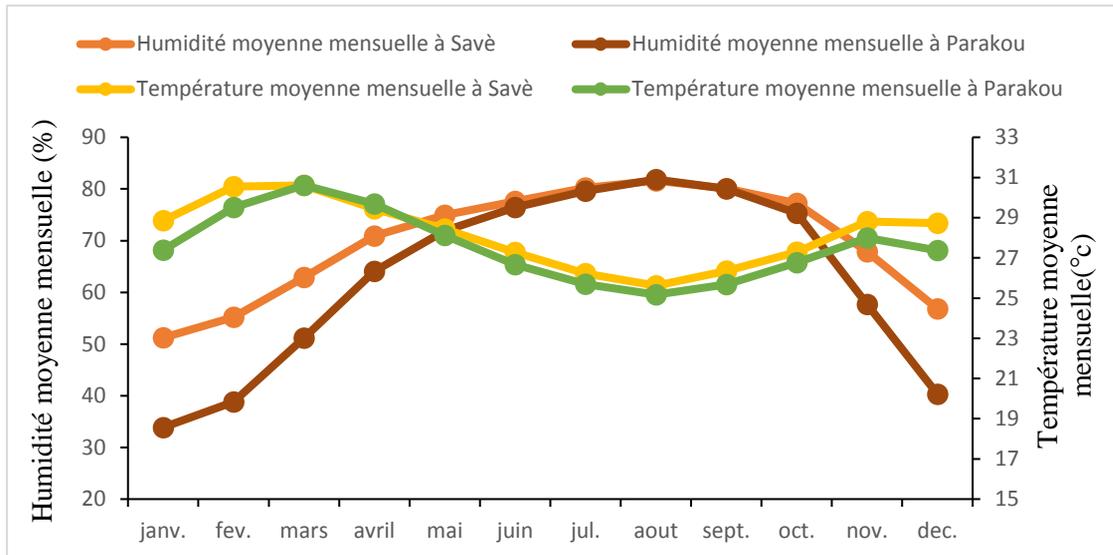


Figure 5: Températures et humidités moyennes mensuelles au niveau des stations de Savè et de Parakou

Source : METEO-BENIN, 2020

De ces graphiques, il apparaît que dans notre milieu d'étude, les températures sont relativement élevées à la station de Savè qu'à celle de Parakou, avec des valeurs allant de 25.62 au mois d'août à 31°C au mois mars à Savè et de 25.17 au mois d'août à 30.61°C au mois mars à Parakou. Dans le même temps, l'humidité varie de 51.22 (mois de janvier) à 81.61% (mois d'août) à Savè et de 33.87 à 81.84% toujours au même mois à Parakou. On retient alors que mars est le mois le plus chaud et août le mois le plus froid au niveau des deux stations sans que août apparaît comme le mois le plus humide et janvier le mois le plus sec au niveau des deux stations.

1.2.3. Hydrographie du bassin versant de l'Okpara à Kaboua

Le cours d'eau Okpara est un des affluents du fleuve Ouémé sur sa rive gauche. Il sert souvent avec ses affluents de points d'approvisionnement en eau d'usages domestique et agricole pour les populations avoisinantes. La Figure 8 présente la configuration hydrographique du bassin de l'Okpara à Kaboua.

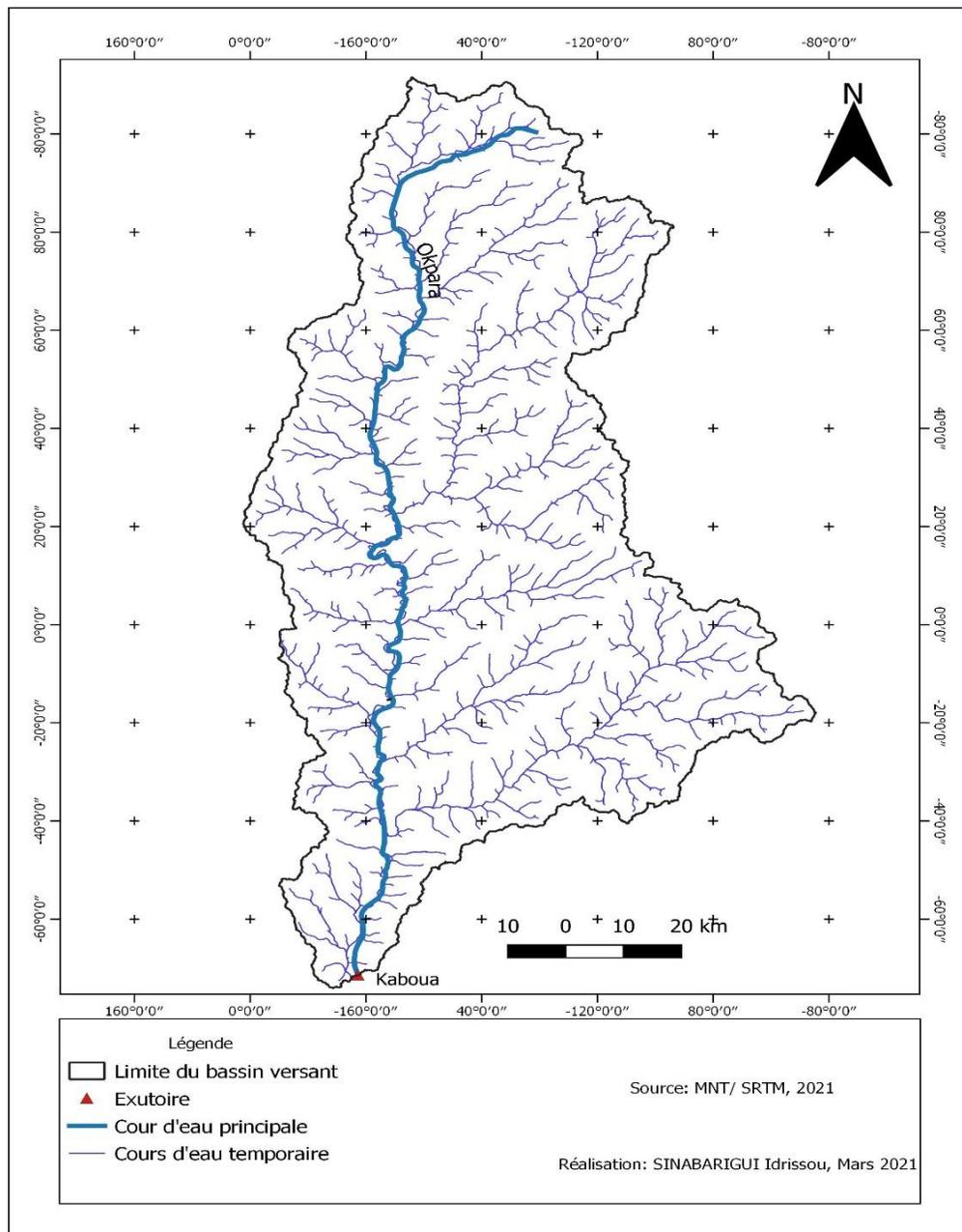


Figure 6: Réseau hydrographique du bassin de l'Okpara à Kaboua extrait du MNT

Source : Nos travaux, 2020

Cette Figure montre la densité du réseau hydrographique du bassin. La plupart des affluents (embranchements) du réseau tarisse en saison sèche même le cours d'eau principale (le Fleuve Okpara) ne coule pas en toute période de l'année, ce qui limite suffisamment l'accès à l'eau pour ses divers usagers. La Figure ci-dessous présente la variation des débits moyens mensuels de l'Okpara à Kaboua.

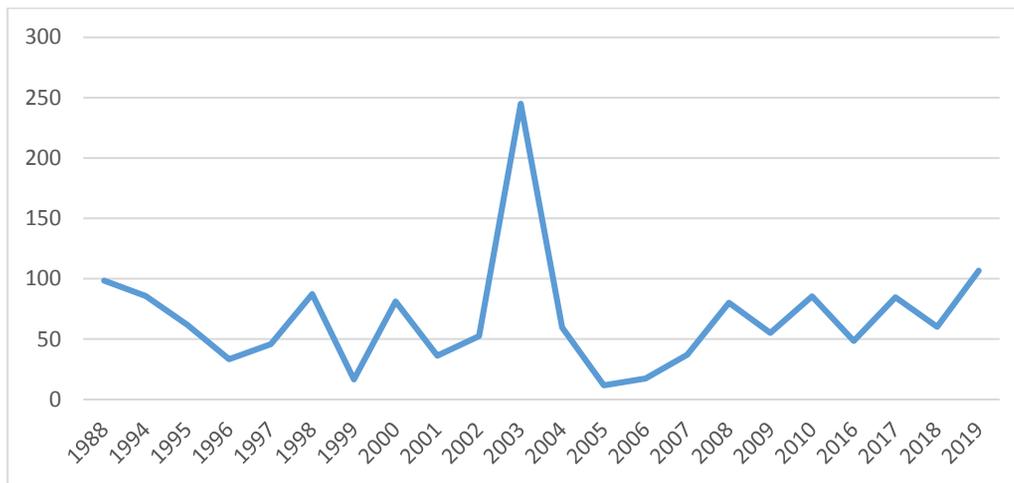


Figure 7: Variabilité des débits moyens annuels dans le bassin de l'Okpara

Source : DG-Eau, 2020

La Figure 9 montre une diminution progressive des débits moyens annuels sur la période de 1988 à 1996. On note un débit très élevé en 2003 qui correspondait à l'année de fortes inondations au Bénin. 2005 est l'année qui a connu les plus faibles débits et a évidemment été une année sèche au Bénin. On note une succession d'année de faibles variations de débit moyen annuel sur la période 2016 à 2019 avec une reprise de hausse de débit en 2019.

1.2.4. Sol

Situés sur le socle cristallin, les sols du bassin versant de l'Okpara à Kaboua sont d'une grande variété tant du point de vue de leur nature que de leur répartition géographique. Ce sont les sols ferrugineux tropicaux qui caractérise le mieux le bassin. Ce sont des sols riches en sesquioxydes et caractérisés par un complexe argileux moyennement désaturé. Suivant l'intensité et les caractéristiques de cette migration, trois groupes sont distingués : les sols ferrugineux tropicaux appauvris ; les sols ferrugineux tropicaux lessivés et les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions. Ces sols sont d'une fertilité moyenne ou médiocre en surface et faible dès l'horizon d'infiltration. Ils ne présentent aucune carence particulière dans les 60 premiers centimètres.

Ils sont suivis par les sols alluvionnaires ou sol minéraux bruts provenant des dépôts laissés par le cours d'eau Okpara et ses affluents au fond des vallées, par les minéraux bruts lithiques

d'origine non climatique provenant de l'érosion et formés sur des cuirasses et par les sols peu évolués lithiques d'origine non climatique formée sur du quartzite et du micaschiste.

D'autres types de sols sont également observés dans le bassin, mais peu évolués. Il s'agit des sols hydromorphes rencontrés au fond des vallées et sur les pénéplaines à granite porphyrique, à quartzite et à sédiments colluviaux, des vertisol rencontrés dans les vallées et dans les dépressions des plaines, des sols peu évolués d'origine climatique rencontrée sur les collines. La carte ci-dessous présente les différents sols dominants qui caractérisent le mieux le bassin versant.

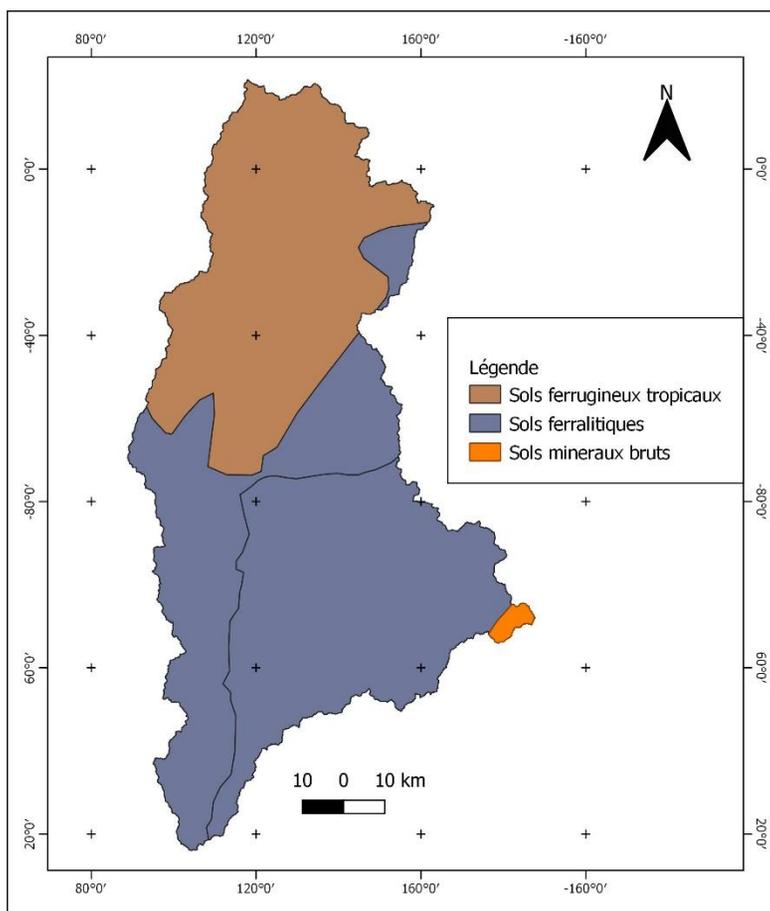


Figure 8: Pédologie du bassin versant de l'Okpara à Kaboua

Source : FAO, 2012

1.2.5. Potentialités floristiques et faunistiques

Le bassin de l'Okpara est caractérisé par un couvert végétal remarquable. Les formations végétales les plus rencontrées sont les forêts denses décidues ; les forêts claires et surtout les savanes boisées, arborée et arbustive. On y retrouve des espèces agroforestières telles que le karité (*Vitellaria paradoxa*), l'anarcadier (*Anarcadium occidentale*), le teck (*Vitellaria paradoxa*), le teck (*Tectona grandit*), le

manguier (*Mangifera indica*), etc. Les aires agricoles sont dominées par la culture du coton, du maïs, de l'igname, du manioc, du niébé, etc. Au niveau de ce bassin, on rencontre les forêts classées de Tchaourou-Toui-Kilibo, de N'dali et de Tchachou. En général, ces formations végétales sont soumises à des modifications de très grande amplitude. Dans les localités de Savè, Ouèssè et dans presque toute la partie septentrionale, la végétation naturelle sont transformées en plantations d'anacardiens ou de manguier.

1.2.6. Les activités socio-économiques

Les populations du bassin de l'Okpara mènent des activités variées ; elles exercent le plus souvent une activité principale associée à des activités secondaires. Les facteurs physiques (climat favorable et disponibilité des terres) ont fait de l'agriculture, l'activité qui occupe la majorité des habitants (52% de la population active). Mais celle-ci n'est que de subsistance avec des techniques et des outils rudimentaires.

Le sous-secteur de l'élevage, marqué par la prédominance des pratiques traditionnelles d'élevage des espèces bovines, ovines, caprines, porcines et des volailles, contribue, selon les évaluations de l'INSAE en 2010, pour environ 5,9 % au PIB. Le bassin de l'Okpara, excédentaire tant en fourrage qu'en eau d'abreuvement, abrite les grands centres de transhumance nationale et transnationale. L'accueil des transhumants ne se fait pas non plus sans difficulté en raison de la restriction des parcours, liée essentiellement à la densité agricole dans certaines localités, les éleveurs et les agriculteurs se partageant les mêmes aires.

A cela s'ajoutent les échanges commerciaux grâce à la proximité du Nigéria. C'est un commerce informel basé sur l'exportation des produits agricoles et de véhicules d'occasion et l'importation de lubrifiants, de motos neuves et de leurs pièces.

L'artisanat occupe aussi une place importante dans les activités des habitants du bassin. Il comprend l'artisanat de production des outils agricoles ou de transformation des produits agricoles et l'artisanat de service qui concentre le plus grand nombre d'artisans en milieu urbain. On note également l'exploitation des ressources forestières, les carrières de sable, de graviers et de granites, puis la pêche.

Le bassin de l'Okpara, possède également des atouts pour le développement d'une industrie touristique de qualité ,des activités de tourisme classique et l'écotourisme: climat favorable, découverte des cultures autochtones, faune sauvage, zones de biodiversité faunique et floristique, territoires encore préservés...les manifestations culturelles caractéristiques des groupes Socio-

ethniques telles que les danses folkloriques pour les réjouissances(danse de Têkê, Kiarou, Sinsinou...) sont très répandues au Nord du Bassin. La fête de la Gaani, une fête identitaire de l'ethnie baàtonou est l'un des grands événements organisés à Nikki chaque année.

1.2.7. Démographie des communes du bassin de l'Okpara

La population du bassin de l'Okpara est estimée à 1 174 331 (INSAE ; 2013) dans les huit communes du bassin avec 1 122 592 dans le Borgou et 272 145 habitants dans les Collines. La répartition par commune est donnée par le Tableau 1 :

Tableau 1: Répartition de la population du bassin de l'Okpara par commune

Nom des communes	Population totale	
	2013	Estimée en 2021
Nikki	150466	198135
Pèrèrè	79240	104344
Bembèrèkè	125465	165213
N'Dali	114659	150984
Parakou	254254	334804
Tchaourou	221108	291157
Savè	87379	115061
Ouessè	141760	186671
Total	1174331	1546370

Source : INSAE, RGPH 4

L'estimation de la population totale est basée sur les estimations de la population de INSAE, RGPH3 projetées sur la base la méthode de Taux de croissance exponentielle. Soit :

$$P_n = P_0 (1+k)^n \quad (1)$$

- **P_n** : Population après n années
- **k** : Taux de croissance annuel
- **P₀** : Population de la commune en 2013 et
- **n** : Période soit 8 ans.

Il est à noter ici que le taux d'accroissement naturel de 3,5% a été utilisé dans cette estimation

D'après ce tableau, la population est plus dense dans les communes de Parakou et Tchaourou qui sont situés au centre du bassin et se densifie au fil des années.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériels et méthodes utilisés pour l'atteinte des objectifs fixés au départ. Il comprend trois (03) grandes parties à savoir les données utilisées pour cette étude, le matériel ou outils de travail et les méthodes utilisées.

2.1. Données

Les données exploitées dans ce volet cartographique de nos travaux se présentent comme suit :

- ✚ Une image SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) comme Modèles Numériques de Terrain de résolution 30 m élaboré par la NASA et mise en ligne le 6 mars 2021 ;
- ✚ Quatre scènes d'images satellites Landsat-8 OLI dont deux du 2 mars 2021 et les deux du 4 mars 2021 avec une résolution de 30 m ;
- ✚ Les altitudes des bornes géodésiques du bassin versant
- ✚ Les limites du bassin versant
- ✚ Les coordonnées géographiques des bas-fonds acquissent à la DGH et sur le terrain

Ces images ont été téléchargées gratuitement sur le site internet : <http://earthexplorer.usgs.gov/>

En ce qui concerne les données d'entrées du modèle GR4J, il s'agit :

- ✚ Des données de débits de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua acquissent à la DGEau
- ✚ Des données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle acquissent à Météo-Bénin et d'autres sont téléchargées sur le site <http://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>

Le tableau ci-dessous présente les stations dont les données ont été exploitées:

Tableau 2 : Stations synoptiques et postes pluviométriques utilisés

N°	Noms des stations ou postes	Longitude Est (degrés décimaux)	Latitude Nord (degrés décimaux)	Altitude (m)	Plage de données utilisées	Type de données
1	Ina	2.7333	9.9667	358	1989-2019	Précipitation
2	Nikki	3.2	9.9333	402	1989-2019	Précipitation
3	Parakou	2.6	9.35	392	1989-2019	Précipitation, température minimale et maximale
4	Savè	2.4333	7.9833	199		
5	Tchaourou	2.6	8.8667	325	1989-2019	Précipitation
6	Okpara	2.7333	9.4667	295	1989-2019	Précipitation
7	Bembèrèkè	1.6667	9.0167	491	/	Précipitation
8	Ouèssè	2.23	8.30	233	/	Précipitation
9	Shaki_school	3.4167	8.6833	457	1989-2019	Précipitation
10	Kaboua	2.7166	8.25	150	1990-2019	Précipitation, Débit journalier

2.2. Matériels

Le matériel utilisé dans ce travail se présente comme suit :

- les outils ArcGIS , QGIS et ENVI 5.1 pour réaliser les cartes, traiter les images et générer les paramètres géomorphologiques du bassin versant ;
- Excel 2016 pour les calculs, la spatialisation, la réalisation des graphiques et des tableaux
- le GPS pour tracker les bas-fonds
- le modèle GR4J sous tableur Excel, Version 1.12 de novembre 2012 (Perrin et al., 2003) pour l'estimation du débit et l'établissement du bilan hydrologique
- le modèle SWAT intégré à ArcGIS pour la délimitation du bassin versant et l'extraction de son réseau hydrographique.

2.3. Méthodes de recherches

2.3.1. Recherche documentaire

Elle a consisté à la collecte des informations relatives à la cartographie des bas-fonds à travers les documents et les rapports d'étude (thèse de doctorat, publication et mémoires) dans la sous-région. Pour cela, l'internet et les bibliothèques scientifiques ont été exploités, les mémoires, rapports de stages et des livres scientifiques des centres de documentation du LHME ; de LHA et de l'ABEE ont également été consultés.

2.3.2. La collecte des données

Les données SIG utilisées dans le cadre de ce travail ont été téléchargées sur les sites internet spécialisés et d'autres proviennent de la base de données des laboratoires précités. En ce qui concerne les données de validation de l'approche cartographique, une excursion a été effectuée sur certaines localités du bassin versant pour vérifier les résultats du modèle. Ceci a consisté à tracker certains bas-fonds à l'aide d'un GPS dans lequel les coordonnées géographiques de ces derniers ont été intégrées. Aussi, les coordonnées d'un certain nombre de bas-fonds ont été acquises à la Direction du Génie Rural à Porto-Novo.

2.4. Méthode d'analyse et de traitement des données

2.4.1. Méthode de Validation du MNT

Le MNT est un matériel très important dans cette étude. Il est utilisé pour déterminer toutes les caractéristiques topographiques du bassin versant, l'extraction du réseau hydrographique et ses

caractéristiques. Le MNT exploité ici est celui du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avec une résolution spatiale de 30 m provenant du site <http://earthexplorer.usgs.gov>. Pour être utile à une application particulière, un MNT doit être suffisamment précis (Reuter et al. 2008). Pour juger de la qualité du MNT, un contrôle de la précision en altimétrie de la qualité des données MNT dans la zone d'étude a été fait à l'aide de 1000 points des valeurs d'altitude des bornes géodésiques de l'IGN provenant du site <https://geobenin.bj/fr/> pour le SRTM. La vérification consiste à déterminer l'erreur de l'altitude, l'erreur sur l'altitude est définie comme étant la différence entre les valeurs du MNT et les valeurs de l'altitude des bornes géodésiques de l'IGN. Différents critères comme le coefficient de détermination R^2 , le critère de normalisation du RMSE (RSR) (Moriassi et al. ,2007) défini par :

$$RSR = \frac{RMSE}{\sigma_z} \rightarrow RSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (Z_{-MNT} - Z_{-IGN})^2}{\sum_{i=0}^n (Z_{-MNT} - \bar{Z}_{-MNT})^2}} \quad (2)$$

et l'erreur moyenne quadratique (EMQ) (Mhamad ,2013 défini par :

$$EMQ = RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{-MNT} - z_{-IGN})^2} \quad (3)$$

ont été utilisés pour apprécier l'erreur de l'altitude.

Le tableau 2 présente les résultats des différents critères d'évaluation de l'erreur de l'altitude. Le coefficient de détermination du MNT étant proche, la sélection est faite sur les trois autres critères. En considérant le coefficient RSR, c'est le SRTM qui s'ajuste le mieux aux valeurs des altitudes des bornes géodésiques le RSR proche de zéro. Pour confirmer le choix, l'erreur moyenne quadratique est utilisée. Le descripteur statistique le plus utilisé pour évaluer un MNT est l'erreur moyenne quadratique. Si la valeur de l'EMQ est petite, alors le MNT est considéré comme précis. (Mhamad ,2013 in Chritian, 2020). La Figure 11 et le tableau 2 présentent respectivement le graphe de corrélation des altitudes des bornes géodésiques avec les altitudes du SRTM et les paramètres de validation du MNT.

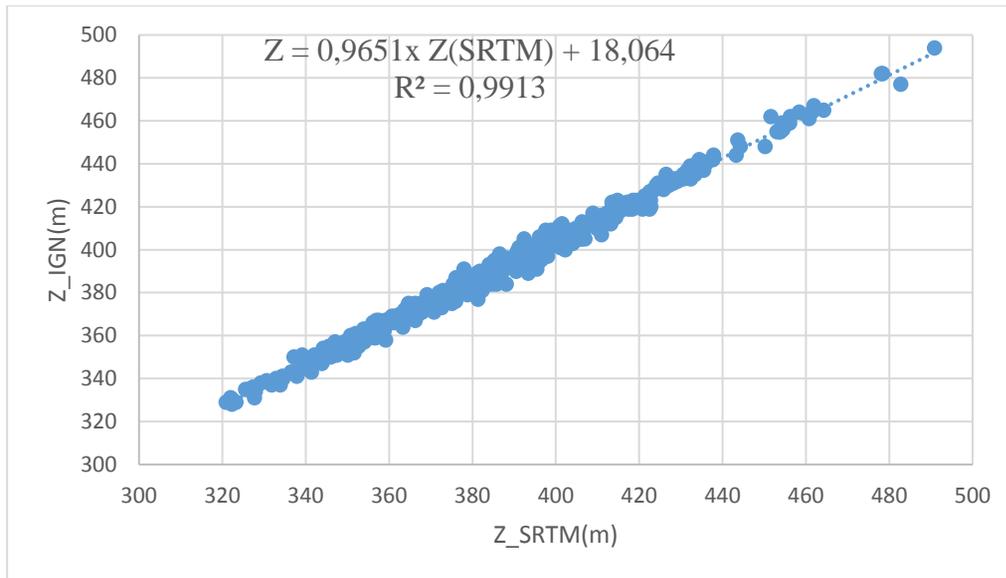


Figure 9: Corrélation des altitudes des bornes géodésiques avec les altitudes du SRTM

Source : Nos travaux, 2020

Cette Figure montre de la bonne corrélation entre les bornes géodésiques de l'IGN-Bénin et les altitudes extraites de notre MNT.

Tableau 2: Paramètres de validation du MNT

Paramètres de validation	SRTM (N06_e002)
Le coefficient de détermination R ²	0.9913
RSR	0.17
EMQ	5.58

Source : Nos travaux, 2020

Les valeurs des différents paramètres d'appréciation de la qualité du SRTM confirment de la faible erreur d'altitude et donc de la bonne qualité et de la fiabilité du MNT. Le SRTM (N06_e002) est de ce fait indiqué pour nos différentes exploitations.

2.4.2. Méthode d'inventaire des bas-fonds

Une étude par télédétection spatiale a permis d'évaluer les zones de bas-fond potentiellement exploitables du bassin de l'Okpara. L'inventaire des bas-fonds ayant fait l'objet de cette étude s'est basé sur la télédétection et les SIG. C'est une approche qui s'est révélée plus rapide et efficace pour ressortir les bas-fonds aménageables d'un bassin versant que l'approche d'inventaire par relevé de terrain. Elle a été utilisée par Kafilatou S. et al dans une étude d'inventaire et de caractérisation des bas-fonds dans le bassin versant de l'Oti au Bénin en 2017 puis par Chabi *et al.* (2010) dans une

étude intitulé Inventaire par télédétection des agroécosystèmes de bas-fonds dans le centre du Bénin.

En effet, cela a consisté à :

-Générer l'Indice Normalisé de Végétation (NDVI)

Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) exprime l'intensité de l'activité chlorophyllienne de la végétation. Il est généré à partir de l'image Landsat OLI préalablement traitée et se calcule par la formule :

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{PIR + R} (4)$$

Où PIR représente la réflectance dans le proche infrarouge et R dans le canal du rouge. L'interprétation des images est faite en tenant compte des hypothèses suivantes : les valeurs très basses de NDVI (< 0,1) correspondent aux espaces sans végétation tels que les affleurements rocheux, le sable ou la neige ; les valeurs modérées (0,2 à 0,3) représentent les zones arbustives et de prairie, alors que les valeurs élevées (0,5 à 0,8) signalent une végétation dense abondante (NASA, 2005).

- Extraire les pentes à partir du Modèle Numérique d'Altitude (MNA)

Le Modèle Numérique d'Altitude est extrait à partir de l'image SRTM de 30 m de résolution. Ce modèle a permis de ressortir la valeur des pentes de la zone. La carte des pentes obtenue a été classifiée en tenant compte des normes établies par le DIARPA (Legoupil *et al.*, 2000 ; Jamin *et al.*, 2002 ; Chabi *et al.*, 2010), qui considère un aménagement de bas-fond techniquement et économiquement viable si les pentes sont inférieures ou égales à 2 %.

-Déterminer les zones de forte accumulation d'eau

Les zones d'accumulation sont des endroits (surfaces) dans lesquels l'eau stagne pendant un moment avant toute infiltration ou écoulement vers les cours d'eau temporaires proches. Elles sont déterminées dans le cadre de cette étude, à partir du traitement numérique de l'image SRTM. L'identification des zones potentielles d'accumulation d'eau sur l'étendue du bassin a nécessité en entrée un Modèle Numérique Altitude (MNA), ensuite l'extraction de la carte des aspects et la génération des directions d'écoulement (flow direction). Enfin, il a été généré en utilisant le résultat précédent le *flow direction* pour obtenir les zones d'accumulation d'eau dont les bas-fonds. La carte des zones d'accumulation d'eau obtenue a été ensuite classifiée. La reclassification d'une surface

a été définie sur la base d'une interprétation de la plage des valeurs du plus petit au plus grand (CETE Nord-Picardie, 2009). Par la suite, les zones de forte accumulation d'eau du secteur de l'étude ont été extraites.

-Extraire les bas-fonds.

La fonction de superposition du logiciel Arc GIS a été utilisée pour l'identification des bas-fonds en utilisant les opérations de Boolean (Overlay). Du résultat issu de l'intersection des 03 précédents critères sont extraits **les zones de bas-fonds aménageables ayant une superficie inférieure ou égale à 25 hectares (4ème critère)** selon le Diagnostic Rapide de Pré-Aménagement (Jamin, *et al.*, 2002).

-Valider l'approche de l'inventaire

Une carte des points de bas-fonds exploités (les bas-fonds aménagés et non aménagés) dans la zone d'étude a été réalisée à partir de relevés GPS de nos travaux de terrain et des données (relevés GPS des bas-fonds) acquises à la DGR. Cette dernière a été rastérisée et superposée à celle dérivée du MNT pour valider l'approche d'inventaire utilisée dans cette étude. La rastérisation est le passage du mode vecteur vers le mode raster. La rastérisation nécessite la définition d'un pas pour la grille en sortie. Dans cette étude le pas défini pour la grille est de 30 m, ceci en tenant compte de la résolution spatiale (30 m) des données SRTM.

La Figure 12 illustre l'approche cartographique utilisée pour l'identification des bas-fonds.

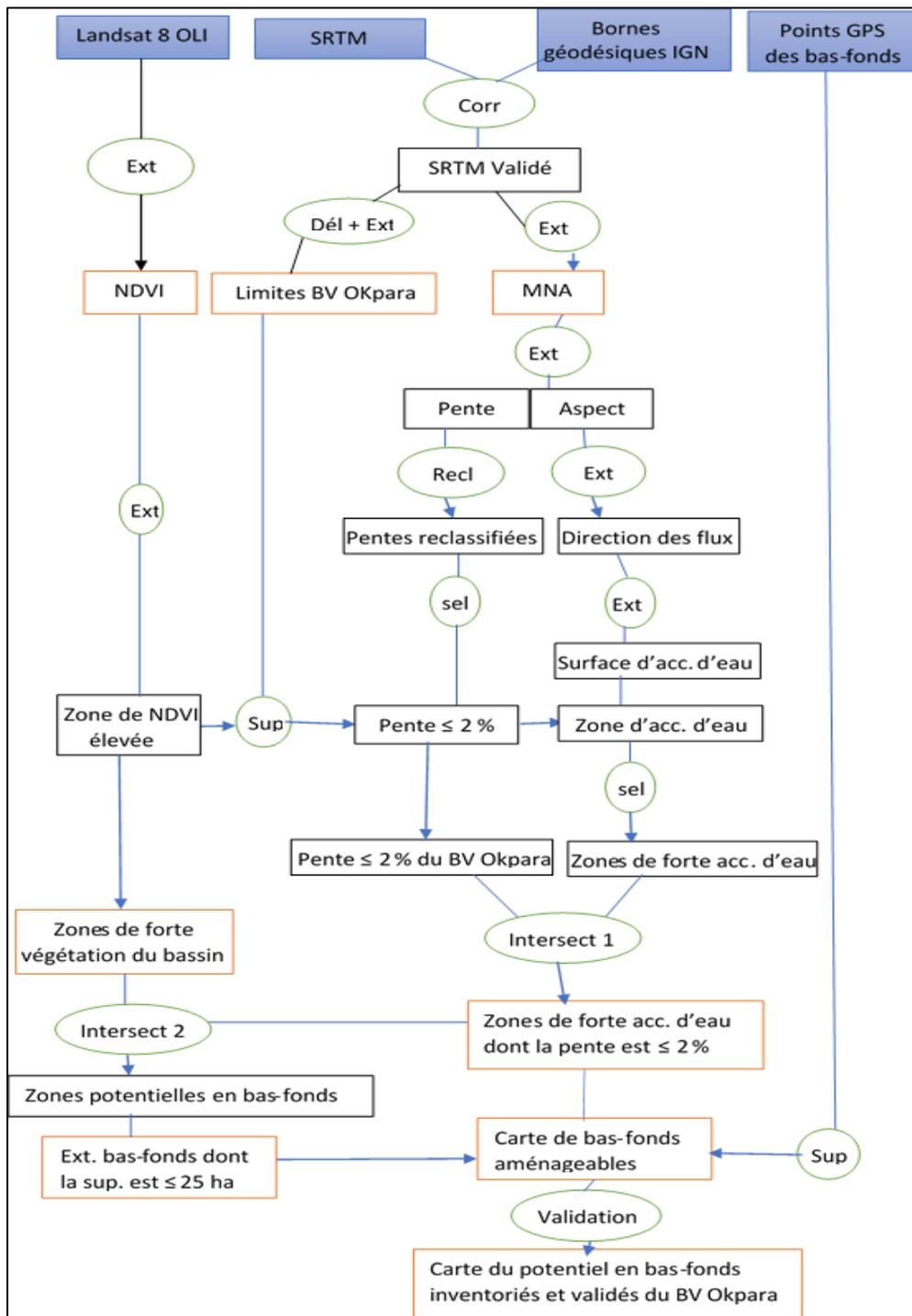


Figure 10: Etape d'inventaire des bas-fonds

Source : Nos travaux, 2020

NB : *acc = accumulation ; Corr = Corrélation ; Dél = Délimitation ; Ext = extraction ; Recl = Reclassification ; Sél = Sélection ; Intersect = Intersection ; Sup = Superposition ; MNA =Modèle Numérique d'Altitude ; BV : Bassin Versant ; sup = superficie.*

2.4.3. Méthodes d'étude des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara

2.4.3.1. Superficie et périmètre du bassin versant

Ils ont été obtenus à partir du logiciel QGIS 3.8 grâce à l'outil Mesure après délimitation du bassin versant.

2.4.3.2. Indice de compacité

L'indice de compacité de Gravelius (1914) KG est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. La formule suivante :

$$kG = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \quad (5)$$

Où P : Périmètre du bassin et S : Surface du bassin

KG proche de 1 signifie que le bassin versant est de forme quasiment circulaire. Par contre lorsque KG est supérieur à 1 cela implique que le bassin versant est de forme allongée.

2.4.3.3. Rectangle équivalent

La notion de dimension du rectangle équivalent a été obtenue par la formule :

$$L = \frac{k_G \times \sqrt{\pi S}}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \times k_G} \right)^2} \right) \quad (6)$$

$$l = \frac{k_G \times \sqrt{\pi S}}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \times k_G} \right)^2} \right) \quad (7)$$

L : longueur du rectangle équivalent

l : largeur du rectangle équivalent

2.4.3.4. Relief

Le relief joue un rôle important dans le comportement hydrologique du bassin versant. En effet, la pente influe sur la vitesse d'écoulement le temps de concentration des eaux et le taux d'infiltration. L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car, de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indice ou des caractéristiques suivantes :

Le logiciel Excel a permis de tracer la courbe hypsométrique. Cette courbe est obtenue par le cumul de l'histogramme des altitudes et ont permis de calculer l'altitude moyenne l'altitude la plus fréquente et l'indice de pente globale du bassin au moyen des formules. La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin.

Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

2.4.3.5. Altitude

Elle joue un rôle important dans le comportement des facteurs hydrologiques. Il est intéressant de calculer la répartition du bassin versant (en km² et en % de la superficie totale) par tranches d'altitude. Il existe quatre types d'altitudes caractéristiques qu'on peut calculer à partir de la courbe hypsométrique :

2.4.3.5.1. Altitude moyenne

Elle se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique.

On peut la définir comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i \times h_i}{A} \quad (8)$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km²].

2.4.3.5.2. Altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. La courbe hypsométrique tracée grâce au logiciel Excel a permis d'obtenir l'altitude médiane dans le cadre de ce travail.

2.4.3.5.3. Altitude maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir des Modèles Numérique de Terrain 2021 sur le logiciel QGIS 3.8. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale est le point le plus bas généralement à l'exutoire.

2.4.3.6. Pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct donc sur le temps de concentration et influence directement le débit de pointe lors d'une averse. Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin. Toutes se basent sur une lecture d'une carte topographique réelle ou approximative ou bien à partir d'un MNA. Dans le cadre de cette étude, la méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) a été adoptée. Elle a consisté à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$I_m = \frac{l \times D}{A} \quad (9)$$

Où :

I_m : pente moyenne [m/km ou 0/00].

L : longueur totale de courbes de niveau [km].

D : équidistance entre deux courbes de niveau [m].

A : surface du bassin versant [km²].

2.4.3.7. Dénivelée

La dénivelée D est calculée à partir du logiciel Excel par la formule suivante :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \quad (10)$$

Où $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sont obtenus à partir de la courbe hypsométrique en prenant les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de A . On déduit les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ entre lesquelles s'inscrit 90% de l'aire du bassin et la dénivelée.

2.4.3.8. Indice global

L'indice global a été calculé à partir de la formule :

$$IG = \frac{D}{L} \quad (11)$$

Où D = dénivelée et L = Longueur du rectangle équivalent (km).

2.4.3.9. Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique sert à la classification du bassin versant et est calculée en utilisant la formule suivante :

$$DS = IG\sqrt{A} \quad (12)$$

Tableau 3: Classement du relief à partir de la dénivelée spécifique selon la classification de l'ORSTOM

Classe	Type de relief	Ds
R1	Relief très faible	Ds < 10m
R2	Relief faible	10 < Ds < 25m
R3	Relief assez faible	25 < Ds < 50m
R4	Relief modéré	50 < Ds < 100m
R5	Relief assez fort	100 < Ds < 250m
R6	Relief fort	250 < Ds < 500m
R7	Relief très fort	500m < Ds

Source : SABI Z. Razaki, 2019

2.4.3.10. Réseau hydrographique

➤ Longueur des cours d'eau

Un bassin versant se caractérise principalement par la longueur suivante : la longueur du cours d'eau principal (LT) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

➤ Pente moyenne d'un cours d'eau

La pente moyenne d'un cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer entièrement ou en partie dans le sol. Le calcul des pentes moyennes et partielles du cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$\alpha_{\text{moy}} = \frac{\Delta H_{\text{max}}}{L_T} \quad (13)$$

Où :

α_{moy} : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;

ΔH_{\max} : dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) ;

L_T : longueur du cours d'eau principal [km].

➤ **Densité de drainage**

La densité de drainage introduite par Horton est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A} \quad (14)$$

Avec :

Dd : densité de drainage [km/km²] ;

L_i : longueur des cours d'eau [km] ;

A : surface du bassin versant [km²].

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant et dans une certaine mesure des conditions climatiques et anthropiques. En pratique les valeurs de la densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé ; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon Schumm (1956), la valeur inverse de la densité de drainage $C=1/Dd$ s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ». Physiquement elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau).

➤ **Densité hydrographique**

La densité hydrographique représente le nombre de cours d'eau par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \quad (15)$$

Où :

F : densité hydrographique [km⁻²]

N_i : nombre des cours d'eau ;

A : superficie du bassin [km²].

➤ **Rapport de confluence**

Le rapport de confluence exprime le développement du réseau de drainage. Il varie suivant l'ordre considéré. C'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre. Selon Strahler (1964) le « R_c » varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence.

$$R_c = \frac{Nu}{N(u+1)} \quad (16)$$

Où :

Nu : Nombre de cours d'eau d'ordre « u ».

$N(u+1)$: Nombre de cours d'eau d'ordre suivant

U : ordre d'un cours d'eau ; « u » varie entre 1 et w (w est l'ordre du cours d'eau principal classification de Strahler).

➤ **Coefficient de torrencialité**

C'est le rapport entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage. Il reflète l'agressivité des averses dans le bassin versant ; plus la valeur du coefficient est grande, plus la torrencialité est importante.

$$C_T = Dd \times F(17)$$

2.4.4. Méthode d'évaluation des ressources en eau du bassin à l'exutoire de Kaboua

2.4.4.1. Analyse critique des données hydrologiques

L'analyse critique des données a révélé l'existence de lacunes dans les séries de données de chacune des stations. Les données de précipitations journalières, de température, d'humidité relative et d'ensoleillement ne présentent pas de lacunes sur toute la période de 1989 à 2019. Ces données n'ont nécessité aucun traitement spécifique. En ce qui concerne les données de débit de la station hydrométrique de Kaboua, les périodes de 1989 à 1994 et de 2011 à 2015 n'ont aucune donnée. Par rapport aux lacunes dans les séries de débits journaliers, elles ont été évaluées et présentées dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4: Lacune des débits journaliers à Kaboua

Nom de la station	Types de données	Années dont le taux de lacune est >10%	Années dont le taux de lacune est ≤ 10%
Kaboua	Débit journalier	1980 ;1981 ;1982 ;1983 ;1984 ;1985 ;1986 ;1987 ;1988 ;1994 ;1995 ;1996 ;1997 ;1998 ;1999 ;2000 ;2001 ;2002 ;2003 ;2004	2005 ; 2006 ; 2007 ; 2008 ; 2009 ; 2010 ; 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019

Source : Nos travaux, 2020

La station hydrométrique de l'Okpara à Kaboua dispose des relevés complets de débits journaliers sur les périodes de 1980 à 1988, de 1994 à 2010 et de 2016 à 2019. Sur la période de 1989 à 1993 et de 2011 à 2019, aucun relevé n'est disponible. La définition des périodes de calibration tient compte de ce manque de données.

2.4.4.2. Calcul des précipitations moyennes par la méthode de Thiessen

La méthode des polygones de Thiessen est la plus couramment utilisées et consiste à un découpage de l'espace géographique, en définissant pour chaque station pluviométrique P, un polygone d'influence de tel façon que chaque point du polygone soit plus proche de P que de tout autre station. Ces polygones dépendent uniquement de la configuration géométrique et non pas des valeurs observées. Elle consiste à attribuer une zone d'influence pour chacune de ces stations.

La Figure ci-dessous présente le découpage du bassin versant de l'Okpara à Kaboua en zone d'influence des stations considérées.

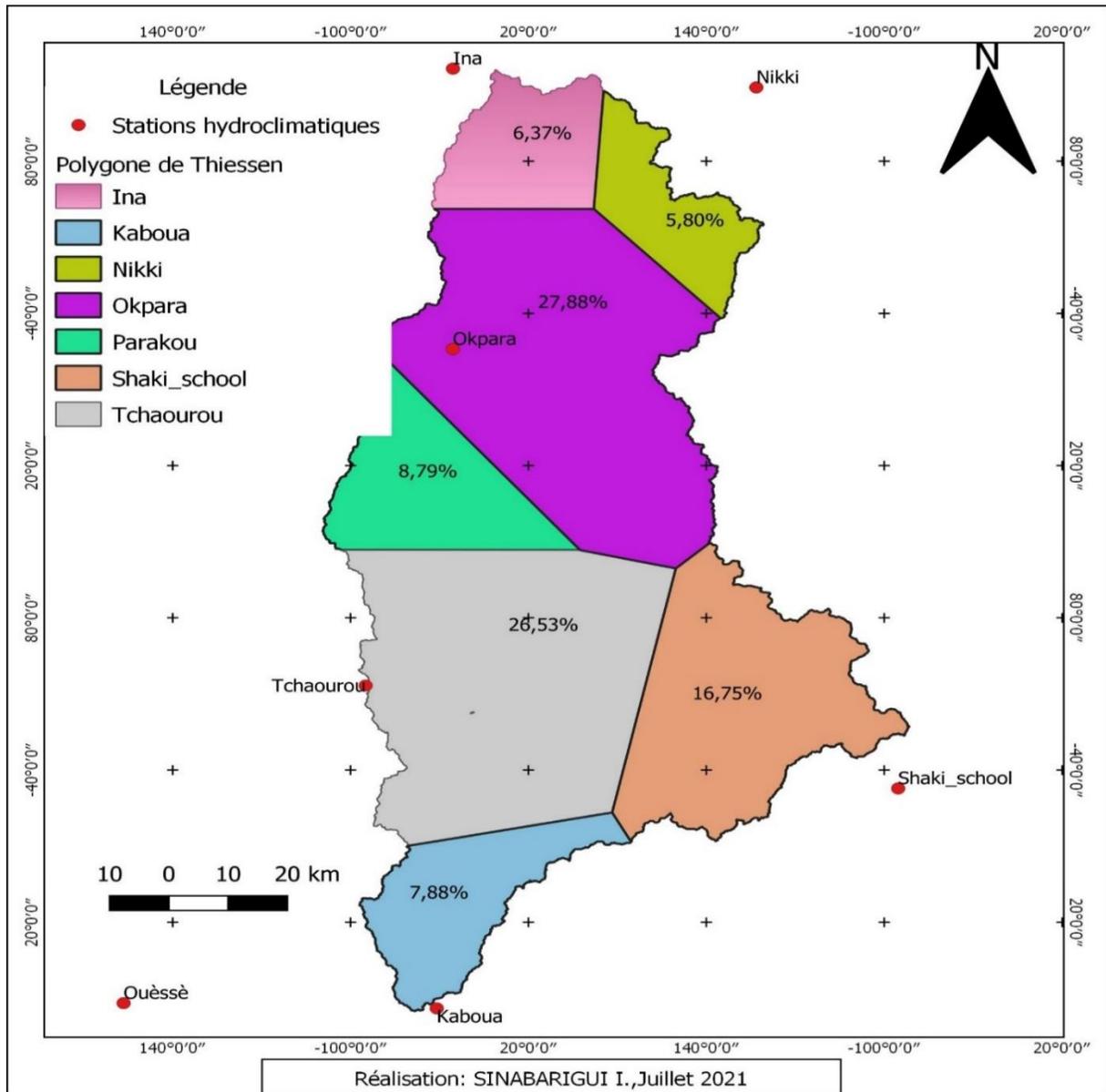


Figure 11: Découpage du bassin versant de l'Okpara par la méthode de Thiessen

Source : Nos travaux, 2020

Cette méthode permet d'estimer les valeurs pondérées en prenant en considération le poids de chaque station pluviométrique. Cette estimation s'effectue en attribuant pour l'ensemble des points appartenant à un polygone d'influence, où l'aire constitue le facteur de pondération, la même valeur de la station correspondante.

Alors, la pluie moyenne sur un bassin est égale à la somme de la hauteur pluviométrique

Pi mesuré à chaque station, multiplié par la surface de son polygone d'influence (facteur de pondération), le tout divisé par la surface S total du bassin, d'où la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times s_i}{S_T} \quad (18)$$

Avec :

P_{moy} : La pluie moyenne sur le bassin

P_i : La hauteur pluviométrique mesurée au niveau de chaque station

s_i : La surface de chaque polygone

S_T : La surface totale du bassin

n : Le nombre des stations

Pour le bassin versant de l'Okpara, sept zones d'influence sont définies comme le montre la Figure 22, en conséquence sept stations sont utilisées pour effectuer l'opération de la spatialisation. Les pourcentages (poids) sur la Figure 13 représente le rapport $\frac{s_i}{S_T}$ qui appliqués à la formule précédente donne :

$$P_{moy} = 0,06 P_{Ina} + 0,06 P_{Nikki} + 0,28 P_{Okpara} + 0,09 P_{Parakou} + 0,26 P_{Tchaorou} + 0,17 P_{Shaki_Scool} + 0,08 P_{Kaboua}$$

2.4.4.3. La température

Les températures correspondent aux valeurs journalières moyennes de températures par station synoptique et sont exprimées en degrés [°C] :

$$T = (T_{min} + T_{max}) / 2 \quad (19)$$

Où T_{min} et T_{max} sont les minimum et maximum de température observés sur la journée

2.4.4.4. Estimation d'ETP

Depuis 1950 plusieurs formules ont été développées pour estimer l'évapotranspiration potentielle ou de référence (FAO. 1998). Elles sont classées en quatre groupes selon le paramètre utilisé (température Rayonnement solaire humidité relative). Ces facteurs climatiques affectent la transpiration des cultures et la production de matière végétale (FAO. 1998). La mesure de l'ETP sur le terrain étant complexe plusieurs auteurs ont développé des formules pour son estimation notamment la formule de Hargreaves (1985) la formule de Thornthwaite (1948), de Penman-Monteith (1994) et celle Oudin (2005). Dans le cadre de cette étude, celle de Oudin et al. (2005) a

été utilisée. Elle est présentée sous tableur Excel et prend en compte la températures moyenne journalière et la Latitude de la station de mesure.

$$ETP = Re * (T + 5) / 28.5 / 100 \quad (20)$$

Avec :

ETP [mm.j⁻¹] l'évapotranspiration potentielle,

Re [MJ.m⁻².j⁻¹] le rayonnement extraterrestre,

T [°C] la température moyenne journalière de l'air (formule 16)

2.4.4.5. Estimation d'ETR

L'Evapotranspiration Réelle est calculée à partir de l'Evapotranspiration Potentielle. Plusieurs auteurs ont développé des formules pour estimation de l'ETR dont celle de Turc (1954) qui fait l'objet de notre étude.

$$ETR = \frac{P}{\left(0,9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (21)$$

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

$$L = 300 + 25 t + 0.05 t^3.$$

t = température moyenne annuelle (c°).

2.4.4.6. Description et choix du modèle

La grande diversité des modèles hydrologiques donne l'embarras du choix aux ingénieurs pour une application donnée. Afin d'éviter les erreurs et les inconvénients dus au mauvais choix, il est nécessaire d'effectuer le choix en fonction des objectifs de l'étude. Le choix du modèle s'est basé sur les critères suivants :

- La disponibilité des données d'entrée
- La capacité du modèle à simuler les données manquantes
- La capacité du modèle à simuler la réponse hydrologique tout en tenant compte de la composante souterraine
- La facilité d'utilisation grâce à une interface conviviale facilitant le traitement de données et la représentation des données et des fichiers de sortie. Cependant, il n'est pas toujours évident

de trouver un modèle satisfaisant à la fois toutes ces exigences. Suivant ces critères notre choix s'est porté sur le modèle GR4J.

Le modèle GR4J se présente dans un tableur Excel ou intégré au logiciel R et permet de simuler des valeurs journalières de débit grâce aux données journalières de pluie moyenne du bassin P (mm) d'évapotranspiration potentielle ETP (mm) et des débits Q (m³/s) observés. Les données utilisées sont celle de pluies, d'évapotranspirations et de débits du bassin de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua de 1990 à 2019 de sept (07) stations comme l'indique le polygone de Thiessen ci-dessus (Figure 13).

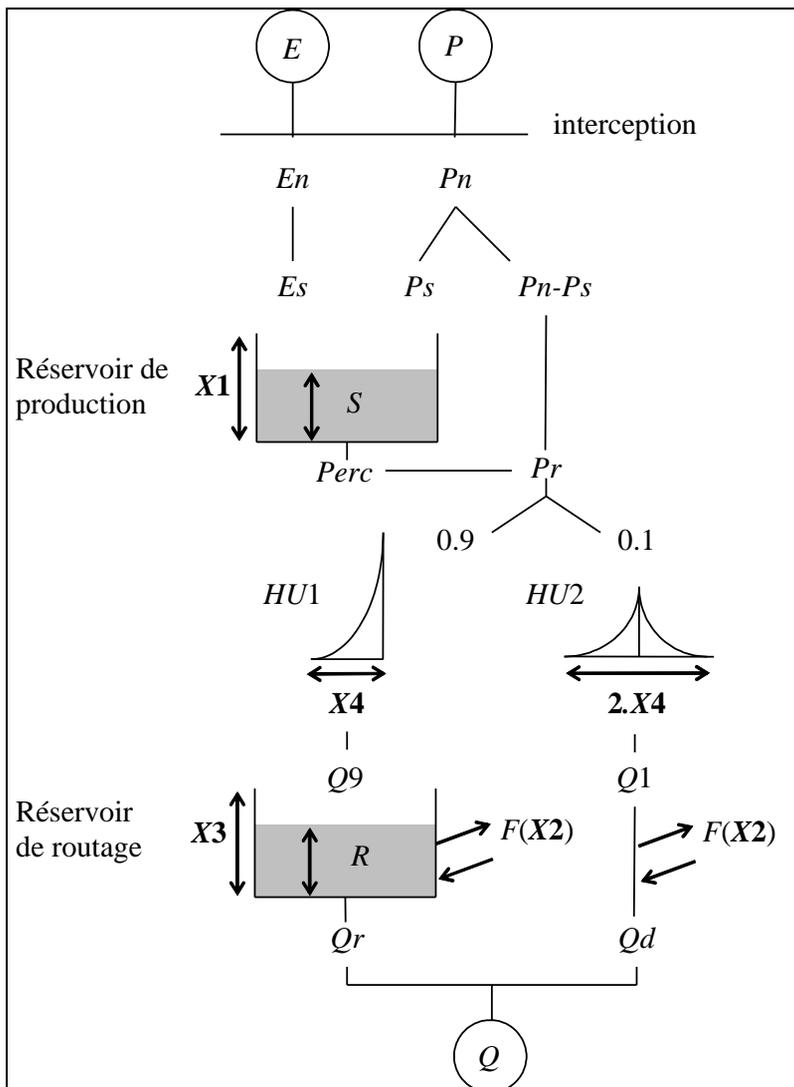


Figure 12 : Schéma du modèle GR4J

Source : Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003)

On désigne par P (mm) la hauteur de la pluie et par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP).

2.4.4.7. Principe du modèle GR4J

Le modèle GR4J se présente dans un tableur Excel et permet de simuler des valeurs journalières de débit grâce aux données journalières de pluie moyenne du bassin P (mm) ; d'évapotranspiration potentielle ETP (mm) et des débits Q (m³/s) observés. C'est un modèle à deux réservoirs régulés par quatre paramètres optimisables afin d'approximer au mieux la relation Pluie - Débit. Il intègre des hydrogrammes unitaires et une fonction d'échange en eau permettant de réguler les échanges avec l'extérieur du bassin. Les réservoirs pris en compte sont :

- **La neutralisation**

La première opération est la neutralisation sur un pas de temps de la lame d'eau précipitée P par une évapotranspiration potentielle E pour déterminer une pluie nette P_n et une évapotranspiration nette (E_n). Ceci permet de traduire le phénomène de reprise directe par l'atmosphère de l'eau de pluie tombée sur le sol et la végétation. En cas de non-consommation totale de la pluie nette alimentera les autres parties du modèle. La neutralisation est assimilable à une fonction d'interception avec un réservoir de capacité nulle :

- si $P > E$ alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$

- si $P < E$ alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P_n$

- **La fonction de production**

Cette fonction est directement liée au fait que les volumes d'eau écoulés correspondent à une fraction de la pluie tombée. Ainsi, cette fonction a pour but de répartir la part de la pluie qui alimente le débit, celle qui sera évaporée ou perdue vers l'extérieur du bassin et celle qui sera stockée.

- une partie P_s de la pluie nette P_n alimente le réservoir de production ;
- une quantité d'évapotranspiration E_s est retirée du réservoir à un taux dépendant de la disponibilité en eau ;
- la part de la pluie qui alimente le débit est $P_n - P_s$ à laquelle on ajoute une percolation (Perc) issue du réservoir.

- **La fonction de routage**

Cette fonction traduit le fait que les variations de débits sont plus lissées que les variations de pluie et de plus interviennent avec un certain retard. Ainsi la fonction de routage permet de réaliser une

répartition temporelle des quantités d'eau. La répartition est effectuée grâce aux hydrogrammes unitaires et au réservoir de routage qui reconstituent la réponse en débit à une séquence de pluie. Pour une pluie donnée jusqu'à un pas de temps donné l'hydrogramme donne le débit engendré par cette pluie aux différents pas de temps successifs. La sortie Q à un pas de temps i est alors la somme des pluies jusqu'au pas de temps i pondérées par les ordonnées de l'hydrogramme.

- **La fonction d'échange**

Une dernière fonction est introduite pour traduire les phénomènes d'apport ou de perte vers des nappes profondes ou l'extérieur topographique du bassin.

- **Paramètres**

Le modèle GR4J ne comporte que 4 paramètres à caler qui sont censés représenter l'hydrologie du bassin :

- X1 : capacité du réservoir de production (mm)
- X2 : coefficient d'échange souterrain (mm)
- X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)
- X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire décalage temporel entre pluie et débit (heures).

2.4.4.8. Calage et validation

Le calage a pour but d'établir une concordance entre les variables simulées et observées en modifiant les paramètres hydrologiques et hydrauliques en vue de les estimer avec plus de certitudes. Il consiste à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible (Madsen, 2000). Le critère utilisé est le critère des moindres carrés des erreurs, présenté sous la forme adimensionnelle du critère de Nash borné. L'opération de calage consiste à trouver des valeurs des paramètres du modèle qui minimise l'erreur de modélisation sur la période considérée.

La validation est l'application d'un modèle sur les données qui n'ont pas été utilisées lors du calage d'un modèle ; tout en gardant constantes les valeurs des paramètres obtenues lors du calage. Le calage et la validation se font donc sur deux périodes différentes. L'an (2004) est choisi comme période de mise en route du modèle. La période de 2005-2010 correspond à la période de calage et la période de 2016 à 2019 correspond à la période de validation.

2.4.4.9. Evaluation de la qualité du modèle

Pour l'évaluation de la performance du calage, une observation visuelle des hydrogrammes simulés et observés est effectuée d'une part et une observation quantitative basée sur la vérification des indices de performance est fait afin de voir la qualité des ajustements. Les indices de performance vérifiées sont :

✓ Le critère de Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe , 1970) noté en générale NS ou NSE. Le coefficient de Nash-Sutcliffe mesure le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées. Il est compris entre $-\infty$ et 1 calculé selon la formule suivante :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^N ((Q_{simi} - \overline{Q_{obsi}})^2)} \quad (22)$$

Avec

$\overline{Q_{obsi}}$: Débit moyen observé (m^3/s)

Q_{obsi} : Débit observé au pas de temps i (m^3/s)

Q_{simi} : Débit simulé au pas de temps i (m^3/s)

N : Le nombre de valeurs de la série

✓ Le coefficient R^2 qui décrit la dispersion combinée des séries observées et simulée en comparaison des dispersions de chacune des séries. Il est compris entre 0 et 1. Lorsque sa valeur tend vers 1, cela indique une diminution de l'erreur de la variance. Il est calculé par la formule suivante :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N ((Q_{obsi} - \overline{Q_{obsi}})(Q_{simi} - \overline{Q_{simi}}))}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - \overline{Q_{obsi}})^2) \sum_{i=1}^N (Q_{simi} - \overline{Q_{simi}})^2}} \quad (23)$$

2.4.4.10. Etablissement des composantes du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique consiste à comparer le flux total entrant dans le bassin versant et la quantité du flux qui en sort. En raison des données disponibles, les termes du bilan hydrologique qui sont ressortir sont : la pluviométrie, l'écoulement, l'évapotranspiration réelle et la variation du stock d'eau dans le sol suivant la formule :

$$\mathbf{P} = \mathbf{R} + \mathbf{ETR} + \mathbf{\Delta s} \quad (24).$$

P : précipitation (mm) estimé à partir de la formule (18)

ETR : évapotranspiration réelle (mm) estimé à partir de la formule (21)

R : écoulement de surface (mm) généré par le modèle (Débit observé)

ΔS : variation du stock d'eau dans le sol (mm)

Chapitre 3 : Résultats et discussions

Ce chapitre présente les résultats obtenus et discussions pour chaque objectif spécifique notamment l'évaluation du potentiel en bas-fonds du bassin versant de l'Okpara ; l'évaluation des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara et leurs impacts sur la gestion des bas-fonds puis la modélisation hydrologique dans le but d'évaluer la ressource en eau et l'efficacité de ce modèle à simuler la relation pluie-débit du bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua.

3.1-Evaluation du potentiel en bas-fonds du bassin versant de l'Okpara

L'extraction des bas-fonds du bassin versant de l'Okpara a tenu compte d'un certain nombre de critères tel que : l'indice de végétation calculé à partir de l'image Landsat OLI, des pentes et des zones de fortes accumulations d'eau d'une part et des données GPS pour la validation d'autres.

3.1.1. Application des critères

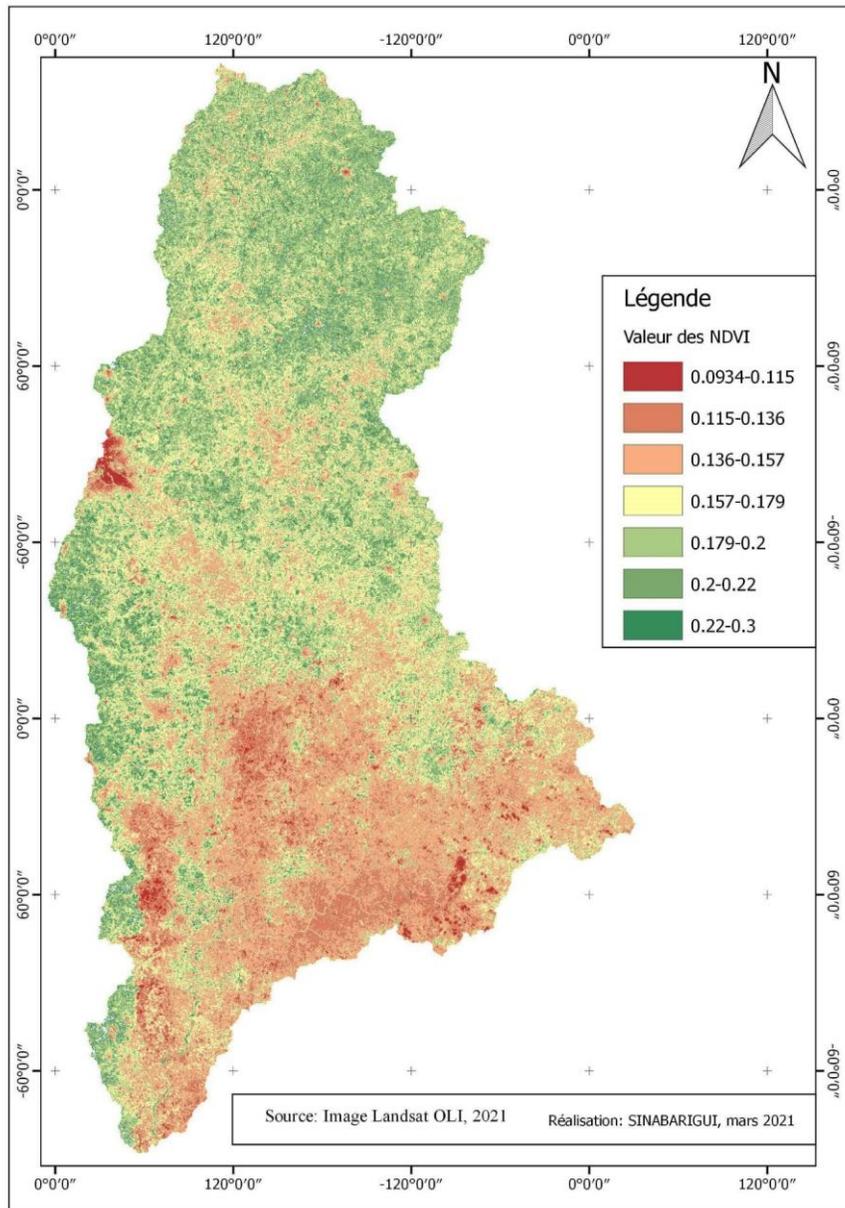


Figure 13: Application des critères d'indice normalisé de végétation

Source : Nos travaux, 2020

L'analyse de la Figure 15 montre que les NDVI varient de 0.09 à 0.3 dans le bassin versant de l'Okpara. Il ressort de cette analyse que les zones à forte réflectance sont plus concentrées dans la partie amont du bassin. Ces zones de forte réflectance montrent la densité importante de végétation

au niveau des zones humides, ainsi que le degré d'humidité du sol contenant une bonne quantité de biomasses. L'extraction de ces zones est montrée par la Figure 16 ci-dessous.

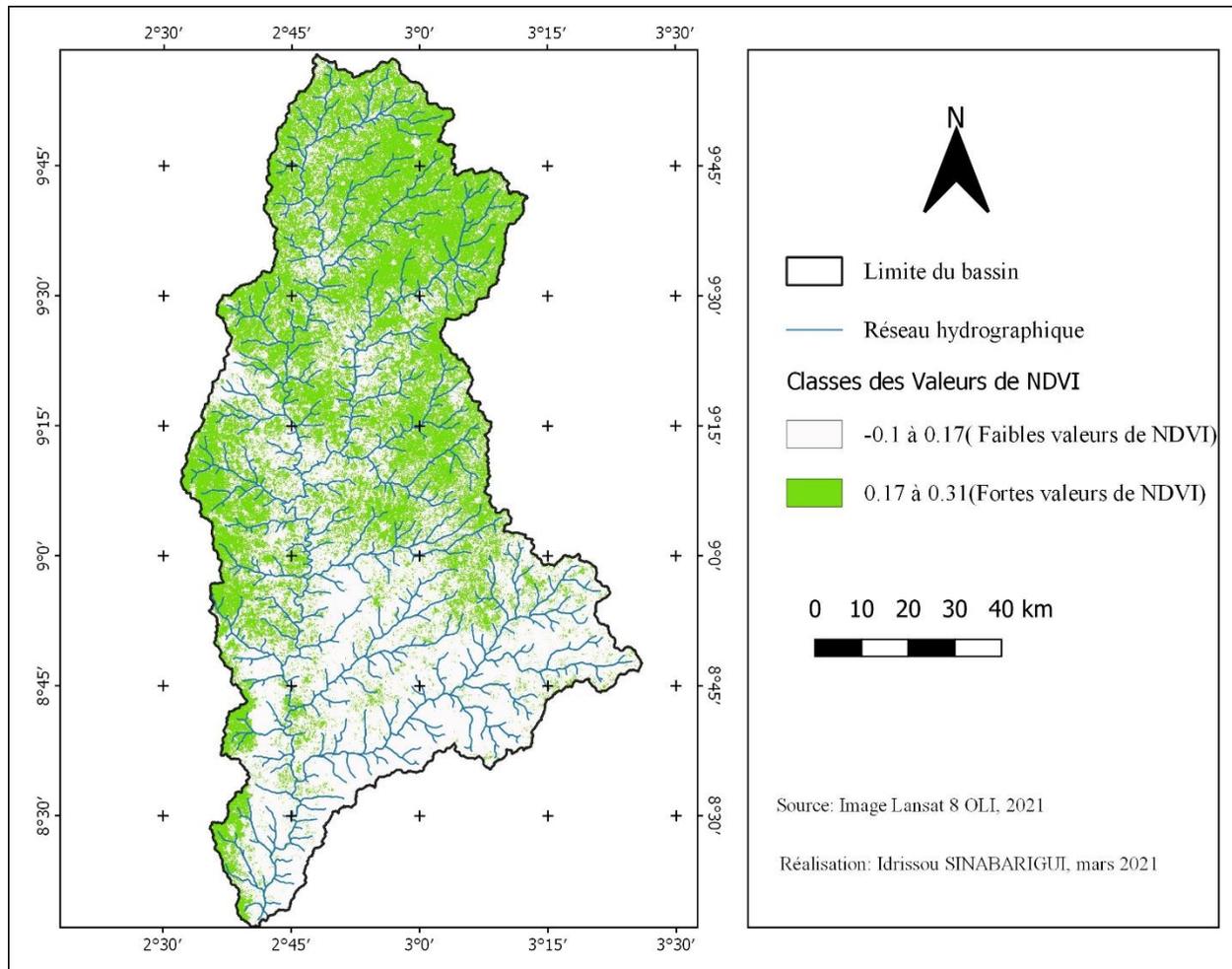


Figure 14: Extraction des fortes valeurs de NDVI

Source : Nos travaux, 2020

Les zones ayant une forte réflectance où la valeur du NDVI est comprise entre 0,17 et 0,31 indiquent la présence d'importantes végétations et d'humidité de sol, caractéristiques des écosystèmes de bas-fonds. Constatons que ces zones sont plus concentrées dans la partie amont du bassin.

Le modèle numérique d'altitude (MNA) généré (Figure 17) présente les différentes facettes topographiques du bassin versant de l'Okpara.

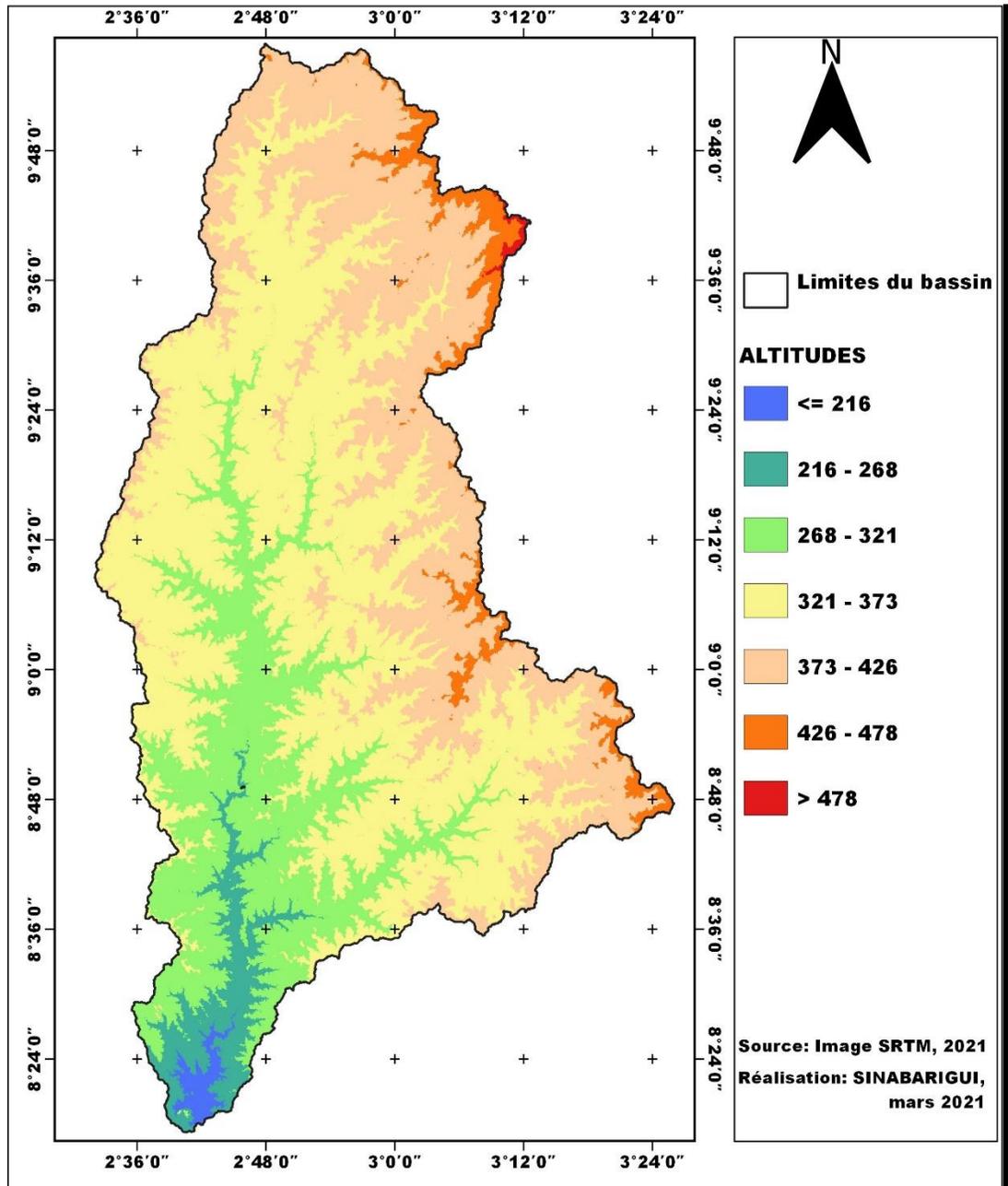


Figure 15: Distribution des altitudes dans le bassin

Source : Nos travaux, 2020

Cette Figure montre les zones les plus surélevées notamment la partie supérieure du bassin et sa partie située dans le Nigéria. On note également une faible élévation vers les lits des cours d'eau et qui se réduit progressivement jusqu'à l'exutoire qui est naturellement la partie la plus basse d'un bassin versant.

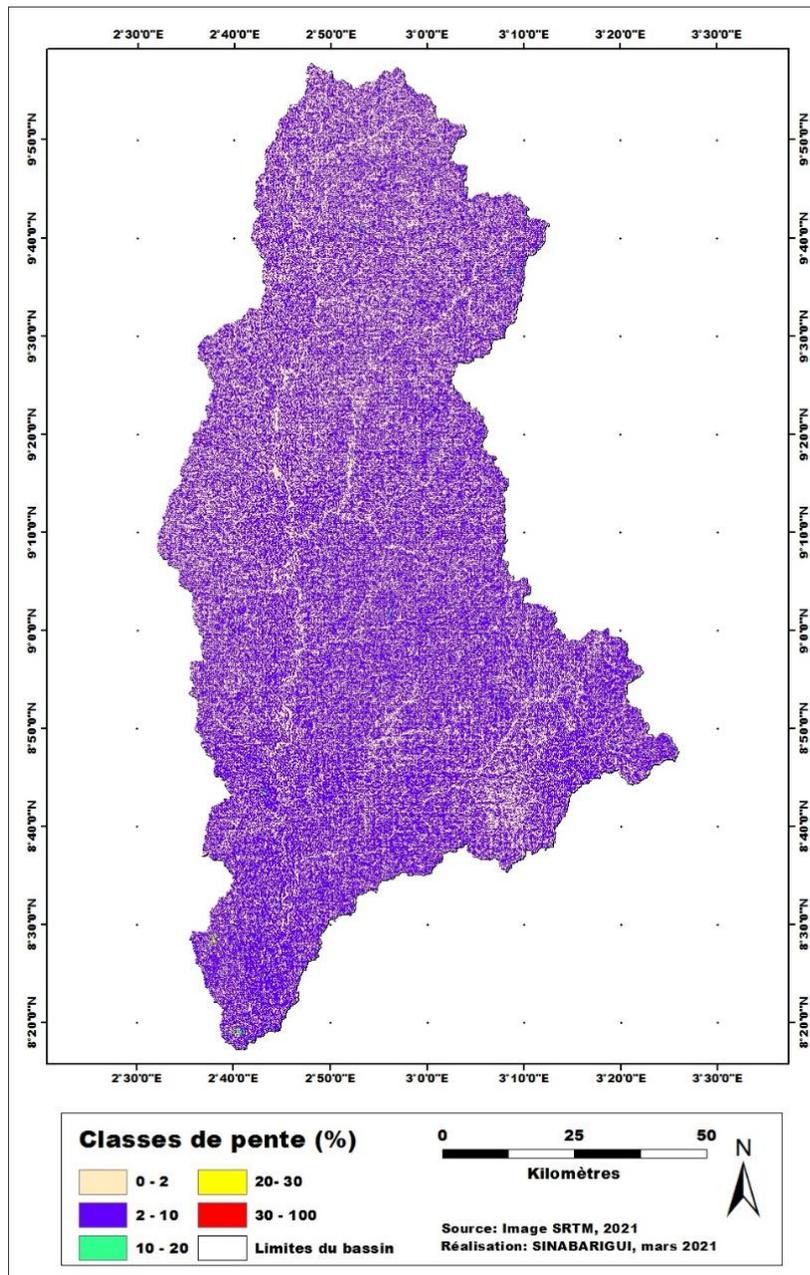


Figure 16: Distribution des pentes dans le bassin

Source : Nos travaux, 2020

La carte des pentes (Figure 18) est obtenue à partir du modèle numérique d'altitude du bassin. L'analyse de cette Figure montre que les pentes varient de 0 à 7 % et indique la présence des ondulations de terrain qui contribuent à la mise en place des écosystèmes de bas-fonds.

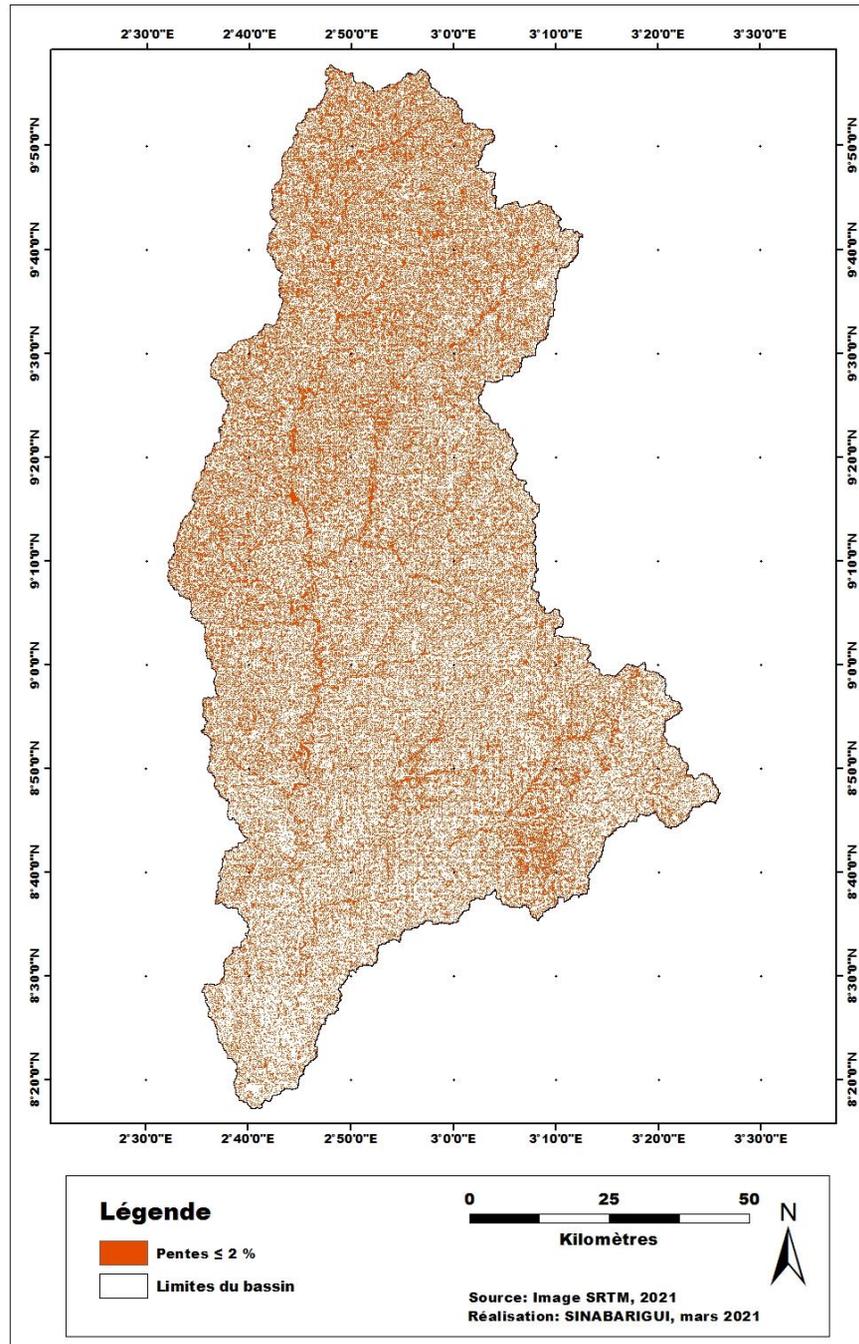


Figure 17: Classification et extraction des zones à faible pente

Source : Nos travaux, 2020

Les faibles pentes ($\leq 2\%$) indiquent la présence des ondulations de terrain qui contribuent à la mise en place des écosystèmes de bas-fonds facilement aménageables.

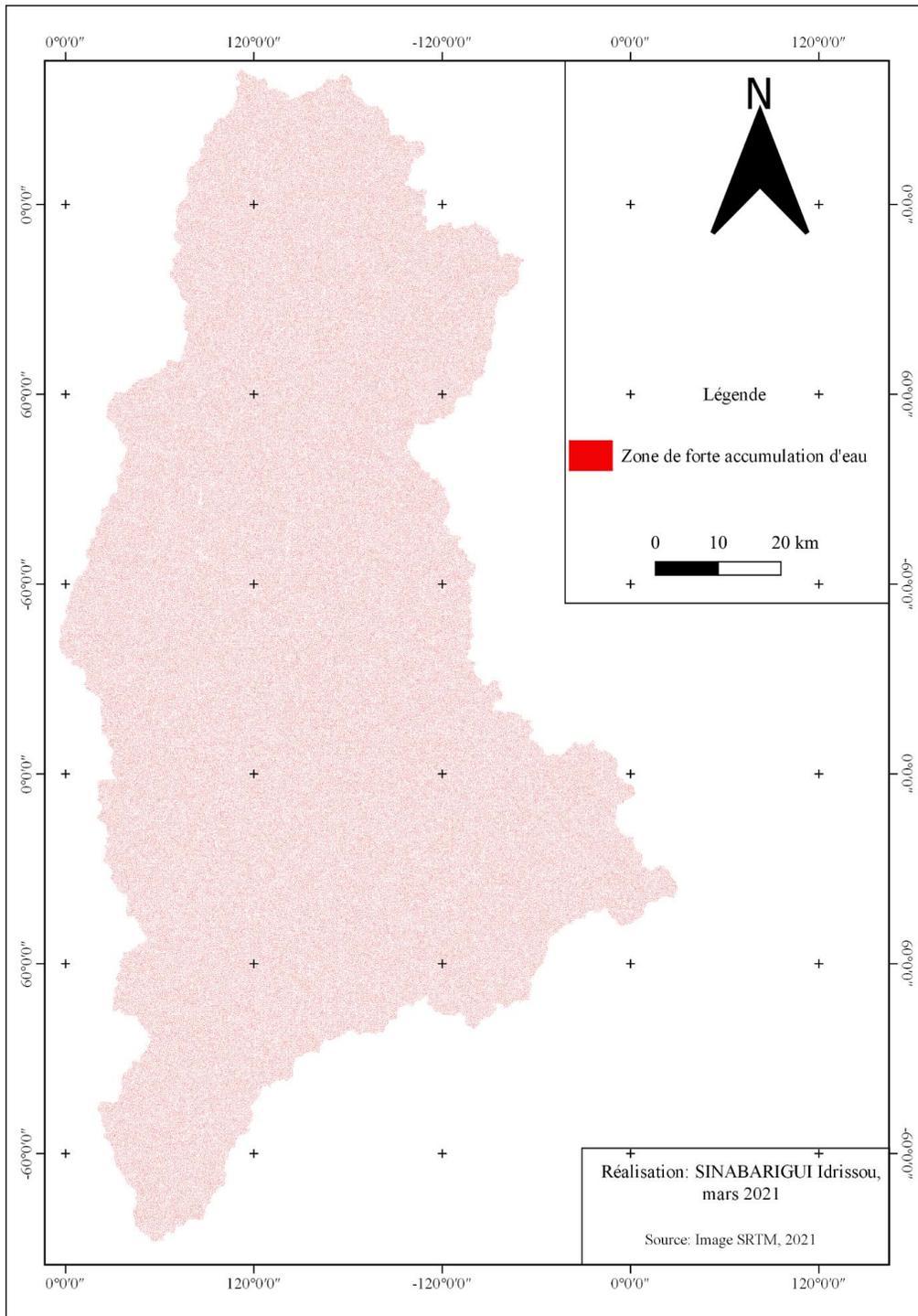


Figure 18: Extraction des zones à forte accumulation d'eau

Source : Nos travaux, 2020

Les zones d'accumulation concernent les zones de rencontre de plusieurs affluents et qui permettent la mise en place des écosystèmes humides.

3.1.2. Potentiel en bas-fonds du bassin versant de l'Okpara

Le potentiel en bas-fonds (Figure 21) est extrait suite à l'intersection des résultats cartographiques issus des critères d'identification préalablement établis et expliqués dans la méthodologie.

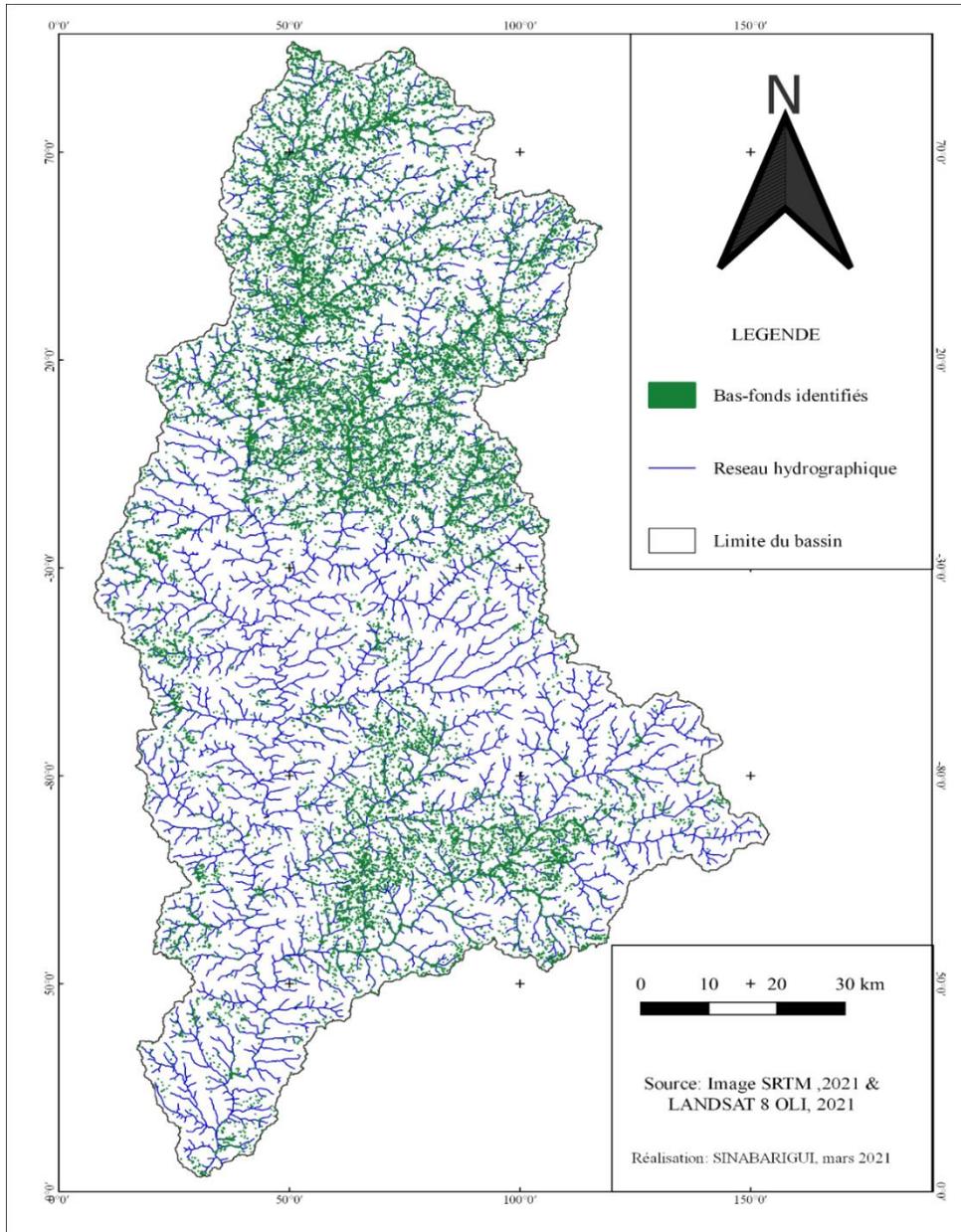


Figure 19: Identification des bas-fonds

Source : Nos travaux, 2020

La Figure 21 montre que notre zone d'étude est pourvue en bas-fonds. 21405 bas-fonds de superficie compris entre 0.1 ha à 50 ha ont été identifiés sur tout le bassin avec 15866 situés au Bénin couvrant une superficie de 4839 hectares environ soit 51,5 % de la superficie totale du bassin.

Les bas-fonds aménageables ayant une superficie inférieure ou égale à 25 ha ont été extraits à partir d'une requête spatiale (Figure 22).

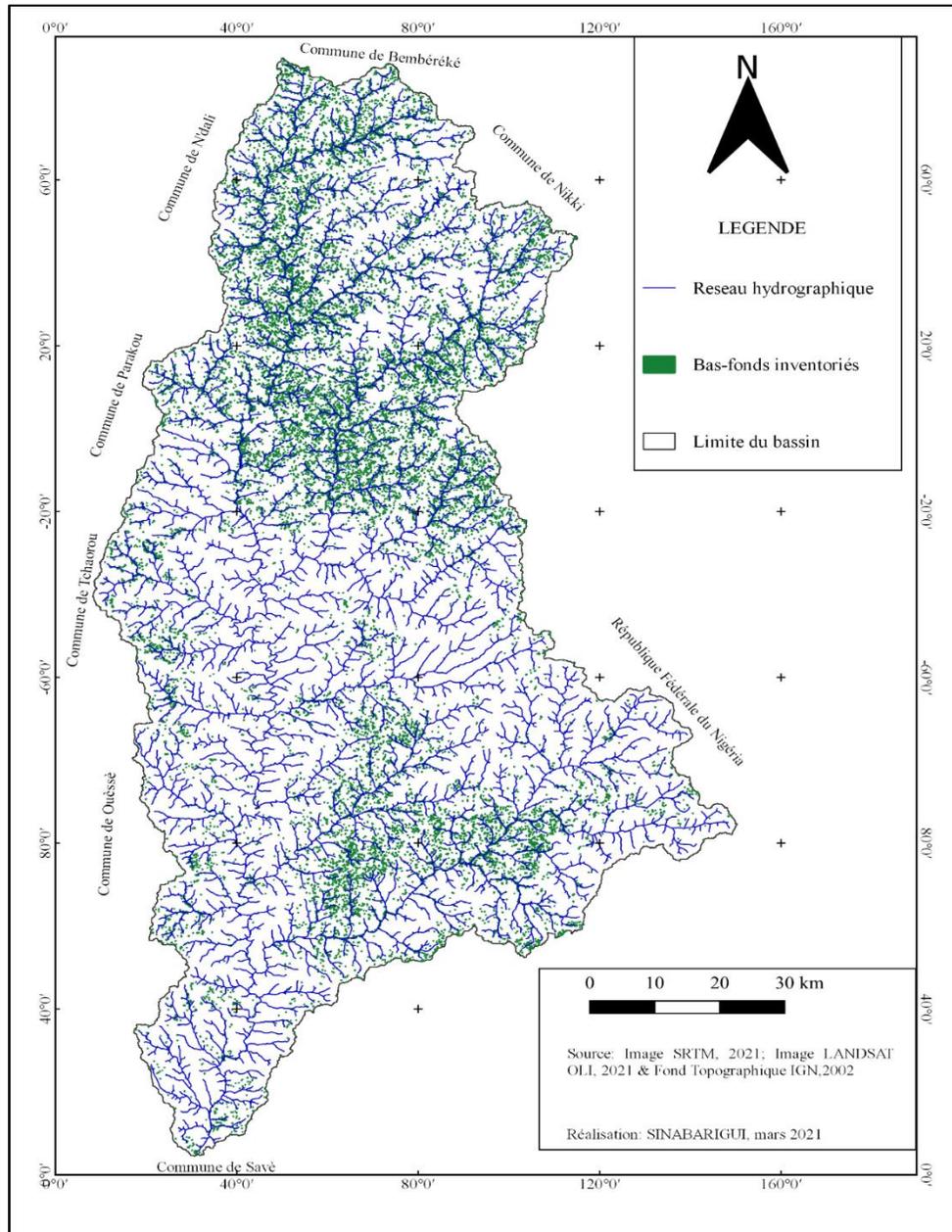


Figure 20 : Potentiel en bas-fonds aménageables ayant une superficie inférieure ou égale à 25 ha

Source : Nos travaux, 2020

De l'analyse de la Figure 22, il ressort qu'environ 21401 bas-fonds inventoriés sur tout le bassin avec 15862 bas-fonds sur le territoire béninois ont une superficie inférieure ou égale à 25 ha et sont facilement aménageables. Ils couvrent une superficie de 6228,2 ha, soit 67 % de la superficie totale du bassin.

3.1.3. Validation de l'approche de cartographie proposée

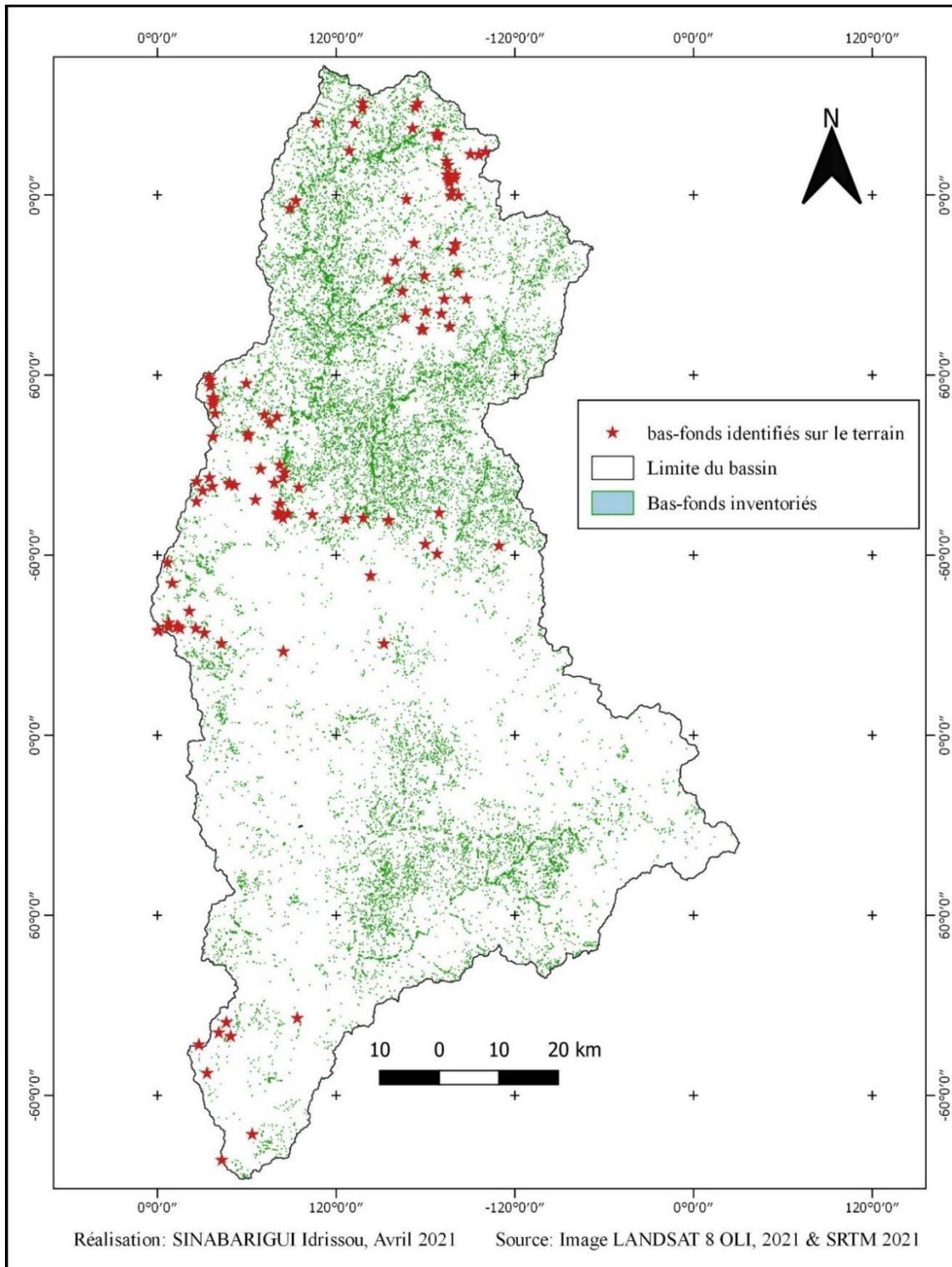


Figure 21 : Validation des résultats

Source : Nos travaux, 2020

La validation des résultats (Figure 23) repose sur la superposition des relevés GPS des bas-fonds aménagés ou non sur ceux inventoriés par traitement d'images satellitaires comme présenté par Souberou K. al (2016). L'analyse de cette Figure montre que 103 sur les 120 bas-fonds trackés sur le terrain soit environ 85,83 % correspondent aux bas-fonds inventoriés par traitement numérique d'images satellitaires. La superposition de ces différents points a permis de confirmer les critères d'inventaire par traitement numérique des images.

3.2- Etude des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara

3.2.1. Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Okpara à Kaboua

Le tableau ci-dessous est un tableau synthèse des caractéristiques de forme du bassin versant de l'Okpara.

Tableau 5: Caractéristiques de forme du bassin versant de l'Okpara à Kaboua

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Longueur du rectangle équivalent	L	km	389.63
Largeur du rectangle équivalent	l	km	24.34
Périmètre	P	km	829.4
Air	A	Km ²	9406
Indice de compacité (Gravelius, 1914)	KG		2.4
Indice global	IG	m / km	0.38
Dénivelée	D	m	150
Dénivelée spécifique	DS	m	37.34
Indice de pente moyenne du lit	Im	m / km	40.36

Source : Nos travaux, 2020

Il ressort de l'analyse de ce tableau que le bassin versant de l'Okpara à Kaboua a une superficie de 9406 km². Son périmètre est de 829.4 km et il a une longueur et une largeur respectivement de 389.63 km et 24.34 km. Le coefficient de GRAVELIUS est égal à 2.4 donc dépasse largement l'unité. Ce bassin est alors très allongé, ce qui favorise les faibles débits de pointe de crue (crue lente), ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus important. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration. Sa pente moyenne est de 40.36 m/km. Cela implique que la pente du lit est modérée. L'indice global de pente (IG) qui est de 0.38 est caractéristique d'un relief fort d'après la classification de l'ORSTOM. La dénivelée spécifique (Ds) du bassin

versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua est de 37.34 m. Ceci indique que le relief est de type R5 (Tableau 6) donc assez faible. Cela implique que le relief est peu élevé et le bassin est exposé à l'érosion hydrique.

3.2.2. Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Okpara

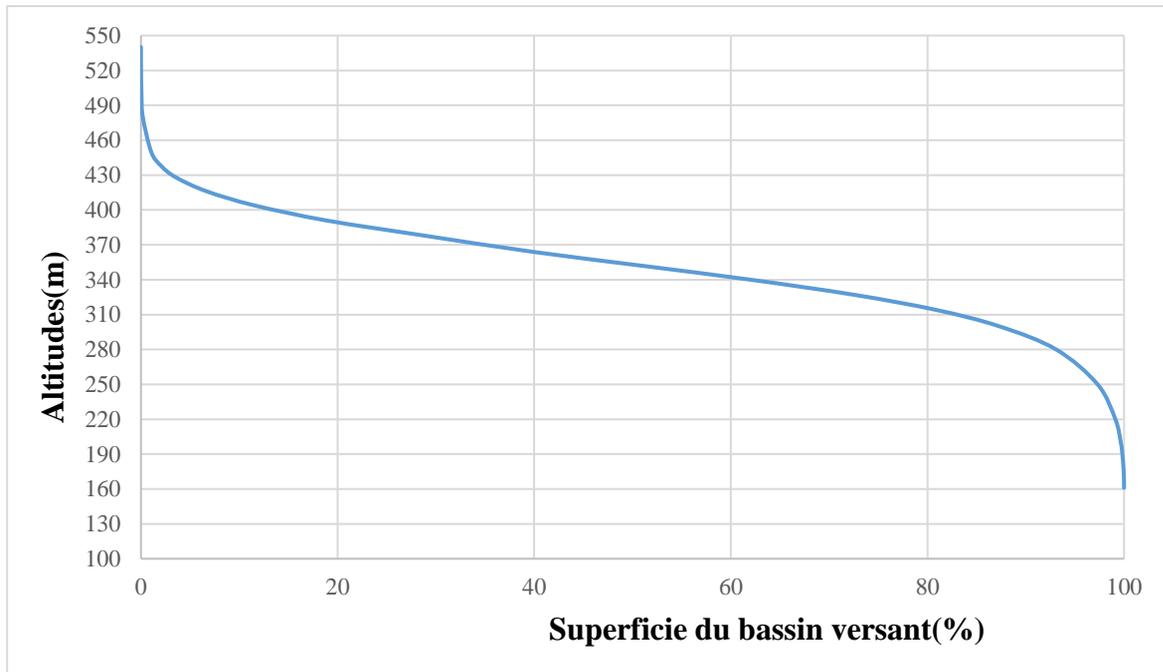


Figure 22: Courbe hypsométrique du bassin de l'Okpara à Kaboua

Source : Nos travaux, 2020

La répartition des altitudes en fonction des pourcentages des surfaces cumulées a permis de tracer la courbe hypsométrique du bassin versant de l'Okpara à Kaboua (Figure 24). Celle-ci reflète par sa forme l'allure des pentes et leurs répartitions en altitudes. Son allure indique que ce bassin versant est en état de maturité. De cette courbe, les altitudes suivantes ont été déterminées :

- L'altitude maximale de 540 m correspondant au sommet du bassin versant ;
- L'altitude minimale (exutoire) de 161 m ;
- L'altitude médiane correspondant à une surface cumulée de 50% est égale à 355 m ;
- L'altitude moyenne est 351.85 m calculées suivant la formule (8) ;
- L'altitude 5% qui est de 420 m ;
- L'altitude 95% est de 270 m.

L'altitude minimale et maximale permettent de déterminer l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente qui influe sur la vitesse d'écoulement et favorise l'érosion hydrique. L'altitude 5% et l'altitude 95% interviennent dans la détermination de la dénivelée du bassin versant. Cette répartition altitudinale de relief du bassin a une influence directe sur le régime hydrologique du bassin et sur l'ensemble de la dynamique érosive (**Boudjadja C. et Khaled L., 2018**).

3.2.3. Réseau hydrographique et paramètres caractéristiques

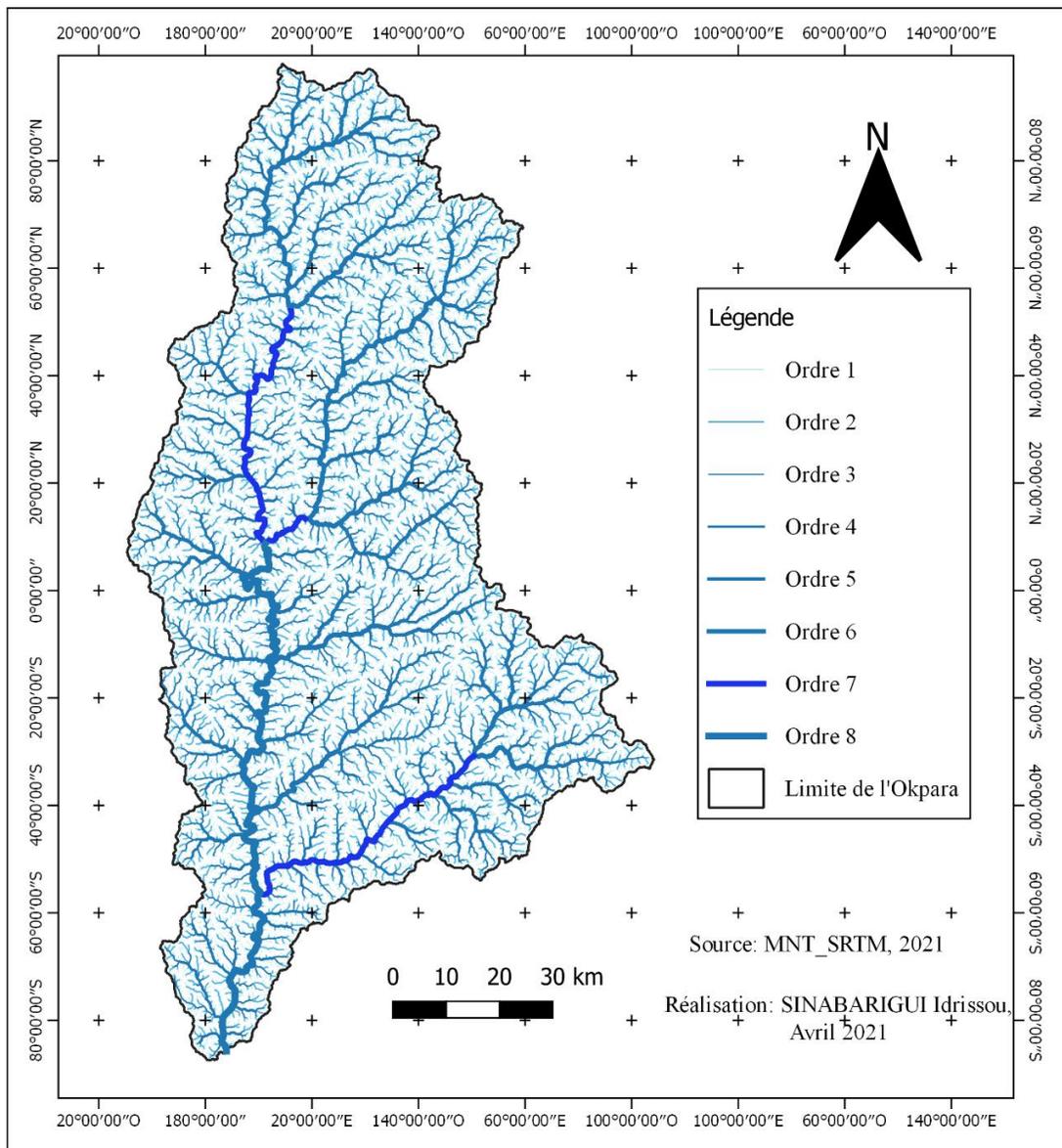


Figure 23: Classification du réseau hydrographique selon le système de Strahler (1975)

Source : Nos travaux, 2020

De l'analyse de la Figure 25, le réseau hydrographique du bassin versant de l'Okpara à Kaboua selon le système de Strahler est d'ordre 8. Ce qui indique que ce réseau est vieux, car, il est assez ramifié et influencé par l'abondance des pluies et la pente du terrain (Strahler. 1975).

Le tableau 6 ci-dessous résume les différents paramètres qui caractérisent le réseau hydrographique du bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua.

Tableau 6: Caractéristiques du réseau hydrographique du bassin versant de l'Okpara à Kaboua

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Longueur Talweg	LT	km	275.28
Longueur du réseau	Li	km	12390
Densité de drainage	Dd	Km/km ²	1.32
Constante de stabilité des cours d'eau	C	-	0.76
Densité hydrographique	F	Km ⁻²	2.32
Pente moyenne du cours d'eau		m/km	1.38
Coefficient de torrentialité	Ct	km/km ⁴	2.23
Classification du réseau hydrographique	-	-	8
Rapport de confluence	Rc	-	1.3 – 2.3

Source : Nos travaux, 2020

De l'analyse des tableaux 5 et 6, on retient que la longueur du cours d'eau principal est de 275.28 km la longueur totale du réseau hydrographique est 12390 km, la densité de drainage du bassin est 1.32 km/km². La densité hydrographique est de 2.32 km⁻². La pente moyenne du cours d'eau est 1.38 m/km et la classification du réseau hydrographique selon le système de Strahler est d'ordres 8 (Figure 25). La Constante de stabilité des cours d'eau est 0.76. La pente moyenne du cours d'eau étant douce (1.38 m/km) donne le temps à l'eau de s'infiltrer entièrement ou partiellement dans le sol. La faible densité de drainage révèle que le réseau hydrographique est peu dense. Cela traduit également que le bassin présente dans son ensemble une formation géologique perméable dont l'écoulement est plutôt limité et que l'infiltration est élevée. La densité de drainage faible de même que celle hydrographique (les deux facteurs allant souvent de pair) présentent en général une région à substratum très perméable à couvert végétal important et à un relief peu accentué. La valeur du coefficient de torrentialité (2,23 km/km⁴) montre que le bassin versant de l'Okpara ne présente pas des caractéristiques morphométriques adaptées à l'écoulement et qu'il est constitué par des formations perméables dont l'infiltration est importante. La valeur du rapport de confluence varie de 1,3 à 2,3 selon l'ordre des cours d'eau considéré, cela indique que la géologie du bassin versant

de l'Okpara à Kaboua influence fortement l'écoulement (Strahler, 1964). La longueur du cours d'eau principal et la longueur totale du réseau hydrographique indiquent que le bassin versant de l'Okpara à Kaboua est assez ramifié ce qui influence l'écoulement de l'eau à l'exutoire. Mais la faible valeur de la constante de stabilité des cours d'eau (0,76), permet de dire que le bassin versant de l'Okpara à Kaboua est moins érodable (SCHUMM, 1956).

3.3-Evaluation des ressources en eau du bassin à l'exutoire de Kaboua

3.3.1. Calage et validation des résultats du modèle GR4J

Pour une meilleure approximation et une bonne simulation, nous avons opté pour une méthode de calage manuel afin de trouver les paramètres optimaux.

Les périodes modélisées sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7: Périodes de simulation du modèle GR4J

Périodes de simulation	Fonction
01 /01/2004-31/12/2004	Mise en route
01 /01/2005-31/12/2010	Calage
01 /01/2016-31/12/2019	Validation

Source : Nos travaux, 2020

L'exécution du modèle passe par le changement des valeurs des paramètres X1, X2, X3 et X4 manuellement. Les paramètres optimaux résultant du calage et le Nash sont présentés dans le tableau 8.

Tableau 8: Résultats obtenus pour le calage du modèle GR4J

Paramètres Réels				Critères			
X1(mm)	X2(mm/j)	X3(mm)	X4(j)	Nash(Q)	Nash (VQ)	Nash (ln(Q))	R ²
409.5	1.917	144.33	4.231	0.725	0.668	0.188	0,645

Source : Nos travaux, 2020

Les valeurs des critères de performances de Nash et de R² sont satisfaisantes (respectivement 72.5% et 64.5%). Analysons à présent le graphique issu du calage (Figure 24) :

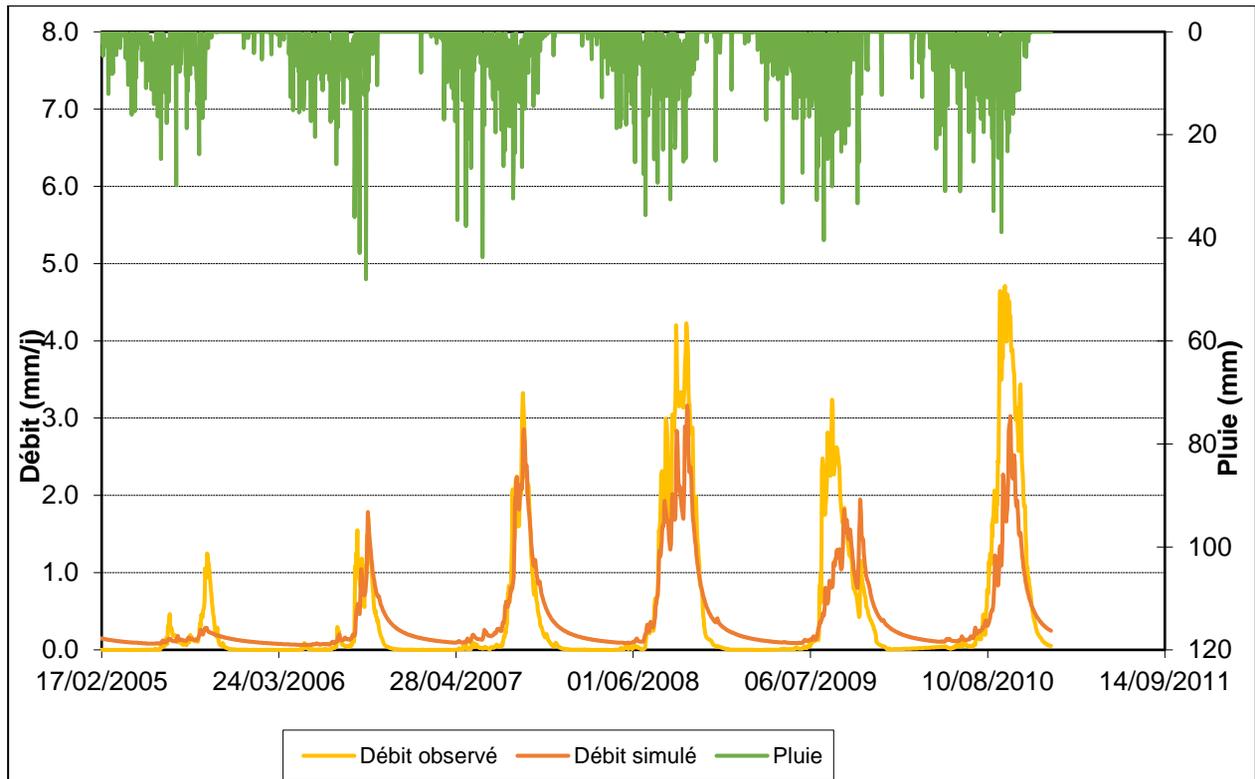


Figure 24: Visualisation de la qualité du calage sur 6 ans

Source : Nos travaux, 2020

D'après l'analyse de la Figure 26, nous pouvons remarquer que le graphe des débits modélisés suit le parcours de ceux observés notamment pour les débits de crues (périodes de juillet à Octobre des années 2007, 2008, 2009 et 2010). Cependant, la crue de 2005 a été sous-estimée et celle de 2006 a été surestimée. Toutefois, on note un léger décalage dans la représentation des débits de crue de l'année 2009. Quant aux débits d'étiages, ils sont bien représentés par le modèle. Pour rassurer de la fiabilité de ces résultats de simulation, nous avons déterminé le coefficient de corrélation (R^2) sur la période de calage.

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observée et débit simulé, une représentation de la répartition des points selon la droite $y = ax + b$ (Figure 27) est importante pour déceler l'alignement des points de ces débits.

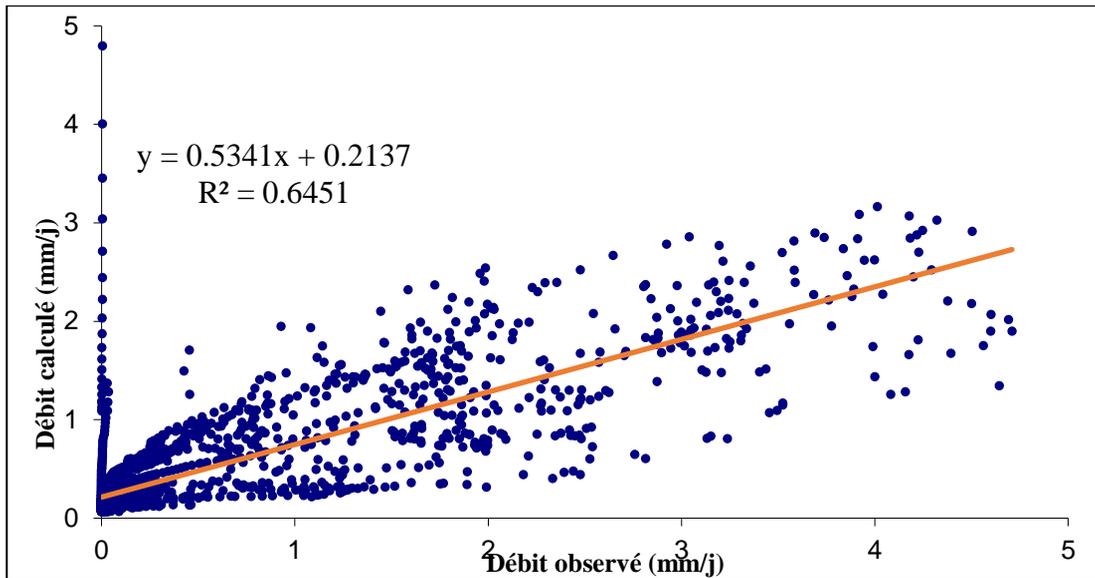


Figure 25: *Corrélation entre les débits observés et les débits simulés de la période de calage*

Source : Nos travaux, 2020

L'analyse de ce graphe (Figure 27), montre que les nuages de points sont alignés autour de la droite d'équation $y = 0,5341x + 0,2137$ à l'exception de quelques points. Il en ressort de ces analyses que des résultats obtenus sont satisfaisants lors du calage. Il sera donc primordial de voir la performance du modèle dans la validation. Pour la validation, de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période (01/01/2016-31/12/2019) ont été utilisées. Le tableau suivant présente les résultats issus de la validation.

Tableau 9: Résultats obtenus pour la validation du modèle GR4J

Paramètres Réels				Critères			
X1(mm)	X2(mm/j)	X3(mm)	X4(j)	Nash(Q)	Nash (VQ)	Nash (ln(Q))	R ²
409.5	1.917	144.33	4.231	0.653	0.670	0.357	0.6695

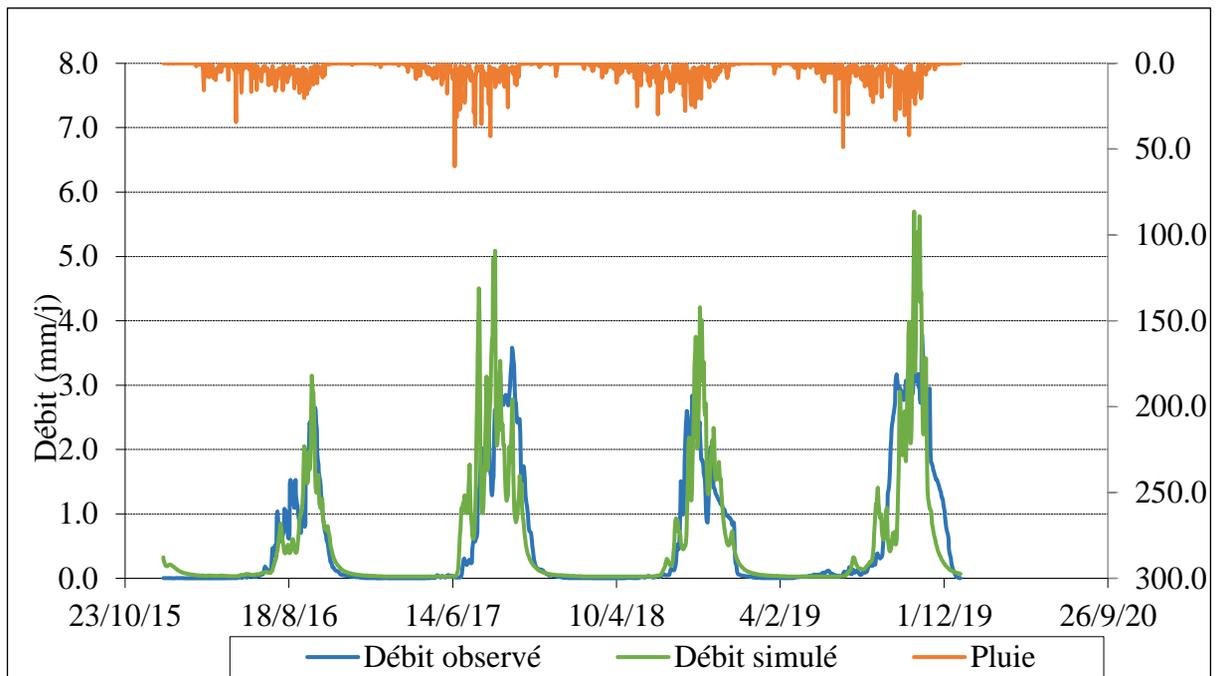


Figure 26: Visualisation de la qualité de validation sur 4 ans

Source : Nos travaux, 2020

L'analyse de la Figure 28 révèle une bonne représentation de la période d'été par le modèle. Les débits moyens ont été bien simulés. On peut toutefois remarquer une légère sous-estimation de ces débits en 2018 et 2019. Le Nash (65.3%) est acceptable. Les périodes de crue sont bien représentées par les modèles. Mais on note une mauvaise estimation des débits d'été avec un $\ln(Q) = 35.6\%$. Les pics de 2017, 2018 et 2019 ont été surestimés tandis qu'on note une bonne estimation en 2016. On peut dire que le modèle GR4J n'arrive pas à très bien simuler les débits élevés contrairement à ceux faibles.

Pour vérifier si le calage est bien fait, il est important de représenter la répartition des points selon la droite $y = ax + b$ (Figure.29).

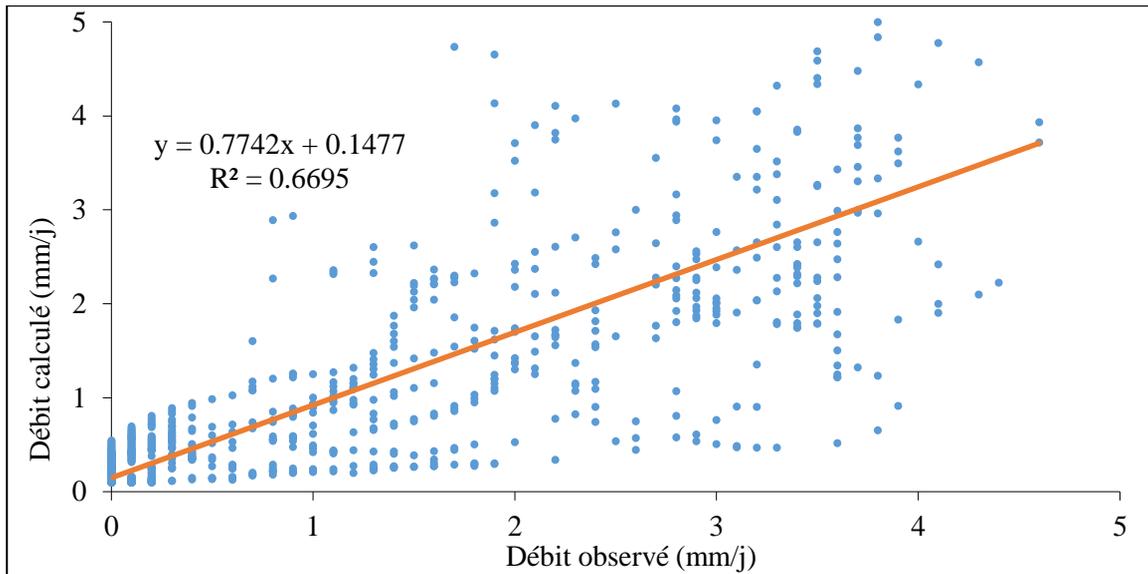


Figure 27: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés de la période de validation

Source : Nos travaux, 2020

On constate également de ce graphe (Figure 29) que les points sont disposés autour de la droite de régression $y = 0,7742x + 0,1477$. Le coefficient de corrélation issu de la validation est de 66,95% contre 64,51% lors du calage. La corrélation linéaire entre le débit observé et celle calculée donne donc une relation significative avec un coefficient de corrélation supérieure à 60%.

3.3.2. Modélisation pluie-débit dans le bassin versant de l'Okpara

Les données de débits dans le bassin de l'Okpara sont disponibles de 1980 à 1988 ; de 1994 à 2004 et de 2016 à 2019, celles des précipitations sont disponibles de 1980 à 2019. Afin de disposer de la même période entre débits et précipitations, les périodes 2002 à 2010 et de 2016 à 2019 ont été utilisées. En conséquence, le modèle a été calé sur la période 2005 à 2010 avec 2004 comme année de mise route et validés sur la période 2016 à 2019. Les performances en calage et en validation du modèle hydrologique sont présentées dans le tableau 10. La dynamique des débits du bassin de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua est bien captée par le modèle GR4J (Figure 22 et 24) avec de bons coefficients de Nash dont 69% en calage et 58,4% en validation.

Les coefficients de détermination R^2 entre les observations pour les données de terrain et les données de simulations sont également bon aussi bien en calage (64,51 %) qu'en validation (66,95%). Le tableau suivant présente les performances du modèle GR4J lors de la simulation.

Tableau 10: Performance du modèle GR4J

Paramètres initiaux		X1 (mm)	X2 (mm/j)	X3 (mm)	X4(jours)				
		665,14	0,93	27,94	1,26				
Sortie du modèle									
Périodes de simulation		Paramètres Réels				Critères			
Calage	2005-2010	X1	X2	X3	X4	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (ln Q)	R ²
		409,5	1,92	144,33	4,23	0,725	0,668	0,188	0,645
Validation	2016-2019					0,653	0,670	0,357	0,669

Source : Nos travaux, 2020

L'analyse du graphe (Figure 24) et des valeurs des critères obtenus (Tableau 10), montre que les débits observés sont proches des débits simulés. L'objectif principal de la modélisation hydrologique n'est pas de reproduire exactement l'hydrogramme observé, mais que le modèle soit capable de capter la dynamique de cet hydrogramme (N'Tcha M'Po, 2018). Le modèle GR4J capte la dynamique des écoulements et du forçage dans le bassin versant de l'Okpara. Il est de ce fait performant.

3.3.3. Etablissement des composantes du bilan hydrologique

Le tableau 11 présente les valeurs moyennes annuelles des différents termes du bilan hydrologique du bassin versant de l'Okpara à Kaboua.

Tableau 11: Composantes du bilan hydrologique du bassin versant de l'Okpara

Composantes du bilan hydrique	Quantités	
	Calage	Validation
Précipitations totales (P mm)	1158,92	1303,05
Evapotranspiration réelle (ETR en mm)	1024,34	1092,19
Débit observé (mm)	160,66	251,05
Débit simulé (mm)	152,73	247,38
Coefficient de ruissellement observé (%)	13,86	19,27
Coefficient de ruissellement simulé (%)	13,18	18,98
Variation du stock d'eau dans le sol (ΔS en mm)	-18,15	-36,52

Source : Nos travaux, 2020

Ce tableau montre que les ressources en eau de surface sont évaluées à 152,73 mm et 247,38 mm par an respectivement en période de calage et de validation alors que le stock d'eau dans le sol (infiltration et stock de surface) est de -18,15 mm et -36,52 mm an. Le signe négatif de la variation du stock observée révèle un stress hydrique dans le bassin. On note à la fois une baisse de l'évapotranspiration et une augmentation des précipitations sur la période de validation. Ceci a été confirmé par les Indices Standardisés de Précipitation (SPI) en annexe 2 qui montre que la période de validation est plus humide que celle de calage. 13,2 % et 19 % des précipitations respectivement au calage et à la validation, contribue à l'écoulement de surface et la part des précipitations qui est évaporée est de 88,4% au calage et 83,8% à la validation. Ces résultats sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par Sintondji (2005) qui a trouvé que 11,1 % des pluies tombées sur le bassin versant de Térou-Igbomakoro dans la Haute Vallée de l'Ouémé (HVO) contribuent à l'écoulement de surface et 67,3 % sont évapotranspirées. Cela pourrait s'expliquer par la grande différence de taille des bassins versants. En effet, moins le bassin versant est grand, plus vite les eaux atteignent l'exutoire, et plus élevée est la probabilité d'avoir un coefficient de ruissellement plus grand (Sintondji et al, ; 2008).

De l'analyse de ces résultats, il ressort que dans la période de 2016 à 2019, la majeure partie soit 84% des précipitations retourne à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. La lame d'eau moyenne ainsi écoulé s'élève environ à 247 mm par an. Le signe négatif de la variation du stock notée révèle un déficit hydrique dans le bassin versant de l'Okpara.

3.3.4. Appréciation de la disponibilité de l'eau et exploitation des bas-fonds en période d'étiage

Il est à noter ici que le bilan annuel prouve une disponibilité importante de la ressource en eau dans le bassin en général. En effet, le débit moyen annuel est estimé environ à 247,4 mm/an ces dernières années (2016-2019), Ceci permet de dire que le problème de déficit hydrique ou d'assèchement des réservoirs en période d'étiage peut être résolu si on élève le niveau de la maîtrise de cette ressource. Cependant, malgré le niveau bas de maîtrises de cette ressource dans les différentes localités de ce bassin versant, il faut noter que lors de nos travaux de terrain, l'eau est disponible dans certains bas-fonds exploités. Ces eaux sont stockées soit dans les mares, les puits, les barrages, etc..., comme le montrent les photos ci-dessous :



Photo 1 : Trou d'eau exploité dans un périmètre irrigué à Bossi (arrondissement de Tchachou)



Photo 2 : Trou d'eau exploité sur le basfond de Adido kparu (Arrondissement de Tchaorou)



Photo 3 : Puits exploité dans le basfond de Boko (Commune de N'dali)

Source : Nos travaux, Avril 2021



Photo 4 : Mare servant à l'abreuvement du bétail à Parakou

Le constat ici est que bien que la saison sèche battait son plein, il y avait disponibilité de la ressource en eau d'une manière ou d'une autre dans les bas-fonds qui permettaient de faire des cultures de contre saison ou du maraîchage et aussi pour le bétail. Malgré le potentiel élevé en bas-fonds évalué dans le chapitre 2, la plupart sont exploités de façon saisonnière. Toutes fois, certains bas-fonds sont exploités comme le montrent les photos suivantes :



Photo 5 : Basfond de Loko-Gberou, Tchachou
(Avril 2021)



Photo 6: Basfond de Baka, Parakou
(Avril 2021)



Photo 7 : Bas-fond de Boko
Source : Nos travaux, Avril 2021



Photo 8 : Bas-fond de Kika 1, Kika

4. DISCUSSION

Cette étude a permis d'identifier 21405 bas-fonds de superficie allant à 50 ha sur tout le bassin versant de l'Okpara avec 15866 situés au Bénin couvrant une superficie de plus de 4839 hectares. Ce taux d'environ deux (02) bas-fonds à l'hectare est inférieur à ce qu'a trouvé Souberou et al (2016) dans la commune de Matéri soit trois (03) bas-fonds à l'hectare. Cet écart de richesse en bas-fonds peut s'expliquer par la présence d'un relief moins favorable à la mise en place des écosystèmes de bas-fonds dans le bassin versant de l'Okpara. Toutefois, ce bassin versant est pourvu en bas-fonds mais inégalement répartis. De la partie centrale à celle supérieure du bassin, on note une forte concentration en bas-fonds. Ce qui s'explique par le fait que c'est la tête du réseau hydrographique mais aussi c'est une zone de terres plates parsemée de collines. Malgré cette forte concentration des bas-fonds dans cette partie du bassin, le constat sur le terrain a montré une faible exploitation de cette ressource qui est plus exploitée vers le sud du bassin où il y a moins de bas-fonds. La mise en valeur de ces bas-fonds est majoritairement saisonnière comme le montre les photos 1 et 2 de l'annexe 4 où les bas-fonds sont aménagés en attendant la saison de pluie pour être exploités. Oloukoi et al (2009) avaient aussi trouvé que les bas-fonds sont moyennement exploités et le taux d'exploitation diminue au fur et à mesure qu'on évolue du Sud vers le Nord dans le centre Bénin. Néanmoins, cette partie du bassin (Département du Borgou) qui regorge plus de bas-fonds concentre aussi une population très dense (1 122 592 habitants) avec un taux d'accroissement de 4,59 en 2013 (INSAE, RGPH4).

L'évaluation des paramètres morphométriques intervenant dans le comportement hydrologique du bassin versant de l'Okpara a montré que ce dernier est à crue lente, présente un relief peu accentué avec un réseau hydrographique peu dense selon la classification de ORSTOM. Il est caractérisé dans son ensemble par une formation géologique perméable favorisant une bonne infiltration des eaux superficielles et limitant les écoulements. Il est à noter aussi que la faible valeur de la constante de stabilité des cours d'eau (0.76) révèle que le bassin versant de l'Okpara est moins érodable (SCHUMM, 1956) et donc est exposé à l'érosion hydrique. Ce qu'avait montré Dossou-Yovo (2009) qui note une production moyenne de sédiments de 7 tonnes/ha/an pour tout le bassin. En ce qui concerne l'évolution de la dynamique des écoulements de surface, le modèle GR4J utilisé pour la simulation a donné des résultats satisfaisants. Les critères de Nash et de R^2 lors du calage sur la période 2005-2010 sont respectivement de 72,5% et 64, 5% contre 65,3% et 66,9% en validation sur la période 2016-2019. Cependant, il est noté une légère perte de performance dans

la simulation des débits élevés mais le modèle fait preuve d'une bonne performance pour les débits moyens en passant de 66,8% au calage à 67% à la validation. Par contre, le modèle simule très mal les débits d'étiage. Le bilan annuel moyen de la ressource eau disponible à la surface et pour la recharge des nappes a été estimé. La pluie moyenne, l'écoulement de surface, l'évapotranspiration et le stock d'eau sont respectivement évalué à 1230 mm; 200 mm; 1058 mm et -27 mm par an . On note une augmentation de l'écoulement de surface de 13,18 au calage à 18,97% à la validation et de la production moyenne en eau (surface et souterraine) passant de 11,6 au calage à 16,2% à la validation. Ce qui corrobore avec les résultats de Dossou-Yovo (2011) qui a noté une augmentation de l'écoulement de surface (de 10,8 à 14,23%) avec le modèle SWAT en concluant qu'elle est due à la diminution de l'évapotranspiration et de la capacité de rétention en eau du sol. L'appréciation de la disponibilité de la ressource en eau en période sèche fait sur le terrain lors de nos travaux dans le mois d'Avril 2021 (sous-titre 3.4.7) a montré que cette ressource est peu disponible dans les bas-fonds ou mares et des puits à grands diamètres.

Cette étude a révélé le potentiel en bas-fonds du bassin versant de l'Okpara dont la mise en valeur peut permettre de résoudre les problèmes d'appauvrissement des terres et de l'eau, de baisse de la productivité et de production en toutes saisons. Aussi, elle permettra de bonnes prises de décision dans les projets d'aménagement agropastoral puisque ce sont ces bas-fonds, d'après nos constats sur le terrain qui accueillent le pâturage en période sèche.

SUGGESTIONS ET PERSPECTIVES

Au vu de ces résultats, nous suggérons à l'endroit des autorités centrales et communales, la mise en place d'un Programme d'action pour la protection et la gestion des ruisseaux en têtes de bassin versant. Il faut également procéder à l'aménagement des mares et des bas-fonds urbains et périurbains de telle sorte à recevoir une quantité importante des eaux qu'ils drainent. Cela permettra de réduire les inondations et de disposer d'assez d'eau pour d'autres usages ; à la construction des fossés de drainage des centres urbains et péri-urbaines vers les bas-fonds les plus proches ;

Dans ces perspectives, d'autres efforts doivent être mené pour :

- faire respecter une certaine distance des lits des cours d'eau en matière d'installation des cultures pour éviter des inondations et la perturbation du régime hydrologique ;
- construire des ouvrages de protection dans les zones sous menace d'inondation

Aussi, la vulgarisation d'une approche intégrée de l'aménagement de ces bas-fonds est nécessaire. Nous proposons également à tout projet de mise en valeur agropastorale des bas-fonds du bassin versant de l'Okpara de :

- prévoir des ouvrages de lutte antiérosive sur les versants ;
- prévoir des retenues ou des bassins de stockage d'eau pour la conservation des eaux de surface ;
- faire des puits modernes pour le captage des eaux souterraines,

En termes de perspectives de recherche, il serait intéressant d'étudier :

- ✚ la capacité de rétention d'eau des sols au niveau des bas-fonds de ce bassin versant
- ✚ les techniques de gestion des excédents hydriques dans ce bassin versant

CONCLUSION

Le présent travail a été réalisé dans le bassin versant de l'Okpara à l'exutoire de Kaboua. Il a permis de montrer le potentiel en bas-fonds aménageables de ce bassin versant à travers une analyse des critères d'identification de ces zones à haute potentialité agricole et une cartographie de ces bas-fonds. Cette analyse multicritère a pris en compte l'indice de végétation (NDVI), la pente inférieure ou égale à 2%, les zones de forte accumulation d'eau et la superficie du bas-fond inférieure ou égale à 25 ha. 21405 bas-fonds de superficie allant à 50 ha ont été identifiés sur tout le bassin versant avec 15866 situés au Bénin couvrant une superficie de plus de 4839 hectares. La carte du potentiel en bas-fonds réalisée permettra la localisation géographique des zones de forte potentialité agropastorale en vue de pallier les contraintes des changements climatiques. Elle pourra servir dans les projets de développement agricole et pastoral pour la réalisation des ouvrages d'aménagement hydroagricoles et pastoraux.

Les caractéristiques morphostructurales intervenant dans le comportement hydrologique du bassin ont été aussi étudiées à travers l'évaluation des indices morphométriques. Le bassin versant de l'Okpara est de forme allongée, ce qui favorise les faibles débits de pointe de crue (crue lente) en raison du temps d'acheminement important de l'eau à l'exutoire. Le temps de concentration est alors élevé. Le réseau hydrographique est très ramifié et influence de ce fait l'écoulement de l'eau à l'exutoire. La valeur de sa pente moyenne indique que la pente du lit est modérée. L'indice global de pente (IG) est caractéristique d'un relief fort d'après la classification de l'ORSTOM. Ce qui confirme la dénivelée spécifique (Ds) qui indique que le relief est assez fort (élevé) mais montre aussi que le bassin est exposé à l'érosion hydrique. La pente moyenne du cours d'eau étant douce donne le temps à l'eau de s'infiltrer entièrement ou partiellement dans le sol. La faible densité de drainage et la densité hydrographique traduisent que le bassin présente dans son ensemble une formation géologique perméable dont l'écoulement est limité et que l'infiltration est élevée. La valeur du coefficient de torrentialité approuve la présence de cette formation géologique et montre aussi que le bassin versant de l'Okpara ne présente pas des caractéristiques morphométriques adaptées à l'écoulement. Toutefois, ces paramètres permettent de savoir les actions à entreprendre dans le bassin versant pour faciliter la mise en valeur des bas-fonds.

La modélisation avec GR4J sur le bassin de l'Okpara a donné de bons résultats lors du calage. Ces résultats satisfaisants ont été confirmés en validation sur la période de 2016-2019. Les résultats de validation (2016-2019) ont montré, par rapport à ceux obtenus lors du calage du modèle (2005-

2010), une augmentation importante de l'écoulement de surface (de 13,18 à 18,97%) et de la production moyenne en eau (surface et souterraine) passant de 11,6 au calage à 16,2% à la validation.

Le modèle GR4J est un bon outil et peut être utilisé dans la compréhension de la dynamique du bassin versant et des entités qui le composent. Il est capable de fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrage hydraulique, de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique du bassin versant. La question de la disponibilité de la ressource en eau en toute période de l'année dans le bassin de l'Okpara ne peut être résolue qu'en élevant le niveau de maîtrise de cette ressource.

Référence bibliographique

Akponikpe P,B,I,, Tovihoudji P,, Lokonon B,, Kpadonou E,, Amegnaglo J,, Segnon A, C,, Yegbemey R,, Hounsou M,, Wabi M,, Totin E,, Fandohan-Bonou A,, Dossa E,, Ahoyo N,, Laourou D,, Aho N,, (2019) : Etude de Vulnérabilité aux changements climatiques du Secteur Agriculture au Bénin, Report produced under the project “Projet d’Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d’Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d’Afrique subsaharienne”, Climate Analytics gGmbH, Berlin

M,A, Akpo, A, Saïdou, I, Yabi, I, Balogou et L, B, Bio Bigou,, (2016) : Indicateurs paysans d ’ appréciation de la qualité des sols dans le bassin de l ’ Okpara au Bénin, pp 53-64

M,A, Akpo, A, Saïdou, I, Yabi, I, Balogou et L, B, Bio Bigou,, (2016) : Evaluation de la performance des pratiques de gestion de la fertilité des sols dans le bassin de la rivière Okpara au Benin, pp 370-390

Alphonse A., (2017) : Conflits d'usage dans le bassin béninois du fleuve Niger en Afrique de l’ouest dans le contexte de la gestion intégrée des ressources en eau, pp 1-178

Arsène A., (2009) : Analyse hydrologique multi- échelle du bassin de l ’Ouémé supérieur : processus dominants à l ’ origine des écoulements, Rapport de Master Recherche R2E Eau et Environnement, 75p

Boudjadja C. et Khaled L., 2018 : Caractérisation géomorphologique et morphométrique et impact sur l’érosion du bassin versant de l’Oued Boussiaba (Wilaya de Jijel), Mémoire de Master Eau et Environnement, 96p

Chabi A, Oloukoi J, Mama VJ, Kiepe P,, (2010) : Inventaire par télédétection des agro-écosystèmes de bas-fonds dans le centre du Bénin, Cah Agric 2010 ; 19 : 446-53 ; doi : 10,1684/agr,2010,0434, 8p

Caroline Wittwer,, (2020) : Projet « Intégrer la gestion des inondations et des sécheresses et de l’alerte précoce pour l’adaptation au changement climatique dans le bassin de la Volta », 86p

Dossou-Yovo E,, (2011) : Impacts des changements climatiques et de la dynamique du couvert végétal sur les ressources en eau dans le bassin de l’Okpara à l’exutoire de Kaboua à l’horizon 2025, Mémoire du Diplôme d’Etudes approfondies (DEA), 132 p

Enda LEAD Afrique Francophone,, (2013) : Les systèmes d’information géographique participatifs (SIG-P) dans la gestion des ressources naturelles et la sécurité alimentaire en Afrique, Rapport technique, 59p

Gond V, et al., (2004) : Surveillance et cartographie des plans d ' eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l ' instrument VEGETATION embarque, <http://www.tandf.co.uk/journals>, DOI: 10,1080/0143116031000139908, Pp 987–1004

Gandomè L, D, QUENUM et al., (2016) : Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l ' Ouémé (Bénin), pp 315 - 328

Hamza Ouatiki,, (2014) : Spatialisation des pluies et étude physiographique du sous bassin versant de Tillouguite à l'aide des outils de modélisation géospatiale, 57p

Hountondji B., (2019) : Infiltration des eaux et des dépôts dans la retenue du mini- barrage de wourowourokou dans le nord du Bénin, pp 201-214

INSAE,, (2003) : Troisième recensement général de la population et de l'habitation, Synthèse des résultats, 34p,

Jean A, et al., (1994) : Fonctionnement hydrologique des bas-fonds en Afrique de l'Ouest

Kafilatou T, et al., (2017) : Inventaire et caractérisation des bas-fonds dans le bassin versant de l'Oti au Bénin à l'aide des images Landsat et ASTER DEM, pp 69-89

Kodja,, (2018) : Indicateurs des évènements hydro-climatiques extrêmes dans le bassin versant de l 'Ouémé à l 'exutoire de Bonou en Afrique de l 'Ouest, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Montpellier, 288p

Moriasi et al., (2007): Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations

Yèkambèssoun N'Tcha M'Po, Agnidé Emmanuel Lawin, Ganiyu Titilope Oyerinde, Benjamin Kouassi Yao, Abel Akambi Afouda, (2016) : Comparison of Daily Precipitation Bias Correction Methods Based on Four Regional Climate Model Outputs in Ouémé Basin, Benin, Hydrology, Volume 4, Issue 6, pp, 58-71, doi: 10,11648/j,hyd,20160406,11

M, Normand, C, Cann, N, Chkir, A,L, Cognard, M,C, Imberti, C, Loumagne, C, Otlé A, Vidal, D, Vidal-Madjar,, (1994) : Utilisation de l'observation spatiale pour l'estimation de l'état hydrique des sols et la modélisation hydrologique, pp 699-716

Ogouwale R, et al., (2015) : Changements climatiques et modélisation hydro-climatique dans le bassin versant de l'Okpara (AFRIQUE DE L'OUEST), pp 579-584

Oloukoi J., (2007) : Modélisation de la dynamique de l 'occupation des terres dans le département des collines au bénin, pp 305-323

Oloukoi et al., (2009) : Dynamique agraire des agro écosystèmes de bas-fonds au centre du Benin, Pp 117 – 128

Ousmane K., (2016) : Monographie de la commune de Parakou, Afrique conseil, 29 p

OMM-N° 1090,, (2012) : Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé

Puech C., (1995) : Télédétection et modélisation hydrologique, Quelle vision, quelle échelle, quels processus ? Télédétection et ressources en eau, Actes de l'atelier international, Montpellier, 16 p,

Programme CEE-CIRAD-TS2A 0017 F CD,, (1988) : Fonctionnement hydrologique des bas-fonds : synthèse préliminaire,

Raunet M., (1985) : Bas-fonds et riziculture en Afrique, Approche structurale comparative

Razaki S,Z,, (2019) : Apports de la télédétection et des systèmes d'information géographique dans la modélisation hydrologique d'un bassin versant : cas du Mékrou à Koupoungou, Rapport de Mémoire de Master Professionnel en Hydrologie, 101p

Sintondji et al., (2008) : Modélisation du bilan hydrique dans le bassin du Zou à l'exutoire d'Atchéribé : Contribution à l'utilisation durable des ressources en eau

Sintondji L, O,, Awoye H, R, and Agbossou K, E, (2008) : Modélisation du bilan hydrologique du bassin versant du Klou au Centre-Bénin : Contribution à la gestion durable des ressources en eau, pp 35-48

Sintondji Luc O, et al., (2009) : Modelling the hydrological balance of the Okpara catchment at the Kaboua outlet in Benin, pp 1-18

UNC-BENIN,, (2000) : La mise en valeur des bas-fonds : un défi pour l'an 2000 (N 10 de la revue Agriculture de janvier 2000)

Vissin E., (2010) : Impact de la Variabilité Climatique et de la Dynamique des Etats de Surface sur les Ecoulements du Bassin Béninois du Fleuve Niger

V, Gond et al., (2004) : Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT-4, pp 987–1004

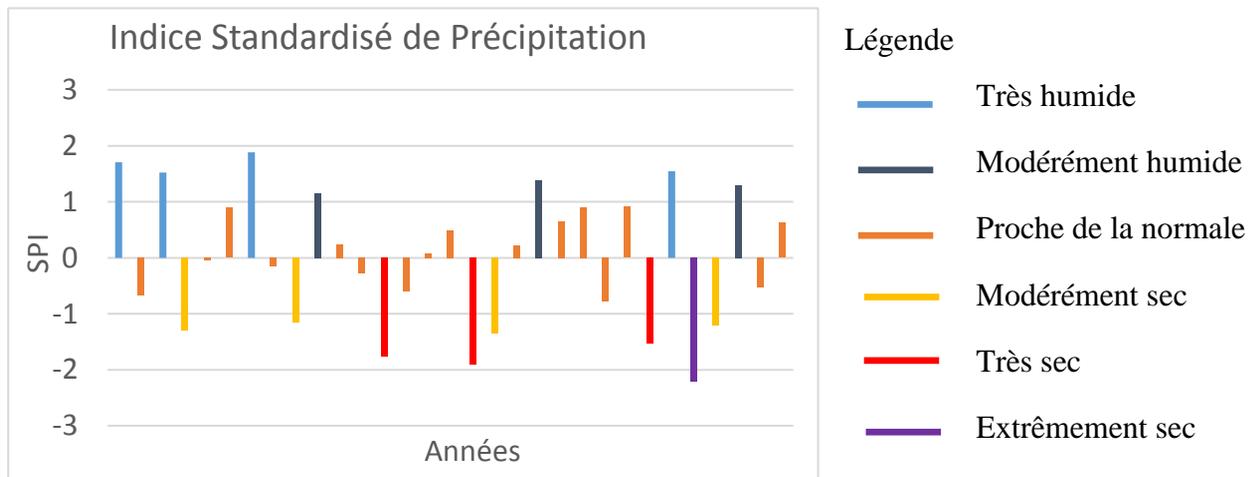
ANNEXES

Annexe 1 : Les différents rapports de confluence calculés à partir du réseau hydrographique

Cours d'eau	Nombre des cours d'eau	Rapport de confluence
Ordre 1	33324	-
Ordre 2	14401	2,3
Ordre 3	8979	1,6
Ordre 4	4378	2,1
Ordre 5	2356	1,86
Ordre 6	958	2,46
Ordre 7	693	1,38
Ordre 8	534	1,3

Source : Nos travaux, 2020

Annexe 2 : Indices de précipitation



Source : Météo-Bénin, 2020

Annexe 3 : Classification des SPI selon OMM

Plage des SPI	
2,0 et plus	Extrêmement humide
De 1,5 à 1,99	Très humide
De 1,0 à 1,49	Modérément humide
De -0,99 à 0,99	Proche de la normale
De -1,0 à -1,49	Modérément sec
De -1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

Source: OMM, 2012

Annexe 4 : Catégorisation des années de simulation par degré d'humidité

Années de simulation		Degré d'humidité
Calage	2005 ; 2006	Sécheresse sévère
	2007 ;2009 ;2010	Humidité légère
	2008	Humidité modérée
Validation	2016	Sécheresse modérée
	2017	Humidité modérée
	2018	Sécheresse légère
	2019	Humidité légère

Annexe 4 : Album



Photo 1: Bas-fond aménagé attendant la saison pluvieuse pour l'exploitation (Tchaorou)



Photo 2: Bas-fond aménagé attendant la saison pluvieuse pour l'exploitation (Tchachou)



Photo 3: A la station de pompage de l'Okpara à Kika



Photo 6: Station de pompage de l'Okpara à Kika



Photo 4 : Bas-fond en exploitation à Boko en période d'étiage



Photo 7: Retenue d'eau de l'Okpara à Kika



Photo 5: Bas-fond en exploitation à Tchachou en période d'étiage



Photo 8: Fleuve Okpara à Worja en période d'étiage