

CAMES

Historique

Plusieurs réunions de spécialistes chargés de définir le rôle et les fonctions de l'Enseignement Supérieur ont conduit à la constitution d'une "Commission consultative d'expert pour la réforme de l'Enseignement en Afrique et à Madagascar". Une résolution de la Conférence des Ministres de l'Éducation nationale tenue à Paris en 1966 donnait mandat à la commission d'entreprendre une recherche approfondie sur les structures et les enseignements des Universités Africaines et malgaches, dans un large esprit de coopération interafricaine. Les conclusions de la réflexion menée par la Commission leur ayant été soumises à la Conférence de Niamey, tenue les 22 et 23 janvier 1968, les Chefs d'Etats de l'OCAM décidèrent la création du "Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur", regroupant à ce jour seize (16) Etats francophones d'Afrique et de l'Océan Indien. La convention portant statut et organisation du CAMES fut signée par les seize (16) Chefs d'Etat ou de Gouvernement, le 26 Avril 1972 à Lomé. Tous les textes juridiques ont été actualisés en 1998-1999 et le Conseil des Ministres du CAMES, a lors de la 17ème Session tenue à Antananarivo en Avril 2000, adopté l'ensemble des textes juridiques actualisés du CAMES, qu'on peut retrouver sur le site web <http://www.lecames.org/spip.php?article1>

Missions

- Promouvoir et favoriser la compréhension et la solidarité entre les Etats membres ;
- Instaurer une coopération culturelle et scientifique permanente entre les Etats membres ;
- Rassembler et diffuser tous documents universitaires ou de recherche : thèses, statistiques, informations sur les examens, annuaires, annales, palmarès, information sur les offres et demandes d'emploi de toutes origines
- Préparer les projets de conventions entre les États concernés dans les domaines de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et contribuer à l'application de ces conventions ;
- Concevoir et promouvoir la concertation en vue de coordonner les systèmes d'enseignement supérieur et de la recherche afin d'harmoniser les programmes et les niveaux de recrutement dans les différents établissements d'enseignement supérieur et de recherche, favoriser la coopération entre les différentes institutions, ainsi que des échanges d'informations.

Organisation

Le Conseil des Ministres

Le Conseil des Ministres est l'instance suprême du CAMES. Il regroupe tous les Ministres ayant en charge l'Enseignement Supérieur et/ou la Recherche Scientifique des pays membres. Il se réunit une fois l'an en session ordinaire et peut être convoqué en session extraordinaire. L'actuel Président du Conseil des Ministres est le Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche de Côte d'Ivoire.

Le Comité des Experts

Le Comité des Experts prépare la session ministérielle. Il est composé de deux représentants par pays membre ou institution membre. Il se réunit une fois l'an en session ordinaire et peut être convoqué en session extraordinaire.

Le Comité Consultatif Général (CCG)

Il supervise et contrôle l'application de l'Accord portant création et organisation des Comités Consultatifs Interafricains. Ses membres sont des Recteurs ou Présidents d'Universités et des Directeurs des Centres Nationaux de Recherche. Les organismes signataires de l'Accord y sont représentés par leurs Directeurs.

INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

Politique éditoriale

La Revue CAMES publie des contributions originales (en français et en anglais) dans tous les domaines de la science et de la technologie et est subdivisée en 9 séries :

- **Sciences des structures et de la matière.** Elle couvre les domaines suivants : mathématiques, physique, chimie et informatique,
- **Sciences de la santé** : médecine humaine, médecine vétérinaire, pharmacie, odonto-stomatologie, productions animales ;
- **Sciences de la vie, de la terre et agronomie** ;
- **Sciences appliquées et de l'ingénieur** ; Littérature, langues et linguistique ;
- **Sciences humaines** : Philosophie, sociologie, anthropologie, psychologie, histoire et géographie ;
- **Sciences économiques et de gestion** ;
- **Sciences juridiques et politiques** ;
- **Pharmacopée et médecine traditionnelles africaines** ;

Toutes les séries publient en moyenne deux numéros par an.

Les contributions publiées par la Revue CAMES représentent l'opinion des auteurs et non celle du comité de rédaction ou du CAMES. Tous les auteurs sont considérés comme responsables de la totalité du contenu de leurs contributions.

Soumission et forme des manuscrits

La soumission d'un manuscrit à la Revue CAMES implique que les travaux qui y sont rapportés n'aient jamais été publiés auparavant, ne soient pas soumis concomitamment pour publication dans un autre journal et qu'une fois acceptés, ne fussent plus publiés nulle part ailleurs sous la même langue ou dans une autre langue, sans le consentement du CAMES.

Les manuscrits, dactylographiés en interligne double en recto sont soumis aux rédacteurs en chef des séries.

Les manuscrits doivent comporter les adresses postales et électroniques et le numéro de téléphone de l'auteur à qui doivent être adressées les correspondances. Les manuscrits soumis à la Revue CAMES doivent impérativement respecter les indications cidessous:

Langue de publication

La revue publie des articles rédigés en français ou en anglais. Cependant, le titre, le résumé et les mots-clés doivent être donnés dans les deux langues.

Ainsi, tout article soumis en français devra donc comporter, obligatoirement, «un titre, un abstract et des keywords», idem, dans le sens inverse, pour tout article en anglais (un titre, un résumé et des mots-clés).

Page de titre

La première page doit comporter le titre de l'article, les noms des auteurs, leur institution d'affiliation et leur adresse complète. Elle devra comporter également un titre courant ne dépassant pas une soixantaine de caractères ainsi que l'adresse postale de l'auteur, à qui les correspondances doivent être adressées.

Résumé

Le résumé ne devrait pas dépasser 250 mots. Publié seul, il doit permettre de comprendre l'essentiel des travaux décrits dans l'article.

Introduction

L'introduction doit fournir suffisamment d'informations de base, situant le contexte dans lequel l'étude a été entreprise. Elle doit permettre au lecteur de juger de l'étude et d'évaluer les résultats acquis.

Corps du sujet

Les différentes parties du corps du sujet doivent apparaître dans un ordre logique.

Conclusion

Elle ne doit pas faire double emploi avec le résumé et la discussion. Elle doit être un rappel des principaux résultats obtenus et des conséquences les plus importantes que l'on peut en déduire.

La rédaction du texte

La rédaction doit être faite dans un style simple et concis, avec des phrases courtes, en évitant les répétitions.

Remerciements

Les remerciements au personnel d'assistance ou à des supports financiers devront être adressés en terme concis.

Références

Les noms des auteurs seront mentionnés dans le texte avec l'année de publication, le tout entre parenthèses.

Les références doivent être listées par ordre alphabétique, à la fin du manuscrit de la façon suivante:

• **Journal** : noms et initiales des prénoms de tous les auteurs, année de publication, titre complet de l'article, nom complet du journal, numéro et volume, les numéros de première et dernière page.

• **Livres** : noms et initiales des prénoms des auteurs et année de publication, titre complet du livre, éditeur, maison et lieu de publication.

• **Proceedings** : noms et initiales des prénoms des auteurs et année de publication, titre complet de l'article et des proceedings, année et lieu du congrès ou symposium, maison et lieu de publication, les numéros de la première et dernière page.

Tableaux et figures

Chaque tableau sera soumis sur une feuille séparée et numéroté de façon séquentielle. Les figures seront soumises sur des feuilles séparées et numérotées,

selon l'ordre d'appel dans le texte.

La numérotation des tableaux se fera en chiffres romains et celle des figures en chiffres arabes, dans l'ordre de leur apparition dans le texte.

Photographies

Les photographies en noir & blanc et couleur, sont acceptées.

Procédure de révision

Les manuscrits sont soumis à la révision des pairs. Chaque manuscrit est soumis au moins à deux référés spécialisés. Les auteurs reçoivent les commentaires écrits des référés. Il leur est alors notifié, par la même occasion, l'acceptation ou le rejet de leur contribution.

NB : Le manuscrit accepté doit, après correction conformément aux recommandations des référés, être retourné aux différents rédacteurs en chef des séries, en format WORD ou DOC.

REDACTEURS EN CHEF DES REVUES

Les auteurs sont invités à envoyer directement leurs articles aux rédacteurs en chef des différentes séries:

• Sciences des structures et de la matière:

Pr ABDOULA YB Alassane: aabdouy@yahoo.com (Niamey)

• Sciences de la santé:

Pr TOURE Meissa mtoure@ised.sn (Dakar)

• Sciences de la vie, de la terre et agronomie:

Pr GLITHO Adolé I. iglitho@yahoo.fr (Lomé)

• Sciences appliquées et de l'ingénieur:

Pr FALL Meissa meissaJall@univ-thies.sn (Thiès)

• Littérature, langues et linguistique:

Pr AINAMON augustin ainamonaugustin@yahoo.fr (Cotonou)

• Sciences humaines:

Pr KADANGA Kodjona kkadanga59@yahoo.fr (Lomé)

• Sciences économiques et de gestion:

Pr ONDO Ossa Albert saon4@yahoo.fr (Gabon)

• Sciences juridiques et politiques:

Pr SOMA Abdoulaye tikansonsoma@yahoo.fr (Ouagadougou)

• Pharmacopée et médecine traditionnelles africaines

Pr OUAMBA Jean Maurille jm_maurille@yahoo.fr (Brazzaville)

Conformément à la **note d'information N° 0011.2018//CAMES/SG/KP du 28/02/2018**, adressée aux Rédacteurs en chef des Revues du **CAMES** (qui devient **RAMres : Revue Africaine et Malgache de Recherches Scientifiques**). Vous êtes priés de bien vouloir vous acquitter des **frais d'évaluation** de votre article qui s'élèvent à **25 000 F CFA** et d'envoyer votre reçu de paiement et une copie de votre manuscrit à l'adresse **iglitho_at_yahoo.fr**

Si votre article est accepté pour publication, après révision, vous paierez des **frais de publication** qui s'élèvent à **75 000 F CFA** avant sa parution dans la revue sur la plate-forme de gestion des publications.

NB: - **WARI**; - **Express union Internationale**; - **Rapid Transfert ECOBANK**; - **Africash UBA**.

Au Comptable du CAMES (**M. BOUROBOU Orphé Tuburse**) et le code par **SMS** au **+226 66897033**. Les reçus doivent être scannés et envoyés à l'adresse suivante **<pocoulbaly_at_yahoo.fr>**. avec copie au **Professeur GLITHO A. <iglitho_at_yahoo.fr>** (PS: Prendre soin de remplacer **_at_** par **@** dans les e-mail ci-dessus.)

APRES RETRAIT DE L'ARGENT, LE COMPTABLE DU CAMES VOUS DÉLIVRERA UNE ATTESTATION DE RETRAIT QUE VOUS ENVERREZ à **iglitho_at_yahoo.fr** ACCOMPAGNEE DE VOTRE MANUSCRIT (DEUX FICHIERS WORD AU MAXIMUM).

SOMMAIRE

Impacts de la variabilité climatique sur la dynamique des agrosystèmes dans la commune d'aplahoué au sud-ouest du Bénin	6
Composition and seasonal distribution of diatom in human-influenced rivers in tropical Africa: Nonhon and Gninhin rivers (Ivory Coast, West Africa)	15
Dynamique hydro-climatique des eaux de surface dans le bassin ivoirien du Niger : apport des indices NDWI et MNDW	22
Perception des producteurs de mangue (<i>Mangifera indica</i> L) sur le désordre physiologique « nez mou » dans les départements de Koro et Sinématiali de la Côte d'Ivoire	33
Spatial heterogeneity and factors associated with bovine brucellosis in Benin: a national epidemiological analysis	41

Impacts de la variabilité climatique sur la dynamique des agrosystèmes dans la commune d'aplahoué au sud-ouest du Bénin

Pocoun Damè KOMBIENOU¹, Archille Comlan TOVO², Kocou Fortuné ADOKO¹, Ibouraima YABI² & Guy Apollinaire MENSAH¹

Résumé

La variabilité climatique affecte fortement les agrosystèmes, avec des enjeux majeurs, pour le développement durable des pays ouest-africains comme le Bénin. L'objectif de l'étude était d'analyser les impacts de la variabilité climatique sur la dynamique des agrosystèmes dans la Commune d'Aplahoué au Sud-Ouest du Bénin. Cette analyse repose sur des données climatologiques de 1952 à 2018 obtenues par une combinaison de mesures in situ, d'observations spatiales, et de modélisation numérique au niveau, des stations synoptiques d'Aplahoué et de Bohicon (précipitations) et de la Météo-Bénin (thermométries). Une enquête auprès de 305 personnes, combinant questionnaires et grilles d'observations, a permis de collecter des données socio-agricoles sur les perceptions du climat, les perturbations agricoles, la baisse de productivité et les stratégies d'adaptation locales. Le traitement et l'analyse statistique descriptive des données ont été réalisés à l'aide du tableur Excel 2013 et du logiciel SPSS, permettant la structuration et l'interprétation des résultats. Les résultats ont montré ces dernières années, une augmentation des excès pluviométriques et inondations (77,5 %), un retard du démarrage de la grande saison (93,3 %), des ruptures de pluies (35,8 %) et une répartition irrégulière des pluies (28,3 %). Face à ces perturbations, les producteurs ont adopté diverses stratégies telles que l'utilisation des variétés à cycle court (97,4 %), l'agriculture de contre saison (95,6 %), la diversification des sources de revenus (87,1 %), la diversification agricole (81,7 %), l'irrigation des cultures (43,3 %) et le réaménagement du calendrier agricole (100 %) pour contrecarrer les déficits et excès hydriques. Un appui institutionnel est nécessaire pour renforcer la résilience des systèmes de production.

Mots clés : Variabilité climatique, adaptation, agrosystème, vulnérabilité, Bénin.

Abstract

Impacts of climate variability on the dynamic of agro-ecosystems in the Municipality of Aplahoué in South-Western Benin

Climate variability significantly impacts agroecosystems, posing major challenges for the sustainable development of West African countries like Benin. The objective of this study was to analyze the impacts of climate variability on agroecosystem dynamics in the Commune of Aplahoué in southwestern Benin. This analysis is based on climatological data from 1952 to 2018 obtained through a combination of in situ measurements, spatial observations, and numerical modeling at the synoptic stations of Aplahoué and Bohicon (rainfall) and at Météo-Bénin (thermometrics). A survey of 305 people, combining questionnaires and observation grids, collected socio-agricultural data on climate perceptions, agricultural disturbances, decreased productivity, and local adaptation strategies. The data were processed and analyzed using Excel 2013 and SPSS software, allowing for the structuring and interpretation of the results. The results showed an increase in excessive rainfall and flooding (77.5%), a delayed start to the main growing season (93.3%), rain breaks (35.8%), and irregular rainfall distribution (28.3%) in recent years. Faced with these disruptions, producers adopted various strategies, such as the use of short-cycle varieties (97.4%), off-season farming (95.6%), diversification of income sources (87.1%), crop diversification (81.7%), crop irrigation (43.3%), and adjustments to the agricultural calendar (100%), to mitigate water deficits and excesses. Institutional support is needed to strengthen the resilience of production systems.

Keywords: Climate variability, adaptation, agro-ecosystem, vulnerability, Benin.

1. Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) ; 01BP884 Cotonou, Bénin.

2. Laboratoire Pierre PAGNEY "Climat, Eau, Écosystème et Développement" (LACEEDE), Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), Université d'Abomey-Calavi (UAC) ; 1 0074 Poste

148 (République du Bénin) ; B.P. : 526 Cotonou, Bénin

Auteur de correspondance : Dr Ir. KOMBIENOU Pocoun Damè ; 01 BP 884RP, Cotonou, Bénin ; Téléphones : (+229) 01 97355649 ; (+229) 01 95454959, Email : ykopoda@yahoo.fr

INTRODUCTION

La variabilité climatique constitue une menace majeure pour la croissance économique et l'atteinte des Objectifs de Développement Durable dans les pays en développement où l'agriculture reste le principal levier de réduction de la pauvreté (Dixon et al., 2001). Pourtant, ce secteur doit répondre à des défis cruciaux tels que nourrir une population croissante, réduire les inégalités sociales et assurer la durabilité des moyens d'existence (Massé, 2007). En Afrique de l'Ouest, les systèmes agricoles, majoritairement pluviaux, constituent la principale source d'emplois et de revenus (Agossou, 2012). Les agrosystèmes, en plus de fournir denrées et revenus, sont des espaces de

transmission des savoirs endogènes et de conservation de la biodiversité. Toutefois, ils sont confrontés à des perturbations climatiques croissantes.

Au Bénin, l'agriculture emploie 70 % de la population et contribue à 36 % du Produit Intérieur Brut et 88 % des exportations (Houssou, 2014). Toutefois, reposant à 80 % sur la pluviométrie (Atidegla, 2011), elle est vulnérable aux sécheresses, surtout dans le sud et l'extrême nord. Les recherches montrent une variabilité pluviométrique, une réduction de la saison des pluies et une hausse des températures (Boko, 1988 ; Vissin, 2007). Ces changements entraînent une baisse des rendements, accentués par de mauvaises pratiques culturales et la variabilité des prix

agricoles (MAEP, 2017).

Dans la commune d'Aplahoué où domine l'agriculture traditionnelle pluviale, les perturbations climatiques affectent les agrosystèmes (Minhountchi, 2022). Pour y faire face, les producteurs adoptent diverses stratégies d'adaptation comme l'utilisation des variétés à cycle court, les cultures de contre-saison, la diversification des cultures et des revenus, la modification des dates de semis et l'irrigation (Atidéglà & Koumassi, 2022.). L'objectif de l'étude était d'analyser les impacts de la variabilité climatique sur la dynamique des agrosystèmes dans la Commune d'Aplahoué au Sud-Ouest du Bénin. De façon spécifique, il s'agit de :

-analyser les indicateurs de la variabilité climatique dans la commune d'Aplahoué ;

-analyser les perceptions paysannes des tendances climatiques et leurs impacts ;

-évaluer les différentes mesures ou options d'adaptation mises œuvre.

1. PRÉSENTATION DU CADRE D'ÉTUDE

Située entre 6°50' et 7°36' N et 1°25' et 1°52' E, la commune d'Aplahoué couvre 915 km² dans le département du Couffo, au sud-ouest du Bénin et est limitée par Djidja au nord-est, Djakotomey au sud, Klouékanmè et Abomey à l'est, et le Togo à l'ouest (Figure 1). Elle comprend sept arrondissements subdivisés en 14 quartiers et 52 villages, avec comme principales agglomérations Aplahoué et Azovè séparées par le cours d'eau Dokomey.

Le climat est subéquatorial avec deux saisons pluvieuses (avril-juillet et octobre-novembre) et deux saisons sèches (août-septembre et décembre-mars), pour une pluviométrie annuelle moyenne de 1.150 mm. Située dans la 5ème zone agro-écologique, la Commune est exposée à des risques climatiques affectant les agrosystèmes. La végétation se compose de savanes arborées dominées par le rônier (*Borassus aethiopium* Mart., Arecaceae) et le baobab (*Adansonia digitata* L., Bombacaceae), complétées par des forêts et des plantations de teck (*Tectona grandis* L.f. Lamiaceae), d'anacardiés (*Anacardium occidentale* L. Anacardiaceae), de manguiers (*Mangifera indica* L. Anacardiaceae).

Le relief, formé d'un plateau sédimentaire (80 m d'altitude) et de pénéplaines ponctuées de collines, favorise l'agriculture et le maraîchage dans les dépressions, parfois sujettes aux inondations. Les sols dominants, ferrallitiques et argilo-sableux, favorables aux cultures, coexistent avec des sols hydromorphes, des vertisols et des sols bruns, constituant une base agricole importante, mais vulnérable aux aléas climatiques.

La taille de la Population d'Aplahoué au quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH4) de 2013 a été de 171 109 hbts et les projections de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INStAD) pour 2025, ont prédit qu'elle atteindra 227.757 habitants avec 9.978 ménages agricoles.

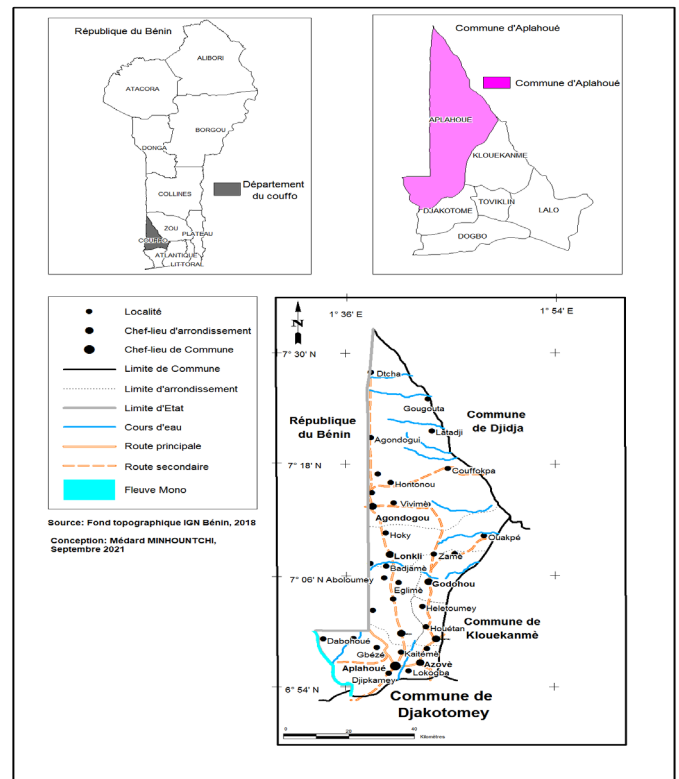


Figure 1 : Situation géographique de la commune d'Aplahoué
Source : Minhountchi et al. (2021)

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Collecte des données

Les techniques de collecte des données utilisées s'étaient résumées en la recherche documentaire et les enquêtes de terrain afin d'obtenir des données et informations nécessaires à l'explication des événements extrêmes sur les agrosystèmes.

2.1.1. Phase exploratoire

La phase exploratoire a consisté à s'entretenir avec les autorités locales, les responsables administratifs en charge du secteur agricole au niveau de la cellule communale (CC) de l'Agence Territoriale pour le Développement Agricole pôle 5 (ATDA5) et autres personnes ressources sur l'importance du travail. Cette phase a permis de recevoir les orientations des acteurs du secteur agricole afin de choisir les villages pour l'enquête.

2.1.2 Phase d'enquêtes

La phase d'enquête a mobilisé questionnaires, guides d'entretien, entretiens non formels et observations directes auprès des ménages, personnes ressources et structures agricoles. Après une rencontre avec les autorités villageoises et les organisations paysannes, les questionnaires ont été administrés individuellement aux producteurs, suivis de visites des parcelles. Les informations recueillies ont porté sur le profil des paysans (identité, instruction, mode d'acquisition des terres, nombre d'exploitations) et sur les caractéristiques de leurs exploitations (superficie, âge, précédent cultural, état sanitaire et rendement).

2.1.3 Échantillonnage

Le choix de la commune d'Aplahoué s'est reposé sur une étude du PANA-Bénin (2008) qui l'a situé dans un milieu fortement affecté par la variabilité climatique. Trois arrondissements (Kissamey, Aplahoué et Godohou), principaux pôles agricoles selon l'INSD (2013), ont été retenus. Dans chacun, trois villages

ont été enquêtés, soit neuf villages au total (≈ 300 ménages agricoles sur 9978). La taille de l'échantillon a été déterminée par la formule de Schwatz (1995) : $N = Z^2 PQ / d^2$ avec :

N = Taille de l'échantillon par village ;

Z_a = écart fixé à 1, 96 correspondants à un degré de confiance de 99 % ;

P = nombre de ménages agricoles du village / nombre total de ménages agricoles que compte la Commune d'Aplahoué ;

Q = $1 - P$ et d = marge d'erreur qui est égale à 1 %.

et un échantillonnage aléatoire stratifié (taux fixé à 3 %) dont la formule est :

Les chefs de ménage de plus de 40 ans, installés depuis au moins 20 ans et disposant de $\geq 0,5$ ha ont été privilégiés, en plus de cinq personnes ressources (sages, agents de l'ATDA 5, ONG, autorités locales). Dans le tableau 1 ont été présentées la structure et la taille de l'échantillon, soit au total 305 personnes dont 300 chefs de ménages (producteurs) et 5 personnes ressources enquêtées parmi les 9.978 ménages agricoles.

Tableau 1 : Structure et taille de l'échantillon dans la zone d'étude

Arrondissements	Ménages agricoles		Personnes ressources		Exploitations agricoles visitées
	Effectifs	Echantillon	Autres acteurs arrondissements	Responsables SCDA et ONG	
Kissamey	3718	112	01	02	08
Aplahoué	3361	101	01		07
Godohou	2899	87	01		09
Total	9978	300	03	02	24

Source : INSD (2016) et résultats d'enquête

2.1.4. Méthodes de collecte des données

Cette recherche a mobilisé différentes méthodes qualitatives et participatives. La méthode des itinéraires et l'observation participante ont permis d'identifier les acteurs clés, essentiellement les paysans, et de recueillir leurs perceptions sur les effets agricoles et socioéconomiques de la variabilité climatique. Des entretiens individuels et des focus groups ont complété cette approche pour approfondir les savoirs et stratégies d'adaptation locales.

La méthode d'investigation répétée (MIR) a consisté à revisiter les mêmes enquêtés à quatre périodes climatiques (petite et grande saisons pluvieuses et sèches) afin de contrôler la constance des informations. L'échantillonnage a concerné des villages identifiés comme agricoles, en recoupant les données des services techniques et celles issues du terrain. La MARP et des entretiens directs avec les chefs de ménages et personnes ressources ont renforcé la compréhension des agrosystèmes et des dynamiques climatiques locales.

Les indicateurs retenus ont porté sur la pluviométrie, les températures extrêmes et les événements météorologiques marquants, ainsi que sur l'évolution des régimes pluviométriques.

2.2 Recherche des tendances climatiques

Les tendances thermométriques et pluviométriques dans la commune d'Aplahoué ont été déterminées sur la période de 1952-2018.

La moyenne mobile et les tests de Mann Kendall ont été utilisés pour rechercher la tendance et les ruptures de stationnarité dans les séries pluviométrique et thermométrique.

Le test de Mann-Kendall (1948) a été un test non paramétrique qui a permis de déceler une éventuelle dépendance entre

deux variables (X_i ; Y_i), i (Houndénou, 1999). Il a été utilisé dans cette étude pour mesurer le degré de significativité des tendances pluviométrique et thermométrique.

2.3 Traitement des données

Les données collectées ont été saisies et traitées avec le tableur Excel 2013 et le logiciel SPSS. L'analyse de la variabilité climatique a été faite à l'aide du logiciel SPSS et a permis de générer des statistiques descriptives telles que la moyenne, la fréquence des variables étudiées, les températures et la pluviométrie. Des méthodes spécifiques d'analyse de la variabilité climatique ont permis de traiter chaque type de données et d'informations collectées.

3. RÉSULTATS

3.1. Indicateurs de la variabilité climatique dans la Commune d'Aplahoué

Les deux paramètres considérés pour l'analyse des tendances climatiques au niveau de la commune d'études sont les précipitations et les températures puisqu'elles représentent les paramètres les plus déterminants de la zone du climat soudanien au Bénin. Cette analyse s'articule autour des cumuls pluviométriques et thermométriques annuels de la période 1952-2018, en raison de ce que les tendances de températures témoignent d'un réchauffement depuis 1950 avec une alternance d'années humides et sèches.

3.1.1 Indice pluviométrique

Les indices pluviométriques ont permis d'identifier les années d'extrêmes pluviométriques dans la Commune d'Aplahoué (figure 2).

L'évolution interannuelle des hauteurs pluviométriques moyennes dans la commune d'Aplahoué de 1952 à 2018 traduit une forte variation des évolutions pluviométriques dans le milieu suivant les différentes années.

Les indices pluviométriques et thermométriques des années humides et des années sèches calculés illustrent la variabilité pluviométrique dans le secteur d'étude de 1952 à 2018 (figure 3).

Les résultats ont montré une bonne lecture du climat par les producteurs, dont les observations (retard des pluies, baisse de la pluviométrie, hausse des températures, sécheresses fréquentes) ont concordé avec les données climatiques disponibles

L'analyse climatique d'Aplahoué (1952-2018) a révélé une forte variabilité interannuelle des précipitations et des températures, paramètres clés du climat soudanien (Figure 2). Les indices pluviométriques et thermométriques ont montré l'alternance d'années humides et sèches, traduisant des tendances contrastées sur la période étudiée (Figure 2).

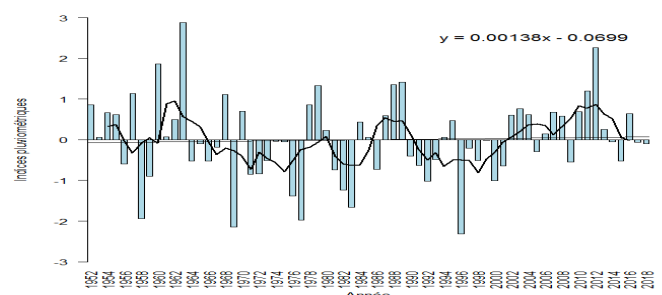


Figure 2 : Indice pluviométrique de la commune d'Aplahoué de 1952 à 2018

Source : Traitement des données de Météo Bénin, 2021

À Aplahoué (1952-2018), les pluies ont connu une forte variabilité, alternant années humides (1952-1962, 2002-2018) et déficitaires (1963-2001). Sur 67 ans, 48 % des années étaient humides et 52 % sèches, avec une tendance linéaire globale à la hausse confirmée par le test de Mann-Kendall (Tableau2).

Tableau 2 : Synthèse du résultat du test de Mann Kendall sur les cumuls pluviométriques annuels

$U(t)$	p-value	α_0	Observation
+0,042	0,619	0,05	Tendance positive, mais non significative au seuil de 5%

Source : Traitement des données de Météo Bénin, 2021

Les tests de Mann-Kendall et de Pettitt (1952-2018) n'ont révélé aucune tendance significative des pluies à Aplahoué, tandis que l'agriculture restait aussi dépendante des conditions thermiques.

La variabilité de la température a été faite à partir de l'évolution interannuelle des températures minimales et maximales de la commune d'Aplahoué de 1952 à 2018 (Figure 3).

3.1.2 Indicateurs thermométriques dans la Commune d'Aplahoué de 1952 à 2018

Les températures minimales et maximales ont connu une hausse entre 1952 et 2018. La figure 3 présente l'évolution interannuelle des températures maximales et minimales dans la Commune d'Aplahoué entre 1952-2018.

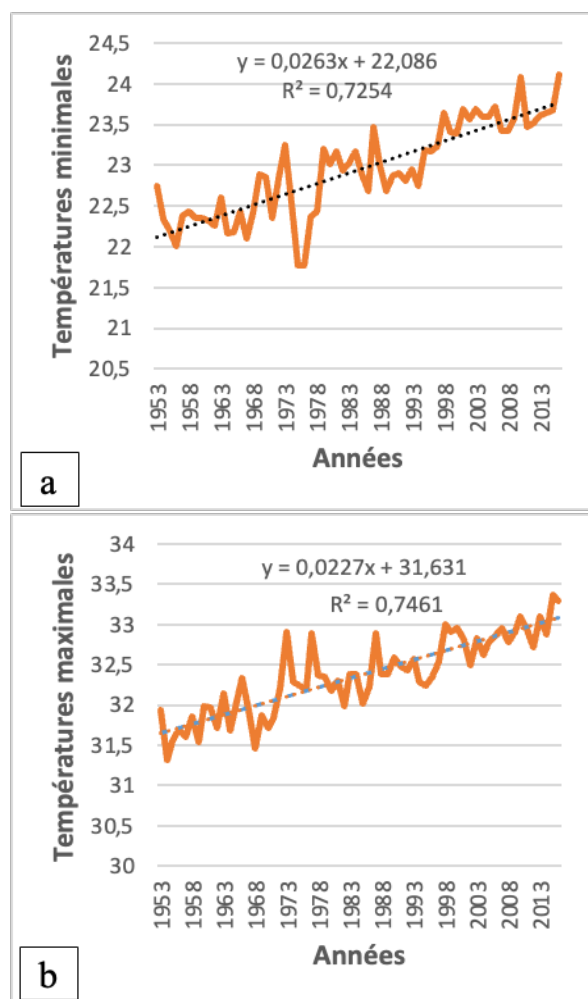


Figure 3 : Évolution interannuelle des températures minimales

(a) et maximales (b) de la commune d'Aplahoué de 1952 à 2018

Source des données : Météo Bénin, 2021

Pour (38,33 %) des enquêtés, une modification de ce paramètre du climat n'a pu permettre de conclure aisément. La perception dans les zones de dépression a été similaire à celle observée sur le plateau avec les proportions d'individus qui avaient perçu les hausses de température, les baisses de température et une situation restée inchangée de 58,33 %, 11,67 % et 30 % respectivement. Globalement, le réchauffement de la terre a été plus ou moins admis dans la zone d'étude (54,17 %). Le dernier risque non négligeable évoqué par les paysans a été la fréquence des vents violents. Les séquences sèches se référaient à une absence totale des pluies sur plusieurs jours consécutifs au cours d'une saison pluvieuse. Lorsqu'elles devenaient plus ou moins longues, elles constituaient un événement préjudiciable aux cultures et diminuaient le potentiel des réserves en eau. Selon la recommandation en agro-climatologie, une séquence sèche d'au moins 10 jours consécutifs a causé indubitablement de préjudice aux cultures.

La typologie et la fréquence d'occurrence des séquences sèches de la grande saison des pluies et de celle de la petite saison des pluies ont été présentées à la figure 4 ci-après :

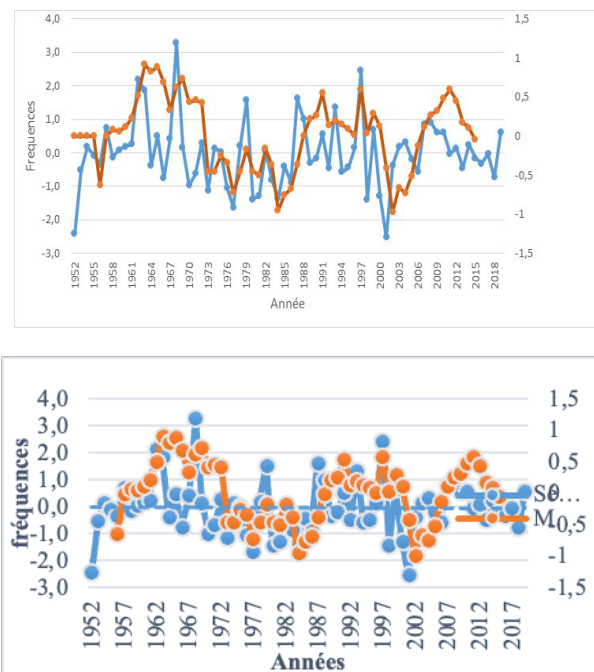


Figure 4 : Evolution interannuelle des séquences sèches de la grande et la petite saison des pluies

Légende : S1- séquences pluvieuses courtes ; S2- séquences sèches longues.

Source : Météo-Bénin, novembre 2021

Les séquences pluvieuses courtes (S1) ont diminué tandis que les séquences sèches longues (S2) ont augmenté, apparaissant même au cœur des saisons humides, phénomène confirmé par 70 % des enquêtés. Les petites saisons ont aussi montré une hausse des séquences sèches (S1 et S2). Parallèlement, les températures minimales, maximales et moyennes ont toutes augmenté d'environ 0,03 °C/an entre 1954 et 2016, tendance confirmée par le test de Mann-Kendall (Tableau 3).

Tableau 3 : Synthèse du résultat du test de Mann-Kendall sur les séries de température annuelles de 1952 à 2018

Paramètres	$U(t)$	p-value	α_0	Observations
T_{max}	+ 0,685	$1,23.10^{-15}$	0,5	Tendance à la hausse significative au seuil de 5 %
T_{min}	+ 0,663	$9,47.10^{-15}$	0,5	Tendance à la hausse significative au seuil de 5 %
T_{moy}	+ 0,733	$2,2.10^{-16}$	0,5	Tendance à la hausse significative au seuil de 5 %

T_{max} = température maximale ; T_{min} = température minimale ;
 T_{moy} = température moyenne

Source : Traitement des données de Météo Bénin, 2021

Le test de Mann-Kendall a révélé une hausse significative des températures, entraînant aridité des sols et assèchement précoce des ressources hydriques. L'analyse pluviométrique (1952-2018) a montré une légère hausse des cumuls, non significative et marquée par de fortes disparités saisonnières. Le diagnostic climatique, validé par le test de Student, a confirmé une variabilité marquée et une tendance nette au réchauffement, aux impacts sur les agrosystèmes.

Les cumuls pluviométriques des deux normales pluviométriques et leur différence ont été présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Précipitations moyennes comparées des périodes 1952-1981 et 1981-2010 sous climat d'Aplahoué.

Station	1952-1981 (mm)	1981-2010 (mm)	Différence (1952-1981) - (1981-2010) (mm)
Aplahoué	1145	1049	95,61 (Non significative au seuil de 5%)

Source : Données ASECNA

À Aplahoué, le régime a été marqué par deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. L'analyse des hauteurs de pluie (1952-2018) a montré une tendance contrastée : baisse de 1952-1981 puis hausse après 1981, mais sans différence significative entre les normales 1952-1981 et 1981-2010 selon le test de Student. Les précipitations annuelles ont varié fortement, oscillant entre 564 et 1847 mm puis entre 608 et 1471 mm.

3.2. Perceptions paysannes de la variabilité climatique et leurs impacts dans la commune d'Aplahoué

Dans le tableau 5 ont été présentés les différents risques pluviométriques qui ont pesé sur l'activité agricole. Ces risques ont été présentés sous deux (02) périodes.

Tableau 5 : Synthèse des perceptions paysannes sur l'évolution de la pluviométrie

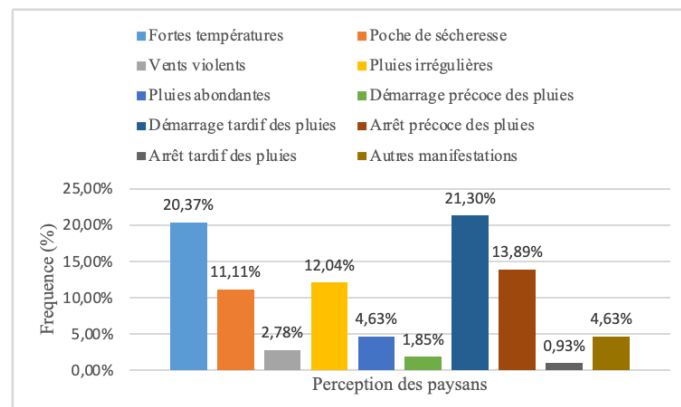
Période	Tendances thermométriques	Zone d'étude (Commune d'Aplahoué)	
		Fréquence absolue	Fréquence relative (%)
A partir des années 1952 jusqu'en 1981 et 1981-2010	Retard dans le démarrage des pluies de la grande saison	112	93,33
	Poches de sécheresse	43	35,83
	Mauvaise répartition des pluies au cours de l'année	34	28,33
	Baisse des précipitations	13	10,83
De 2010 à nos jours	Excès pluviométriques/	93	77,5

Source : Données d'enquête Août-Octobre 2021

Les résultats ont révélé une prédominance d'excès pluviométriques (77,5 %) par rapport aux baisses (10,8 %), avec 93,3 % de retards de démarrage, 35,8 % de ruptures en saison pluvieuse et 28,3 % de mauvaises répartitions des

pluies entre 1952 et aujourd'hui.

La variabilité climatique s'est manifestée de différentes manières dans la Commune d'Aplahoué. La figure 5 a montré les perceptions des paysans sur les manifestations des variabilités climatiques.

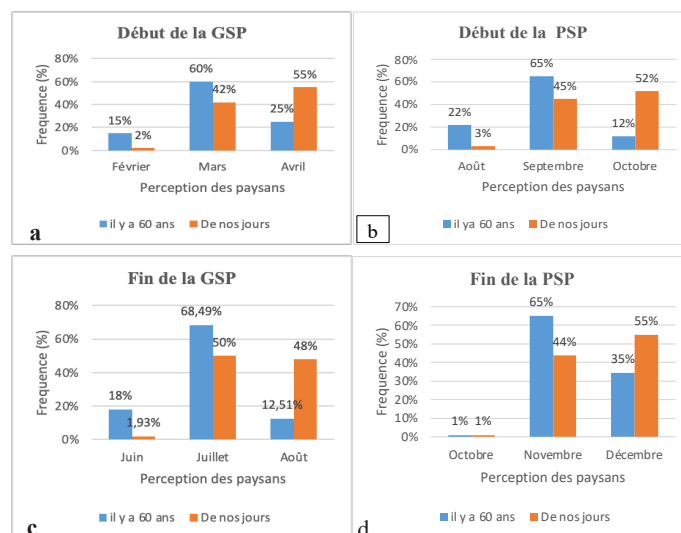
**Figure 5** : Perceptions des paysans sur les manifestations de la variabilité climatique

Source : Résultats, enquêtes de terrain, octobre 2021

Dans l'échantillon, 21,30 % des enquêtés ont mentionné un démarrage tardif et des précipitations abondantes dès l'installation des pluies, tandis que 20,37 % les ont attribuées aux fortes températures. Les risques relevés étaient les arrêts précoces (13,89 %), l'irrégularité des pluies (12,04 %) et les poches de sécheresse (11,11 %). Les autres manifestations, telles que vents violents ou abondance excessive des pluies, ont été rarement citées (<5 %).

Malgré la relative stabilité de la quantité de pluie pour 82,5 % des enquêtés, 17,5 % ont constaté une baisse. Depuis 2006, notamment avec le désastre de 2007, les pluies étaient devenues plus concentrées sur de courtes périodes, compliquant la maîtrise du calendrier agricole. Ces perturbations pluviométriques se traduisaient par la baisse des rendements et revenus des producteurs, obligeant ceux-ci à s'adapter aux nouvelles conditions climatiques.

Le déroulement des activités agricoles a été essentiellement basé sur la bonne répartition des pluies au cours de chaque saison agricole. La figure 6 (a, b, c et d) résume la perception des paysans sur le démarrage et la fin des différentes saisons agricoles, il y a 60 ans et de nos jours.

**Figure 6** : Perceptions des paysans sur la variabilité des saisons en début (a, b) et en fin (c, d) de saisons agricoles

Source : Résultats des travaux de terrain, octobre 2021.

GSP = Grande Saison pluvieuse ; PSP = Petite Saison des pluies

Selon les paysans enquêtés, le calendrier des saisons agricoles a subi de profondes modifications. Jadis, la grande saison pluvieuse débutait en mars (60 %), mais aujourd'hui elle a commencé en avril (55 %) et a pris fin plus tôt, en juillet, pour 50 % des producteurs. La petite saison, qui débutait en septembre (65 %) et finissait en novembre, démarrait désormais en octobre (52 %) et s'étendait parfois jusqu'en décembre (55 %). Ainsi, 97 % des enquêtés ont signalé un retard du démarrage des pluies, rendant le calendrier agricole traditionnel inadapté et réduisant la disponibilité en eau.

De plus, certains signes naturels servaient d'indicateurs agricoles : « lorsque le tonnerre grondait fort, cela était annonciateur d'une bonne saison » (Akindélé, 2014). Mais de façon générale, 99 % ont reconnu que « les pluies ont commencé plus tard et ont fini plus tôt que dans le passé », avec une variabilité spatiotemporelle accrue. Enfin, 95 % des producteurs ont estimé que les précipitations ont diminué et la saison s'est rétrécie ces trente dernières années.

Les populations locales ont apprécié différemment l'évolution de la température dans la commune d'Aplahoué. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Synthèse des perceptions paysannes sur l'évolution de la température

Tendance thermométrique	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)
Hausse des températures	178	58,36
Baisse des températures	14	04,59
Pas de changement	113	37,05
Total	305	100

Source : Données d'enquête août - septembre 2021

Les résultats ont montré que plus de la moitié des personnes enquêtées (58,36 %) ont affirmé avoir remarqué une hausse des températures ces dernières années tandis que seulement 04,59 % ont affirmé le contraire. Pour le reste, soit 37,05 %, on ne pouvait conclure à une modification de ce paramètre climatique. La majorité de la population reconnaissait que la chaleur devenait de plus en plus intense et insupportable aussi bien pour les agriculteurs que pour les cultures. De nos jours, il a été observé un rapide flétrissement des plants lorsque les pluies devenaient rares. Cependant, il a été constaté ces dernières années, un excès pluviométrique/inondation affirmée par 77,50 % des enquêtés. Ces constats des populations ont confirmé la tendance à la hausse des températures observée à partir du traitement des différentes données thermométriques.

3.3. Vulnérabilité et options d'adaptation

Les diagrammes de la figure 7 ont illustré le degré de vulnérabilité des éléments du système de culture aux impacts de la variabilité climatique dans la commune d'Aplahoué.

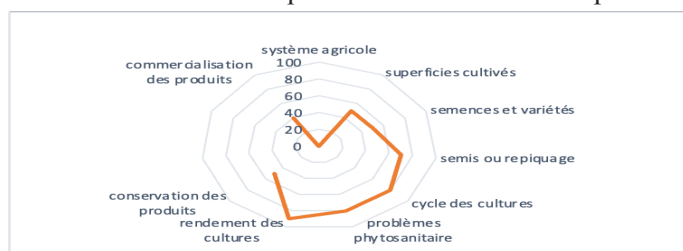


Figure 7 : Diagramme de vulnérabilité des éléments du système de culture
Source : Enquête de terrain, novembre 2021

Les indices d'exposition ont varié de 40 % à 90 % et le rendement des cultures a été plus vulnérable que les autres éléments des systèmes de culture, suivi de la santé des cultures et le cycle des cultures. Aucun élément du système n'a été à l'abri des impacts de la variabilité climatique dans la commune d'Aplahoué.

Ces différents éléments du système étaient tous indispensables pour les agrosystèmes, il était important de comprendre à quel degré chacun d'eux était très éprouvé par les extrêmes hydroclimatiques (tableau 7).

Dans le tableau 7 a été présentée la matrice de sensibilité des différents éléments dans la commune d'Aplahoué.

Tableau 7 : Matrice de sensibilité aux impacts de la variabilité climatique

Système agricole	Risques climatiques		Indices d'exposition	Classement
	Sécheresse	Inondation		
Superficies cultivées	2	3	50	4
Semences et variétés	1	4	50	4
Semis ou repiquage	4	3	70	3
Cycle des cultures	5	3	80	2
Problèmes phytosanitaires	4	4	80	2
Rendement des cultures	4	5	90	1
Conservation des produits	1	4	50	4
Commercialisation des produits	1	3	40	5
Indice d'impact	55		72,5	

Source : Enquête de terrain, novembre 2021

Source : Enquête de terrain, novembre 2021

Les résultats de l'analyse ont montré que les impacts de la variabilité climatique majeurs étaient les inondations (72,5 %) et la sécheresse (55 %) et que tous les éléments du système de production étaient exposés aux risques. Les impacts de la variabilité climatique ont constitué un handicap pour le développement de l'agriculture dans la commune d'Aplahoué.

Face à l'ampleur persistante de la variabilité climatique et de ses impacts, des mesures ont été développées par les producteurs.

Le déplacement de la date de semis et l'association des cultures ont été les options d'adaptation utilisées par les producteurs pour faire face aux impacts de la variabilité climatique dans les agrosystèmes et elles variaient d'un producteur à un autre.

Concernant le déplacement de la date de semis, depuis les décennies, les paysans ont eu un calendrier agricole qu'ils ont adopté dans les agrosystèmes conformément aux champs ordinaires. Toutefois, face aux perturbations climatiques ces dernières décennies, les producteurs, dans les agrosystèmes, ont déplacé la date de semis. Au cours des enquêtes, les producteurs ont affirmé qu'ils déplaçaient les dates des semis s'ils constataient du retard dans la mise en place, dans le démarrage des premières pluies. Soixante-dix-huit pour cent (78 %) des producteurs enquêtés dans les champs attendaient les premières pluies. Les semis ont été faits à partir du mois d'avril au mois de mai tandis que les vingt-deux pour cent (22 %) restants ont fait des semis allant du début du mois de mars au début du mois d'avril. Ces paysans ont qualifié leur semis de « semis à risque ». Mais, la plupart de ces producteurs qui ont fait des semis à risque ont affirmé qu'ils ont procédé à l'arrosage des champs, ces derniers étaient à proximité des concessions.

Des premiers semis de la grande saison des pluies à la petite saison, les producteurs ont procédé aux semis de différentes cultures. Sauf que des producteurs ont fait des cultures saisonnières comme le maïs et le haricot. Au cours de la petite

saison pluvieuse, les semis ont eu lieu déjà à partir de mi-août. Le calendrier agricole dans les champs était en réaménagement d'après la variabilité spatiotemporelle de la pluviométrie.

L'association de cultures a consisté à produire deux ou plusieurs plantes simultanément dans le même champ (Steiner, 1985). Elle a permis aux paysans de réduire les risques naturels qui pouvaient affecter les rendements agricoles, notamment les ruptures de pluies. Elle a permis aussi d'atténuer l'effet d'un stress hydrique en cours de cycle grâce aux possibilités de compensation entre les espèces associées sur la même parcelle.

Trenbath (1993) a montré qu'une espèce qui pousse en association avec d'autres cultures était moins attaquée par les ravageurs qu'en culture pure et améliorait la productivité par unité de surface. Pour avoir accès à plusieurs cultures, les paysans ont associé plusieurs cultures sur une même portion de terre. L'association de culture quant à elle présentait l'inconvénient de donner lieu à une compétition interspécifique pour le captage de lumière, l'eau et les nutriments. Elle a contribué significativement à l'épuisement rapide du sol.

4. DISCUSSION

4.1. Manifestations de la variabilité climatique

Dans la Commune d'Aplahoué, les hauteurs des pluies ont baissé sur la période 1963-2001 comparativement aux périodes 1952-1962, 2002-2018. Les températures minimale et maximale ont connu une évolution progressive de 1952 à 2018 avec une hausse dans les années entre 1954 et 2016. La récurrence des événements climatiques, depuis ces dernières années, constitue l'un des principaux facteurs qui affecte aussi bien la capacité de production des exploitants agricoles du secteur de recherche (J. L. Ayedjo *et al.*, 2024). Ce résultat est proche de ceux de (M. B. D. Ahouangan *et al.*, 2013 et O. Koudamiloro, 2017) qui ont montré que le Bénin est sujet à une Ces résultats corroborent ceux obtenus par Boko *et al.* (2012), qui ont observé une perturbation du régime pluviométrique et une tendance à la hausse de la température dans le Sud-Bénin. On peut conclure à une instabilité du principal paramètre climatique de la zone soudanienne que sont les précipitations. Cette instabilité des pluies constitue une expression des changements et variabilités climatiques (G. L. Djohy et Edja A. H., 2018)

De 1952 à 2018, la variabilité pluviométrique dans la Commune d'Aplahoué s'est traduite par l'alternance d'années excédentaires et déficitaires, marquée par le démarrage tardif des pluies, leur mauvaise répartition et des poches de sécheresse (Ogouwalé, 2006 ; Codjo *et al.*, 2013). Ces phénomènes, aggravés par la hausse des températures minimales et maximales, compromettent l'eau et l'agriculture (Boko *et al.*, 2012 ; Kaboré *et al.*, 2017).

Les analyses montrent une rupture pluviométrique autour des années 1980 (Totin, 2010 ; Koumassi, 2014), confirmée par une hausse thermique notable en 1973, 1977, 1979, 2010 et 2011 (Ogouwalé, 2006, p.302). Selon la perception locale, les changements climatiques se manifestent par le décalage des saisons, les sécheresses, inondations et vents violents (Teka *et al.*, 2013).

Une forte concordance existe entre observations scientifiques et perceptions paysannes : baisse de rendements, destructions de cultures, perturbation du calendrier agricole (Houssou-Goe, 2008 ; Hounzinmè *et al.*, 2020). Comme ailleurs

en Afrique (Doukpolo, 2014 ; Issaou, 2014), les paysans identifient l'augmentation des températures et la baisse de la pluviométrie comme changements majeurs. Ces perturbations récentes fragilisent les agrosystèmes et compromettent durablement les productions.

4.2. Perceptions paysannes de la variabilité climatique

L'analyse des données pluviométriques et thermiques ainsi que la perception locale révèlent que les populations identifient clairement les effets de la variabilité climatique : sécheresses, inondations, démarrages tardifs des pluies, fins précoces et hausses de températures. Ces aléas affectent les superficies emblavées, les rendements et fragilisent une agriculture essentiellement pluviale (Agbéssi, 2016 ; Ahossi, 2016).

Les paysans, se référant aux conditions climatiques passées jugées « normales », observent une réduction de la durée de la saison pluvieuse, des poches de sécheresse et une chaleur excessive, confirmant les travaux de (Yegbemey *et al.*, 2014 ; Chédé *et al.*, 2020). L'érosion hydrique, accentuée par ces phénomènes, demeure un facteur majeur de dégradation des sols (Boyossoro *et al.*, 2007).

Toutefois, les causes de ces événements sont souvent attribuées à la nature ou aux métaphysiques plutôt qu'aux activités humaines (Minhountchi, 2022). Face à cette variabilité, diverses stratégies d'adaptation locales sont mises en œuvre par les producteurs.

4.3. Vulnérabilité des agrosystèmes et mesures d'adaptation

Les impacts de la variabilité climatique sur les agrosystèmes d'Aplahoué poussent les producteurs à développer diverses mesures d'adaptation, notamment l'utilisation de semences à cycle court, l'agriculture de contresaison, l'irrigation, la diversification agricole et l'ajustement du calendrier cultural (Kombienou *et al.*, 2024). Toutefois, ces stratégies endogènes (semis répétés, variétés précoces, paillage) demeurent insuffisantes pour réduire leur vulnérabilité, confirmant les constats de (Yabi et Afouda, 2007 ; Ahossi, 2016 et Codjo, 2017).

La dépendance d'une agriculture pluviale aux aléas climatiques – séquences sèches, inondations, démarrages tardifs ou fins précoces des pluies, hausse des températures – accroît les risques de pertes agricoles. D'où la nécessité d'une maîtrise de l'eau, via micro-irrigation et intensification des pratiques culturales, comme le recommandent (Barbier *et al.*, 2006 ; Waïdi, 2020).

Les résultats convergent avec ceux de (Agossou *et al.*, 2012 ; Amani, 2012.), qui soulignent l'importance des semis multiples, de l'utilisation d'engrais, du recours à la main-d'œuvre et du choix de variétés précoces. Enfin, la valorisation des fumiers organiques et de la lutte biologique intégrée constitue une piste prometteuse pour renforcer la résilience agricole.

CONCLUSION

L'étude analyse les tendances climatiques, les perceptions paysannes et les stratégies locales d'adaptation aux changements climatiques dans la Commune d'Aplahoué. Les impacts de la variabilité climatique affectent fortement les conditions socioéconomiques des exploitants agricoles. Les investigations ont révélé une diversité de techniques locales d'adaptation. La variabilité pluviométrique de 1952 à 2018 est marquée par une alternance d'années excédentaires et déficitaires, renforcée par la hausse des températures minimales et maximales (0,03 °C/an). Ces

conditions imposent de fortes contraintes agronomiques et environnementales, avec des répercussions sur le calendrier agricole classique. Les mesures d'adaptation mises en place, bien qu'efficaces par endroits, nécessitent une meilleure organisation et coordination, compte tenu de prévisions climatiques futures peu reluisantes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le personnel de l'ATDA 5, les personnes ressources et les populations d'Aplahoué pour leur implication, ainsi que toutes les bonnes volontés ayant contribué à l'amélioration de cet article par leurs observations et suggestions.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agbessi E.M.P. (2017). Extrêmes hydro-climatiques dans le bassin du fleuve Mono à Athiémé. Mémoire de Master. MIRD/FLASH/Université d'Abomey-Calavi, Bénin. 288 p.

Agossou D.S.M., Tossou C.R., Vissoh V.P. and Agbossou K.E. (2012). Perception des perturbations climatiques, savoirs locaux et stratégies d'adaptation des producteurs agricoles béninois. *African Crop Science Journal*, Vol. 20, Issue Supplements2, pp. 565-588.

Agossou F. (2012). Impact économique du changement climatique sur l'agriculture au Bénin. Mémoire de Maîtrise Université d'Abomey-Calavi 65p.

Ahossi A. (2016). Risques hydroclimatiques et stratégies endogènes d'atténuation d'adaptation dans la commune de Bopa. Mémoire de Master. MIRD/FLASH/ Université d'Abomey-Calavi, 65p.

Ahouangan M. B. D., Hountondji Y-C., Thiry A., De Longueville F., Djaby B. et Ozer P. (2013). Adaptation et résilience des populations rurales face aux catastrophes naturelles en Afrique subsaharienne. Cas des inondations de 2010 dans la commune de Zagnanado, Bénin. 18 p.

Akindélé A. (2014). Interprétation socio-anthropologique des indicateurs environnementaux de la dynamique du climat dans le département du Plateau. Mémoire de maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi /FLASH/DGAT, 65 p.

Amani Y.C. (2012). Production agricole et changement climatique : vers une tragédie des comportements paysans à Tiassalé ? *European Scientific Journal*, vol. 8, No.16, pp. 227-244.

Atidéglà C.S. and Koumassi D.H. (2022). Effets de la variabilité climatique sur la production agricole dans la commune de Sô-ava au Bénin et stratégies d'adaptation. *J. innov. res. appl. sci.*; 14(6): 330-338. ISSN 2429-5396 ; www.american-jiras.com.

Atideglà C.S. (2011). Effets des différentes doses d'engrais minéraux et de la fiente de volaille sur l'accumulation de biocontaminants et polluants (germes fécaux, composés azotés et phosphorés, métaux lourds) dans les eaux, les sols et les légumes de Grand-Popo au Bénin. Thèse de doctorat unique, EDP/FLASH, Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin, ; p 319

Ayédjô L. J., Djessonou F-N. C., Hounkanrin B. et Ogouwalé E. (2024). Impacts De La Variabilité Climatique Sur L'Agriculture Familiale Dans La Commune De Bantè (Bénin, Afrique De L'Ouest). *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*

ISSN : 2509-0119. © 2024 Scholar A Vol. 48 No. 1 December

2024, pp. 645-656.

Barbier E.B., Edward B., Koch, Evamaria W., Silliman, Brian R., Hacker, Sally D., Wolanski, Eric, Primavera, Jurgenne H., Granek, Elise F., Polasky, Stephen, Aswani, Shankar, Cramer, Lori A., Stoms, David M., Kennedy, Chris J., Bael, David, Kappel, Carrie V., Perillo, Gerardo M. E., and Reed, Denise J. (2008). Response to N. Koedam and F. Dahdouh-Guebas's E-Letter [original article: Barbier et al. (2008). Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values]. *Science*, 320. pp. 321-323.

Barbier N., Couteron P., Lejoly J., Deblauwe V. and Lejeune O. (2006). Selforganised vegetation patterning as fingerprint of climate and human impact on semiarid ecosystems. *Journal of Ecology*, 94 (3), 537-547. Doi: 10.1111/j.1365-2745.2006.01126.x

Boko M. (1988). Climats et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres et Sciences Humaines. CRC, URA909 du CNRS, Université De Bourgogne, Dijon, 2 volumes, 601 p

Boko M., Kosmowski F. and Vissin W.E. (2012). Les Enjeux du Changement Climatique au Bénin : Programme pour le Dialogue Politique en Afrique de l'Ouest. Konrad-Adenauer-Stiftung, Cotonou, 65 p.

Boyossoro, H. Kouadio, K. et Kouamé, F. (2007). Insécurité climatique et Géorisques en Côte d'Ivoire : étude du risque d'érosion hydrique des sols dans la région semi -montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences et Changements Planétaires* 18(1) : 29- 37 p.

Chédé F., Yabi I. et Houndénou C. (2020). Variabilité Intra-saisonnière de la grande saison pluvieuse dans le Sud-Bénin. *European Scientific Journal* February 16 (6) ISSN 1857-7431, 300-316.

Codjo T. (2017). Aménagement hydro-agricole pour la réduction de la vulnérabilité et l'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques dans la Basse Vallée de l'Ouémé. Thèse de doctorat unique, DGAT/EDP/ Université d'Abomey-Calavi, 312 p.

Codjo T., Lamodi F., Agbalessi S., Ogouwalé R. and Ogouwalé E. (2013). Stratégies paysannes d'adaptation aux changements climatiques dans la commune de Pobè : 164-169. In Boko M.,

Dixon J., Gulliver A. and Gibbon D. (2001). Farming systems and Poverty: Improving Farmer's Livelihoods in a changing world. FAO, Rome, Italie. 49p.

Djohy G. L. et Edja A. H. (2018). Effet de la variabilité climatique sur les ressources en eau et

stratégies d'adaptation des éleveurs et maraîchers au Nord-Bénin. *Annales de l'Université de Parakou Série « Sciences Naturelles et Agronomie »* ISSN : 1840-8494 eISSN : 1840-8508 Parakou, Bénin. Ann. UP, Série Sci. Nat. Agron. Décembre 2018 ; Vol.8 (No.2) : 83-91

Doukpolo B. (2014). Changements climatiques et productions agricoles dans l'Ouest de la République Centrafricaine. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 337 p.

Houndénou C. (1999). Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin diagnostic et modélisation. Thèse de Doctorat de géographie. UMR5080

- CNRS « Climatologie de l'Espace Tropical » Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie, Dijon, 341p
- Hounzinmè S.S., Chanhoun C.S.L., Teka O. and Oumou M. (2020). Effets De La Variabilité Climatique Sur Le Rendement De Quelques Cultures Vivrières Dans Le Nord-Est Du Benin. *European Scientific Journal*, ESJ, 16(12), 137. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n12p13>
- Houssou S.E. (2014). Variabilité climatique et production maraîchère dans le bas-fond de Houinga-Houégbé (Commune de Houéyogbé). Mémoire de Master II, FSA/ Université d'Abomey-Calavi, p 119.
- Houssou-Goe P.S.S. (2008). Agriculture et changements climatiques au Bénin : Risques climatiques, vulnérabilité et stratégies d'adaptation des populations rurales du département du Couffo. Thèse pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome. Faculté des Sciences Agronomiques (FSA). Département d'Economie, Socio-Anthropologie et Communication pour le développement rural (DESAC) Université d'Abomey-Calavi (UAC). 103p.+Annexes
- INStad (Institut National de la Statistique et de la Démographie). (2013). RGPH4 : Cahiers des villages et quartiers de villes du Département du Couffo du Bénin (RGPH-4, 2013). Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation. Direction des Etudes Démographiques, Ministère du Plan et du Développement, 34 p. <https://rgph5.instad.bj/wp-content/>
- Issaou L. (2014). Risques climatiques dans le sud-Togo : manifestations, impacts et stratégies d'adaptation. Thèse de Doctorat de Géographie de l'Université de Lomé, 264 p.
- Kaboré P.N., Ouedraogo A. Sanon M., Yaka P. and Somé L. (2017). Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du Centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. *Climatologie*, (14): 82-95. Doi: <https://doi.org/10.4267/climatologie.1268>
- Man-Kendall G. (1948). Rank correlation methods. London, UK: Griffin. [Google Scholar]
- Kombienou P.D., Tovo C.A., Yabi I. and Arouna O. (2024). Effets de la variabilité climatique sur les agrosystèmes et stratégies paysannes d'adaptation dans la commune d'Aplahoué au sud-ouest du Bénin. *Rev. Sc. Env. Univ., Lomé (Togo)*, 2024, n° 21. ISSN 1812-1403. 142-166
- Koudamilo O. (2017). Vulnérabilité aux risques hydroclimatiques et stratégies d'adaptation des populations dans le bassin versant de l'Ouémé à Beterou (Bénin). Thèse de Doctorat en Gestion des ressources naturelles, EDP/UAC, 274 p.
- Koumassi H. (2014). Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Couberi. Thèse de Doctorat unique, LECREDE/ FLASH / EDP / Université d'Abomey-Calavi 246p
- MAEP (2017). Cadre programmatique du secteur agricole, 154p
- Massé D. (2007). Changements d'usage des terres dans les agrosystèmes d'Afrique subsaharienne : propriétés des sols et dynamique des matières organiques. *Science de la Terre. Institut National Polytechnique de Toulouse*, 83p
- Minhountchi M.K. (2022). Vulnérabilité de l'agriculture et stratégie de résilience aux risques climatiques dans la commune d'Aplahoué. Mémoire de Master II en Géographie et Gestion de l'Environnement à l'Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espaces, Cultures et Développement » de l'Université d'Abomey-Calavi. 98p.
- Ogouwalé E. (2006). Changement climatique dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire. Thèse de Doctorat unique, LECREDE/ FLASH / EDP / Université d'Abomey-Calavi 302p
- PANA-Bénin (2008). Programme d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques du Bénin (PANA-BENIN). Cotonou, janvier 2008. 81p.
- Schwartz D. (1995). Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. 4^e édition, Éditions médicales, Flammarion, Paris, 314 p.
- Steiner K.G. (1985). Cultures associées dans les petites exploitations agricoles tropicales en particulier en Afrique de l'Ouest. *Eschborn, GTZ*, 347 p.
- Teka O., Houessou G.L., Oumou M., Vogt J. and Sinsin B. (2013). An assessment of climate variation risks on agricultural production: Perceptions and adaptation options in Benin. *Int. J. Clim. Change Strateg. Manag.* 5, pp.166–180. <https://doi.org/10.1108/17568691311327578>
- Totin H. (2010). Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : Stratégies de gestion durable. Thèse de Doctorat nouveau régime, EDP/FLASH, 234 p.
- Trenbath, B.R. (1993). Intercropping for the Management of Pests and Diseases. *Field Crop Research*, 34, 381-405.
- Vissin E.W. (2007). Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat unique, Dijon, France, 285p
- Waïdi S. (2020). Vulnérabilité du paysannat aux changements climatiques dans la dépression médiane au Sud-Bénin. Thèse de doctorat unique de géographie Université d'Abomey-Calavi. DGAT/EDP/ Université d'Abomey-Calavi, 274 p.
- Yabi I. and Afouda F. (2007). Variabilité pluviométrique du début de la saison agricole et mesures d'adaptation dans le département des Collines au Bénin (Afrique de l'ouest). In : Actes du 1er colloque de l'Université d'Abomey-Calavi des Sciences, Cultures et Technologies, Géographie, Abomey-Calavi (Bénin), pp. 315- 327.
- Yegbemey R.N., Yabi J.A., Aïhoun G.B. and Paraïso A. (2014). Modélisation simultanée de la perception et de l'adaptation au changement climatique : cas des producteurs de maïs du Nord Bénin (Afrique de l'Ouest). *Cah. Agric.* 23 (3) : 177-187 p.

Composition and seasonal distribution of diatom in human-influenced rivers in tropical Africa: Nonhon and Gninhin rivers (Ivory Coast, West Africa)

SEU-ANOI Netto Mireille^{1*}, ADJOUMANI Yaoua Ines¹, KOUADIO Kouakou Norbert 1

Abstract

This study aimed to describe the temporal and spatial distribution of diatoms communities of the rivers Nonhon and Gninhin that are impacted by agricultural and mining activities respectively. Sampling was carried out every 45 days from October 2020 to February 2022 at three stations on each rivers following two climatic seasons. Diatoms were sampled at the same time as physical and chemical parameters using qualitative and quantitative methods according to Standard NF EN 15972 (2011). Thirty-one taxa, 12 genera, 12 families, 5 orders and 2 classes were identified. Abundance varied between 18×10^5 Cells/L and 40×10^5 Cells/L and between 30×10^5 and 126×10^5 Cells/L respectively in Nonhon and Gninhin Rivers. In Nonhon River, extreme values of Shannon diversity index (1.42 and 2.14) were noted during dry season at stations NO1 and NO3 respectively. Maximum (0.90) and minimum (0.71) values of evenness index were recorded during rainy season at stations NO2 and NO3 respectively. Concerning Gninhin River, Shannon diversity index values fluctuated between 0.73 and 2 respectively at stations GN1 and GN2 during rainy season. Evenness values oscillated between 0.32 and 0.82 respectively at GN1 and GN2 during dry season. The lack of homogeneity of the appearance of taxa indicated the dominance of few taxa with high abundance, which is an indicator of the existence of environmental pressure. These results suggested the need for awareness among the local population about ecological standards for the conservation of the ecological integrity of the two rivers.

Key words: Composition, Dynamic, Diatoms, Rivers; West Africa

Résumé

Cette étude visait à décrire la distribution spatio-temporelle des communautés de diatomées des rivières Nonhon et Gninhin, impactées respectivement par les activités agricoles et minières. Des prélèvements ont été effectués tous les 45 jours, d'octobre 2020 à février 2022, à trois stations sur chaque rivière, suivant deux saisons climatiques. Les diatomées ont été échantillonnées de manière concomitante avec les paramètres physico-chimiques en utilisant des méthodes qualitatives et quantitatives conformément à la norme NF EN 15972 (2011). Au total, 31 taxons, 12 genres, 12 familles, 5 ordres et 2 classes ont été identifiés. L'abondance varie entre 18×10^5 cellules/L et 40×10^5 cellules/L dans la rivière Nonhon, et entre 30×10^5 et 126×10^5 cellules/L dans la rivière Gninhin. Dans la rivière Nonhon, des valeurs extrêmes de l'indice de diversité de Shannon (1,42 et 2,14) ont été observées pendant la saison sèche aux stations NO1 et NO3 respectivement. Les valeurs maximales (0,90) et minimales (0,71) de l'indice d'équitabilité ont été enregistrées pendant la saison des pluies aux stations NO2 et NO3 respectivement. Concernant la rivière Gninhin, les valeurs de l'indice de diversité de Shannon ont fluctué entre 0,73 et 2 aux stations GN1 et GN2 respectivement pendant la saison des pluies. Les valeurs d'équitabilité ont oscillé entre 0,32 et 0,82 aux stations GN1 et GN2 respectivement pendant la saison sèche. Le manque d'homogénéité dans la représentation des taxons indique la dominance de quelques taxons très abondants, ce qui témoigne de l'existence d'une pression environnementale. Il est impératif de sensibiliser la population locale aux normes écologiques pour la conservation de l'intégrité écologique de ces deux rivières.

Mots clés : Composition, Dynamique, Diatomées, Rivières ; Afrique de l'Ouest

¹ Laboratoire d'Environnement et de Biologie Aquatique (LEBA), UFR - Sciences et de Gestion de l'Environnement, Université NANGUI Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02 (Côte d'Ivoire)

* Corresponding Author : SEU-ANOI Netto Mireille ; 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire ; GSM : 00225 07 59 20 32 27 ; E-mail : nettomiranoy@yahoo.fr

1-Introduction

River ecosystems dynamics is hierarchically organised in space (Tudesque *et al.*, 2014), and are influenced by multiple natural and thropogenic factors operating at different temporal and spatial scales, causing biotic assemblage variation depending on which factor is at play. For example, water pollution mainly due to human activities leads to many undesirable effects on ecosystem as well as human health (Carr and Neary, 2008). Agricultural runoff and wastes from urban areas that get their way into different aquatic systems could lead to changes in the physical and chemical characteristics of the receiving water bodies (Peters and Meybeck, 2000). Aquatics ecosystems are important, as they provide numerous ecological services from water storage, maintenance of biodiversity and biochemical cycling

(Messenger *et al.*, 2021). Therefore, the need for proper monitoring and management of those aquatic ecosystems is crucial, as all life on earth depends on them. A more appropriate biomonitoring technique must thus be applied to assess water quality using these microscopic organisms, (Matlala *et al.*, 2011) with diatoms serving as indicators. Indeed, diatoms are the main primary producers and chemical modulators in freshwater aquatic ecosystems (Mangadze *et al.*, 2015) and represent an important carbon and energy source for secondary consumers (Venkatachalapathy and Karthikeyan, 2015). Because diatoms are very sensitive to environmental changes and/or disturbances such as eutrophication, acidification, land use and pollution, they are considered as powerful indicators of water quality in freshwater systems (Bere and Tundisi, 2010 ; Wu *et al.*, 2012 ; Rimet *et al.*, 2015). In addition,

Diatoms are a major group of the algae and are one of the most common types in fresh water (Wehr and Sheat, 2003). They are usually at the base of aquatic food web are the most important factor for production of organic matter in aquatic ecosystem. Therefore, rivers require significant amounts of diatoms to have productive and sustainable fisherie.

Despite their importance in aquatic ecosystems, diatoms data are scarce, being limited to the studies of Ouattara (2000), Da (2007), Salla (2015) and N'Guessan *et al.* (2018) in tropical Africa. In Ivory Coast, the use of these organisms in monitoring the integrity of rivers is very limited by a lack of knowledge. Only available data are those of N'Guessan *et al.* (2018). None of his studies concerning diatom's structure has focused on Nonhon and Gninhin rivers despite various activities developed on their watershed. The purpose of the current study was to document diatom biodiversity and describe temporal and spatial distribution of diatom communities as well as physico-chemical factors that control their dynamics from a sustainable development perspective.

2-Materials and Methods

2.1-Study area and sampling sites

The study area with the the two rivers Nonhon and Gninhin is under two climatic conditions namely a dry season from November to February and a rainy season from from March to October. The peak rainfall is in September. Human activities in the study area are dominated by farming and mining (Doffou, 2019). Based on accessibility, the upstream-downstream gradient and influence of human activities, three sampling points were selected for each river (Fig 1). The characteristics of the sampling stations on the Nonhon and Gninhin rivers are set out in table I.

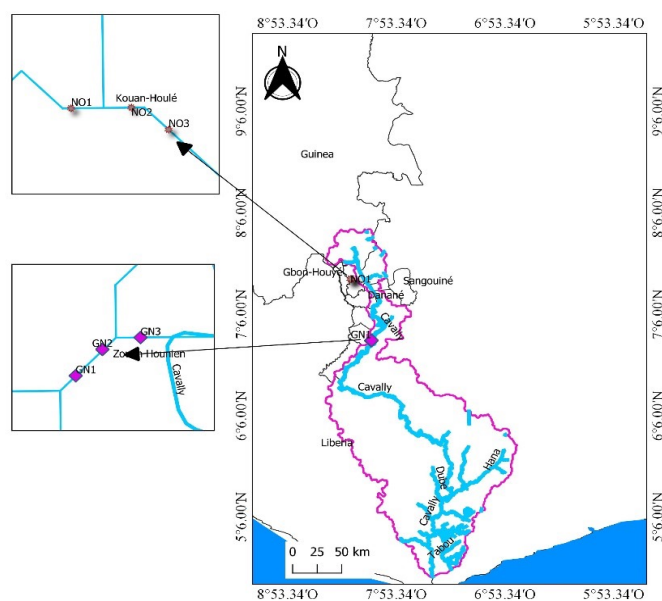


Figure 1: Maps of the Cavally watershed showing the sites of sampling stations on Nonhon (NO1, NO2, NO3) and Gninhin (GN1, GN2 and GN3) rivers in Ivory Coast.

Figure 1: Maps of the Cavally watershed showing the sites of sampling stations on Nonhon (NO1, NO2, NO3) and Gninhin (GN1, GN2 and GN3) rivers in Ivory Coast.

Table I: Characteristics of the sampling sites of the Nonhon and Gninhin rivers.

Rivers	Stations	Geographic coordinates		Canopy (%)	Position
		North Latitude	West Longitude		
Nonhon	NO1	7°26'53,088''	8°18'16,42788''	52,85	Upstream
	NO2	7°26'54,91212''	8°18'21,89988''	53,57	Intermediate
	NO3	6°50'15,87012''	8°18'21,89988''	67,14	Downstream
Gninhin	GN1	6°50'15,87012''	8°6'49,57812''	35,00	Upstream
	GN2	6°50'14,442''	8°6'57,042''	28,89	Intermediate
	GN3	6°50'15,864''	8°6'59,112''	55,56	Downstream

2.2-Sampling and analytical techniques of environmental parameters

Physical and chemical parameters of the water (temperature, pH, conductivity, dissolved oxygen, and transparency) were measured every 45 days from 9 a.m. to 2 p.m. from October 2020 to February 2022 at the different stations. These parameters were measured in situ using a Hach Lange HQ 40D type multiparameter powered on approximately 5 minutes before the measurements. The probes were then immersed in water, then selecting the desired function made it possible to obtain the parameter value on the display screen. Water transparency was measured using a Secchi disc. For nutrients and organic matter, a surface water sample was collected using 1-liter polyethylene bottles at each station and during each sampling campaign, and stored at 4°C in a glass container. The analyses were performed in the laboratory according to the following standards for ISO 7890-3 : 1988 (Nitrates), ISO 7150-1 : 1984 (Ammonium), ISO 6878 : 2004 (Phosphates), AFNOR NF T90-005 (Silice), ISO 15705 : 2002 (COD), ISO 5815-1 : 2019 (BOD5).

2.3-Diatoms sampling and analysis of biotic variables

Diatoms were sampled at the same time as physical and chemical parameters using qualitative and quantitative methods according to Standard NF EN 15972 (2011). Qualitative sampling was carried out using a 20µm mesh plankton net by filtering 40 L of water drawn using a 10 L capacity bucket. After filtration, the filtrate collected in the net collector was stored in a pillbox and fixed with Lugol then with formalin at a final concentration of 5%. Quantitative sampling was carried out by sedimentation of 10 L of water in a bucket. A water sample was stored in 120 mL capacity pillboxes then fixed with Lugol and formalin at a final concentration of 5%. After sampling, diatoms were subjected to specific preparations in order to better reveal details of the ornamentation (striations, pores) of the siliceous shell or frustule (Rumeau and Coste 1988). Diatoms were subsequently observed, photographed and measured under an Olympus BX40 microscope. Identification of these taxa was made as previously described (Couté and Iltis, 1985; Krammer and Lange-Bertalot, 1991; Round *et al.*, 1990 ; Tomas, 1995). Taxa were identified essentially according to the classification of Van den Hoek *et al.* (1995), updated using the website <https://www.algaebase.org/search/species/>.

Water samples (250 mL) intended for the determination of chlorophyll *a* were collected in polyethylene bottles, then wrapped in aluminum foil and stored in a cooler containing dry ice until the laboratory, where samples

were filtered on Whatman GF/F filters with a 0.7 µm mesh using a vacuum pump. After each filtration, filters were immediately immersed in 15 mL of a 90% cool acetone solution in a dark glass bottle wrapped in aluminum foil and stored for 24 hours at 4°. Chlorophyll **a** was extracted by centrifugation of the mixture at 2000 rpm for 15 minutes. Then, the absorbance of the supernatant was measured at several wavelengths (665 and 750 nm) prior and after acidification using a spectrophotometer knowing that acidification destroys chlorophyll **a** without destroying the other pigments.

3-Data analysis

Data were subjected to various analyses as follows

3.1-Structural analyzes

Taxonomic richness and the total number of taxa collected at each site were determined. Biological diversity (H') and evenness (J') were calculated according to equations of Shannon (1949) and Pielou (1966) respectively. Abundance (N) of taxa was expressed as cells per liter (Utermöhl 1958 ; Aktan *et al.*, 2005) and determined according to the following formula:

$$D = N / (a/A) \times V$$

where $a = C_{40} \times (R_{40})^2 \times \pi$

N : quantity of cells counted for a taxon;

a : surface area observed under the microscope;

C_{40} : number of fields observed at 40x; R_{40} : radius of the field at 40x (0.25 mm),

A : surface area of the sedimentation cup where the cells accumulate (490.8 mm²)

V: sample volume used for sedimentation

The chlorophyll biomass was obtained from the Lorenzen formula (1967).

3.2-Statistical analyses

Variability of physical and chemical parameters as well as biotic parameters were studied through univariate analyses. For each parameter studied, hypothesis of normality of data distribution was verified using Shapiro test (Shapiro *et al.*, 1968). Subsequently, data were subjected to Kruskal-Wallis non-parametric test for seasons and stations. Significance level was defined as $p < 0.05$. For these analyses, R software was used.

4-Results

4.1-Physical and chemical variables

Physical and chemical variables at sampling stations in Nonhon and Gninhin rivers during the period October 2020 to February 2022 are presented in Seu-Anoï *et al.* (2024). Overall, physical and chemical characteristics of Nonhon River reflected spatial and seasonal variations (Tab.II). The minimum (23.2°C) and maximum (26.2°C) temperatures were recorded respectively at station NO2 during the dry

season and station NO3 during the rainy season. The pH values vary between 2.87 (NO2; rainy season) and 11.12 (NO3; dry season). The minimum (17 µS/cm) and maximum (140 µS/cm) value of conductivity were observed respectively at NO1 (dry season) and NO2 (rainy season). The dissolved oxygen levels in the different stations have a range of variations between 0.69 mg/L (NO1, dry season) and 5.58 mg/L (NO2, rainy season). The maximum (77.1 cm) and minimum (2.6 cm) values of transparency (77.1 cm) were observed during the rainy season at station NO3. The high nitrate content (15.1 mg/L) and the low content of this parameter (4.9 mg/L) were observed during the rainy season at station NO1. Ammonium concentrations vary from 0.21 mg/L to 0.8 mg/L (NO3; rainy season). The silica contents vary between 4 mg/L (NO1; rainy season; dry season and NO2; rainy season) and 16 mg/L (NO3; rainy season). The maximum content (0.18 mg/L) of phosphate were obtained during the rainy season (NO3). The minimum content (0.04 mg/L) of this parameter was recorded at stations NO1 and NO3 (rainy season) and at station NO2 (dry season). The high value of COD was recorded during the rainy season at station NO2 and the low value was obtained at station NO1 in the dry season. Biochemical oxygen demand (BOD5) concentrations range between 5 mg/L (NO3; dry season) and 19.5 mg/L (NO2; rainy season).

Regarding the Gninhin river (Tab.III), the extremes temperatures values were recorded at station GN3 during the rainy season (25.90 °C) and the dry season (34.9 °C), respectively. Low (5.4) and high (10.24) pH values were recorded at station GN1 during the rainy season. The minimum and maximum conductivity values were obtained at stations GN1 (261 µS/cm) and GN3 (11.3 µS/cm), respectively, during the rainy season. High dissolved oxygen values were recorded at stations GN2 (5.95 mg/L) and GN3 (5.50 mg/L) during the dry season. The extremes transparency values were recorded at stations GN1 (0.01 cm) and GN2 (136.3 cm), respectively, during the dry season. The highest nitrate concentration was recorded at station GN3 during the dry season, while the lowest was recorded at station GN1 during the rainy season. The extreme values for ammonium concentrations were recorded at GN1 (0.08 mg/L) and GN3 (18 mg/L) during the rainy season. The highest and lowest silica concentrations were recorded at station GN3 during the rainy season (3 mg/L) and the dry season (18 mg/L), respectively. The extreme values for phosphate concentration were recorded at stations GN2 (0.05 mg/L) and GN3 (0.26 mg/L) during the rainy season. High COD values were recorded at all stations during the rainy season. Maximum BOD5 values were obtained at all stations during the dry season.

Spatial and seasonal variations of physical and chemical parameters were not significantly different in the two rivers (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$).

Table II. Spatial and seasonal variations of physico-chemical parameters in the Nonhon river in western Côte d'Ivoire (NO = Nonhon river; DS = dry season; RS = rainy season; 1, 2, 3 = Station number).

Nonhon river												
Stations	NO1 RS		NO1 DS		NO2 RS		NO2 DS		NO3 RS		NO3 DS	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Temperature (°C)	24.7	26.07	23.7	25.14	24.5	25.87	23.2	25.35	24.6	26.2	23.4	24.49
pH	5.76	8.75	6.2	10.75	2.87	8.56	6.6	10.29	6.57	8	7.08	11.12
Conductivity (µS/cm)	36	84	17	95.2	18	140	18	91.7	20	38	20	93.7
Dissolved oxygen (mg/L)	1.2	4.2	0.69	3.54	2.8	5.58	1.52	3.44	1.2	5.85	2.21	3.68
Transparency (cm)	3.1	73.5	8.1	46.2	12.6	67.6	17.2	44.7	2.6	77.1	26.4	47.1
Nitrates (mg/L)	4.9	15.1	4.8	11.6	5.3	13.7	5.1	9.2	6.1	14.1	5.7	10.4
Ammonium (mg/L)	0.36	0.7	0.26	0.33	0.29	0.78	0.29	0.41	0.21	0.8	0.3	0.52
Silice (mg/L)	4	13	4	11	4	12	7	14	5	16	5	14
Phosphates (mg/L)	0.04	0.1	0.05	0.05	0.05	0.14	0.04	0.1	0.04	0.18	0.06	0.08
DCO (mg/L)	17.3	38.9	13.6	16.2	19.2	40.8	14.1	20.8	15.5	40.6	14.6	16.9
DBO5 (mg/L)	7	14	5.5	9.5	6	19.5	6	12.5	6.5	17	5	10.7

Table III. Spatial and seasonal variations of physico-chemical parameters in the Gninhin river in western Côte d'Ivoire (GN = Gninhin river; DS = dry season; RS = rainy season; 1, 2, 3 = Station number).

Gninhin river												
Stations	GN1 RS		GN1 DS		GN2 RS		GN2 DS		GN3 RS		GN3 DS	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Temperature (°C)	26	29.6	25.96	29.53	26.5	31.7	29.61	30.04	25.9	31.52	30.04	34.9
pH	5.4	10.24	7.51	7.9	6.7	8.28	7.86	7.96	5.49	7.29	7.66	7.84
Conductivity (µS/cm)	51	261	31	134	59	111	26	74	11.3	172	36	85
Dissolved oxygen (mg/L)	0.4	4.36	3.56	3.77	0.7	2.81	3.14	5.95	2.2	4.7	2.66	5.5
Transparency (cm)	0.02	54	0.01	66.2	0.03	44	45.2	136.3	0.02	31	1.4	37.8
Nitrates (mg/L)	6.3	15.1	8.2	91	5.2	13.1	14.3	17.6	6.7	20.4	21.2	24.2
Ammonium (mg/L)	0.08	0.68	0.38	0.38	0.21	0.41	0.44	0.55	0.26	18	0.47	0.71
Silice (mg/L)	4	12	9	16	4	13	9	12	3	13	10	18
Phosphates (mg/L)	0.11	0.14	0.06	0.12	0.05	0.18	0.12	0.21	0.06	0.26	0.09	0.23
DCO (mg/L)	14.8	31.4	18	20.3	14.6	27.8	18.1	20.3	17.3	31	23.8	26.5
DBO5 (mg/L)	4	10	9.5	12.9	6.5	12.5	11.7	17.3	4	14.5	14.5	19.1

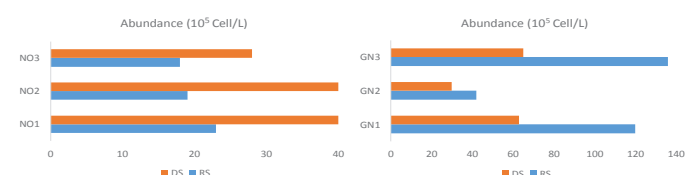
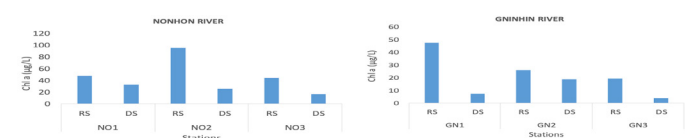
4.2-Diatom community composition

In the present study, 31 taxa belonging to 12 genera, 12 families, 5 orders and 2 classes were identified from all sampling sites (Tab.3). In both rivers, Bacillariophyceae class was the predominant diatom population with 94%. Mediophyceae class only represents 06% of the total population. *Pinnularia* (08 taxa), *Surirella* (05 taxa), *Gyrosigma* (03 taxa) were the predominant genera with the highest taxa richness recorded in the sampling sites during both seasons. In agricultural sites (Nonhon river), the community (21 diatomic taxa) was distributed between two classes namely Bacillariophyceae and Mediophyceae. Bacillariophyceae class was the highest contribution with a percentage of 82%. Mediophyceae represented only 8% percent of the total population. The genera *Achnanthes*, *Surirella*, *Stenopterobia*, *Achnanthes*, *Gyrosigma*, *Navicula*, *Pinnularia* appeared with the highest frequencies and *Stephanodiscus*, *Cyclotella*, *Fragilaria*, and *Pinnularia* were specific genera in this river. Taxa, notably *Cyclotella meneghiniana*, *Stephanodiscus astra*, *Fragilaria crotonensis*, *Pinnularia viridis*, present in Nonhon river were supporting organic pollution. Moreover, the mining impacted sites (Gninhin River) with 25 diatomic taxa, were characterized by the presence of a single class consisting of Bacillariophyceae (100%) and predominated by *Craticula*, *Pinularia*, *Gyrosigma*, *Achnanthes*, *Stenopterobia*, *Surirella* with the highest frequencies (above 50%). The genera notably *Ulnaria*, *Craticula*, *Stauroneis*, *Sellaphora*, *Pinnularia*, *Sellaphora*, *Encyonema*, *Surirella*, obtained in this River were common in polluted waters. *Ulnaria ulna*, *Craticula cuspidata*, *Stauroneis anceps*, *Sellaphora pupula*,

Pinnularia sp.3, *Sellaphora pupula* var. *bacillarioides*, *Encyonema silesiacum*, *Surirella capronii* were the taxa present only in this site. Taxa common to both rivers were *Pinnularia brauniana*, *Pinnularia nodosa*, *Pinnularia* sp.1, *Pinnularia* sp.2, *Pinnularia* sp.4, *Pinnularia* sp.5, *Navicula placentula*, *Gyrosigma acuminatum*, *Gyrosigma* sp.1, *Gyrosigma* sp.2, *Achnanthes tropica*, *Stenopterobia intermedia*, *Surirella tenera*, *Surirella* sp.1, *Surirella* sp.2, *Placoneis elginensis*. In the two rivers, the stations located in the upstream zone (NO1: Nonhon river and GN1: Gninhin river) record the lowest taxonomic richness with 9 and 13 taxa in Nonhon and Gninhin rivers respectively. On the other hand, stations located downstream (NO3: Nonhon river and GN3: Gninhin river) with 15 and 16 taxa respectively present the greatest taxonomic richness.

4.3-Diatoms abundance and biomass

Spatio-seasonal variation in total abundance of diatoms in Nonhon and Gninhin rivers is presented in Fig. 2. Across the two rivers, abundance varied between 18.10^5 Cell/L and 40.10^5 Cell/L in Nonhon river and between 30.10^5 and 126.10^5 Cell/L in Gninhin river. These extreme values were observed respectively during rainy and dry seasons in Nonhon river and during dry and rainy seasons in Gninhin river at all stations. In the two rivers explored, a clear domination of the Bacillariophyceae class was noted. Taxa that contribute to the growth of diatoms in Nonhon river during dry season were *Cyclotella meneghiniana*, *Pinnularia viridis*, *Pinnularia* sp.2, *Pinnularia* sp.4, *Navicula placentula*, *Gyrosigma acuminatum*, *Gyrosigma* sp.1, *Gyrosigma* sp.2, *Stenopterobia intermedia*, *Surirella* sp.2, *Surirella* sp.3. In Gninhin river, taxa responsible for dominance during rainy season are *Craticula cuspidata*, *Craticula cuspidata*, *Sellaphora pupula*, *Pinnularia brauniana*, *Gyrosigma acuminatum*, *Gyrosigma* sp.1, *Gyrosigma* sp.2, *Encyonema silesiacum*, *Stenopterobia intermedia*, *Surirella tenera*, *Surirella* sp.2. In the two rivers explored, no significant difference in abundance was observed between the stations and between seasons (Kruskall-Wallis, test $p > 0.05$). Fig. 3 illustrates spatio-seasonal evolution of chlorophyll *a* biomass within the two rivers studied. In those rivers, maximum and minimum values were recorded at all stations respectively during rainy and dry seasons. No significant difference in chlorophyll *a* biomass was observed between stations and between seasons (Kruskall-Wallis, test $p > 0.05$).

**Figure 2:** Abundance of diatoms communities in the Nonhon (stations NO1, NO2, NO3) and Gninhin (stations GN1, GN2, GN3) rivers.**Figure 3:** Chlorophyll *a* biomass in Nonhon (stations NO1, NO2, NO3) and Gninhin (stations GN1, GN2, GN3) rivers.

4.5-Diversity evaluation

The spatial-seasonal variations of Shannon diversity and evenness index in Nonhon and Gninhin rivers are presented in Fig. 4. In Nonhon river, values oscillated between 1.42 and 2.14 for Shannon diversity and between 0.71 and 0.90 for Evenness index. Extreme values of Shannon diversity index were noted during dry season at stations NO1 and NO3. Maximum and minimum values of evenness index were recorded during rainy season at stations NO2 and NO3 respectively. Concerning Gninhin river, values of Shannon diversity index fluctuated between 0.73 and 2 bit/Cell respectively at stations GN1 and GN2 during rainy season. Evenness values oscillated between 0.32 and 0.82 bit/Cell respectively at stations GN1 and GN2 during dry season.

No significant difference in spatial and seasonal variation of Shannon diversity and evenness index was observed for the two rivers (Kruskal-Wallis, test $p > 0.05$).

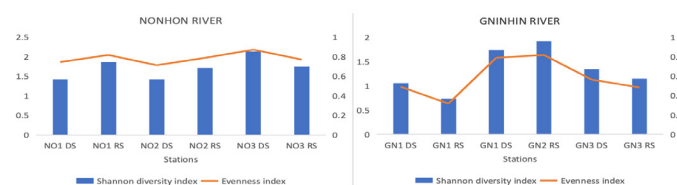


Figure 4: Shannon diversity and Evenness index of diatoms communities in Nonhon (stations NO1, NO2, NO3) and Gninhin (stations GN1, GN2, GN3) rivers.

5-Discussion

5.1-Diatomic community

A total of 31 diatom taxa were identified which was lower than numbers reported in the literature. **Ndjouondo et al. (2023)** reported 43 species in Amenda, North-west cameroon, whereas **Shibabaw et al. (2021)** report 169 diatom species in the Gilgel Gibe watershed in Southwest Ethiopia. One of the reasons for low diversity might be the environmental factors due to anthropogenic pressure. Indeed, the agricultural and mining activities carried out around Nonhon and Gninhin rivers respectively impact their functioning. This would prevent the presence of taxa sensitive to pollution. In Kebena and Akaki rivers (Addis Ababa, Ethiopia), **Beyene et al. (2009)** made the same observation. In Nonhon river, taxa were distributed between two classes which are Mediophyceae and Bacillariophyceae. Gnihin river is characterized by the presence of a single class consisting of Bacillariophyceae (100%). This result could be explained by the different sources of anthropogenic pressure as noted in the work of **Serre-Fredj et al. (2023)**. Taxa including *Cyclotella meneghiniana*, *Stephanodiscus astra*, *Fragilaria crotonensis*, *Pinnularia Viridis*, present in Nonhon river and *Ulnaria ulna*, *Craticula cuspidata*, *Stauroneis anceps*, *Sellaphora pupula*, *Pinnularia sp.3*, *Sellaphora pupula* var. *bacillarioides*, *Encyonema silesiacum*, *Surirella capronii* present only in Gnihin river are characteristic of disturbed waters. This result could be explained by the agricultural and mining activities carried out around the two rivers which impact their functioning. The same

observations were made by **Battarbee et al. (2001)**. According to them, the presence of diatoms in water can be explained by numerous factors such as light intensity, quantity of nutrients, turbidity and chemical conditions of the water (pH, conductivity, dissolved organic carbon). Additionally, in the two rivers, stations located in the upstream zone (NO1 and GN1) record the lowest species richness with 04 and 09 taxa whereas stations located downstream (NO3 and GN3) present the greatest species richness with 12 and 15 taxa. The reason for taxa richness variation among upstream and downstream stations could be due to the diatom species response to environmental variables (**Beyene et al., 2014**). Hence, low taxa richness may indicate presence of hostile environment (chemical and physical pressure) unsuitable for occurrence of diatoms with narrow environmental optima. Consequentially, only diatoms with broad range of tolerance to environmental conditions would exist in that specific site (**Soininen et al., 2007**). The same observation was made by **Alfinito and Lange-Bertalot (2013)**.

5.2-Seasonal and spatial variation of diatoms abundance, diversity and evenness

In Nonhon river, on one hand, densities were generally higher during dry season at all stations. On the other hand, lowest values were recorded during rainy season also at all stations. High densities observed during dry season at all stations could be due to the fact that during this season, water inputs due to soil leaching are reduced and residence time of water becomes sufficiently long. These undoubtedly have an effect of increasing the growth potential of diatoms (**Sheng-Xiu et al., 2009**). The low densities recorded at all stations in the rainy season could be due to several factors acting in synergy: (1) high amount of organic matter, (2) high speed of water flow which would encourage a reduction in proliferation of micro-algae, (3) dilution effect and (4) high grazing rate. These phenomena could explain the drop in diatom density recorded during this study in Nonhon river. The opposite trend was observed at Gninhin river. Highest values are were noted during rainy season while the lowest are were recorded during dry season at all stations. High values observed during rainy season could be explained by high concentrations of nutrient salts, particularly phosphate and ammonium, during this season in Gninhin river. This results from the fact that in addition to light energy requirements, the presence of nutrients was essential for diatom photosynthesis to occur. Indeed, under optimal conditions, diatoms absorb nutrients for their proliferation (**Brzezinski, 1985**). In addition, during periods of heavy rain, the strong flow of water from Cavally river entering in Gninhin river could induce an enrichment of this ecosystem with diatoms. These results corroborate the observations of **Angelier (2000)** and **Suroy (2013)** according to which the development of diatoms is linked to changes in the conditions of their environment and to the speed of the current in an aquatic ecosystem. Highest value of diversities observed during dry season at

station NO3 (Nonhon river) and at station GN2 (Gninhin river) during rainy season could be explained by the stability of the water column. The lower evenness values obtained during rainy season at station NO3 (Nonhon river) and station GN2 (Gninhin river) in dry season were due to the proliferation of Bacillariophyceae restraining the development of other diatom groups (Merican *et al.*, 2006). In general, diatom diversity in Nonhon and Gninhin rivers was similar to that observed in other aquatic systems (Shaimaa *et al.*, 2018).

Conclusion

The taxa richness and Shannon and Weaver Index (H) showed that Nonhon and Gninhin rivers in the study sites have a relatively high diversity of diatoms because water quality is suitable for the living aquatic life and is slightly affected by the pollutants that are released to it. Evenness Index (E) which recorded high values and lack of species homogeneity with high densities, indicates also environmental stress. It is necessary to carry out a study aimed at implementing an ecological restoration plan designed to restore the biological connectivity of these aquatic ecosystems.

Acknowledgment:

Authors thank MOUSSO Henri Gauthier and ETTIEN Afia Florence, students from “Pôle de recherche Pêche et Aquaculture (PPA)” at Nangui ABROGOUA University for their contribution to the sampling.

References

Angelier E. (2000). Introduction à l'écologie. Des écosystèmes naturels à l'écosystème humain. éd. Tec et Doc, paris. 230 p.

Aktan Y., Tufekci V., Tufekci H., Aykulu G. (2005). Distribution patterns, biomass estimates and diversity of Phytoplankton in Izmit bay (Turkey). Estuarine Coastal and Shelf Scie, 64: 372-384.

Alfinito S., Lange-Bertalot H. (2013). Contribution to the knowledge of the freshwater algae of Sierra Leone (Tropical West Africa): diatoms from Loma Mountains and Bumbuna Falls, the Northern Province. Bio Jour, 4 : 135-178.

Battarbee R. W., Juggins S., Gasse F., Anderson N. J., Bennion H., Cameron N. G., Ryves D. B., Pailles C., Chalif F., Telford R. (2001). European Diatom Database (EDDI). An Information System for Palaeo environmental Reconstruction. Environmental change research centre, 97 p.

Bere T., Tundisi J. G. (2010). The Effects of Substrate Type on Diatom-Based Multivariate Water Quality Assessment in a Tropical River (Monjolinho), São Carlos, SP, Brazil. Water Air Soil Pollut, 216 : 391-409.

Beyene A., Addis T., Kifle D., Legesse W., Kloos H., Triest L. (2009). Comparative study of diatoms and

macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia. Ecol indic, 9 (2): 381-92.

Beyene A., Awoke A., Triest L. (2014). Estimation of environmental optima and tolerances of diatoms using multi-factor multiplicative modeling. Ecol infor, 19: 53-61.

Brzezinski M A. (1985). The Si: C: N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. Journ of Phyco, 21 : 347-357.

Carr G. M., Neary J P. (2008). Water quality for ecosystem and human health: UNEP/Earthprint, 130 p.

Couté A. Iltis A. (1985). Étude au microscope électronique à balayage de quelques algues (Dinophycées et Diatomophycées) de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Nova Hed, 41 : 69-79.

Da K. P. (2007). Étude taxinomique du phytoplancton dulçaquicole des masses d'eau lenticues et lotiques de quelques sites au Sud de la Côte d'Ivoire, entre les fleuves Bandama et Bia : Apports de la microscopie électronique à balayage. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles. Université d'Abidjan Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 402 p.

Doffou R. J. O. (2019). Influence de l'orpaillage sur la diversité du peuplement ichthyologique et l'écologie alimentaire d'une espèce endémique (Micralestes eburneensis Daget, 1964) dans le fleuve Cavally (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, 150 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. (1991). Bacillariophyceae: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer D. ed. Süßwasserflora von Mitteleuropa 2/3. Gustav Fischer, Stuttgart, 576 p.

Kruskal W. H. (1952). A nonparametric test for the several sample problem. The Annals of Mathematical Statistics, 23 : 525-540

Lorenzen C J. (1967). Determination of chlorophyll a and pheopigments : spectrophotometric equations. Limnology and Oceanography, 12: 343-346.

Mangadze T., Bere T., Mwedzi T. (2015). Epilithic diatom flora in contrasting landuse settings in tropical streams, Manyame Catchment, Zimbabwe. Hydrobio, 743 (1): 163-173.

Matlala M. D., Taylor J. C., Harding W. R. (2011). Development of a diatom index for wetland health. WRC Report No. KV 270/11: 174 p.

Merican F., Asmadi W., Maznah W., Mashhor M. (2006). A note on the freshwater algae of gunung stong, Kelantan, Malaysia. Journ Bios, 17 (1): 65-76.

Messenger M. L., Lehner B., Cockburn C., Lamouroux N., Pella H., Snelder T., Tockner K., Trautmann T., Watt C., Detry T. (2021). Global prevalence of non-perennial rivers and streams. Nat, 594 : 391-397.

Ndjouondo G. P., Nwamo R. D., Muyang R. F., Teke A. N., Kouadio A. D. (2023). Influence of some abiotic factors on the diatom densities in the Mezam river (Bamenda, North-West

- Cameroon). *Afric Journ of Biolo and Med Res*, 6 (3): 40-55.
- N'Guessan K. R., Aboua B. R. D., Tison-Rosebery J., Ouattara A., Kouamelan E. P. (2018). Biodiversity and ecology of epilithic diatoms in the Agnéby River, Ivory Coast. *Journ of Aqua Sci*, 43 (2) : 131-140.
- Ouattara A. (2000). Premières données systématiques et écologiques du phytoplancton du lac d'Ayamé (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Catholique de Leuven, Louvain, Belgique, 207 p.
- Peters N. E., Meybeck M. (2000). Water quality degradation effects on freshwater availability: impacts of human activities. *Water Inter*, 25 (2) :185-193.
- Rimet F., Bouchez A., Montuelle B. (2015). Benthic diatoms and phytoplankton to assess nutrients in a large lake: Complementarity of their use in Lake Geneva (France-Switzerland). *Ecolo Indica*, 53 : 231-239.
- Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. T. (1990). *The diatoms : Biology & Morphology of the Genera*. Cambridge University Press, 747 p.
- Rumeau A., Coste M. (1988). Initiation à la systématique des diatomées d'eau douce pour l'utilisation pratique d'un indice diatomique générique. *Bul Fran de Pêche et de Pesci*, 309 : 1-69.
- Salla M. (2015). Taxinomie, composition et distribution spatio-saisonnière du phytoplancton des rivières tropicales côtières Boubo et Mé (Côte d'Ivoire). Thèse unique, Abidjan, Côte d'Ivoire, 224 p.
- Serre-Fredj L., Léo C., Orianne J., Pascal C. (2023). Complex drivers of primary production along an anthropised estuary (Seine estuary-France). *Freontiers in environment Sci*, 1-15. DOI 10.3389/fenvs.2023.1216732
- Seu-Anoi N. M, Soro N, Mouso H. G, Adjoumani Y. I. (2024). Spatio-seasonal dynamics of microalgae from the Nonhon and Gninhin Rivers of the Cavally watershed (Côte d'Ivoire, West Africa). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, 25(4) : 157-169, ISSN: 2220-6663 (Print) 2222-3045 (Online)
- Shaimaa A. E, Latif A. A, Sayed R. H, Jakeen K. E. (2018). Develop of Lateral Flow Immunochromatographic Test and PCR for Detection of Salmonella Enteritidis in Poultry Farm. *Inter Journ of Veter Sci*, 7 (3) : 153-158.
- Shannon C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27: 79-423,623-656.
- Shapiro S. S., Wilk M. B., Chen H. J. (1968). A comparative study of various tests of normality. *Journ of Ameri Stat Associa*, 63: 1343-1372.
- Sheng-Xiu L., Zhao-Hui W., Malhi S. S., Shi-Qing L., Ya-Jun G., Xiao-Hong T. (2009). Nutrient and Water Management Effects on Crop Production, and Nutrient and Water Use Efficiency in Dryland Areas of China. In Sparks, editor: *Advances in Agronomy*, Burlington: Academic Press, 102 : 223-265. ISBN: 978-0-12-374818-8
- Shibabaw T., Beyene A., Awoke A., Tirfie M., Azage M., Triest L. (2021). Diatom community structure in relation to environmental factors in human influenced rivers and streams in tropical Africa. *Plos One*, 16 (2) : 17.
- Soininen J., Heino J. (2007). Variation in niche parameters along the diversity gradient of unicellular eukaryote assemblages. *Protist*; 158(2):181-191. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2006.11.002> PMID: 17169610.
- Suroy M. (2013). Rôles du frustule des diatomées et des conditions nutritives de leur croissance sur l'export de carbone dans les océans. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille, Marseille, France, 313 p.
- Tomas C. R. (1995). *Identifying Marine phytoplankton*. Academic Press, Harcourt Brace & Company, 598 p.
- Tudesque L., Tisseuil C., Lek S. (2014). Scale-dependent effects of land cover on water physico-chemistry and diatom-based metrics in a major river system, the Adour-Garonne basin (South Western France). *Sci of the Tot Enviro*, 466-467: 47-55.
- Utermöhl H. (1958). Zur vervollkommnung der quantitativen phytoplankton methodic. *Mitteilungen der Internationale Vereinig für Limnolo*, 9: 1-38.
- Van den Hoek C., Mann D. G., Jahns H. M. (1995). *Algae. An Introduction to Phycology*. CambridgeUniversity Press, Cambridge, 623 p.
- Venkatachalapathy R., Karthikeyan P. (2015). Application of Diatom-Based Indices for Monitoring Environmental Quality of Riverine Ecosystems: A Review. *Envi Managt of Riv Bas Ecosys*, 28: 593-619.
- Wehr J. D., Sheath R. G. (2003). *Freshwater algae of North America : Ecology and classification*. Academic Press-Elsevier Science, Boston-New York, 318 p.
- Wu Y., Shuguang L., Alisa L. G. (2012). Predicting impacts of increased CO2 and climate change on the water cycle and water quality in the semiarid James River Basin of the Midwestern USA. *Sci of the Tot Envi*, 430: 150-160.
- <https://www.algaebase.org/search/species/>: consulté le 15/12/2020

Dynamique hydro-climatique des eaux de surface dans le bassin ivoirien du Niger : apport des indices NDWI et MNDW

Justin Kouadio KONAN^{1*}, Bi Vami Hermann N'GUESSAN², Djaha Levix Nadir KOFFI³, Grivenik Gad EBOLA MOULOUNDA^{3*}

Résumé

Cette étude analyse la dynamique spatio-temporelle des eaux de surface dans la portion ivoirienne du bassin du Niger, un système fortement influencé par la variabilité hydro-climatique. L'objectif est de caractériser l'évolution des surfaces en eau et d'expliquer leur organisation spatiale en lien avec les conditions climatiques et le bilan hydrique. L'approche méthodologique repose sur l'exploitation d'images satellitaires multi-sources (Landsat et Sentinel-2) couvrant la période 1986–2024, traitées dans Google Earth Engine. Les indices NDWI et MNDWI ont été combinés à une approche de GéoAI basée sur la segmentation spatiale, permettant de dépasser les limites des méthodes classiques fondées sur des seuils radiométriques. Cette intégration constitue une innovation méthodologique majeure, en améliorant la détection des surfaces en eau dans les environnements complexes. Les résultats montrent une forte variabilité interannuelle, avec un NDWI variant de 0,00077 à 0,08343 et un MNDWI de 0,0144 à 0,14097. Le coefficient de variation atteint 109,1 % pour le NDWI contre 72,1 % pour le MNDWI, confirmant la meilleure robustesse de ce dernier. Les surfaces en eau passent de 0,65 km² en 1986 à 11,97 km² en 2000 (+266 %), avant de chuter à 0,36 km² en 2020. Le bilan hydrique est globalement déficitaire, avec des valeurs atteignant -906 mm et une dominance des classes déficitaires représentant 56,5 % du bassin. Contrairement aux approches classiques, l'intégration de la GéoAI permet une meilleure prise en compte des structures spatiales, réduisant les erreurs de classification et améliorant la cohérence des résultats. Cette étude met ainsi en évidence le rôle déterminant du bilan hydrique dans la dynamique des eaux de surface, tout en proposant une approche intégrée et innovante combinant indices spectraux et intelligence artificielle géospatiale, applicable à d'autres bassins tropicaux.

Mots-clés : Intelligence artificielle géospatiale (GeoAI) ; Dynamique des eaux de surface ; Bilan hydrique ; Variabilité climatique ; Bassin du Niger

Abstract

strongly influenced by hydro-climatic variability. The objective is to assess surface water changes and explain their spatial organization in relation to climatic conditions and water balance. The methodology relies on multi-source satellite imagery (Landsat and Sentinel-2) from 1986 to 2024, processed using Google Earth Engine. NDWI and MNDWI indices were combined with a GeoAI-based spatial segmentation approach, overcoming the limitations of traditional threshold based methods. This integration represents a significant methodological contribution, improving surface water detection in complex environments. Results show strong inter-annual variability, with NDWI ranging from 0.00077 to 0.08343 and MNDWI from 0.0144 to 0.14097. The coefficient of variation reaches 109.1% for NDWI and 72.1% for MNDWI, indicating greater robustness of MNDWI. Surface water extent increased from 0.65 km² in 1986 to 11.97 km² in 2000 (+266%), before decreasing to 0.36 km² in 2020. The water balance is predominantly negative, reaching -906 mm, with deficit areas covering 56.5% of the basin. Unlike conventional approaches, the integration of GeoAI enables better representation of spatial structures, reducing classification errors and improving result consistency. This study highlights the key role of water balance in controlling surface water dynamics and proposes an innovative integrated framework combining spectral indices and geospatial artificial intelligence, applicable to other tropical basins.

Keywords: Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI); Surface water dynamics; Water balance; Climate variability; Niger River

1UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM),
Université Félix Houphouët-Boigny/ED-STAD/CURAT
2UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM),
Université Félix Houphouët-Boigny/ED-STAD/CURAT
3UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM),
Université Félix Houphouët-Boigny/ED-STAD/CURAT

3*Ingénieur de recherche chez Geomatique métier d'avenir
*Auteur correspondant : Tél. : + 225 0758970513
Justin Kouadio KONAN^{1*}, (justinkouadiokonan@gmail.com)
Bi Vami Hermann N'GUESSAN², (vami@outlook.com)
Djaha Levix Nadir KOFFI³, (levixnadirkoffi@gmail.com)
Grivenik Gad EBOLA MOULOUNDA (ebaulatmoulounda@gmail.com)

I. INTRODUCTION

Les ressources en eau jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes et le développement socio-économique, notamment dans les régions tropicales où elles soutiennent de manière déterminante les activités agricoles, pastorales et domestiques. Cependant, ces ressources sont de plus en plus affectées par la variabilité climatique et les changements

environnementaux, qui modifient les régimes hydrologiques et accentuent les risques de pénurie ou d'excès d'eau (Arias

et al., 2021). En Afrique de l'Ouest, plusieurs études récentes mettent en évidence une intensification des extrêmes climatiques, caractérisée par une alternance accrue d'épisodes

et humides, influençant directement la disponibilité des ressources hydriques (Diedhiou et al., 2021). Cette situation souligne la nécessité de disposer d'outils performants pour le suivi des dynamiques hydrologiques à différentes échelles spatiales et temporelles. Dans ce contexte, la télédétection constitue un levier majeur pour l'analyse des surfaces en eau, notamment grâce à l'exploitation des images satellitaires. Les approches récentes montrent que l'utilisation des indices

spectraux permet une détection efficace des surfaces en eau, même dans des environnements complexes (Yang et al., 2020). Par ailleurs, l'intégration des approches d'intelligence artificielle géospatiale (GéoAI) et des plateformes de calcul telles que Google Earth Engine améliore la précision des analyses et facilite le traitement de grandes quantités de données (Zhu et al., 2021). Malgré ces avancées, peu d'études ont combiné de manière intégrée les indices de télédétection, les techniques d'interpolation spatiale des données climatiques et les approches GéoAI pour analyser la dynamique hydro-climatique des eaux de surface dans la portion ivoirienne du bassin du Niger. Cette zone demeure fortement exposée aux fluctuations climatiques et aux pressions environnementales, ce qui en fait un espace stratégique pour la gestion durable des ressources en eau. Dans ce contexte, la présente étude s'inscrit dans une problématique centrale :

comment caractériser de manière fiable la dynamique spatio-temporelle des eaux de surface dans un bassin soumis à une forte variabilité hydro climatique ? Plus spécifiquement, il s'agit de déterminer dans quelle mesure les indices de télédétection (NDWI et MNDWI), combinés aux paramètres hydro-climatiques, permettent d'analyser et d'expliquer les variations des surfaces en eau. L'objectif général de cette étude est d'expliquer la dynamique spatio-temporelle des surfaces en eau dans la portion ivoirienne du bassin du Niger à partir de l'analyse des indices spectraux NDWI et MNDWI, en relation avec les conditions hydro-climatiques. La variabilité spatio-temporelle des surfaces en eau dans la portion ivoirienne du bassin du Niger résulte principalement des fluctuations des précipitations, modulées par l'intensité de l'évapotranspiration, traduisant ainsi la dépendance des surfaces en eau au bilan hydrique du bassin.

II. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude correspond à la portion ivoirienne du bassin versant du fleuve Niger, située au nord de la Côte d'Ivoire. Elle s'inscrit dans le sous-bassin du Bani, constituant la partie amont du système hydrologique du Niger. Elle s'étend approximativement entre les longitudes 9°20' et 10°06' Ouest et les latitudes 6° et 8° Nord, et couvre une superficie d'environ 31 633 km², soit près de 9,8 % du territoire national. Sur le plan administratif, la zone d'étude s'étend sur les districts des Savanes et du Denguélé, englobant les régions de la Bagoué, du Kabadougou et du Folon. Elle comprend plusieurs unités administratives, notamment les départements de Boundiali, Kouto, Tengrela, Odienné, Minignan, Samatiguila et Madinani. Cette organisation territoriale témoigne d'une occupation de l'espace marquée par des activités agricoles et pastorales fortement dépendantes des ressources en eau. D'un point de vue hydrologique, la zone est caractérisée par un réseau hydrographique structuré, dominé par des cours d'eau temporaires et permanents qui alimentent le fleuve Niger. Cette organisation reflète un système de drainage sensible aux conditions climatiques, notamment aux variations des précipitations et de l'évapotranspiration. La présence de bas-fonds et de zones humides favorise la formation de surfaces en eau temporaires, particulièrement en saison

des pluies. Sur le plan climatique, la zone appartient au domaine soudano-guinéen, caractérisé par une alternance marquée entre saison humide et saison sèche. Cette variabilité climatique influence directement la dynamique des ressources en eau, entraînant des phases d'expansion et de contraction des surfaces en eau observées à travers les indices NDWI et MNDWI. Ainsi, les caractéristiques géographiques, hydrologiques et climatiques de la zone d'étude en font un espace particulièrement pertinent pour l'analyse de la dynamique hydro-climatique des eaux de surface (Figure 1).

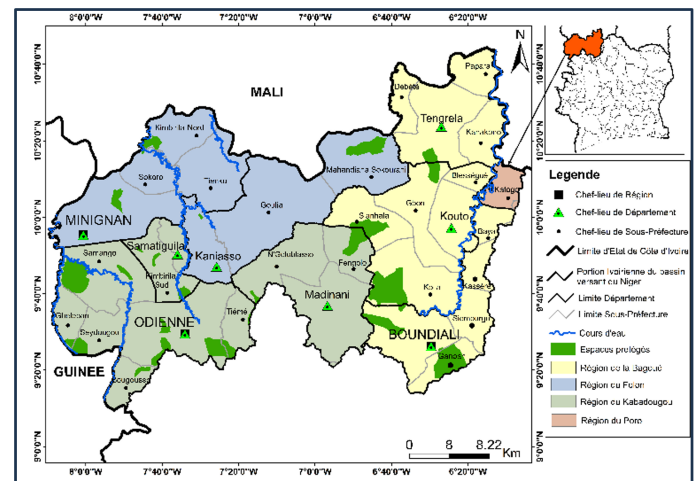


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

III. DONNÉES

Dans le cadre de cette étude, les données utilisées proviennent principalement d'images satellitaires optiques multi-capteurs couvrant la période de 1986 à 2025. Les principales sources incluent les satellites Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 et Sentinel-2A, offrant une couverture temporelle et spatiale adaptée à l'analyse des surfaces en eau. Les images Landsat ont été acquises via la base de données du United States Geological Survey, tandis que les images Sentinel-2A proviennent du programme Copernicus de l'European Space Agency. L'ensemble des données a été collecté à partir de la plateforme Google Earth Engine, qui offre un accès à des archives satellitaires multi-temporelles.

Les bandes spectrales exploitées correspondent principalement aux bandes verte (Green), proche infrarouge (NIR) et moyen infrarouge (MIR), nécessaires à l'identification des surfaces en eau. La résolution spatiale des images varie entre 30 m pour les capteurs Landsat et 10 m pour Sentinel-2A, permettant une analyse détaillée des surfaces hydriques.

Les données ont été sélectionnées en fonction de leur qualité radiométrique, en privilégiant les images présentant une faible couverture nuageuse. Elles ont été organisées selon différentes périodes de l'année (janvier, janvier-février, mai-juin, août-novembre), afin de prendre en compte la variabilité saisonnière des conditions hydrologiques (Tableau 1).

Tableau 1 : Détail des données satellitaires utilisées

Année	Période	Satellite	Capteur	Type d'image	Bandes utilisées	Résolution spatiale
1986	Janvier	Landsat 5	TM	optique	Green, NIR, MIR	30 m
1990	Octobre – Novembre	Landsat 5	TM	optique	Green, NIR, MIR	30 m
1995	Mai – Juin	Landsat 7	ETM+	optique	Green, NIR, MIR	30 m
2000	Janvier – Février	Landsat 7	ETM+	optique	Green, NIR, MIR	30 m
2005	Septembre – Novembre	Landsat 4–5	TM	optique	Green, NIR, MIR	30 m
2010	Janvier – Février	Landsat 5	TM	optique	Green, NIR, MIR	30 m
2015	Janvier	Landsat 8	OLI	optique	Green, NIR, MIR	30 m
2020	Janvier / Août – Novembre	Landsat 8	OLI	optique	Green, NIR, MIR	30 m
2025	Janvier – Août	Sentinel-2A	MSI	optique	Green, NIR, MIR	10 m

IV. MÉTHODES

IV.1. Prétraitements

L'étude s'appuie sur des images satellitaires multisources issues des capteurs Landsat (TM, ETM+, OLI) et Sentinel-2 (MSI), couvrant la période d'analyse. Les données ont été extraites et traitées dans l'environnement Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Afin d'assurer la comparabilité inter-capteurs et inter-temporelle, seules des images en réflectance de surface ont été utilisées. Les images Landsat proviennent de la collection Landsat Collection 2 Level-2, intégrant une correction atmosphérique via l'algorithme LaSRC (Vermote et al., 2016), tandis que les images Sentinel-2 correspondent au niveau Level-2A, corrigées à l'aide de l'algorithme Sen2Cor (Main-Knorn et al., 2017).

Cette transformation en réflectance de surface constitue une étape de normalisation radiométrique, permettant de corriger les effets atmosphériques ainsi que les variations liées aux capteurs et aux conditions d'acquisition. Elle garantit une homogénéité des données dans le temps et rend possible une comparaison fiable des indices spectraux (Roy et al., 2021). Un filtrage des images a été réalisé afin d'exclure les pixels affectés par la couverture nuageuse et les ombres associées. Pour les images Landsat, le masque de qualité (QA_PIXEL) a été utilisé, tandis que pour Sentinel-2, les bandes de classification (QA60 et SCL) ont permis d'identifier et d'éliminer les pixels nuageux.

Le choix des scènes satellites à intervalles de cinq ans vise à analyser l'évolution spatio-temporelle des surfaces en eau et des paramètres hydrologiques sur le long terme tout en réduisant les redondances entre les images successives. Cette approche permet de mettre en évidence les principales dynamiques environnementales et hydrologiques du bassin à différentes périodes représentatives.

L'intervalle quinquennal a également été retenu afin d'assurer une meilleure disponibilité des images Landsat exploitables, notamment celles présentant une faible couverture nuageuse et une qualité radiométrique acceptable. Ce choix facilite ainsi la comparaison des états hydrologiques du bassin entre

différentes périodes clés comprises entre 1986 et 2025.

Par ailleurs, cette méthode permet de suivre les tendances majeures de l'évolution des ressources en eau sans surcharger l'analyse avec des scènes annuelles souvent répétitives ou incomplètes.

IV.1. Variabilité spatio-temporelle des surfaces en eau

Dans le cadre de cette étude, la dynamique spatio-temporelle des eaux de surface a été analysée à partir d'indices spectraux, permettant de discriminer les surfaces en eau en fonction de leurs signatures radiométriques.

L'indice de ratio hydrique (WRI), développé par Shen et al. (2010) et Zhang et al. (2011), repose sur la réflectance dominante de l'eau dans les bandes verte et rouge par rapport au proche infrarouge et à l'infrarouge moyen. Il est défini comme suit :

$$WRI = \frac{\text{Green} + \text{Red}}{\text{NIR} + \text{MIR}}$$

Les valeurs du WRI sont généralement supérieures à 1 pour les surfaces en eau.

L'indice de différence normalisée de l'eau (NDWI), proposé par McFeeters (1996), exploite la forte absorption de l'eau dans le proche infrarouge et sa réflectance dans le vert :

$$NDWI = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}}$$

Cet indice permet de discriminer efficacement les surfaces en eau de la végétation, mais présente des limites dans les zones urbaines et sur les sols nus.

Afin de pallier ces limitations, l'indice modifié de l'eau (MNDWI), introduit par Xu (2006), a été mobilisé. Il améliore la détection des surfaces en eau en réduisant l'influence des surfaces bâties :

$$MNDWI = \frac{\text{Green} - \text{MIR}}{\text{Green} + \text{MIR}}$$

En complément, la composante humidité de la transformation Tasseled Cap (Kauth et Thomas, 1976 ; Crist et Cicone, 1984) a été utilisée afin d'identifier les zones à forte humidité :

$$\text{Humidité} = 0,1509 \text{ Bleu} + 0,1793 \text{ Vert} + 0,3279 \text{ Rouge} + 0,3406 \text{ NIR} - 0,7112 \text{ MIR} - 0,4572 \text{ SWIR}$$

Ces différents indices ont permis d'identifier non seulement les plans d'eau libres, mais également les zones humides et les surfaces associées aux dynamiques hydrologiques du bassin.

Afin de caractériser la variabilité des surfaces en eau, plusieurs indicateurs statistiques ont été calculés :

$$R = \frac{X_{\max}}{X_{\min}}$$

$$A = X_{\max} - X_{\min}$$

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100$$

B Ces indicateurs permettent d'évaluer l'intensité des fluctuations hydrologiques et la variabilité interannuelle des surfaces en eau. Le tableau 2 ci-dessous, nous présente la définition des différents termes des équations.

Tableau 2 : Définition des symboles et variables

Symbole	Définition	Description
Green	Bande verte	Réflectance dans le domaine du visible ($\approx 0,52 - 0,60 \mu\text{m}$), sensible à la turbidité de l'eau
Red	Bande rouge	Réflectance dans le domaine du rouge ($\approx 0,63 - 0,69 \mu\text{m}$), liée à la végétation
NIR	Proche infrarouge	Réflectance dans le proche infrarouge ($\approx 0,76 - 0,90 \mu\text{m}$), fortement absorbée par l'eau
M I R (S W I R)	Infrarouge moyen	Réflectance dans l'infrarouge moyen ($\approx 1,55 - 1,75 \mu\text{m}$), utile pour distinguer l'eau des sols nus et zones urbaines
NDWI	Indice d'eau normalisé	Indice permettant de détecter les surfaces en eau à partir des bandes Green et NIR
MNDWI	Indice d'eau modifié	Version améliorée du NDWI utilisant la bande MIR pour une meilleure discrimination
WRI	Indice de ratio hydrique	Indice renforçant la discrimination entre surfaces en eau et non-eau
Xmax	Valeur maximale	Valeur maximale de l'indice observée sur la période étudiée
Xmin	Valeur minimale	Valeur minimale de l'indice observée
μ (mu)	Moyenne	Valeur moyenne des observations
σ (sigma)	Écart-type	Mesure de la dispersion des valeurs autour de la moyenne
R	Rapport des extrêmes	$R = X_{\text{max}} / X_{\text{min}}$, mesure l'intensité relative des variations
A	Amplitude	$A = X_{\text{max}} - X_{\text{min}}$, mesure l'écart entre les valeurs extrêmes
CV	Coefficient de variation	$CV = (\sigma / \mu) \times 100$, mesure la variabilité relative en pourcentage

L'extraction des surfaces en eau repose sur l'utilisation des indices spectraux NDWI et MNDWI, calculés à partir des bandes verte (Green), proche infrarouge (NIR) et infrarouge moyen (MIR). Ces indices permettent de discriminer efficacement les surfaces en eau libre des autres occupations du sol. Les surfaces en eau ont été identifiées par seuillage des valeurs des indices. Un seuil de 0,01 a été retenu pour classer les pixels en eau, tout pixel présentant une valeur supérieure à ce seuil étant considéré comme une surface en eau libre.

Ce seuil a été appliqué sur des images normalisées en réflectance de surface, garantissant la stabilité des valeurs des indices et leur comparabilité dans le temps. Le choix de ce seuil repose sur l'analyse des distributions statistiques des indices et vise à limiter les confusions avec les sols nus, les ombres et certaines surfaces anthropisées, tout en assurant une détection cohérente des surfaces en eau libre, incluant les plans d'eau

permanents et les écoulements temporaires. Dans le cadre de cette étude, une approche d'intelligence artificielle géospatiale (GéoAI) a été mobilisée afin d'améliorer la caractérisation de l'organisation spatiale des surfaces en eau, en complément des méthodes fondées sur les indices spectraux.

L'approche adoptée repose sur l'utilisation d'un modèle de segmentation sémantique pré-entraîné, intégré dans l'environnement ArcGIS Pro à travers l'outil Water Body Extraction. Ce modèle permet une classification pixel à pixel des surfaces en eau à partir des données satellitaires, en mobilisant simultanément les informations spectrales et spatiales. Il convient de préciser que ce modèle n'a pas fait l'objet d'un entraînement spécifique sur des données locales dans le cadre de cette étude. Il est utilisé comme un outil opérationnel de classification, permettant d'améliorer l'extraction des surfaces en eau en exploitant les structures spatiales et les motifs morphologiques observés.

L'application du modèle aux images satellitaires préalablement normalisées, issues de la plateforme Google Earth Engine, a permis de produire un raster de classification distinguant les surfaces en eau libre des autres occupations du sol. Cette approche améliore la lecture de l'organisation spatiale des surfaces en eau, en mettant en évidence leur structuration le long du réseau hydrographique et leur distribution au sein des axes de drainage. L'évaluation des résultats repose sur la cohérence entre les structures spatiales identifiées et les variables hydro-climatiques du bassin, notamment les précipitations, l'évapotranspiration et le bilan hydrique. Dans ce contexte, la GéoAI constitue un outil d'analyse spatiale complémentaire permettant d'affiner

l'interprétation des dynamiques des surfaces en eau, sans constituer un modèle prédictif spécifique à cette étude. Les surfaces en eau détectées ont été validées par comparaison avec la base de données de référence JRC Global Surface Water (version 1.4). Les zones présentant une occurrence supérieure à 75 % ont été considérées comme des eaux de surface permanentes, tandis que les autres surfaces détectées correspondent à des eaux temporaires. Les superficies des plans d'eau ont été estimées à partir du nombre de pixels classifiés comme eau, en tenant compte de la résolution spatiale des images (30 m pour Landsat et 10 m pour Sentinel-2A), puis converties en kilomètres carrés (km²).

IV.3. Dynamique hydro-climatique des eaux de surface

L'analyse de la dynamique hydro-climatique des surfaces en eau repose sur l'examen des relations entre les variations des indices NDWI et MNDWI et les variables hydro-climatiques du bassin versant. Les variables hydro-climatiques retenues incluent les précipitations (P), les débits hydrologiques (Q), l'évapotranspiration de corrigé (ETc) et la température de l'air (T). Les précipitations et les débits représentent les principaux apports hydriques du système, tandis que l'évapotranspiration, contrôlée par la température, traduit les pertes en eau liées aux conditions atmosphériques (IPCC, 2021). L'évapotranspiration de référence (ET₀) a été estimée selon la méthode de Penman-Monteith recommandée par la Food and Agriculture Organization (Allen et al., 1998), qui

constitue la référence standard pour l'estimation des pertes hydriques. Elle s'exprime par :

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

où $\overline{R_n}$ correspond au rayonnement net reçu à la surface, tandis que G représente le flux de chaleur du sol. La variable T désigne la température de l'air, alors que u_2 correspond à la vitesse du vent mesurée à 2 mètres de hauteur. Le terme $(e_s - e_a)$ traduit le déficit de pression de vapeur, indicateur de la demande évaporative de l'atmosphère. Par ailleurs, Δ représente la pente de la courbe de pression de vapeur saturante, et γ correspond à la constante psychrométrique. Après la normalisation et l'analyse de l'ensemble des paramètres nécessaires à l'étude du bilan hydrologique de surface dans le bassin versant du Niger, l'évapotranspiration corrigée a été estimée à partir de l'évapotranspiration de référence en intégrant un coefficient cultural, selon la relation suivante :

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

Où ET_c représente l'évapotranspiration corrigée, ET_0 l'évapotranspiration de référence estimée selon la méthode de Penman-Monteith, et K_c le coefficient cultural (sans unité), permettant de prendre en compte les caractéristiques de la couverture du sol et de la végétation.

Le bilan hydrologique a ensuite été évalué à partir d'une formulation simplifiée reposant sur la différence entre les apports et les pertes en eau du système, exprimée comme suit :

$$\text{Bilan hydrologique} = \sum \text{apports d'entrée} - \sum \text{apports de sortie}$$

Dans cette étude, cette relation est traduite par :

$$\text{Bilan hydrologique} = P - ET_c - L_e$$

où P représente les précipitations, ET_c l'évapotranspiration corrigée et L_e la lame d'eau écoulée.

Dans l'expression du bilan hydrologique, P représente les précipitations, qui constituent la principale source d'apport en eau. Le terme ET_c désigne l'évapotranspiration corrigée au sol, traduisant les pertes hydriques liées aux processus atmosphériques et à la végétation. Enfin, L_e correspond à la lame d'eau écoulée, qui représente la fraction des précipitations transférées vers les écoulements de surface. Autrement dit, il s'agit du débit de sortie. En complément, l'indice normalisé de précipitation (SPI) a été mobilisé comme indicateur des anomalies pluviométriques, permettant de caractériser l'intensité et la durée des épisodes de sécheresse et d'humidité à différentes échelles temporelles, sur la base des seules précipitations (Vicente-Serrano Sergio M. et al., 2010).

Le SPI a été calculé à partir des données de précipitations et de température issues de la plateforme météo blue, à l'aide du logiciel R. Par ailleurs les mêmes données ayant servi pour SPI ont également été inclus dans le bilan mais avec le bilan, il y'a eu correction culturelle et étude de la lame d'eau écoule avec les débits et le tout normalisé en mm. L'analyse a été

conduite à travers la comparaison des séries temporelles des indices NDWI et MNDWI et des variables hydro-climatiques, afin d'examiner les relations entre les fluctuations climatiques et la dynamique des eaux de surface.

V. RÉSULTATS

V.1. Variabilité spatio-temporelle des eaux de surface au seuil 0.01

L'évolution des indices NDWI et MNDWI, calculés selon un seuil de 0,01 après normalisation radiométrique inter-capteurs, met en évidence une variabilité interannuelle marquée des surfaces en eau dans le bassin étudié. Le NDWI varie entre 0,00077 et 0,08343, tandis que le MNDWI s'inscrit dans une plage comprise entre 0,0144 et 0,14097, traduisant des amplitudes importantes mais différenciées selon l'indice, en raison de leur sensibilité respective aux conditions de surface et à la turbidité.

Entre 1986 et 1995, le NDWI passe de 0,015 à 0,002, soit une diminution absolue de 0,013, correspondant à une réduction significative de l'extension des surfaces en eau. Cette dynamique s'interprète en termes de déficit hydrique, résultant d'une baisse des apports pluviométriques et d'une augmentation de la demande évaporative, en cohérence avec la période de sécheresse observée en Afrique de l'Ouest durant les années 1980 (Figure 3).

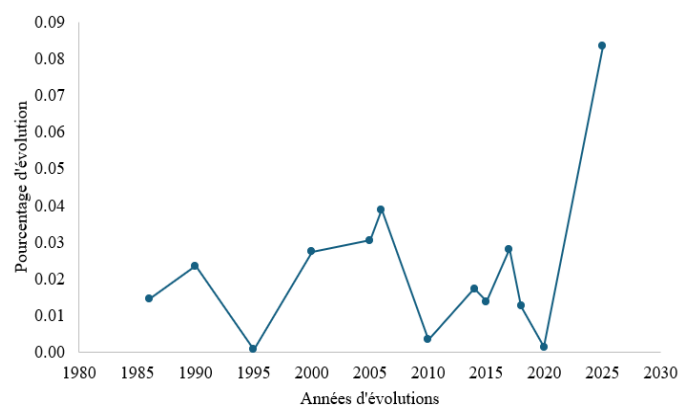


Figure 3 : Évolution temporelle du NDWI (1986–2025) au seuil de 0,01

Sur la même période, le MNDWI augmente de 0,015 à 0,040, évolution qui traduit une redistribution spatiale de l'eau, notamment sa concentration dans les zones basses, plutôt qu'une augmentation globale des ressources hydriques (Figure 4).

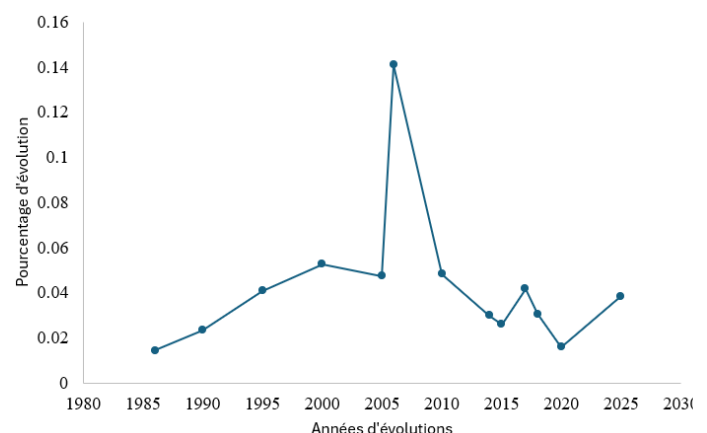


Figure 4 : Évolution temporelle du MNDWI (1986–2025) au seuil de 0,01

À partir de 1995, les deux indices enregistrent une augmentation progressive jusqu'en 2005, avec un NDWI atteignant 0,038 et un MNDWI culminant à 0,14. Cette phase correspond à une expansion des surfaces en eau, traduisant une amélioration relative des conditions hydriques. Après 2005, une diminution nette est observée, le NDWI chutant à 0,005 en 2010 et le MNDWI à 0,05, avant une phase de fluctuations entre 2010 et 2020, durant laquelle le NDWI oscille entre 0,002 et 0,029 et le MNDWI entre 0,015 et 0,045. Cette séquence met en évidence une instabilité du système hydrologique, caractérisée par une alternance de phases de réduction et d'expansion des surfaces en eau supérieure de près de 0,045 au maximum observé précédemment (0,038 en 2005), correspondant à une augmentation d'environ +118 %. Cette évolution traduit une extension significative des surfaces en eau détectées. Elle s'explique par l'amélioration de la résolution spatiale des images, passant de 30 m (Landsat) à 10 m (Sentinel 2), permettant une détection plus fine des petites surfaces en eau, ainsi que par l'intégration de surfaces temporairement saturées ou inondées dans la classe "eau". Dans le même temps, le MNDWI atteint 0,038, indiquant une reprise modérée, sans retrouver les niveaux observés en 2005. Les indicateurs statistiques synthétisent ces dynamiques (Tableau 3). À l'inverse, le MNDWI présente un rapport de 9,78, indiquant une variabilité plus modérée et une meilleure stabilité. Les indices NDWI et MNDWI, étant sans dimension, traduisent une signature spectrale relative de la présence d'eau.

Tableau 3 : Indicateurs de variabilité des surfaces en eau issus du MNDWI et du NDWI (indices sans dimension)

Indicateur	MNDWI	NDWI
Valeur minimale	0.0144	0.00077
Valeur maximale	0.14097	0.08343
Amplitude ($A = X_{\max} - X_{\min}$)	0.12655	0.08266
Rapport ($R = X_{\max} / X_{\min}$)	9.78	108.35
Moyenne (μ)	0.043	0.022
Écart-type (σ)	0.031	0.024
Coefficient de Variation (CV %)	72.1 %	109.1 %

L'analyse met en évidence une dynamique des surfaces en eau structurée en trois phases principales : une phase de contraction entre 1986 et 1995, une phase d'expansion entre 1995 et 2005, puis une phase de variabilité entre 2010 et 2020, suivie d'une augmentation marquée en 2025. Dans l'ensemble, le coefficient de variation du NDWI (109,1 %) supérieur à 100 % traduit une très forte variabilité relative des surfaces en eau, liée à la faible valeur moyenne de l'indice et à l'existence de fluctuations marquées dans le temps. Cette dispersion importante reflète une forte sensibilité du système hydrologique aux conditions hydro-climatiques.

V.2. Organisation spatiale des surfaces en eau

L'analyse des cartes issues des indices NDWI met en évidence une évolution progressive des surfaces en eau entre 1986 et 1995. En 1986, la surface en eau estimée est de 0,65 km²,

traduisant une présence très limitée des plans d'eau. En 1990, cette surface augmente significativement pour atteindre 5,31 km², soit une multiplication par plus de huit. Cette tendance se poursuit en 1995, avec une surface de 9,18 km². Cependant, en 2000, la surface en eau diminue à 6,23 km², traduisant une régression des surfaces en eau. Cette évolution s'explique par une dégradation des conditions hydro-climatiques du bassin. En effet, l'analyse du SPI met en évidence une transition vers des valeurs négatives à la fin des années 1990, indiquant un déficit pluviométrique. Parallèlement, le bilan hydrique devient déficitaire dans plusieurs secteurs du bassin, avec des valeurs comprises entre environ -195 mm et -538 mm, traduisant une situation où les pertes en eau par évapotranspiration excèdent les apports pluviométriques.

Dans ce contexte de déficit hydrique ($P < ET_c$), l'alimentation des zones humides est réduite, ce qui entraîne une diminution de l'extension spatiale des surfaces en eau. Cette évolution met en évidence la sensibilité des milieux hydriques aux fluctuations du bilan hydrique, où la combinaison d'un déficit pluviométrique et d'une forte demande évaporatoire favorise la régression des surfaces en eau. L'analyse basée sur le MNDWI confirme cette dynamique, mais avec des surfaces systématiquement plus élevées. Les surfaces passent de 3,27 km² en 1986 à 7,61 km² en 1990, puis à 9,18 km² en 1995, pour atteindre 11,97 km² en 2000. Cette différence souligne la capacité du MNDWI à détecter davantage de surfaces en eau, notamment dans les zones de faible profondeur ou partiellement végétalisées. Dans l'ensemble, les cartes montrent une augmentation progressive des surfaces en eau entre 1986 et 1995, suivie d'une évolution plus contrastée après 1995. Toutefois, ces surfaces restent relativement faibles à l'échelle du bassin, ce qui indique que les variations observées concernent principalement des zones localisées et non une transformation généralisée du système hydrologique. (Figure 5).

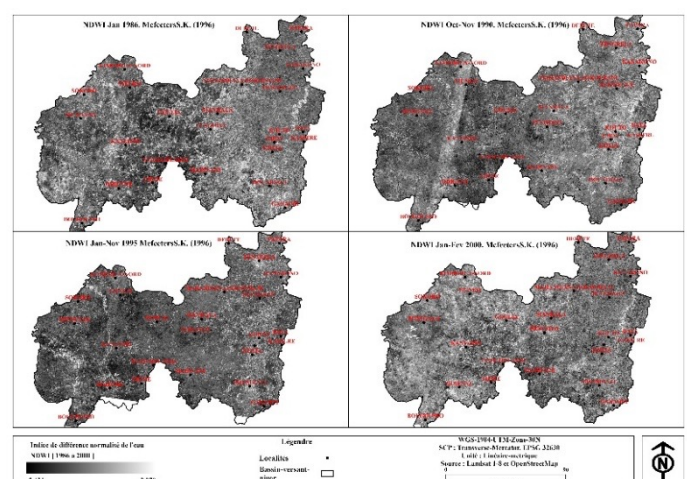


Figure 5 : Cartographie de NDWI dans la portion ivoirienne

L'analyse des cartes NDWI met en évidence une évolution contrastée des surfaces en eau entre 1986 et 2020. En 1986, la surface en eau est faible (0,65 km²), puis augmente progressivement pour atteindre 5,31 km² en 1990 et 9,18 km² en 1995, traduisant une phase d'extension localisée des zones en eau. En 2000, cette surface diminue à 6,23 km², marquant

une contraction partielle. La période récente (2010–2020) se caractérise par une forte variabilité, avec des surfaces passant de 0,77 km² en 2010 à 0,59 km² en 2015, puis 2,85 km² en 2018, avant de chuter à 0,32 km² en 2020. Cette dynamique traduit des fluctuations rapides et localisées des surfaces en eau. (Figure 6). Par ailleurs, les surfaces estimées avec le MNDWI sont systématiquement plus élevées (jusqu'à 11,97 km² en 2000), confirmant une détection plus étendue des zones humides. Dans l'ensemble, les surfaces en eau restent faibles et spatialement limitées, indiquant une dynamique dominée par des variations locales plutôt qu'une transformation globale du régime hydrologique.

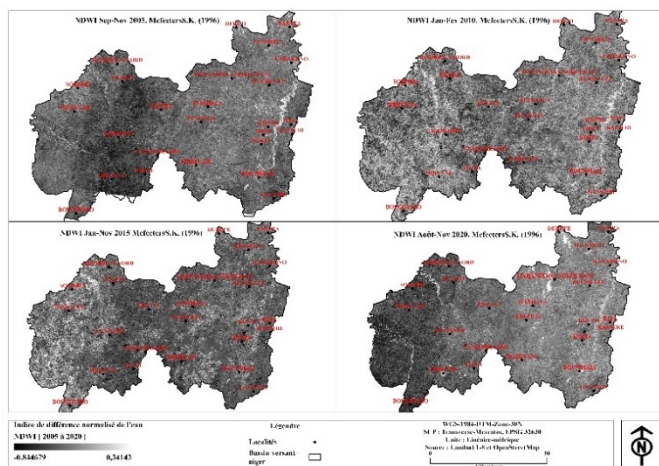


Figure 6 : Cartographie diachronique du NDWI dans le bassin versant (2005, 2010, 2015 et 2020)

L'analyse des cartes MNDWI met en évidence une augmentation progressive des surfaces en eau entre 1986 et 2000. En 1986, la surface en eau est estimée à 3,27 km², traduisant une présence limitée des zones humides. En 1990, cette surface augmente à 7,61 km², soit plus du double, indiquant une extension significative des surfaces en eau. Cette dynamique se poursuit en 1995, où la surface atteint 9,18 km², traduisant une expansion continue des zones humides. En 2000, la surface en eau atteint 11,97 km², correspondant à une augmentation globale d'environ +266 % par rapport à 1986. Spatialement, cette évolution se traduit par une extension progressive des zones en eau, notamment dans les bas-fonds et les zones de drainage, comme le montrent les cartes. (Figure 7).

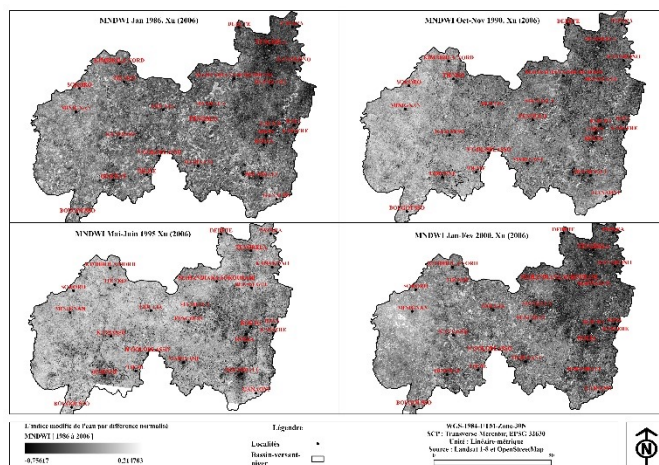


Figure 7 : Cartographie du MNDWI dans le bassin versant du Niger de 1986, 1990, 1995 et 2000

L'analyse des cartes MNDWI met en évidence une rupture nette dans la dynamique des surfaces en eau entre 2005 et 2020. En 2005, la surface en eau est estimée à 10,77 km², valeur élevée traduisant une extension importante des zones humides. Cette situation se maintient en 2010, avec une surface de 10,99 km², indiquant une relative stabilité du système hydrologique sur cette période. En revanche, une chute brutale est observée à partir de 2015, où la surface diminue fortement à 0,59 km², soit une réduction de plus de 94 % par rapport à 2010. Cette contraction se poursuit en 2020, avec une surface estimée à 0,36 km², confirmant une réduction majeure des surfaces en eau. Spatialement, cette évolution se traduit par une forte régression des zones humides, visibles sur les cartes par la diminution des zones claires associées à l'eau et leur concentration dans des secteurs très localisés. (Figure 8).

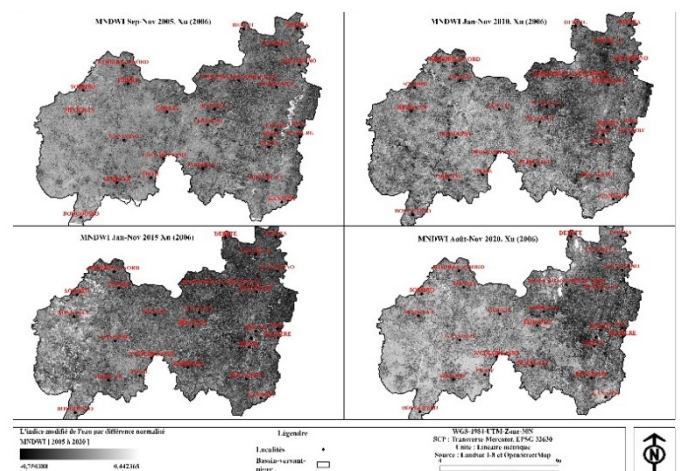


Figure 8 : Évolution du MNDWI dans le bassin versant du Niger de 1986, 1990, 1995 et 2000

En 2020, les surfaces en eau estimées à partir des indices NDWI et MNDWI restent globalement faibles à l'échelle du bassin. Le NDWI indique une superficie d'environ 0,32 km² (321 175 m²), tandis que le MNDWI estime une surface légèrement supérieure de 0,36 km² (362 810 m²).

L'écart entre les deux indices demeure limité ($\approx 0,04$ km²), traduisant une différence modérée dans la détection des surfaces en eau. Cette variation s'explique par la capacité du MNDWI à mieux discriminer les surfaces en eau dans des environnements où les signatures spectrales peuvent être perturbées par les sols nus ou certaines surfaces anthropisées, ce qui confirme sa meilleure robustesse par rapport au NDWI. Sur le plan spatial, les surfaces en eau détectées apparaissent principalement concentrées le long des axes de drainage et dans les zones topographiquement basses du bassin versant. Cette organisation traduit une distribution fortement contrôlée par la structure du réseau hydrographique, sans extension significative à l'ensemble du bassin.

Malgré cette présence, les superficies restent faibles (inférieures à 1 km²), indiquant une faible extension des surfaces en eau libre à l'échelle du bassin. Ainsi, l'année 2020 se caractérise par une dynamique spatialement limitée des surfaces en eau, cohérente entre les indices NDWI et MNDWI, et traduisant une distribution localisée des surfaces en eau au sein du bassin (Figure 9).

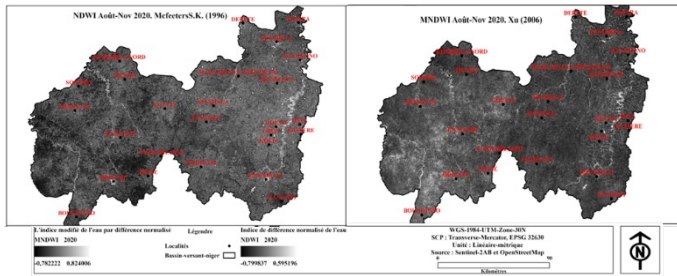


Figure 9 : Évolution du MNDWI et NDVI dans le bassin versant du Niger de 2020

V.3. Dynamique hydro-climatique des eaux de surface

V.3.1. Analyse des tendances temporelles de précipitation et d'évapotranspiration et température

L'évolution conjointe de la température, des précipitations (P) et de l'évapotranspiration (ETP) entre 1940 et 2024 met en évidence une dynamique hydro-climatique marquée par un déséquilibre progressif du bilan. Au cours de la période 1940-1960, les températures restent relativement stables autour de 26,0–26,5 °C (Figure 10)

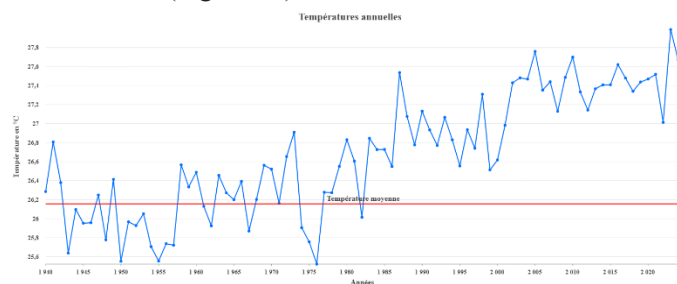


Figure 10 : Évolution temporelle de la température moyenne annuelle dans le bassin (1940–2024)

tandis que les précipitations sont élevées, souvent supérieures à 1500 mm avec des pics proches de 2000 mm (Figure 11).

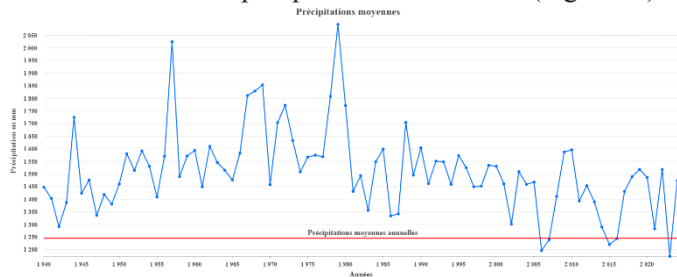


Figure 11 : Variabilité temporelle des précipitations annuelles dans le bassin (1940–2024)

L'ETP demeure élevée (1750mm/an), traduisant un contexte favorable au maintien des ressources en eau. Entre 1940 et 1980, une légère augmentation des températures s'observe, accompagnée d'une irrégularité croissante des précipitations, tandis que l'ETP reste élevée, amorçant une réduction progressive du bilan hydrique (Figure 12).



Figure 12 : Dynamique temporelle de l'évapotranspiration annuelle (ETP) dans le bassin (1940–2024)

La période 1980–2000 est caractérisée par une hausse plus marquée des températures ($\approx 26,5$ – $27,2$ °C) et une baisse significative des précipitations, avec plusieurs années inférieures à 1400 mm, alors que l'ETP demeure élevée (≈ 1780 – 1850 mm), accentuant le déficit hydrique. À partir de 2000–2020, le réchauffement s'intensifie, avec des températures atteignant 27,5–27,8 °C, tandis que les précipitations restent modérées et très variables (≈ 1200 – 1600 mm) sans retrouver les niveaux antérieurs, alors que l'ETP dépasse fréquemment 1850 mm, traduisant une intensification des pertes en eau. Cette dynamique se confirme sur la période récente (2020–2024), marquée par des températures proches de 28 °C, un ETP élevé et persistant dans le temps et des précipitations irrégulières. Dans l'ensemble, l'augmentation conjointe de la température et de l'ETP, combinée à la variabilité des précipitations, entraîne un déséquilibre croissant entre les apports et les pertes en eau, ce qui contribue directement à la contraction et à la forte variabilité des surfaces en eau observées à travers les indices NDWI et MNDWI.

V.3.2. Évolution spatiotemporelle de l'indice standard de précipitation SPI

L'analyse de l'indice SPI met en évidence une variabilité climatique marquée entre 1941 et 2024, caractérisée par une alternance de phases humides et sèches. La période 1941–1970 est globalement dominée par des conditions normales à humides, avec des valeurs majoritairement positives (SPI > 0), traduisant une disponibilité relativement favorable en eau. À partir de 1971–1980, une dégradation progressive s'observe, avec l'apparition de valeurs négatives du SPI (SPI < 0), indiquant le début d'une phase sèche. Cette tendance s'accroît durant la période 1981–1990, caractérisée par une dominance de valeurs comprises entre 0,95 et -0,53, correspondant à des conditions de sécheresse modérée marquée. Après 1991–2000, une reprise partielle est observée, avec un retour de conditions plus humides dans certaines zones (SPI > 0,7), mais cette amélioration reste spatialement limitée. Les périodes 2001–2010 et 2011–2024 sont marquées par une forte variabilité, avec une alternance de valeurs positives et négatives du SPI, traduisant une instabilité du régime pluviométrique. Cette variabilité se manifeste par des épisodes ponctuels d'humidité sans retour à des conditions durablement humides. La carte de synthèse (1941–2024) confirme cette dynamique, en mettant en évidence une dominance des conditions sèches dans plusieurs secteurs du bassin, indiquant une transition vers un régime climatique plus variable et globalement plus contraint. (Figure 13).

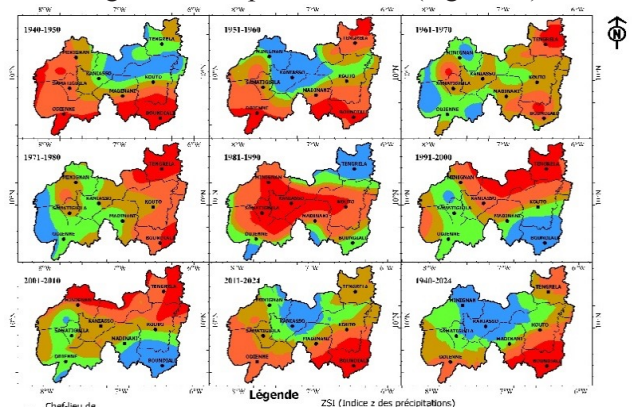


Figure 13 : Évolution spatiotemporelle de l'indice standard de précipitation SPI de 1940 à 2024

V.3.3. Analyse du bilan hydrique

Le bilan hydrique annuel, défini par $B=P-ET_c$, met en évidence une structure spatiale fortement contrastée dominée par des conditions déficitaires. La carte du bilan hydrique (Figure 14) distingue quatre ensembles cohérents. Les classes très négatives (≈ -1510 à -925 mm) et négatives (≈ -925 à -419 mm) occupent l'essentiel des secteurs sud et ouest (Odienné–Bougoussou–Madinani), indiquant un déficit hydrique structurel où ET_c excède largement P . Les classes faiblement négatives à proches de l'équilibre (≈ -419 à $+120$ mm) dessinent un couloir central (Minignan–Goulia Sianhala–Kouto), traduisant des conditions transitionnelles. Les valeurs positives ($\approx +120$ à $+844$ mm, localement jusqu'à $> +1400$ mm) restent localisées au nord/nord-est (Tengréla Papara) et le long de certains axes de drainage, suggérant des zones d'excédent ponctuel liées à des apports pluviométriques plus élevés et/ou à des conditions locales de rétention.

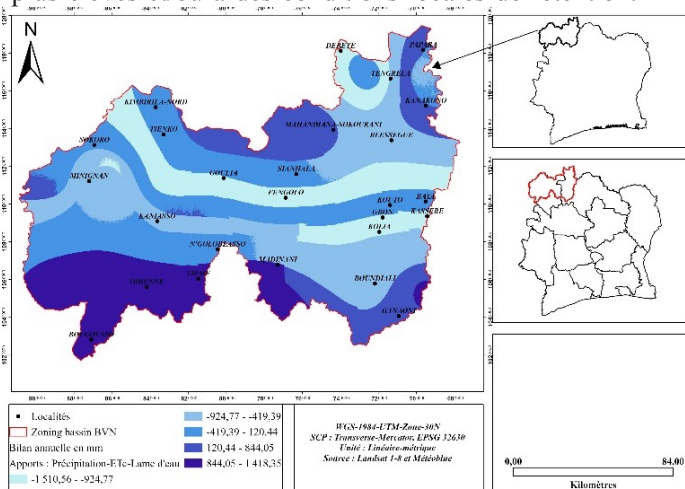


Figure 14 : Distribution spatiale du bilan hydrique annuel ($P - ET_c$) dans la portion ivoirienne du bassin du Niger de 1940 à 2024

La synthèse statistique par classes (Figure 15) confirme ce diagnostic. Les valeurs moyennes de bilan montrent une décroissance nette des classes excédentaires vers les classes déficitaires : $+459$ mm (classe 1), $+116$ mm (classe 2), puis bascule en déficit avec -195 mm (classe 3), -538 mm (classe 4) et -906 mm (classe 5). Les pourcentages de surface associés ($\approx 16,17\%$, $27,31\%$, $27,45\%$, $14,17\%$, $14,89\%$) indiquent que les classes 3 à 5 (déficitaires) représentent $\approx 56,5\%$ du bassin, contre $\approx 43,5\%$ pour les classes excédentaires (1–2). Cette majorité spatiale du déficit atteste d'un bilan hydrique globalement négatif, avec une intensification du déficit vers les classes 4–5.

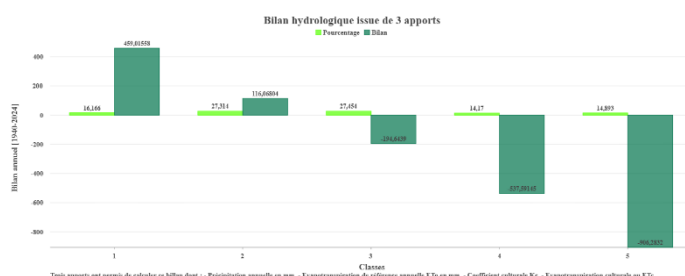


Figure 15 : Répartition du bilan hydrique annuel par classes dans la portion ivoirienne du bassin du Niger de 1940 à 2024

L'analyse conjointe carte–statistiques montre ainsi que le bassin fonctionne majoritairement sous contrainte évaporative

($ET_0 > P$), avec des excédents limités et discontinus. Ce régime se traduit par une faible disponibilité en eau de surface sur de larges zones et une concentration des eaux dans des secteurs spécifiques. En cohérence, les zones à bilan négatif marqué correspondent à des faibles valeurs de NDWI, tandis que les valeurs élevées de MNDWI se concentrent dans les zones excédentaires ou à forte capacité de stockage (bas-fonds, talwegs), sans continuité spatiale à l'échelle du bassin.

VI. DISCUSSION

Les résultats obtenus mettent en évidence une dynamique hydro-climatique fortement contrainte par le bilan hydrique, avec une prédominance des conditions déficitaires et une variabilité marquée des surfaces en eau détectées par les indices NDWI et MNDWI. Cette structuration est cohérente avec les travaux récents en Afrique de l'Ouest, qui montrent que les systèmes hydrologiques tropicaux sont principalement contrôlés par l'équilibre entre précipitations et évapotranspiration (Nicholson, 2018). Dans le cas présent, la dominance des classes déficitaires ($\approx 56,5\%$) traduit un système sous contrainte évaporatoire, ce qui explique directement la contraction spatiale des surfaces en eau observées sur plusieurs périodes, notamment après 2005.

Cette relation entre déficit hydrique et dynamique des eaux de surface est également confirmée par la cohérence entre les faibles valeurs de NDWI et les zones à bilan négatif, indiquant une réduction effective de l'humidité de surface. Des études similaires ont montré que le NDWI est fortement sensible aux variations d'humidité superficielle et aux conditions hydrologiques (McFeeters, 1996 ; Xu, 2006). Toutefois, les résultats obtenus ici montrent que le MNDWI présente une meilleure capacité de détection, notamment dans les zones de bas-fonds et de drainage. Cette observation rejoint les conclusions de (Gautam et al., 2015), qui démontrent que le MNDWI est plus performant que le NDWI dans les environnements complexes, en raison de sa capacité à réduire les confusions avec les surfaces bâties et les sols nus. Cependant, contrairement à cette étude qui repose sur une approche par seuillage empirique, la présente recherche mobilise une approche basée sur la GéoIA. Ce modèle a permis d'extraire les plans d'eau libre autrement dit, les plans d'eau permanent ainsi que les zones à forte humidité et in fine, l'espace du drainage entier qualifié de surface sèche.

Pour ce qui concerne l'extraction des plans d'eau, nous avons conçu un modèle Deep Learning grâce au module python de GéoIA. GéoIA autrement dit, l'intelligence artificielle géospatiale est l'application de l'intelligence artificielle (IA) combinée aux données, aux sciences et aux technologies géospatiales afin d'accélérer la compréhension des opportunités commerciales, des impacts environnementaux et des risques opérationnels dans le monde réel. Elle permet d'extraire les données géospatiales riches grâce au deep learning, réaliser des analyses prédictives avec la machine learning, améliorer la qualité, la cohérence et la précision des données, intégrer l'intelligence artificielle à la prise de décision et bien d'autres. (<https://www.esri.com/enus/capabilities/geoai/overview>).

Ce point constitue une avancée méthodologique majeure. En effet, les approches classiques basées sur des seuils fixes, comme celles utilisées par Gautam et al. (2015), restent sensibles aux variations radiométriques, aux conditions atmosphériques et à l'hétérogénéité des surfaces. À l'inverse, l'intégration de la GéoIA permet ici de dépasser ces limites en combinant information spectrale et organisation spatiale, améliorant ainsi la précision de la classification des surfaces en eau. Cette approche est en accord avec les travaux récents en télédétection, qui insistent sur l'importance des méthodes d'apprentissage spatial pour l'analyse des objets géographiques (Zhu et al., 2021). Elle permet notamment d'expliquer pourquoi les surfaces en eau détectées dans cette étude présentent une structuration cohérente le long du réseau hydrographique et dans les zones topographiquement déprimées.

Par ailleurs, l'analyse temporelle met en évidence une rupture importante durant les années 1980, caractérisées par une diminution des précipitations et une augmentation progressive de l'évapotranspiration. Cette période correspond à une phase de sécheresse bien documentée en Afrique de l'Ouest (Nicholson, 2018), confirmant la robustesse des résultats obtenus. La contraction des surfaces en eau observée entre 1986 et 1995 est donc en parfaite cohérence avec ce contexte climatique régional. Cependant, la reprise partielle observée entre 1995 et 2005 suggère une certaine résilience du système hydrologique, bien que cette amélioration reste spatialement limitée et temporaire.

Malgré ces apports, certaines limites doivent être soulignées. D'une part, les données climatiques utilisées, notamment celles issues de météoblue, présentent une incertitude liée aux processus de downscaling, pouvant affecter la précision des estimations du bilan hydrique. D'autre part, les indices NDWI et MNDWI, bien que robustes, restent des indicateurs indirects de la présence d'eau et ne permettent pas une quantification directe des volumes hydriques. Comme le souligne Xu (2006), ces indices traduisent une signature spectrale relative et peuvent être influencés par des facteurs tels que la turbidité de l'eau ou la présence de végétation aquatique.

En outre, l'analyse met en évidence une forte variabilité spatiale des surfaces en eau, dominée par des dynamiques locales plutôt que par une transformation homogène du bassin. Ce constat rejoint les travaux de Pekel et al. (2016), qui montrent que les changements des eaux de surface à l'échelle globale sont souvent fragmentés et contrôlés par des facteurs locaux.

Dans ce contexte, l'utilisation combinée des indices spectraux et de la GéoIA apparaît particulièrement pertinente pour capter cette hétérogénéité. Ainsi, la principale contribution de cette étude réside dans l'intégration du bilan hydrique et des indices spectraux dans une approche spatiale avancée, permettant de mieux comprendre les mécanismes de contraction et d'expansion des surfaces en eau. Le bilan hydrique apparaît comme un facteur explicatif central, agissant comme un régulateur de la dynamique hydrologique du bassin. Cette interaction entre climat et surface en eau confirme que les

variations observées ne sont pas uniquement liées aux précipitations, mais résultent d'un équilibre complexe entre apports et pertes en eau.

En définitive, cette étude met en évidence la pertinence d'une approche intégrée combinant télédétection, analyse hydro-climatique et intelligence artificielle géospatiale. Elle ouvre des perspectives importantes pour le suivi des ressources en eau dans les contextes tropicaux soumis à une forte variabilité climatique, tout en soulignant la nécessité d'améliorer la qualité des données et de croiser les approches pour affiner les analyses futures.

VII. CONCLUSION

La présente étude a permis de caractériser de manière intégrée la dynamique spatio-temporelle des eaux de surface dans la portion ivoirienne du bassin du Niger, en mobilisant les indices spectraux NDWI et MNDWI, couplés à l'analyse du bilan hydrique. Les résultats mettent en évidence une forte variabilité des surfaces en eau, structurée par des phases successives de contraction et d'expansion, traduisant la sensibilité du système hydrologique aux fluctuations hydro-climatiques.

L'analyse conjointe des paramètres climatiques montre que cette dynamique est principalement contrôlée par le déséquilibre progressif du bilan hydrique, marqué par une augmentation des pertes en eau liées à l'évapotranspiration et une variabilité des apports pluviométriques. La prédominance des conditions déficitaires sur une grande partie du bassin explique ainsi la limitation spatiale des surfaces en eau, ainsi que leur forte instabilité interannuelle. La période des années 1980 apparaît comme un tournant majeur, correspondant à une phase de sécheresse structurante ayant durablement influencé l'organisation hydrologique du bassin.

Sur le plan méthodologique, la comparaison entre NDWI et MNDWI confirme la complémentarité des indices spectraux, le MNDWI permettant une meilleure détection des surfaces en eau, notamment dans les zones de faible profondeur et les milieux partiellement végétalisés. L'intégration de l'approche GéoIA constitue un apport significatif, en améliorant la prise en compte des structures spatiales et en dépassant les limites des méthodes classiques basées sur des seuils fixes. Cette combinaison méthodologique renforce la robustesse de l'analyse et permet une interprétation plus fine des dynamiques observées.

Toutefois, certaines limites subsistent, notamment liées à l'incertitude des données climatiques et à la nature indirecte des indices spectraux, qui ne permettent pas une estimation quantitative des volumes d'eau. Ces contraintes soulignent la nécessité d'intégrer, dans de futurs travaux, des données hydrogéologiques in situ et des approches multi-sources afin d'affiner la compréhension des processus en jeu. En définitive, cette étude met en évidence le rôle déterminant du bilan hydrique comme facteur de contrôle de la dynamique des eaux de surface, et démontre l'intérêt d'une approche intégrée combinant télédétection, analyse climatique et intelligence artificielle géospatiale. Elle constitue ainsi une contribution pertinente pour le suivi et la gestion durable des

ressources en eau dans les régions tropicales soumises à une forte variabilité climatique.

REMERCIEMENTS

L'auteur exprime sa gratitude à l'Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB), au CURAT et à l'École Doctorale ED-STAD pour leur appui académique. Il remercie également le Ministère de l'Hydraulique et la Direction de l'Hydrologie pour la mise à disposition des données, ainsi que les communautés locales pour leur contribution aux enquêtes.

DÉCLARATION DE CONTRIBUTION DES AUTEURS

Justin Kouadio KONAN a assuré la conceptualisation de l'étude, le développement de la méthodologie, la mise en œuvre des outils logiciels, la rédaction de la version initiale du manuscrit ainsi que sa relecture et sa révision.

Bi Vami Hermann N'GUESSAN a contribué au développement de la méthodologie, à l'implémentation des outils logiciels, ainsi qu'à la relecture et à la révision du manuscrit.

Djaha Levix Nadir KOFFI a participé à l'organisation et à la structuration des données climatiques et météorologiques après leur téléchargement depuis la plateforme météo blue (<https://www.meteoblue.com/fr/historyplus>).

Gilvenick Gad EBOLA MOULOUNDA, ingénieur de recherche indépendant pour ses directives dans la rédaction et le traitement des données.

DÉCLARATION DE DISPONIBILITÉ DES DONNÉES

Toutes les données pertinentes sont incluses dans l'article ou dans les informations complémentaires associées.

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTERÊTS

Les auteurs déclarent qu'il n'existe aucun conflit d'intérêts.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, pp. 1–300.

Arias, M.E., Cochrane, T.A., Norton, D. (2021). Climate variability impacts on water resources in tropical regions. *Journal of Hydrology*, 596, 126–138.

Crist, E.P., Cicone, R.C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data. *IEEE Transactions*

on Geoscience and Remote Sensing, GE-22(3), pp. 256–263.

Didéhiou, S., et al. (2021). Climate variability and hydrological extremes in West Africa. *Atmospheric Research*, 247, 105–126.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, pp. 18–27.

Gautam, V.K., Gaurav, P.K., Murugan, P., Annadurai, M. (2015). Comparative analysis of spectral indices and classification methods for surface water mapping. *Aquatic Procedia*, 4, pp. 140–147.

Knorr, W., et al. (2017). Sen2Cor for Sentinel-2 atmospheric correction. European Space Agency Technical Report, pp. 1–30.

McFeeters, S.K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), pp. 1425–1432.

Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., et al. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, pp. 154–172.

Shen, L., Zhang, L. (2011). A normalized difference water index for water body extraction. *Remote Sensing Letters*, 2(1), pp. 1–10.

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), pp. 1696–1718.

Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), pp. 3025–3033.

Yang, Y., et al. (2020). Remote sensing of surface water in complex environments: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, pp. 278–296.

Zhu, Z., Woodcock, C.E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, pp. 83–94.

N'DA, P. (2015). Recherche et méthodologie en sciences sociales et humaines. L'Harmattan, Paris, 280 p.

Perception des producteurs de mangue (*Mangifera Indica L*) sur le désordre physiologique « nez mou » dans les départements de korhogo et sinematiali de la Cote d'Ivoire

Titre court : Perception sur le « nez mou » dans la filière mangue en Côte d'Ivoire

BAMBA Zié Aboubakar Armel^{1*} N'GUESSAN Kouamé Antoine¹ BOHOSSOU Akissi Antoinette¹ KOUATO Fulgence¹ KOUAME Brou N'guessan Akouèlou¹ OUATTARA Hetawélé Eliézer²

Résumé

L'étude met en évidence la perception des producteurs quant à la manifestation du désordre physiologique appelé « nez mou » qui représente une contrainte majeure à la production en quantité et en qualité de la mangue (*Mangifera Indica L*) en Côte d'Ivoire destinée à l'exportation. Cent quatre-vingt-dix (190) producteurs identifiés de façon aléatoire ont été interrogés sur les pratiques culturales réalisées dans les vergers de mangues, sur la connaissance du désordre physiologique, l'origine et les méthodes de lutte. L'analyse des données a montré que la majorité des producteurs font le désherbage (97%), le labour (85%) et la taille (65%). Le « nez mou » est présent dans les vergers de 46 % des producteurs enquêtés. Les producteurs, bien qu'ayant connaissance de l'existence du déséquilibre physiologique (62,63 %) ne maîtrisent généralement pas (43 %) les causes. Sur deux ans, 2024 et 2025, une perte totale à l'exportation de 71 253 600 FCFA a été enregistrée pour cause de « nez mou ». Quant aux méthodes de lutte, la plupart ne mène aucune action (66 %), certains utilisent des produits phytosanitaires (21%), d'autres ne font pas de récoltes sur les arbres affectés (3%), se contentent de réaliser les pratiques culturales (3%), évitent d'associer d'autres cultures au manguier (3%), font des cuvettes sur le sol autour de l'arbre et apportent des produits biologiques (2%) et évitent l'usage d'engrais dans leur verger (1%). Cette étude dégage une subtilité autour de la perception sur le désordre physiologique au niveau des acteurs de la filière mangue en Côte d'Ivoire.

Mots clés : Désordre physiologique, Exportation, Nez Mou, Perte, Côte d'Ivoire.

Abstract

TITLE : PERCEPTION OF MANGO PRODUCERS (*MANGIFERA INDICA L*) REGARDING THE PHYSIOLOGICAL DISORDER KNOWN AS « SOFT NOSE » IN THE DEPARTMENTS OF KORHOGO AND SINEMATIALI IN COTE D'IVOIRE

The study highlights producers perceptions of the physiological disorder known as « soft nose », which represents a major constraint on the quantity and quality of mango (*Mangifera indica L*) production in Côte d'Ivoire intended for export. One hundred and ninety (190) randomly selected producers were interviewed about the cultivation practices carried out in mango orchards, their knowledge of the physiological disorder, its causes and control methods. Analysis of the data showed that the majority of producers carry out weeding (97%), ploughing (85%) and pruning (65%). « Soft nose » is present in the orchards of 46% of the producers surveyed. Although producers are aware of the existence of the physiological disorder (62.63%), they generally do not understand (43%) its causes. Over a two-year period, 2024 and 2025, a total export loss of 71,253,600 CFA francs was recorded due to « soft nose ». As for control methods, most take no action (66%), some use plant protection products (21%), others do not harvest from affected trees (3%), simply follow standard cultivation practices (3%), avoid planting other crops alongside mango trees (3%), dig basins in the soil around the tree and apply organic products (2%), and avoid using fertilisers in their orchards (1%). This study highlights a nuanced perception of physiological disorders among stakeholders in the mango sector in Côte d'Ivoire.

Keywords : Physiological disorder, Export, Survey, Soft nose, Loss, Côte d'Ivoire.

^{1*} BAMBA Zié Aboubakar Armel (Auteur correspondant), ziearmelbamba@yahoo.com, (+225)0748869973, Doctorant en Pédologie, Laboratoire Environnement, Climat, Santé, Ingénierie et Développement Durable, Département des Géosciences, Unité de Formation et de Recherche des Sciences Biologiques, Université Peleforo GON COULIBALY, BP 1328, Korhogo, Côte d'Ivoire.
N'GUESSAN Kouamé Antoine, Maître de Conférences en Agro-pédologie, nguessanantoine1979@gmail.com, (+225)0707426965
BOHOSSOU Akissi Antoinette, Doctorante en Agro-pédologie,

1akissi22antoinette@gmail.com, (+225)0758006899
KOUATO Fulgence, Maître-Assistant en Biologie et Ecologie animales, kouatoful@gmail.com, (+225)0708265552
KOUAME Brou N'guessan Akouèlou, Doctorant en Epidémiologie et Santé Végétale, akueloukouame@ensea.edu.ci, (+225)0757210833
OUATTARA Hetawélé Eliézer, Zootechnicien, hetaweleeouatt@gmail.com, (+225)0757739086, Inter-mangue, Organisation Interprofessionnelle des acteurs de la mangue de Côte d'Ivoire, Korhogo, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, la mangue occupe le 1^{er} rang des exportations vers les pays de l'Afrique. Sa production nationale est estimée à plus de 150 000 Tonnes. La variété prisée à l'exportation est la Kent. Aujourd'hui, les quantités de mangues d'exportation ont augmenté passant de 31 743 Tonnes en 2019 (Douan, 2022) à plus de 40 000 Tonnes en 2024 (Inter-Mangue, 2024).

Les principales zones de production pour l'exportation sont

rencontrées dans les régions du nord du pays notamment autour des villes d'Odienné, Boundiali, Korhogo, Sinématiali, Ferkessedougou et Tafiré plus au sud (Pugnet, 2018). Les variétés Kent (80%), Keitt (7%) et Amélie (3%) sont les plus cultivées et exportées (Coulibaly, 2022) à cause de leur productivité à l'hectare et leur excellent goût, leur valeur hautement nutritive, et surtout leur valeur commerciale (APROMAB, 2016). Parmi celles-ci, la variété Kent représente plus de 95 % de la production de Côte d'Ivoire à l'exportation

(Pugnet, 2018). En 2024, la production nationale de la variété Kent s'élevait à 180 000 Tonnes avec 40 869 Tonnes exportés vers l'Europe (Inter-manguie, 2024). Elle est globalement la plus recherchée par les importateurs grâce à sa maturation régulière et progressive et ses qualités organoleptiques (Rey, 2002). Elle constitue la référence en termes de qualité pour les marchés de l'exportation (COLEACP, 2021).

Malgré une augmentation régulière de la production et la forte appréciation des variétés produites, seulement 10 % de la production nationale est exportée vers l'Europe (FIRCA, 2014). Des pertes au champ et en post-récolte pouvant atteindre entre 40 % et 50 % sont encore enregistrées (Douan, 2022) et estimées à environ 3,3 milliards de FCFA/an (Kouamé *et al.*, 2020). Ces pertes sont liées aux impacts des maladies et ravageurs affectant la qualité commerciale du produit et au nombre desquels figure le désordre physiologique du fruit appelé le « nez mou » ou « soft nose » chez le manguier (INFOCOMM, 2016). Cette maladie est considérée comme l'une des menaces les plus sérieuses pour l'industrie de la mangue entraînant des pertes économiques importantes (Amin *et al.*, 2007). Le « nez mou » se traduit par un déséquilibre physiologique du fruit reconnaissable par le ramollissement de la pulpe parfois accompagné d'une modification de la couleur de l'épiderme (COLEACP, 2021). Les facteurs favorisant le « nez mou » seraient les types de sols et la présence ou l'absence de certains éléments minéraux (Léfevre, 1968). Son apparition serait liée à une faible teneur en calcium et magnésium corrélée à un excès d'azote dans le sol (Assis *et al.*, 2004 ; Torres *et al.*, 2004 ; Amin *et al.*, 2007 ; Amouroux *et al.*, 2009 ; COLEACP, 2021) ou à l'emplacement d'ancien parcs à bétail au sein des vergers (Rey, 2002 ; Douan, 2022 ; COLEACP, 2021). Néanmoins, la cause véritable ou l'origine de ce déséquilibre physiologique reste mal connue (Amin *et al.*, 2007 et COLEACP, 2021).

Sous l'hypothèse que des contraintes édaphiques et certaines pratiques d'entretien des vergers pouvaient prédisposer la mangue à ce phénomène, cette étude a été initiée en vue d'analyser la perception des producteurs de la mangue sur le désordre physiologique « nez mou » afin d'identifier ses impacts sur la production fruitière destinée à l'exportation.

1. MATERIEL ET METHODES

Une fiche d'enquête a été élaborée pour mener des entretiens auprès des producteurs suivant une méthodologie définie.

1.1. MILIEU DE L'ETUDE

L'étude a été réalisée dans les départements de Korhogo et Sinématiali situés dans la région du Poro, dans le nord de la Côte d'Ivoire (Figure 1). La région du Poro est caractérisée à 80 % par une prédominance des formations savanicoles, qui comprennent la savane boisée, la savane arborée, la savane arbustive et la savane herbeuse. Le climat est de type soudanais, marqué par l'alternance de deux saisons : une saison des pluies, s'étendant de mi-avril à octobre et une saison sèche, allant de novembre à fin mars (Yéo *et al.*, 2020). La pluviométrie annuelle moyenne dans la région du Poro varie entre 1000 mm et 1400 mm/an. Les sols dans cette région sont de type ferralitique (Djaha *et al.*, 2014). De manière générale, le coton,

l'anacarde, le maïs et la mangue sont les cultures les plus produites et représentent les principales sources de revenus dans cette région.

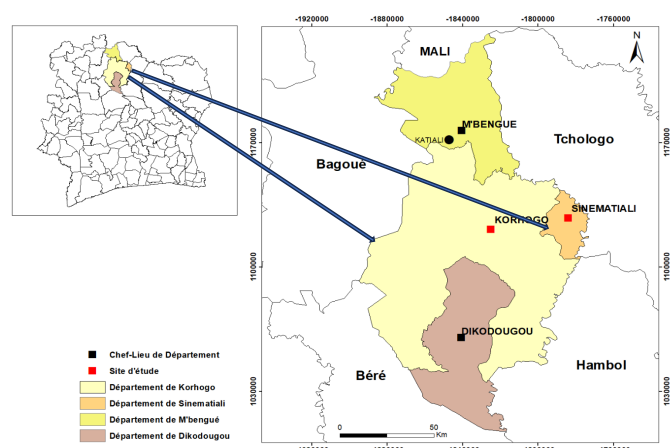


Figure 1 : Zone d'étude

1.2. COLLECTE DE DONNEES

La méthode employée pour cette étude est essentiellement basée sur la production de données empiriques. La collecte de données a consisté à mener deux types d'enquêtes. Une première enquête a été faite auprès des producteurs de mangues et une seconde auprès des stations de conditionnement. La première enquête menée auprès des producteurs s'est déroulée sur la période allant de mars à octobre 2024. Durant cette période, des entretiens structurés ont été menés individuellement avec chaque producteur, à l'aide d'un questionnaire préalablement élaboré. Des personnes ressources dans chaque département avaient pour rôle de réunir les producteurs dans un lieu pour les entretiens. Le jour des entretiens, les producteurs se présentaient selon leur disponibilité. Au total, Cent quatre-vingt-dix (190) producteurs ont été interviewés ; dont 36 dans le département de Korhogo et 154 dans le département de Sinématiali. Les questions posées portaient sur plusieurs aspects notamment les caractéristiques sociodémographiques (sexe, situation matrimoniale, niveau d'instruction, âge et expérience dans la production de la mangue), les caractéristiques des vergers (superficie, pratiques culturelles, âge des vergers et cultures associées au manguier), les informations liées à la connaissance du désordre physiologique « nez mou » et aux moyens de lutte utilisés. La connaissance du désordre physiologique a été déterminée à l'aide d'une échelle de Likert. Pour chaque élément de connaissance donnée, les réponses étaient notées entre 0 et 3. Les éléments de connaissance étaient entre autres l'enfoncement de la zone apicale de la mangue au touché, le pourrissement de la pulpe de la mangue et la présence de fibre noirâtre dans la pulpe et proche du noyau de la mangue. La seconde enquête a été réalisée sur deux années (2024 et 2025), durant la campagne de la mangue (de mars à avril). Cette enquête avait pour but d'évaluer les pertes à l'exportation induites par le désordre physiologique. Pour ce faire, une collecte de données a été menée chaque semaine auprès des inspecteurs phytosanitaires du ministère de l'agriculture. Cette collecte concernait le nombre de caisses de mangues rejetées pour cause de « nez mou ». Elle a été effectuée dans un échantillon de 14 stations de conditionnement dans la ville de Korhogo.

1.3. TESTS STATISTIQUES

Les données qualitatives et quantitatives ont été saisies avec le tableur Excel 2021. Ce tableur a été utilisé pour l'élaboration de tableaux et graphiques. Les tableaux croisés dynamiques ont été utilisés pour synthétiser les données. Le test de X^2 a été réalisé avec le logiciel SPSS version 26 pour voir s'il existe un lien entre les pratiques culturales et l'apparition du « nez mou » chez le manguiier. Pour voir s'il y a une différence en ce qui concerne les pertes économiques entre les différentes stations un test de Kruskal-Wallis a été fait après un test de normalité avec le logiciel SPSS version 26.

2. RESULTATS

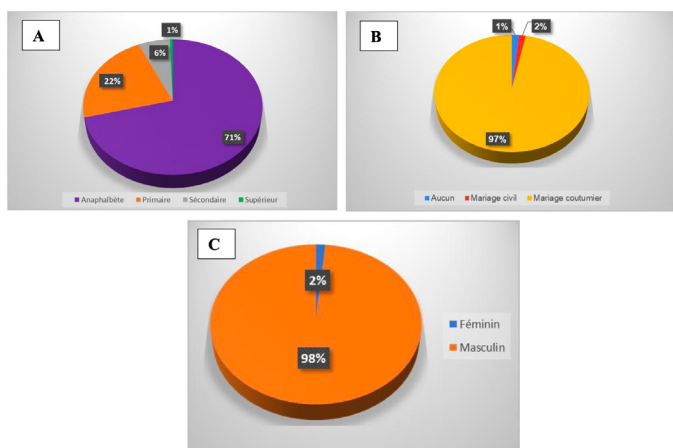
Dans cette partie les résultats qui sont présentés sont les caractéristiques socioéconomiques des producteurs de mangue, les pratiques culturales qu'ils réalisent dans leur verger, leur perception sur le « nez mou » et les pertes économiques causées par le désordre physiologique.

2.1. CARACTERISTIQUES

SOCIOECONOMIQUES DES PRODUCTEURS DE MANGUE

2.1.1. Profil sociodémographique des producteurs

La figure 2 présente les proportions des producteurs enquêtés en fonction du sexe, de leur situation matrimoniale et du niveau d'instruction. Les résultats ont montré que 98 % des producteurs enquêtés sont de sexe masculin contre 2 % de sexe féminin. Près de 97 % des producteurs ont célébré le mariage coutumier et 2 % le mariage civil. En revanche, seul 1 % n'a célébré aucun mariage. Aussi, 71 % des producteurs sont analphabètes, 22 % ont le niveau primaire, 6 % le niveau secondaire et 1 % à niveau supérieur.

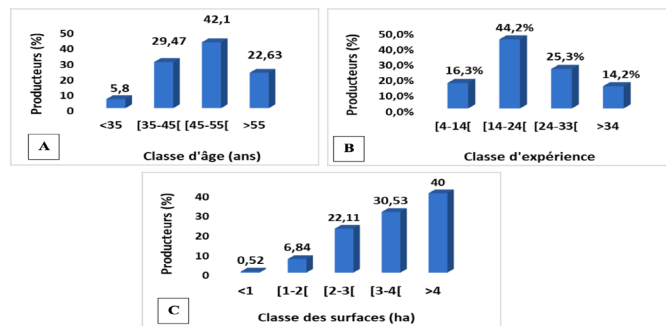


Figures 2 : A : Proportions des producteurs enquêtés selon leur niveau d'instruction ; B : Proportions des producteurs enquêtés en fonction de leur situation matrimoniale C : Proportions des producteurs enquêtés en fonction du sexe

2.1.2. Typologie des producteurs

L'enquête révèle que la culture du manguiier est pratiquée par des producteurs dont l'âge se situe entre 20 ans et 84 ans. L'âge moyen des producteurs est de $48,59 \pm 9,987$. La classe d'âge (A) représentée de façon majoritaire est comprise entre 45 ans et 55 ans, avec une prévalence de 42,1 %, suivi de 29,47 % des producteurs dont l'âge varie entre 35 ans et 45 ans. La

tranche d'âge des producteurs les plus âgés (>55) est de 22,63 % contre celle des producteurs les moins âgés est de 5,8 %. La majorité des producteurs (44,2 %) ont une expérience (B) dans la production de la mangue qui varie entre 14 et 24 ans contre une minorité (14,2 %) qui ont plus de 34 ans d'expérience. Seul 0,52 % des producteurs ont des vergers avec une superficie de moins de 1 ha (C) tandis que le plus grand taux (40 %) des producteurs cultivent sur des surfaces de plus de 4 ha. Aussi, 6,84 %, 22,11 % et 30,53 % exploitent respectivement des vergers dont les superficies se trouvent entre 1 et 2 ha, 2 et 3 ha et 3 et 4 ha.



Figures 3 : A : classe d'âge des producteurs de mangue ; B : classe d'expérience des producteurs de mangue ; C : classe des surfaces des producteurs de mangue

2.2. Pratiques culturales réalisées dans les vergers

Le désherbage (97%), le labour (85%) et la taille (65%) sont respectivement les pratiques culturales les plus réalisées par les producteurs (Figure 4). En outre, 30% des producteurs associent d'autres cultures au manguiier contre 8 % qui utilisent de l'engrais dans leur verger.

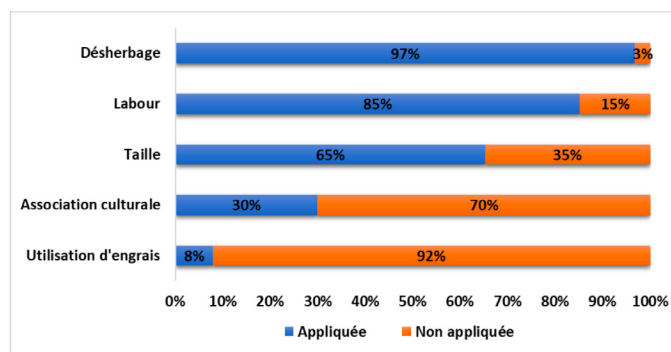


Figure 4 : Pratiques culturales réalisées dans les vergers

2.2.1. Association culturale

La figure 5 montre différentes cultures (l'arachide, l'anacarde, le coton, le riz, le haricot et le maïs) associées aux vergers de manguiier en fonction de leur classe d'âge. Le haricot (33 vergers sur 77) et l'arachide (15 vergers sur 77) sont les cultures les plus associées à la culture du manguiier quel que soit l'âge du verger. Cependant, en termes de nombre, le haricot (33 vergers sur 77) et le maïs (23 vergers sur 77) sont respectivement les cultures les plus associées. Pour les vergers dont l'âge est compris entre 4 et 14 ans, le maïs (5 vergers associés sur 8) est la culture la plus associée. De façon successive, le maïs (12 vergers sur 30), le haricot (9 vergers sur 30) et l'arachide (6 vergers sur 30) sont les cultures les plus associées aux vergers dont l'âge varie entre 14 ans et

24 ans. Quant aux vergers dont l'âge se situe entre 24 et 34 ans, le haricot (11 vergers sur 22) représente la moitié des cultures associées à ces vergers, suivi respectivement du maïs (6 vergers sur 22) et de l'arachide (5 vergers sur 22). La culture la plus associée pour les vergers les plus âgés (>34) est le haricot (12 vergers sur 17). Dans l'ensemble, le haricot (33 vergers sur 77) est la culture la plus associée aux vergers. Cependant, l'anacarde (1 verger sur 77), le riz (2 vergers sur 77) et le coton (3 vergers sur 77) sont les cultures les moins associées à ces vergers.

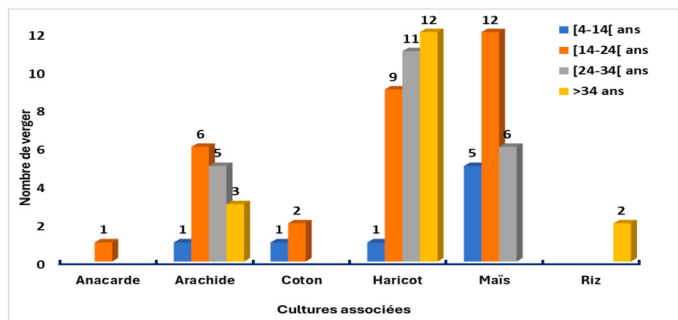


Figure 5 : Cultures associées au manguiers

2.3. PERCEPTION DES PRODUCTEURS SUR LE « NEZ MOU » DANS LA ZONE D'ETUDE

2.3.1. Connaissance du désordre physiologique par les producteurs

Plus de la moitié des producteurs enquêtés (62,63 %) ont une bonne connaissance du désordre physiologique appelé « nez mou », obtenant un score de 2 (Tableau 1). Seuls 12,63 % des producteurs affichent une très bonne connaissance (score de 3), tandis que 11,05 % ont une faible connaissance. Enfin, 13,68 % des producteurs n'ont aucune connaissance de ce désordre physiologique, enregistrant un score de 0. Dans l'ensemble, une grande majorité des producteurs (86,31 %) connaissent au moins un des symptômes de la manifestation du « nez mou ».

Tableau 1 : Niveau de connaissance du désordre physiologique

Score	Effectifs	Pourcentage	Niveau de connaissance du nez mou
0	26	13.68	Pas de connaissance
1	21	11.05	Faible connaissance
2	119	62.63	Bonne connaissance
3	24	12.63	Très bonne connaissance
Total	190	100.00	

2.3.2. Manifestation du « nez mou » dans les vergers

Les résultats présentés dans la figure 6 révèlent que le désordre physiologique est présent dans les vergers de mangues de 46 % des producteurs enquêtés. En revanche, une majorité des vergers (54 %) n'est pas affectée par ce désordre. Par ailleurs, les pratiques culturales étudiées (Tableau 2) telles que le labour, la taille le désherbage, l'Association culturale et l'Usage d'engrais n'ont aucun effet statistiquement significatif sur la manifestation du « nez mou ».

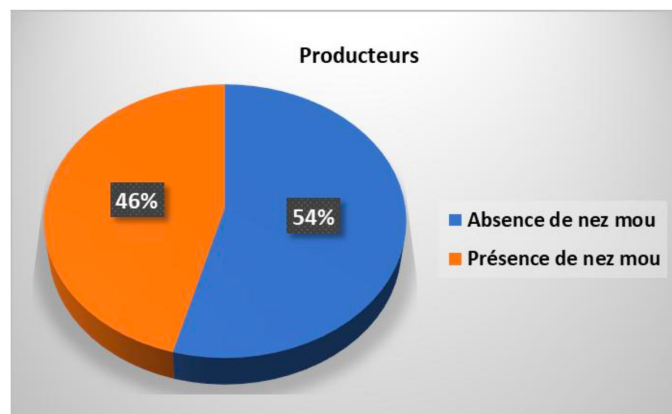


Figure 6 : Apparition du « nez mou » dans les vergers de manguiers

Tableau 2 : Relation entre les pratiques culturales et la manifestation du « nez mou »

Variables	Modalité	Effectif (%)	χ^2	P value
Labour	Présence du nez mou	75 (47,47)	1,07	0,302
	Absence du nez mou	83 (52,53)		
Désherbage	Présence du nez mou	85 (45,9)	0,07	0,792
	Absence du nez mou	100 (54,1)		
Taille	Présence du nez mou	56 (47,1)	0,21	0,649
	Absence du nez mou	63 (52,9)		
Association culturale	Présence du nez mou	22 (38,6)	1,7	0,192
	Absence du nez mou	35 (61,4)		
Usage d'engrais	Présence du nez mou	8 (53,3)	0,37	0,541
	Absence du nez mou	7 (46,7)		

Légende : χ^2 = test de chi 2 ; P value= probabilité

2.3.3. Les causes de la manifestation du désordre physiologique chez la mangue selon les producteurs

Chez la plupart des producteurs interrogés (43%), la cause du désordre physiologique est méconnue (Figure 7). Les causes de la manifestation du « nez mou » sont multiples selon certains producteurs enquêtés. En effet, l'enquête révèle que 10 facteurs sont à l'origine de l'apparition du désordre physiologique selon les producteurs interrogés. 32 % des producteurs affirment que la manifestation du phénomène émane du sol. D'autres, 16% et 14 % indiquent respectivement que l'apparition du désordre physiologique est liée à la présence des termites et l'usage de l'engrais dans les vergers. Néanmoins, certains producteurs (6 %) estiment que la présence des légumineuses et de matière organique dans les vergers provoquent l'apparition du « nez mou ». Toutefois, des producteurs (2%) évoquent les piqûres des mouches de fruits comme responsables de la manifestation du phénomène. Seulement 1 % des producteurs enquêtés attribuent la source de l'apparition du « nez mou » à la pratique du labour ou à l'attaque des feuilles des manguiers par la cochenille farineuse ou à l'usage des produits phytosanitaires dans les vergers ou à la morphologie de l'arbre.

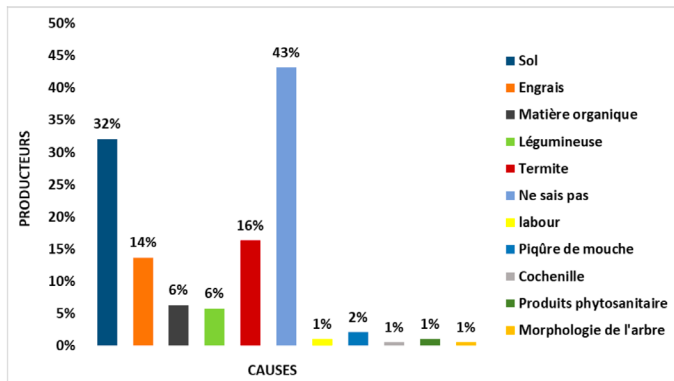


Figure 7 : Causes de la manifestation du « nez mou » selon les producteurs

2.3.4. Pertes de revenu à l'exportation liées au « nez mou »

L'analyse des données a révélé qu'il n'existe aucune différence significative au niveau des pertes à l'exportation pour cause de « nez mou » observées entre les différentes stations ($P\text{-value} = 0,448$ soit supérieur au seuil de significativité $\alpha = 0,05$), au cours des années 2024 et 2025 (Tableau 3). Malgré l'absence de différence significative entre les stations, les pertes financières totales à l'exportation pour l'ensemble des stations enquêtées ont augmenté, passant de 34 428 000 FCFA en 2024 (Tableau 4) à 36 825 600 FCFA en 2025 (Tableau 5). Quant à la production rejetée, des pertes moyennes globales d'environ $20492,86 \pm 15985,327$ Kg en 2024 contre $21920 \pm 15462,274$ Kg en 2025 sont enregistrés.

Tableau 3 : Test de Kruskal-Wallis ; PERTE (FCFA) entre stations en 2024 et 2025

N total	14
Statistiques de test	13,000 ^{a,b}
Degré de liberté	13
Sig. Asymptotique (test bilatéral)	0,448

a. Les statistiques de test sont réglées pour les ex aequo.

b. Aucune comparaison multiple n'est effectuée car le test général ne contient pas de différence significative entre les échantillons.

Tableau 4 : Pertes de revenu à l'exportation liées au « nez mou » en 2024

STATIONS	CAISSES REJETEES POUR NEZ MOU (2024)	PRODUCTION REJETEE (Kg)	PERTE (FCFA)
A	585	11700	1 404 000
B	945	18900	2 268 000
C	1269	25380	3 045 600
D	1665	33300	3 996 000
E	225	4500	540 000
F	2608	52160	6 259 200
G	793	15860	1 903 200
H	360	7200	864 000
I	1080	21600	2 592 000
J	405	8100	972 000
K	225	4500	540 000
L	2025	40500	4 860 000
M	90	1800	216 000
N	2070	41400	4 968 000
TOTAL	14345	286900	34 428 000

Tableau 5 : Pertes de revenu à l'exportation liées au « nez mou » en 2025

STATIONS	CAISSES REJETEES POUR NEZ MOU (2025)	PRODUCTION REJETEE (Kg)	P E R T E (F C F A)
A	450	9000	1 080 000
B	10	200	24 000
C	2250	45000	5 400 000
D	2115	42300	5 076 000
E	495	9900	1 188 000
F	1305	26100	3 132 000
G	1350	27000	3 240 000
H	450	9000	1 080 000
I	844	16880	2 025 600
J	540	10800	1 296 000
K	315	6300	756 000
L	1935	38700	4 644 000
M	1080	21600	2 592 000
N	2205	44100	5 292 000
TOTAL	15344	306880	36 825 600

2.3.5. Les méthodes de lutte contre la manifestation du désordre physiologique par les producteurs

Plus de la moitié des producteurs enquêtés (66 %) n'utilisent aucune méthode de lutte (Tableau 5). Cependant, 21 % des producteurs utilisent des produits phytosanitaires contre la manifestation du désordre physiologique. Près de 3 % des producteurs abandonnent les arbres dont les mangues sont atteintes de « nez mou ». D'autres (3 %) affirment appliquer les bonnes pratiques agricoles, quand certains (3%) évitent les associations culturales. Aussi, 2 % estiment apporter au sol, sous la couronne de l'arbre, des produits biologiques contre 1 % des producteurs enquêtés signifiant ne pas utiliser de l'engrais chimique sur leur parcelle. Pour corriger ce désordre, la moitié des producteurs enquêtés (50%) souhaite qu'une solution leur soit proposée, tandis que l'autre moitié (50%) n'a exprimé aucun souhait.

Tableau 6 : Moyens de lutte utilisés par les producteurs contre l'apparition du « nez mou » dans les vergers

Moyens de lutte	Producteurs	Pourcentage (%)
Ne font pas de récoltes sur les arbres atteints	3	3%
Application des pratiques culturales	3	3%
Aucun	57	66%
Eviter l'association culturale	3	3%
Faire une cuvette autour de l'arbre et utilisation de produits biologiques	2	2%
Non utilisation d'engrais sur la parcelle	1	1%
Utilisation de produits phytosanitaires	18	21%
Total	87	100%

3. DISCUSSION

Les producteurs de mangues dans la zone enquêtée sont en majorité (98 %) des hommes. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Kouamé *et al.* (2020) qui ont montré que 99

% des hommes sont propriétaires de vergers de mangues dans la région nord de la Côte d'Ivoire. Cette prédominance des hommes dans la production de mangues pourrait s'expliquer par le fait que, selon la tradition, au nord de la Côte d'Ivoire, les hommes sont généralement les propriétaires terriens. La plupart des femmes propriétaires sont des veuves ou des héritières (**Kemayou et al., 2021**). Par ailleurs, elles jouent le rôle d'aide de leur mari dans les plantations de mangues, ainsi que dans la production de cultures maraîchères et vivrières destinées à l'alimentation familiale. Elles interviennent plus spécifiquement lors de la campagne de mangue, notamment dans la vente et dans les stations de conditionnement comme employées. La majorité des producteurs interrogés est mariée indépendamment du type de mariage et la minorité est célibataire, ce qui est corroboré par les résultats de **Kemayou et al. (2021)**. En effet, les résultats de ces auteurs ont montré que dans le Noun situé dans la région ouest du Cameroun, 91,3 % des personnes interrogées étaient mariées quel que soit le type de mariage. En outre, l'enquête a révélé que 71 % des producteurs sont analphabètes. Ces résultats sont approximativement analogues à ceux obtenus par **Kouamé et al. (2020)** en Côte d'Ivoire, lors d'une enquête sur les contraintes liées à la production et à la commercialisation des mangues (*Mangifera indica L*) en Côte d'Ivoire. Dans cette étude, 75 % des producteurs enquêtés étaient analphabètes. Cet état de fait pourrait s'expliquer par la non-priorisation de la scolarisation dans la zone nord autrefois. Aussi, l'étude révèle que la moyenne d'âge des producteurs interrogés approche les 49 ans. Par ailleurs, la classe d'âge majoritaire se situe entre 45 et 55 ans. Des résultats similaires ont été obtenus par **Waïgalo (2023)** dans la région de Sikasso au Mali. Ceci serait relatif à l'intérêt des jeunes vis-à-vis des métiers moins salissants et/ou rentables à court termes comme la moto taxi ou la pratique des cultures maraîchères (**Kouamé et al., 2020**). La majeure partie de ces producteurs possède une expérience dans la production de la mangue qui se situe entre 14 et 24 ans. Pour l'ensemble des producteurs enquêtés, la superficie moyenne exploitée avoisine les 5 hectares. De ce fait, les superficies des parcelles des producteurs de la zone d'étude varient entre 0,5 et 20 hectares. Cela pourrait s'expliquer par la plus grande facilité d'accès aux ressources foncières (terres) dans la zone nord du pays. Les pratiques culturelles couramment réalisées par les producteurs interrogés sont de types mécaniques. En effet, le désherbage (97%), le labour (85%) et la taille (65%) représentent les pratiques d'entretien les plus réalisées. D'ailleurs, ces techniques culturelles nécessiteraient peu de moyens financiers et pourraient être effectuées par les producteurs eux-mêmes. **Koffi (2021)**, affirme que le labour, le désherbage et la taille peuvent impacter fortement la production individuelle de l'arbre. De plus, le désherbage et le labour permettraient au sol d'être enrichi en matière organique et aéré. Ce qui faciliterait l'absorption de l'eau et des nutriments par les racines des arbres. Selon **Vannière et al. (2013)**, le désherbage et le labour permettent l'élimination des adventices qui sont des potentiels concurrents directs des manguiers pour l'accès aux ressources. Quant à la taille, les producteurs la pratiqueraient dans leurs vergers en vue d'éviter les maladies liées à l'humidité et de stimuler la production des arbres. En outre, chez le manguiers, la taille peut être réalisée pour maintenir l'arbre en bon état

(**Connor et al., 2014 ; Normand et Lauri, 2018**) et réduire les variabilités de production intra et inter-arbre, la compétition entre les arbres et maintenir les dimensions de l'arbre adulte (**Crane et al., 2009**). L'usage de l'engrais sur les parcelles de manguiers serait dû à la culture d'autres spéculations dans les vergers nécessitant apport d'engrais au sol. Dans leur étude, **Ndiaye et al. (2020)** ont révélé que les plantations de manguiers bénéficient du fumier des bovins et du dépôt des résidus de récolte (fanés d'arachide). L'analyse des résultats montrent que 40,53 % des vergers de manguiers sont associés à des cultures annuelles. Ainsi, les cultures associées aux manguiers suivant l'ordre de prédominance sont le haricot, le maïs et l'arachide. Cette pratique de ces cultures dans les vergers pourrait générer des revenus substantiels aux producteurs durant la phase végétative du manguiers. Pour **Doreus (2012)**, en plus de régénérer des revenus aux producteurs, l'association du manguiers aux cultures annuelles favorise un contrôle indirect de l'enherbement pour le manguiers. Dans le même sens l'auteur souligne que ces cultures permettent de faire l'entretien. S'agissant de la perception des producteurs sur le désordre physiologique appelé « nez mou », la majorité (62,63 %) des producteurs interrogés ont une bonne connaissance du « nez mou » avec un score de 2. Cette situation pourrait être due au nombre d'année d'expérience de ces producteurs dans la production de la mangue. Le désordre physiologique est présent dans les vergers de 46 % des producteurs. Cela pourrait s'expliquer par les conditions écologiques de développement des manguiers. Dans le même sens, **Silué (2022)** affirme que les désordres physiologiques de la mangue surviennent lors de l'exposition du fruit à des conditions environnementales. Les résultats de l'étude ont montré qu'il n'existe aucun lien statistiquement significatif entre la manifestation du « nez mou » et les pratiques culturelles réalisées dans les vergers. La manifestation du désordre a été attribuée au sol par certains producteurs (32 %). Pour **Rey (2002)**, les bas-fonds argileux humides sont des zones propices où se développe le désordre physiologique. Les pertes financières totales à l'exportation engendrées par le désordre physiologique pour l'ensemble des stations enquêtées ont augmenté, passant de 34 428 000 FCFA en 2024 à 36 825 600 FCFA en 2025. Ce constat pourrait être dû au fait que dans les zones propices à la manifestation du nez mou, la collecte de mangues a été plus considérable en 2025 qu'en 2024. La plupart des producteurs (66 %) dont les plantations sont affectées n'utilisent aucune méthode de lutte pour éviter l'apparition du « nez mou ». Cet état de fait pourrait être lié à la méconnaissance réelle de l'origine du phénomène ou à la non vulgarisation d'une solution idoine par les structures d'encadrement agricole.

CONCLUSION

Les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude nous ont permis de constater que la culture de la mangue est pratiquée majoritairement par des personnes âgées dont l'âge moyen est de 49 ans ayant un niveau d'instruction analphabète. Les opérations culturelles que les producteurs réalisent couramment dans leur plantation sont le désherbage, le labour et la taille pour l'entretien de leur verger. Le haricot, le maïs et l'arachide sont les cultures les plus associées au manguiers. La majorité des producteurs interrogés ont une bonne connaissance du

désordre physiologique appelé « nez mou » avec une expérience dans la production de la mangue qui se situe entre 14 et 24 ans. Le désordre physiologique a affecté les mangues issues des vergers de 46 % des producteurs interrogés. Le sol, les termites, l'usage de l'engrais chimique, les légumineuses, la matière organique, le labour, les cochenilles farineuses, l'usage des produits phytosanitaires ou la morphologie de l'arbre sont à l'origine de l'apparition du désordre physiologique selon les producteurs enquêtés. Le « nez mou » cause d'énormes pertes financières. En effet, au cours des campagnes de mangues 2024 et 2025, pour l'exportation, une perte totale de 71 253 600 FCFA a été enregistrée. Face à la méconnaissance réelle de l'origine du problème, la majeure partie des producteurs affectés (66%) n'adoptent aucune méthode de lutte. Certains producteurs ne font pas de récoltes sur arbres atteints, évitent l'association culturale, font une cuvette autour de l'arbre et utilisent des produits biologiques. D'autres n'utilisent pas d'engrais dans leur verger. Les résultats issus de l'enquête inciteraient donc à mener des études fondamentales sur la manifestation du « nez mou ». Par ailleurs, Il faudrait caractériser une mangue atteinte du « nez mou » et analyser le sol afin déterminer l'origine de son apparition.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amin M., Jabbar A., Malik U. A. and Nawab U. (2007).** Mango soft nose disorder and fruit quality in relation to pre and postharvest treatments. LSII, Vol. 1, No.4. 455 -462p.
- APROMAB (2016).** Rapport de synthèse de l'atelier bilan national de la campagne mangue, 28p.
- Assis J. S., Silvai D. J. and Moraes P. L. D. (2004).** Equilibre nutritionnel et troubles physiologiques chez la mangue 'Tommy Atkins'. Rev. Bras. Fructic. Vol. 26 (2) : 326 – 329.
- COLEACP (2021).** Guide de production. Itinéraire technique de la mangue (*Mangifera Indica*). 6 p.
- Connor D. J., Gómez-del-Campo M., Rousseaux M. C. and Searles P. S. (2014).** Structure, management and productivity of hedgerow olive orchards. Scientia Horticulturae, 169 : 71-93.
- Coulibaly B. (2022).** Etude sur le financement agricole. Cas de la filière mangue en côte d'ivoire. Programme HortiFresh en Afrique de l'Ouest. 44 p.
- Crane J. H., Salazar-García S., Lin T. S., De Queiroz Pinto A. C. and Shū Z. H. (2009).** Crop production : Management. In : The Mango : botany, production and uses. 2nd edition, Litz R.E., Wallingford, Etats-Unis, pp 432-472.
- Djaha A. J-B., N'da H. A., Koffi K. E., Adopo A. A. and Ake S. (2014).** Diversité morphologique des accessions d'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) introduits en Côte d'Ivoire. Rev. Ivoir. Sci. Technol. 23 : 244-258.
- Doreus G. (2012).** Production et productivité du manguier en Haïti, étude de cas : Marigot, une petite région agricole du Sud-est. Mémoire de fin d'études : Centre d'Angers – Institut National d'Horticulture et de Paysage, (Haïti) 82p.
- Douan B. G. (2022).** Guide de production de la mangue en Côte d'Ivoire. Hortifresh, fruits Afrique de l'ouest et légumes. 5 p.
- INFOCOMM (2016).** Fonds de la CNUCED pour l'information sur les marchés des produits de base agricoles. New York et Genève, 23p.
- Inter-mangue (2024).** Organisation Interprofessionnelle Agricole (OIA) de la filière mangue en Côte d'Ivoire
- Kemayou M. F. C., Mbong A. G., Solefack M. C. M. and Kuete J. (2021).** Pratiques endogènes de la culture des mangues locales (*Mangifera indica* L., Anacardiaceae) dans les départements du Noum et de la Lékié au Cameroun. European Scientific Journal, ESJ, 17(29), 128.
- Koffi K. J. M. (2021).** Estimation de la maturité physiologique de la mangue et du rendement du verger de manguier (*Mangifera indica* L., variété 'Kent') au nord de la Côte d'Ivoire : vers la mise en place d'un modèle de prévision de récolte. Thèse de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 162 p.
- Kouame L. M'p., Kouame A. K., Ouattara L., N'Guessan F. K., Alloue – Boraud M. W. and Dje M. K. (2020).** Contraintes liées à la production et à la commercialisation des mangues (*Mangifera indica*) en Côte d'Ivoire : cas des variétés exportées vers l'Europe. Afrique Science 17(3) (2020) 16 - 27
- Léfevre J. C. (1968).** Fertilisation du manguier. Fruits vol. 23, N°5.
- Ndiaye O., Diatta U., Nibaly M., Djiba S., Badji K. and Ndiaye S. (2020).** Caractérisation des Vergers de Manguiers (*Mangifera indica* L.) en Basse Casamance, Sénégal. European Scientific Journal, April 2020, édition Vol.16, No.12, ISSN : 1857 -788.
- Normand F. and Lauri P.-É. (2018).** Advances in understanding mango tree growth and canopy development. In: Achieving sustainable cultivation of mangoes. Galán Saúco Victor et Ping Lu, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, Angleterre : 87-119.
- Pugnet V. (2018).** La mangue en Côte d'Ivoire. Fiche Pays Producteur. FruitTrop N° 225. 78 p.
- Rey J. Y. (2002).** La mangue d'exportation en Afrique de l'ouest. CNRA et CIRAD. Département des productions fruitières et horticoles. 4 p.
- Silué Y. (2022).** Amélioration de la conservation au frais des mangues variété « Kent » de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Avignon université (Avignon, France), Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 162 p.
- Torres A. C. and V. G. Saúco. (2004).** The study of the problem of mango (*Mangifera indica* L.). Internal breakdown. Act Hort. (ISHS) 625 : 167-174.
- Vannière H., Rey J., Vayssières J. and Maraite H. (2013).** PIP - Itinéraire technique mangue (*Mangifera indica*). Bruxelles : COLEACP. pp 87.
- Waïgalo A. K. d. A. (2023).** Inefficacité technique des producteurs de variétés améliorées de mangues de la région de Sikasso, Mali : analyse à partir de la fonction de production stochastique. Revue des Etudes Multidisciplinaires en Sciences Economiques et Sociales, REMSES, Vol 8, Num.3 (2023), 119 - 135.

Yéo N., Gragnon B. G. and Karamoko Y. (2020).
Hémoparasites chez les ruminants domestiques dans les
départements de Korhogo et Sinématiali en Côte d'Ivoire.

European Scientific Journal May 2020 edition Vol.16, No.15
ISSN: 1857 -7881 (Print) e - ISSN 1857 -7431. Doi:10.19044/
esj.2020.v16n15p183

Spatial heterogeneity and factors associated with bovine brucellosis in Benin: a national epidemiological analysis

Adeyemi Sharafa Dine DJIBRIL^{1,2*}, Fifa Théomaine Diane BOTHON^{2,3}, Charafou Deen Alexandre II Koladé Dotou TIDJANI⁴, Ayéko Dieu-donné DOSSOU⁵ Missimawu Akpédjé Raoul Baudouin AHOLOU⁶, Kadoeto Cyrille BOKO¹, Souaibou FAROUGOU¹, Gbétondjingninougbo Benoît KOUTINHOIN¹

Abstract

Bovine brucellosis remains insufficiently assessed in Benin. This study aims to estimate the seroprevalence of the disease, map its spatial distribution, and identify associated risk factors across all eight agro-ecological zones (AEZ). A multi-stage sampling design was conducted to include 520 cattle herds. Serum samples from breeding females were analyzed using an indirect ELISA. Individual apparent seroprevalence ranged from 2.7% to 13.8% depending on the zone. At the AEZ level, herd-level seroprevalence varied significantly from 38.46% in the south to 92.31% in the north ($p < 0.001$). Spatial autocorrelation analysis (Moran's $I = 0.38$, $p = 0.036$) and spatial scan statistics identified a highly significant cluster of infection in the northern and central AEZs. Risk factor profiles were explored using Correspondence Analysis, and their associations with herd seropositivity were quantified using ecological odds ratios (OR). The northern high-risk cluster was associated with a nearly sixfold increase in the odds of herd infection (OR = 5.96, 95% CI: 3.99–8.90). Significant ecological risk factors included the predominance of susceptible zebu breeds such as Goudali and White Fulani (OR = 3.89, 95% CI: 2.56–5.92), contact with wildlife near protected areas (OR = 2.37, 95% CI: 1.50–3.73), and cross-border transhumance (OR = 2.13, 95% CI: 1.36–3.33). Conversely, the use of hired professional labor emerged as a significant protective factor (OR = 0.37, 95% CI: 0.25–0.56). This study provides the first comprehensive national mapping of bovine brucellosis in Benin and highlights the urgent need for targeted, risk-based surveillance in pastoral systems.

Key words: Bovine brucellosis; spatial epidemiology; ecological odds ratio; pastoral systems; transhumance; Benin.

Résumé

La brucellose bovine reste insuffisamment évaluée au Bénin. Cette étude vise à estimer la séroprévalence de la maladie, cartographier sa distribution spatiale et identifier les facteurs de risque associés dans les huit zones agro-écologiques (ZAE) du pays. Un échantillonnage à plusieurs degrés a permis d'inclure 520 troupeaux bovins. Les sérums de femelles reproductrices ont été analysés par ELISA indirect. La séroprévalence apparente individuelle variait de 2,7 % à 13,8 % selon la zone. Au niveau des ZAE, la séroprévalence troupeau variait significativement de 38,46 % au sud à 92,31 % au nord ($p < 0,001$). L'analyse d'autocorrélation spatiale (I de Moran = 0,38, $p = 0,036$) et les statistiques de balayage spatial ont identifié un cluster d'infection hautement significatif dans les ZAE du nord et du centre. Les profils de facteurs de risque ont été explorés par Analyse Factorielle des Correspondances, et leurs associations avec la séropositivité des troupeaux ont été quantifiées par des odds ratios (OR) écologiques. Le cluster à haut risque du nord était associé à une multiplication par près de six du risque d'infection des troupeaux (OR = 5,96, IC 95 % : 3,99–8,90). Les facteurs de risque écologiques significatifs comprenaient la prédominance de races zébus sensibles comme le Goudali et le Peulh Blanc (OR = 3,89, IC 95 % : 2,56–5,92), le contact avec la faune sauvage près des aires protégées (OR = 2,37, IC 95 % : 1,50–3,73) et la transhumance transfrontalière (OR = 2,13, IC 95 % : 1,36–3,33). Inversement, le recours à une main-d'œuvre salariée s'est révélé être un facteur protecteur significatif (OR = 0,37, IC 95 % : 0,25–0,56). Cette étude fournit la première cartographie nationale exhaustive de la brucellose bovine au Bénin et souligne l'urgence d'une surveillance ciblée et basée sur les risques dans les systèmes pastoraux.

Mots clés : Brucellose bovine ; épidémiologie spatiale ; odds ratio écologique ; systèmes pastoraux ; transhumance ; Bénin.

¹Research Unit on Communicable Diseases, Polytechnic School of Abomey-Calavi, University of Abomey-Calavi, Cotonou, Benin

²Research Unit on Plant Extracts and Natural Flavors, Applied Chemistry Study and Research Laboratory, Polytechnic School of Abomey-Calavi, University of Abomey-Calavi, Cotonou, Benin

³Kaba Laboratory for Research in Chemistry and Applications; National Higher Institute of Industrial Technology, National University of Sciences,

Engineering Technologies and Mathematics, Benin

⁴Veterinary Laboratory of Bohicon, Ministry of Agriculture, Breeding et and Fishery, Benin

⁵National Center for Biological Products for Veterinary Use, Cotonou, Bénin

⁶Research Unit of Animal Husbandry and Meat Products Quality Control, Polytechnic School of Abomey-Calavi, Benin

*Corresponding author: djibrildine2004@gmail.com

1 Introduction

Bovine brucellosis, caused by *Brucella abortus*, is a major zoonotic disease responsible for significant morbidity across multiple animal species and represents a persistent public health burden in low- and middle-income countries (Ducrotoy et al., 2017; Horefti, 2023). In Benin, despite the recognized economic and veterinary importance of the disease, epidemiological data remain scarce and geographically fragmented. The only available national-level evidence

derives from two studies conducted in specific communes: Noudèkè et al. (2017) reported monthly fluctuations in individual seroprevalence, while Vikou et al. (2018) assessed concurrent bovine brucellosis and tuberculosis at slaughter. Both investigations were, however, limited in spatial scope and did not provide a nationally representative picture of disease distribution or associated risk factors.

This knowledge gap has become particularly critical in the context of the Sedentarization Project for Ruminant Herds in

Benin (ProSeR), a national initiative that seeks to intensify livestock production through the introduction of genetically improved cattle breeds. Any national genetic improvement strategy must be grounded in a rigorous sanitary baseline mapping of priority zoonoses, of which bovine brucellosis is foremost. Without comprehensive seroprevalence data at the national scale, it is impossible to adequately manage health risks associated with animal introductions, design appropriate prophylaxis protocols, or evaluate the effectiveness of planned zootechnical interventions.

This study was therefore designed to provide the first spatially comprehensive assessment of bovine brucellosis across all eight agro-ecological zones (AEZ) of Benin. Specifically, it seeks to (1) estimate the herd-level and individual-level seroprevalence of *Brucella* infection across the agro-ecological areas of Benin; (2) map the geographic distribution of bovine brucellosis and identify spatial clusters of elevated seroprevalence; and (3) identify and quantify risk factors associated with herd seropositivity across agroecological zones.

2 Methodology

2.1 Study area and design

A cross-sectional serological survey was conducted across all eight agro-ecological zones (AEZ) of Benin, where cattle farming systems are predominantly extensive, in accordance with the agroclimatic classification described by Dassou et al. (2015). This serological phase was preceded by a qualitative investigation into farmers' perceptions of bovine brucellosis (Djibril et al., 2024a), which informed the identification of at-risk herds.

2.2 Study population and strategy sampling

A three-stage sampling procedure was employed. The stage 1 relates to selection of reinforced pastoral camps. Within each AEZ, reinforced pastoral camps, defined as permanent or semi-permanent livestock encampments hosting multiple herds under shared grazing resources, were purposively selected based on criteria derived from the prior qualitative survey (Djibril et al., 2024). Camps were retained when farmers reported a history of reproductive disorders (abortions, retained placentas), which are clinical hallmarks of brucellosis. Three camps were selected per AEZ. The second stage concern the selection of herds within camps. Within each selected camp, herds were enrolled through systematic random sampling. A total of 520 herds were included, with 65 herds per AEZ (approximately 20 herds per camp). This fixed allocation ensured balanced representation across all AEZ, facilitating inter-zonal comparisons. The last stage 3 related to selection of animals within herds. Within each selected herd, blood samples were collected from breeding females (cows and heifers of reproductive age), which represent the primary target population for *Brucella* serodiagnosis. The number of animals sampled per herd was proportional to the herd size. On average, approximately 50% of breeding females per herd were sampled.

2.3 Data collection procedures

Prior to data collection, the objectives and procedures of the study were explained to each livestock owner. Following these explanations, farmers provided their informed oral consent. Local social services agents and state veterinarians, who maintain regular contact with these pastoral communities, supervised the ethical process and validated the consent obtained. Data were collected using the KoboCollect mobile application. Structured questionnaires gathered information on the socio-demographic characteristics of the farmers (age, sex, ethnicity, education, religion, marital status, household size) and on potential risk factors related to livestock management (cattle breed, herd size, grazing and transhumance practices, veterinary care access, breeding management, contact with wildlife, use of hired labor, and proximity to protected areas).

2.4 Collection of samples and analyses in the laboratory

Blood samples were collected by jugular venipuncture from selected cattle using 5 ml VACUTEST KIMA dry tubes. Tubes were labeled, kept upright, and transported to the laboratory under cold chain conditions (4–8 °C). After clotting, sera were separated by centrifugation and stored at -20 °C until analysis. Antibodies against *Brucella spp.* were detected using an indirect enzyme-linked immunosorbent assay (iELISA) kit (ID Screen® Brucellosis Serum Indirect Multi-species, Innovative Diagnostics, Grabels, France). The test was performed and interpreted according to the manufacturer's instructions. Internal quality control was ensured by verifying that all positive and negative control panel samples (provided by Innovative Diagnostics) yielded expected results in each plate run.

2.5 Data epidemiological and risk factor data

For each herd, several variables were recorded and considered as potential risk factors for bovine brucellosis. These variables included cattle breed composition, which was identified based on standard phenotypic criteria such as coat colour, horn shape, and body conformation. The main genetic types recorded were the Goudali zebu, White Fulani (Peulh blanc) zebu, Borgou, and crossbreds including White Fulani × Somba and White Fulani × Lagunaire. Herd size was also documented and categorized as either small (fewer than 20 head) or large (20 head or more). The study accounted for grazing and transhumance practices by classifying them into sedentary farming, local transhumance, or cross-border transhumance. Furthermore, access to veterinary care was evaluated based on the presence or absence of regular veterinary interventions. Breeding management practices were recorded as controlled, indicating the use of selected bulls or artificial insemination, or uncontrolled, characterized by free mating. The assessment also included wildlife contact, specifically noting the proximity of herds to protected areas, such as the W-Arly-Pendjari biosphere reserve, alongside any reported contact with wild ruminants. Socioeconomic and operational factors were documented as well, including the type of labor utilized (family or hired labor) and the extent of agricultural activities, particularly involvement in cotton

cultivation as a primary economic activity. Finally, the GPS coordinates for each sampling site were systematically recorded using KoboCollect.

2.6 Statistical and Geospatial Analysis

2.6.1 Statistical Analysis

Data were cleaned, coded, and organized in a Microsoft Excel database, then analyzed using R software version 4.1.1 (R Core Team, 2021). Herd-level seroprevalence was defined as the proportion of herds with at least one seropositive animal. Individual apparent prevalence was defined as the proportion of sampled animals testing seropositive within a given zone. Proportions were compared using the Chi-square test (χ^2) and pairwise two-proportion Z-tests (*prop.test*), with a significance threshold set at $\alpha = 0.05$. Confidence intervals (95% CI) for proportions were calculated using the Wald formula.

Correspondence Analysis (CA) was performed using the FactoMineR package to explore the multivariate structure of risk factor profiles across AEZs. This exploratory approach was specifically chosen because, in West African extensive pastoral systems, risk factors are strongly intercorrelated, for example, a given ethnic group typically rears a specific breed, practices a particular form of transhumance, and is associated with distinct veterinary care patterns. Under such collinearity, classical multivariable logistic regression may produce unstable coefficient estimates and fail to capture the synergistic risk profiles that characterize each zone (Greenacre, 2017). The CA thus served to identify coherent zone-risk factor clusters rather than to isolate individual variable effects.

Ecological Odds Ratios (OR) and 95% confidence intervals (CI) were subsequently calculated to quantify the strength of association between zone-level risk factor profiles and herd seropositivity. For each risk factor identified by the CA, AEZs were dichotomized into "exposed" zones (where the factor was characteristically present based on the CA classification) and "non-exposed" zones (all remaining AEZs). Herd-level outcomes (seropositive versus seronegative herds) were then cross-tabulated, and OR were computed as: $OR = (a \times d) / (b \times c)$, where a = seropositive herds in exposed zones, b = seronegative herds in exposed zones, c = seropositive herds in non-exposed zones, d = seronegative herds in non-exposed zones. The 95% CI was obtained using the Woolf logarithmic method: $95\% CI = \exp[\ln(OR) \pm 1.96 \times \sqrt{1/a + 1/b + 1/c + 1/d}]$. The Spearman rank correlation coefficient (ρ) was used to assess monotonic associations between zone-level risk factor prevalence and seroprevalence.

2.6.2 Geospatial Analysis

Geospatial analyses were conducted in R using the *sf* (Pebesma, 2018), *spdep* (Bivand & Wong, 2018), and *SpatialEpi* (Kim & Wakefield, 2018) packages. AEZ polygons were constructed by merging commune-level administrative boundaries (GADM v4.1) according to the national agro-ecological classification. Geometric validity was ensured using *st_make_valid*. Geographic centroids

were extracted using *st_centroid* and converted to kilometre-based planar coordinates (UTM zone 31N). Global spatial autocorrelation of AEZ-level seroprevalence was assessed using Moran's Index (I), with row-standardized queen-contiguity spatial weights. Local indicators of spatial association (LISA) were computed using *localmoran_perm* with 999 Monte Carlo permutations to generate empirical p-values for each AEZ. The Kulldorff spatial scan statistic (*kulldorff* function) was applied to identify the most likely geographic cluster of elevated seroprevalence, using a Poisson-based log-likelihood ratio (Kulldorff, 1997).

3 Result

3.1 Demographic profile of livestock owners

The Table 1 summarizes the socio-demographic characteristics of the 520 herd owners enrolled across the eight agro-ecological zones. Livestock ownership was overwhelmingly male (97-100%), with women representing marginal minorities only in AEZ 2, 3, and 5 ($p < 0.05$). Monogamy and polygamy were observed in roughly equal proportions (45% each). The majority of owners (80%) were of Fulani ethnicity, practiced Islam, and had received no formal education. On average, household size was 11 members (including five working-age individuals), owner age was 44 years, and livestock farming experience was 24 years. The Bariba and Dendi ethnic groups were present mainly in AEZ 2, 3, and 5, while the Somba were confined to AEZ 1 and 4 (Table 1).

Table 1 : Identification of herd owners participating in the serological study across various agroecological zones.

Variables		AEZ 1 (N=65)		AEZ 2 (N=65)		AEZ 3 (N=65)		AEZ 4 (N=65)		AEZ 5 (N=65)		AEZ 6 (N=65)		AEZ 7 (N=65)		AEZ 8 (N=65)	
		P	CI (%)	P	CI (%)	P	CI (%)	P	CI (%)	P	CI (%)	P	CI (%)	P	CI (%)	P	CI (%)
Sex	Male	100a	0.00	97a	0.0446	98a	0.04	100a	0.00	98.4a	0.03	a	0.00	100a	0.00	100a	0
	Female	0b	0.00	3b	0.0442	2b	0.04	0b	0.00	1.6b	0.03	0b	0.00	0b	0.00	0b	0
Marital status	Single	0c	0.00	10b	0.0772	17c	0.10	0c	0.00	20c	0.10	12c	0.08	21b	0.10	21b	3
	Monogamous	55.88a	0.13	49a	0.1275	43a	0.13	45b	0.13	36b	0.12	53a	0.13	63a	0.12	63a	0.1232
	Polygamous	44.12b	0.13	41a	0.1244	40b	0.12	55a	0.13	44a	0.13	35b	0.12	16c	0.09	16c	0.0927
		b	0.13	41a	0.1056	5	0.0527	93.5	0.10	100	0.00	0b	0.00	0b	0.00	0b	0
Education level	No schooling	88a	0.08	77a	0.1047	80a	0.10	a	0.06	80a	0.10	a	0.00	100a	0.00	100a	0
	Primary education	12b	0.08	23b	0.1047	20b	0.10	6.5b	0.06	20b	0.10	0b	0.00	0b	0.00	0b	0
Religion	Animism	0c	0.00	4.8b	0.0243	5b	0.05	2b	0.03	b	0.08	0c	0.00	11c	0.08	11c	0.0772
	Christianity	3b	0.04	1c	0.0243	8b	0.05	0c	0.00	1.6c	0.03	12b	0.08	26b	0.11	26b	0.1074
	Islam	97a	0.04	a	0.0568	90a	0.07	98a	0.03	87.5a	0.08	88a	0.08	63a	0.12	63a	0.11737
Ethnicity	Bariba	0c	0.00	13b	0.08114	b	0.10	0c	0.00	35b	0.12	0c	0.00	0b	0.00	0b	0
	Dendi	9b	0.07	5c	0.0521	11c	0.07	2b	0.03	10c	0.07	25b	0.10	0b	0.00	0b	0
	Peulh Somba	85a	0.08	82a	0.0913	66a	0.11	96a	0.05	55a	0.12	75a	0.10	100a	0.00	100a	0
		6b	0.06	0d	0	2b	0.03	0	0.00	0c	0.00	0b	0.00	0b	0.00	0b	0

Intra-class percentages that are followed by different letters are significantly different at the 5% threshold. AEZ : agro-ecological zone N : total sample size P : percentage CI : confidence interval

3.2 Seroprevalence of bovine brucellosis

Two complementary indicators of disease burden were computed (Tables 2). Herd-level seroprevalence the proportion of herds with at least one seropositive animal varied significantly across zones (χ^2 , $p < 0.001$). The highest rates were recorded in AEZ 4 (92.31%), AEZ 1 (89.23%), and AEZ 5 (86.15%), all of which were significantly higher than the remaining zones (Table 2). The lowest herd-level seroprevalence was observed in AEZ 7 (38.46%) and AEZ 3 (41.62%). Apparent within-herd prevalence, the proportion of individual animals testing seropositive, ranged from 2.7% (AEZ 7) to 13.8% (AEZ 4). Although inter-zonal differences did not reach statistical significance at the individual level, a north-south gradient was observed, with AEZ 4 (13.8%), AEZ 1 (12.48%), and AEZ 5 (12.48%) exhibiting the highest

individual seroprevalence (Table 2). The spatial distribution of bovine brucellosis seroprevalence is presented in Figure 1.

Table 2: Seroprevalence of bovine brucellosis according to agro-ecological zones and herds

AEZ	Individual-level prevalence				Herd-level prevalence			
	Herd size (total cows/herd)	Observed herd size	Prevalence (%)	CI (%)	Total herds	positive	Prevalences	CI (%)
1	28	3.49	12.48a	0.12	65	58	89.23a	0.08
2	71	7.89	11.11a	0.07	65	40	61.54b	0.12
3	30	1.38	4.6a	0.07	65	27	41.62d	0.11
4	13	1.79	13.8a	0.19	65	60	92.31a	0.06
5	13	1.62	12.48a	0.18	65	56	86.15a	0.08
6	13	1.01	7.8a	0.15	65	34	52.31bc	0.12
7	14	0.38	2.7a	0.08	65	25	38.46d	0.11
8	10	0.49	4.9a	0.13	65	28	43.08cd	0.12

Legend: AEZ: Agro-Ecological Zone
Significance threshold: ***
Significance threshold: $p < 0.001$ (χ^2). Values followed by different superscript letters differ significantly at the 5% level (pairwise Z-tests).

Seroprevalence and Risk Factors of Bovine Brucellosis in Benin
Spatial distribution across the Agro-Ecological Zones (AEZ 1–8)

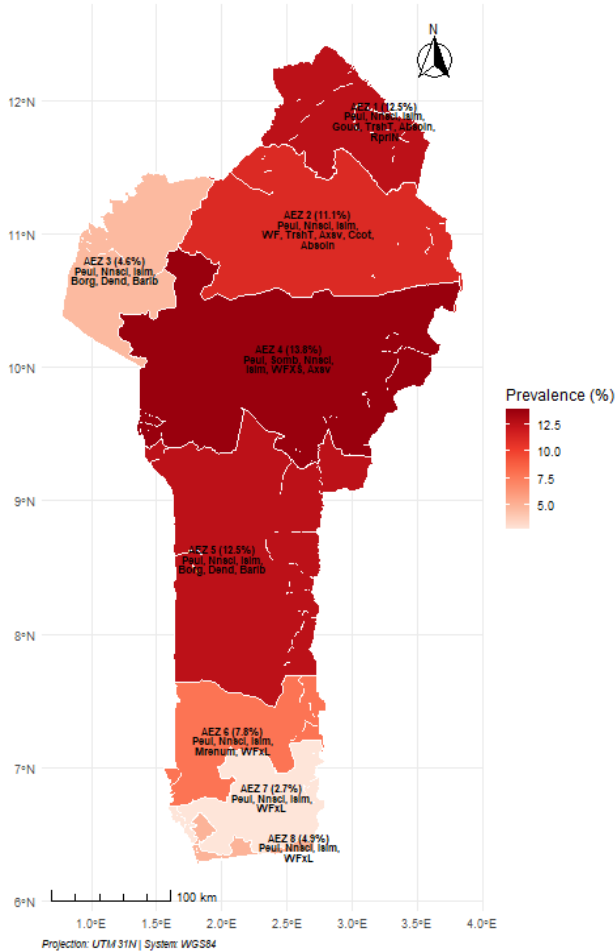


Figure 1. Spatial distribution of bovine brucellosis herd-level seroprevalence across the eight agro-ecological zones of Benin. Colour gradient indicates herd-level prevalence (%). Abbreviations within each zone refer to associated risk factors identified by Correspondence Analysis (see Section 3.4 and Table 4 for details). Projection: UTM 31N; Datum: WGS84.

3.3 Spatial autocorrelation and cluster identification

Global spatial autocorrelation analysis yielded a significantly positive Moran's I index ($I = 0.38$; $Z = 1.80$; $p = 0.036$). The observed index exceeded its theoretical expectation under the null hypothesis of spatial randomness ($E[I] = -0.14$) by more than 1.5 standard deviations, confirming that geographically proximate AEZs tend to exhibit similar seroprevalence profiles. This spatial clustering is consistent

with the epidemiology of bovine brucellosis in West African pastoral systems, where transhumance circuits, seasonal cattle congregation at shared water points, and cross-border trade create spatially correlated exposure conditions.

Local spatial analysis (LISA) classified the AEZs into four quadrants (Figure 2). AEZs 1, 2, 4, and 5 were consistently assigned to the **High-High** quadrant, indicating a coherent high-prevalence cluster in the northern and central regions. AEZs 6, 7, and 8 formed a **Low-Low** southern coldspot. AEZ 3, despite being geographically surrounded by high-prevalence zones, was classified in the **Low-High** quadrant, reflecting its relatively low seroprevalence.

The Kulldorff spatial scan statistic identified a single most likely cluster comprising **AEZ 2 and AEZ 4** in the north-central region (Figure 3).

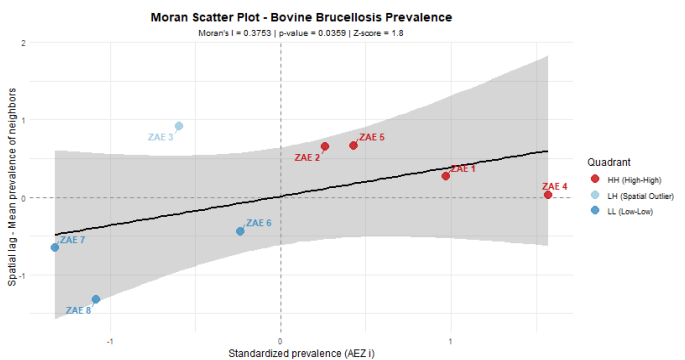


Figure 2. Moran scatter plot of AEZ-level bovine brucellosis seroprevalence. The x-axis represents standardized prevalence; the y-axis represents the spatially lagged prevalence (weighted mean of neighbors). The regression line slope corresponds to Moran's $I = 0.38$ ($p = 0.036$). Quadrant colours: red = High-High; blue = Low-Low; orange = High-Low; light blue = Low-High.

LISA Map - Spatial Clusters of Brucellosis in Benin
Moran's $I = 0.37536$ | $p = 0.0359$

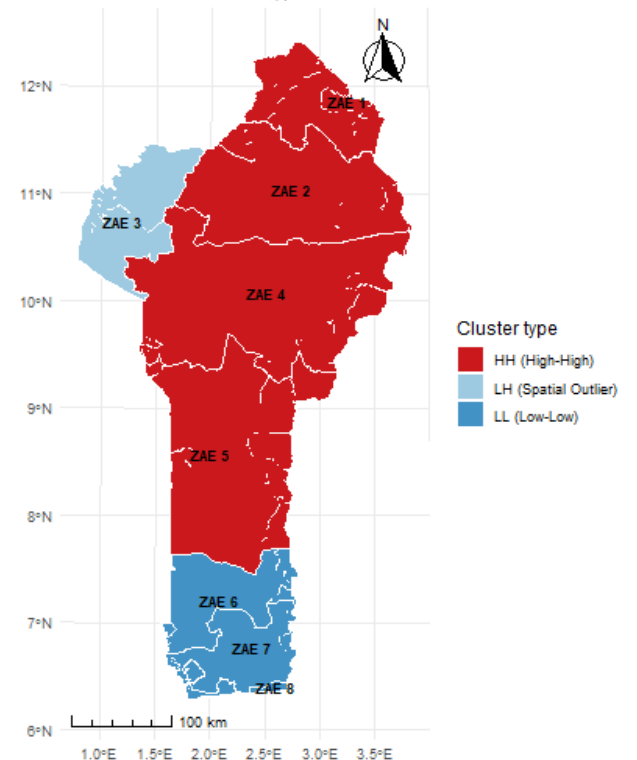


Figure 3. LISA cluster map showing the spatial classification of agro-ecological zones based on local Moran's I values. The primary Kulldorff cluster (AEZ 2 and AEZ 4) is delineated.

3.4 Risk factor profiles identified by Correspondence Analysis

Correspondence Analysis (CA) was performed to explore the multivariate structure of risk factor distribution across the eight AEZs. The first two factorial dimensions accounted for 58,61% of the total inertia. Four distinct zone–risk factor clusters were identified (Figure 4):

- **Group 1 (AEZ 1 and 2):** characterized by White Fulani and Goudali zebu breeds, cotton cultivation, cross-border transhumance, limited access to veterinary care, and unmanaged reproduction.
- **Group 2 (AEZ 3 and 5):** distinguished by a multi-ethnic herder population (Dendi, Bariba, Fulani), Borgou cattle, contact with wildlife, and absence of veterinary care.
- **Group 3 (AEZ 4):** defined by the Somba ethnic group, White Fulani × Somba crossbred cattle, proximity to wildlife, and uncontrolled breeding.
- **Group 4 (AEZ 6, 7 and 8):** marked by the use of hired (paid) labor and White Fulani × Lagunaire crossbred cattle.

Fulani ethnicity, lack of formal education, and Islamic religion were shared characteristics across nearly all zones and did not contribute to inter-zonal differentiation.

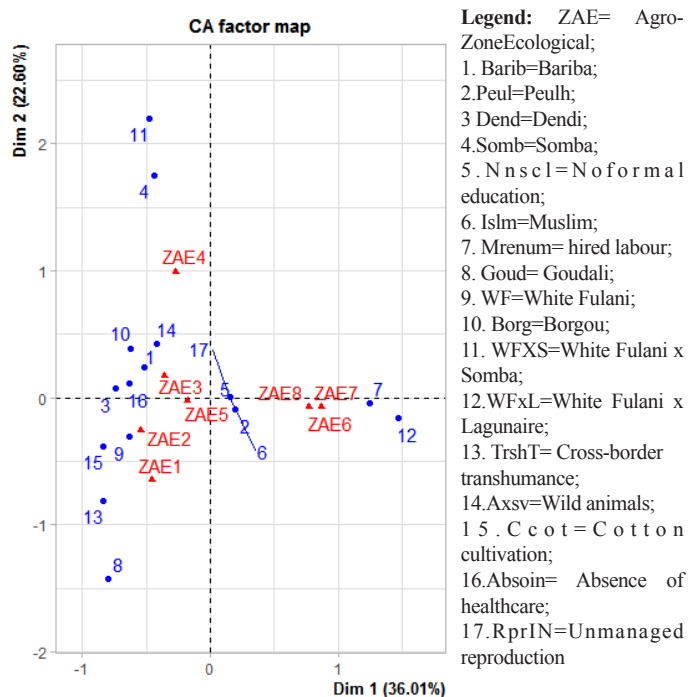


Figure 4. Correspondence Analysis (CA) biplot of risk factor profiles across agro-ecological zones of Benin. Points represent AEZs (triangles) and risk factor modalities (circles). Proximity on the plot indicates statistical association.

3.5 Quantification of risk factor associations

To complement the exploratory CA and quantify the strength of association between risk profiles and herd seropositivity, ecological odds ratios (OR) were computed by contrasting herds from exposed AEZs (where each factor was identified as characteristic by the CA) against herds from all remaining AEZs (Table 3).

Five of the seven ecological risk factors reached statistical significance. The most striking finding was the nearly sixfold increase in the odds of herd seropositivity for the northern high-risk cluster (AEZ 1, 2, 4, 5) compared with the southern zones (OR = 5.96; 95% CI: 3.99–8.90), corroborating the spatial clustering identified by the LISA and Kulldorff analyses.

Among individual risk factors, the predominance of susceptible zebu breeds (Goudali and White Fulani) was the strongest predictor (OR = 3.89; 95% CI: 2.56–5.92). Contact with wildlife near the W-Arly-Pendjari (WAP) biosphere reserve (OR = 2.37; 95% CI: 1.50–3.73) and cross-border transhumance in the far north (OR = 2.13; 95% CI: 1.36–3.33) both significantly increased herd-level infection risk. Cross-border transhumance was further corroborated by a significant Spearman correlation with AEZ-level mean seroprevalence ($\rho = 0.732$; $p = 0.039$).

Conversely, the use of hired labor emerged as a significant protective factor (OR = 0.37; 95% CI: 0.25–0.56), suggesting that professional herd management improves disease surveillance and reduces transmission risk.

Neither large herd size (OR = 1.07; 95% CI: 0.74–1.55) nor cotton cultivation (OR = 0.93; 95% CI: 0.54–1.58) reached significance at the ecological level, likely because their effects are confounded by other zone-specific management factors.

Table 3. Ecological odds ratios (OR) and 95% confidence intervals (CI) for risk factors associated with bovine brucellosis herd seropositivity (N = 520 herds).

Risk factor	Exposed AEZs	Exposed (+/-)	Non-exposed (+/-)	OR	95% CI	p
Northern high-risk cluster	1, 2, 4, 5	214 / 46	114 / 146	5.96	3.99 – 8.90	< 0.001
Goudali / White Fulani breeds	1, 2, 4	158 / 37	170 / 155	3.89	2.56 – 5.92	< 0.001
Wildlife contact (protected areas)	2, 4	100 / 30	228 / 162	2.37	1.50 – 3.73	< 0.001
Cross-border transhumance	1, 2	98 / 32	230 / 160	2.13	1.36 – 3.33	< 0.01
Hired labor (protective)	6, 7	59 / 71	269 / 121	0.37	0.25 – 0.56	< 0.001
Large herd size (mean > 20 head)	1, 2, 3	125 / 70	203 / 122	1.07	0.74 – 1.55	ns
Cotton cultivation	2	40 / 25	288 / 167	0.93	0.54 – 1.58	ns

(+) seropositive herds; (-) seronegative herds; ns: not significant. OR > 1 = risk factor; OR < 1 = protective factor.

4 Discussion

This study constitutes the first spatially comprehensive assessment of bovine brucellosis across all eight agro-ecological zones of Benin. The results reveal a marked spatial heterogeneity in herd-level seroprevalence, ranging from 38.46% (AEZ 7) to 92.31% (AEZ 4), with a clear north-south gradient confirmed by spatial autocorrelation (Moran's I = 0.38; $p = 0.036$). The ecological odds ratio analysis identified susceptible zebu breeds, wildlife contact, cross-border transhumance, and the absence of professional herd management as significant determinants of herd seropositivity. These findings are discussed below in light of regional and international evidence.

4.1 Spatial heterogeneity and the north-south gradient

The LISA analysis classified AEZs 1, 2, 4, and 5 as a coherent High-High spatial cluster, with a nearly sixfold increase in herd seropositivity compared with the southern zones (OR = 5.96;

95% CI: 3.99-8.90). This north-south gradient is consistent with patterns reported across West Africa. In Niger, Boukary et al. (2013) recorded herd-level seroprevalence of 46.8% in the Niamey peri-urban area and up to 62.5% in transhumant systems, both significantly higher than in sedentary southern herds. Similarly, Akinseye et al. (2016) documented in a systematic review of bovine brucellosis in Nigeria that prevalence was consistently higher in the northern pastoral states (13–20% individual-level) than in the southern humid zones (3-8%). In Ethiopia, Megersa et al. (2011) observed that pastoral areas in the lowlands exhibited significantly higher seroprevalence than mixed crop-livestock highland systems, a gradient attributed to herd mobility and intermingling.

Our findings extend this well-documented West African pattern to Benin, confirming that the northern pastoral corridor, where livestock mobility, porous borders, and limited veterinary infrastructure converge constitutes a persistent hotspot for *Brucella* transmission. The Kulldorff scan statistic specifically identified the AEZ 2- AEZ 4 dyad as the most likely cluster, an area that straddles the W-Arly-Pendjari biosphere reserve and multiple international borders.

4.2 Breed susceptibility as the primary individual risk factor

The predominance of Goudali and White Fulani zebu breeds was the strongest individual-level predictor of herd seropositivity (OR = 3.89; 95% CI: 2.56-5.92). This finding aligns with observations by Kassa (2017) and Assani et al. (2015), who reported greater susceptibility of these zebu types to brucellosis and pasteurellosis in northern Benin compared with local taurine breeds. The Borgou breed (AEZ 3), a stabilized taurine-zebu cross, has been described as inheriting complementary resistance traits from its taurine ancestry (Gbodjo et al., 2014; Koudandé et al., 2009). This may partly explain the significantly lower seroprevalence in AEZ 3 despite its geographic proximity to the high-prevalence cluster, a finding reflected in its Low-High LISA classification.

From a broader perspective, the enhanced susceptibility of *Bos indicus* (zebu) types to *Brucella abortus* relative to *Bos taurus* (taurine) breeds has been documented in several African contexts. In Nigeria, Cadmus et al. (2006) reported significantly higher seroprevalence in trade zebu cattle compared with indigenous taurine breeds. Ducrotoy et al. (2017) emphasized that breed susceptibility, combined with management practices, is a key driver of heterogeneous brucellosis distribution across sub-Saharan Africa. This finding has direct implications for the ProSeR initiative in Benin: any programme introducing improved zebu genetics into southern zones must incorporate systematic pre-movement screening and post-introduction surveillance to prevent the southward expansion of brucellosis.

4.3 Cross-border transhumance and wildlife interfaces

Cross-border transhumance, characteristic of AEZs 1 and 2 along the Benin–Niger border, doubled the odds of herd infection (OR = 2.13; 95% CI: 1.36–3.33) and was significantly correlated with AEZ-level seroprevalence

(Spearman $\rho = 0.732$; $p = 0.039$). Transhumant herds are exposed to multiple risk pathways: mixing with animals of unknown sanitary status at shared water points and pastures, contact with herds from neighbouring countries where brucellosis is endemic, and prolonged absence from veterinary services (Assani et al., 2015; Lesse et al., 2015). Comparable findings have been reported in Niger by Boukary et al. (2013), who identified transhumance as the primary risk factor for *Brucella* seropositivity, and in Mali by Sanogo et al. (2012), where nomadic herds showed two to threefold higher seroprevalence than sedentary ones.

Contact with wildlife, assessed through proximity to the WAP biosphere reserve (AEZs 2 and 4), was also significantly associated with herd seropositivity (OR = 2.37; 95% CI: 1.50–3.73). Wildlife–livestock interfaces are increasingly recognized as maintenance reservoirs for *Brucella spp.* in sub-Saharan Africa. Godfroid et al. (2011) demonstrated that African buffalo (*Syncerus caffer*) and other wild ungulates can harbour *Brucella abortus* and serve as spillback sources to domestic cattle. In East Africa, Muendo et al. (2012) reported significantly higher brucellosis seroprevalence in cattle herds adjacent to wildlife conservancies in Kenya. The WAP complex, one of the largest protected area networks in West Africa, supports substantial populations of buffalo, hippopotamus, and wild bovids, all of which represent potential reservoirs. Despite legal restrictions, transhumant herders continue to access peripheral zones of the reserve (Lesse et al., 2015), creating persistent wildlife–livestock contact.

4.4 Protective role of professional herd management

The use of hired (paid) labor for herd management, predominantly observed in the southern AEZs (6 and 7), emerged as a significant protective factor (OR = 0.37; 95% CI: 0.25–0.56). This result suggests that the professionalization of daily herd supervision, through dedicated workers who ensure regular monitoring, prompt removal of aborted material, and timely veterinary consultations, effectively reduces transmission risk. Kassa et al. (2016) noted that hired herders in the Borgou region were more consistently present during calving periods and more likely to implement basic sanitary measures than family members juggling multiple activities. Similarly, Houndékon and Ahossin (2024) observed that the division of labor in Beninese agricultural enterprises, including livestock operations, was positively associated with productivity and health outcomes.

This finding contrasts with the situation in AEZs 1 and 2, where cotton cultivation competes for farmers' attention and labor allocation. Katè et al. (2015) documented that in the Banikoara area (AEZ 2), herders who prioritize cotton farming frequently neglect livestock monitoring during the growing season, a period that coincides with peak calving and maximum brucellosis transmission risk. The non-significance of cotton cultivation as an independent ecological risk factor (OR = 0.93; 95% CI: 0.54–1.58) in our analysis suggests that its effect is mediated through reduced herd supervision rather than acting as a direct pathway.

4.5 Implications for brucellosis control under a One Health framework

From a One Health perspective, the spatial clustering of bovine brucellosis in northern Benin has direct consequences for public health. Brucellosis is a priority zoonosis whose control depends on the active participation and behavioural change of livestock keepers (Zinsstag et al., 2012). Our data indicate that the populations most at risk, Fulani herders managing large zebu herds through cross-border transhumance, are also those with the least access to formal education and veterinary extension services. Dean et al. (2012), in a systematic review of human and animal brucellosis in sub-Saharan Africa, emphasized that effective control requires coordinated surveillance at the human-animal-environment interface, particularly in pastoral settings where exposure pathways are continuous and informal.

The identification of a primary Kulldorff cluster in AEZs 2 and 4 provides a precise geographic target for priority intervention. Ring vaccination strategies, systematic screening of transhumant herds at border checkpoints, and community-based education programmes, delivered through culturally appropriate channels, including Qur'anic schools and local pastoral organizations, represent actionable first steps. Additionally, the protective effect of hired labor (OR = 0.37) suggests that investments in professional herder training programmes may yield measurable reductions in seroprevalence.

5 Conclusion

This study provides the first comprehensive national mapping of bovine brucellosis seroprevalence across all eight agro-ecological zones of Benin. Herd-level seroprevalence ranged from 38% to 92%, with a statistically significant spatial cluster in the northern and central zones (OR = 5.96; 95% CI: 3.99–8.90). The predominance of susceptible zebu breeds (OR = 3.89), wildlife contact near the WAP reserve (OR = 2.37), and cross-border transhumance (OR = 2.13) were identified as significant risk factors, while the use of hired labor acted as a strong protective factor (OR = 0.37). These findings provide a solid evidence base for prioritizing geographically targeted surveillance and control measures in AEZs 1, 2, 4, and 5, and for integrating brucellosis risk assessment into national livestock improvement programmes such as ProSeR.

6 Study limitations

This study has limitations that should be considered when interpreting the results. First, the purposive selection of pastoral camps, chosen based on histories of reproductive disorders, means the study population represents an at-risk sub-population rather than a random sample of all Beninese cattle herds. Consequently, the reported seroprevalence may overestimate the national baseline. Second, the indirect ELISA, while sensitive, may yield false-positive results due to cross-reactivity with antibodies against other Gram-negative bacteria, particularly *Yersinia enterocolitica* O:9 (OIE, 2021). Confirmatory testing using the Rose Bengal test or complement fixation was not performed, which may have led to an overestimation of prevalence. Third, the ecological

design of the risk factor analysis, whereby exposure was defined at the zone level rather than at the individual herd level, limits causal inference and may mask within-zone heterogeneity. Finally, unmeasured variables such as herd density, vaccination history, and the timing of transhumance relative to sampling may have residually confounded the associations.

7 References

- Abdoul'ganyi, B. A., Cyriaque, A. A., Sanni, I. M., & Michel, B. (2020). Impacts of conventional cotton production on water quality in the Alibori watershed in Benin. *European Scientific Journal*, 16(6), 155–170.
- Akinseye, V. O., Adesokan, H. K., Ogugua, A. J., Adediran, E. A., Otu, P. I., Kwaghe, A. V., & Cadmus, S. I. B. (2016). Sero-epidemiological survey and risk factors associated with bovine brucellosis among slaughtered cattle in Nigeria. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 83(1), a1002. <https://doi.org/10.4102/ojvr.v83i1.1002>
- Alton, G. G., Jones, L. M., Angus, R. D., & Verger, J. M. (1988). *Techniques for the brucellosis laboratory*. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Aplogan, H. M. (2013). State of animal genetic resources in Benin: Application to bovine breeds. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants*, 13, 227–230.
- Assani, S. A., Assogba, B., Toukourou, Y., & Alkoiret, I. T. (2015). Productivity of Gudali cattle farms located in the communes of Malanville and Karimama, extreme north of Benin. *Livestock Research for Rural Development*, 27(7), Article 131.
- Bivand, R., & Wong, D. W. S. (2018). Comparing implementations of global and local indicators of spatial association. *TEST*, 27(3), 716–748. <https://doi.org/10.1007/s11749-018-0601-9>
- Boukary, A. R., Saegerman, C., Abatih, E., Thys, E., Hassane, I., Badamassi, H., & Kulo, A. E. (2013). Seroprevalence and potential risk factors for *Brucella* spp. infection in traditional cattle, sheep and goats reared in urban, peri-urban and rural areas of Niger. *PLoS ONE*, 8(12), e83175. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083175>
- Cadmus, S. I. B., Ijagbone, I. F., Oputa, H. E., Adesokan, H. K., & Stack, J. A. (2006). Serological survey of brucellosis in livestock animals and workers in Ibadan, Nigeria. *African Journal of Biomedical Research*, 9(3), 163–168.
- Cannon, R. M., & Roe, R. T. (1982). *Livestock disease surveys: A field manual for veterinarians*. Australian Government Publishing Service.
- Chabi Toko, R. (2016). *The role of cattle farming in the rural economy of the Fulani people of Northern Benin* [Doctoral thesis, University of Liège-Gembloux]. University of Liège Institutional Repository.

- Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics* (3rd ed.). Wiley.
- Dassou, H. G., Yedomonhan, H., Adomou, A. C., Ogn, C. A., Tossou, M. G., & Akoegninou, A. (2015). Facteurs socioculturels et environnementaux déterminant la connaissance ethnovétérinaire au Bénin. *Afrique Science*, 11(5), 335–360.
- Dean, A. S., Crump, L., Greter, H., Schelling, E., & Zinsstag, J. (2012). Global burden of human brucellosis: A systematic review of disease frequency. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 6(10), e1865. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0001865>
- Djibril, A. S. D., Bothon, F. T. D., Boko, K. C., Koutinhoun, B. G., & Farougou, S. (2024). Farmers' perceptions of bovine brucellosis in Benin. *Veterinary World*, 17(2), 434–443. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.434-443>
- Ducrottoy, M. J., Bertu, W. J., Matope, G., Bhatt, P., Ocholi, R. A., Musa Abubakar, U., Werre, S. R., Abdulkadri, A., & Bryssinckx, W. (2017). Brucellosis in sub-Saharan Africa: Current challenges for management, diagnosis and control. *Acta Tropica*, 165, 179–193. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2015.10.011>
- Dunnington, D. (2023). *ggspatial: Spatial data framework for ggplot2* (R package version 1.1.9). <https://CRAN.R-project.org/package=ggspatial>
- Fisher, R. A. (1922). On the interpretation of χ^2 from contingency tables, and the calculation of P. *Journal of the Royal Statistical Society*, 85(1), 87–94. <https://doi.org/10.2307/2340521>
- GADM. (2024). *Global administrative areas database* (Version 4.1). University of California, Davis. <https://gadm.org>
- Gbodjo, Z. L., Sokouri, D. P., Bi, S. G., N'Goran, K. E., Fofana, I. J., Soro, B., & N'Guetta, A. S. P. (2014). Potentialities of dairy production of local cattle raised in rural environments in northern Ivory Coast. *Global Journal of Animal Scientific Research*, 2(3), 260–269.
- Godfroid, J., Scholz, H. C., Barbier, T., Nicolas, C., Wattiau, P., Fretin, D., Whatmore, A. M., Cloeckert, A., Blasco, J. M., Moriyón, I., Saegerman, C., Muma, J. B., Al Dahouk, S., Neubauer, H., & Letesson, J.-J. (2011). Brucellosis at the animal/ecosystem/human interface at the beginning of the 21st century. *Preventive Veterinary Medicine*, 102(2), 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2011.04.007>
- Greenacre, M. (2017). *Correspondence analysis in practice* (3rd ed.). CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781315369983>
- Hijmans, R. J., Ghosh, A., & Mandel, A. (2024). *geodata: Download geographic data* (R package version 0.5-9). <https://CRAN.R-project.org/package=geodata>
- Horefti, E. (2023). The importance of the One Health concept in combating zoonoses. *Pathogens*, 12(8), 977. <https://doi.org/10.3390/pathogens12080977>
- Houndékon, R. D. W., & Ahossin, E. F. M. (2024). The organisation of work within agricultural enterprises in Benin. *International Journal of Management Sciences*, 7(3), 45–58.
- Kaboré, I., Bance, V., Ouedraogo, O., & Oueda, A. (2023). Use of macroinvertebrates for characterizing the biological health status of reservoirs in Burkina Faso (West Africa). *International Journal of Development Research*, 13(08), 63305–63310.
- Kassa, S. K. (2017). *Evaluation of non-genetic factors influencing milk production and genetic characterization of cattle breeds raised in Benin* [Doctoral thesis, University of Abomey-Calavi]. Doctoral School of Life and Earth Sciences.
- Kassa, S. K., Salifou, C. F. A., Dayo, G.-K., Ahounou, S., Dotché, O. I., Issifou, T. M., Koutinhoun, B., Mensah, A. G., Yapi-Gnaoré, V., & Youssao, A. K. I. (2016). Influence of farming system and grazing time on milk production in Borgou cows in Benin. *Tropicicultura*, 34(4), 385–395.
- Katè, S., Amagnidé, A., Hounmenou, C. G., Hounkaptin, E. L. B., & Sinsin, B. (2015). Climate change and pastoral resource management in the agro-pastoral zone of northern Benin: The case of the commune of Banikoara. *Afrique Science*, 11(4), 201–215.
- Kévin, K. S., Charles, D. G. K., Valentine, Y. G., Souleymane, S., Maurice, K., & Issaka, Y. A. K. (2019). Genetic diversity of Benin cattle populations using microsatellite markers. *International Journal of Animal Science and Technology*, 3(1), 7–19. <https://doi.org/10.11648/j.ijast.20190301.12>
- Kim, A. Y., & Wakefield, J. (2018). *SpatialEpi: Methods and data for spatial epidemiology* (R package version 1.2.3). <https://CRAN.R-project.org/package=SpatialEpi>
- Koudandé, O. D., Dossou-Gbété, G., Mujibi, F., Kibogo, H., Mburu, D., Mensah, G. A., Hanotte, O., & Van Arendonk, J. A. M. (2009). Genetic diversity and zebu gene introgression in cattle populations along the coastal region of the Bight of Benin. *Animal Genetic Resources*, 44, 45–55. <https://doi.org/10.1017/S1014233909000061>
- Kulldorff, M. (1997). A spatial scan statistic. *Communications in Statistics — Theory and Methods*, 26(6), 1481–1496. <https://doi.org/10.1080/03610929708831995>
- Kulldorff, M., & Nagarwalla, N. (1995). Spatial disease clusters: Detection and inference. *Statistics in Medicine*, 14(8), 799–810. <https://doi.org/10.1002/sim.4780140809>
- Lawali, D., Zomadi, A., Kpéra, B., Koné, M., Fana, S., Kassa, K., Gandaho, A., & Bodé, T. (2020). *Integrated cross-border development plan (SATI): Dendi-Ganda area*. Dosso Regional Council / West African Economic and Monetary Union.
- Lesse, P., Houinato, M. R., Djenontin, J., Dossa, H., Yabi, B., Toko, I., & Sinsin, B. (2015). Transhumance in the Republic of Benin: Current situation and constraints. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(5), 2668–2681. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i5.31>
- MAEP. (2020). *Developments in agricultural systems in Benin: Activity report*. Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche.
- MAEP. (2021). *Rapport de performance du secteur agricole, gestion 2020*. Ministère de l'Agriculture, de

l'Élevage et de la Pêche.

Megersa, B., Biffa, D., Niguse, F., Rufael, T., Asmare, K., & Skjerve, E. (2011). Cattle brucellosis in traditional livestock husbandry practice in southern and eastern Ethiopia, and its zoonotic implication. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 53(1), 24. <https://doi.org/10.1186/1751-0147-53-24>

Moutou, F. (2020). *Zoonoses, between humans and animals*. Le Pommier.

Muendo, E. N., Mbatha, P. M., Macharia, J., Murithi, R. M., Otieno, F. T., Wandera, E. A., & Muigai, A. W. T. (2012). Infection of cattle in Kenya with *Brucella abortus* biovar 3 and *Brucella melitensis* biovar 1 genotypes. *Tropical Animal Health and Production*, 44(1), 17–20. <https://doi.org/10.1007/s11250-011-9871-3>

Noudèkè, N., Aplogan, L. G., Dossa, F., Youssao Abdou Karim, I., & Farougou, S. (2017). Monthly variations in the prevalence of bovine brucellosis in Benin. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 5(1), 23–29. <https://doi.org/10.14737/journal.aavs/2017/5.1.23.29>

OIE [WOAH] (World Organisation for Animal Health). (2021). Brucellosis (*Brucella abortus*, *B. melitensis* and *B. suis*) (Chapter 3.1.4). In *Manual of diagnostic tests and vaccines for terrestrial animals*. WOAH. <https://www.woah.org>

Pebesma, E. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *The R Journal*, 10(1), 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>

R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.1.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Sanogo, M., Cissé, B., Babana, A. H., Bamba, S., Sidibé, S., Diallo, A., & Koné, Y. (2012). Prévalence sérologique de la brucellose bovine dans les élevages traditionnels au Mali. *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 65(1–2), 35–39. <https://doi.org/10.19182/remvt.10133>

Slowikowski, K. (2023). *ggrepel: Automatically position*

non-overlapping text labels with ggplot2 (R package version 0.9.3). <https://CRAN.R-project.org/package=ggrepel>

Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>

Thrusfield, M. (2018). *Veterinary epidemiology* (4th ed.). Wiley-Blackwell.

Vayssières, J., Stark, F. S., Blanfort, V., Chapuis, R. P., & Vigne, M. (2022). The search for efficiency in livestock farming and sustainable development of territories. In *Grazing livestock and sustainable development of Mediterranean and tropical territories: Recent knowledge on their strengths and weaknesses* (pp. 82–139). CIRAD/INRAE.

Vikou, R., Aplogan, L. G., Ahanhanzo, C., Baba-Moussa, L., & Gbangboche, A. B. (2018). Prevalence of brucellosis and tuberculosis in cattle in Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(1), 120–128. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.10>

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>

Wickham, H., & Bryan, J. (2023). *readxl: Read Excel files* (R package version 1.4.3). <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>

Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023). *dplyr: A grammar of data manipulation* (R package version 1.1.3). <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

Wickham, H. (2022). *stringr: Simple, consistent wrappers for common string operations* (R package version 1.5.0). <https://CRAN.R-project.org/package=stringr>

Zinsstag, J., Schelling, E., Roth, F., Bonfoh, B., de Savigny, D., & Tanner, M. (2012). Human benefits of animal interventions for zoonosis control. *Emerging Infectious Diseases*, 13(4), 527–531. <https://doi.org/10.3201/eid1304.060381>

