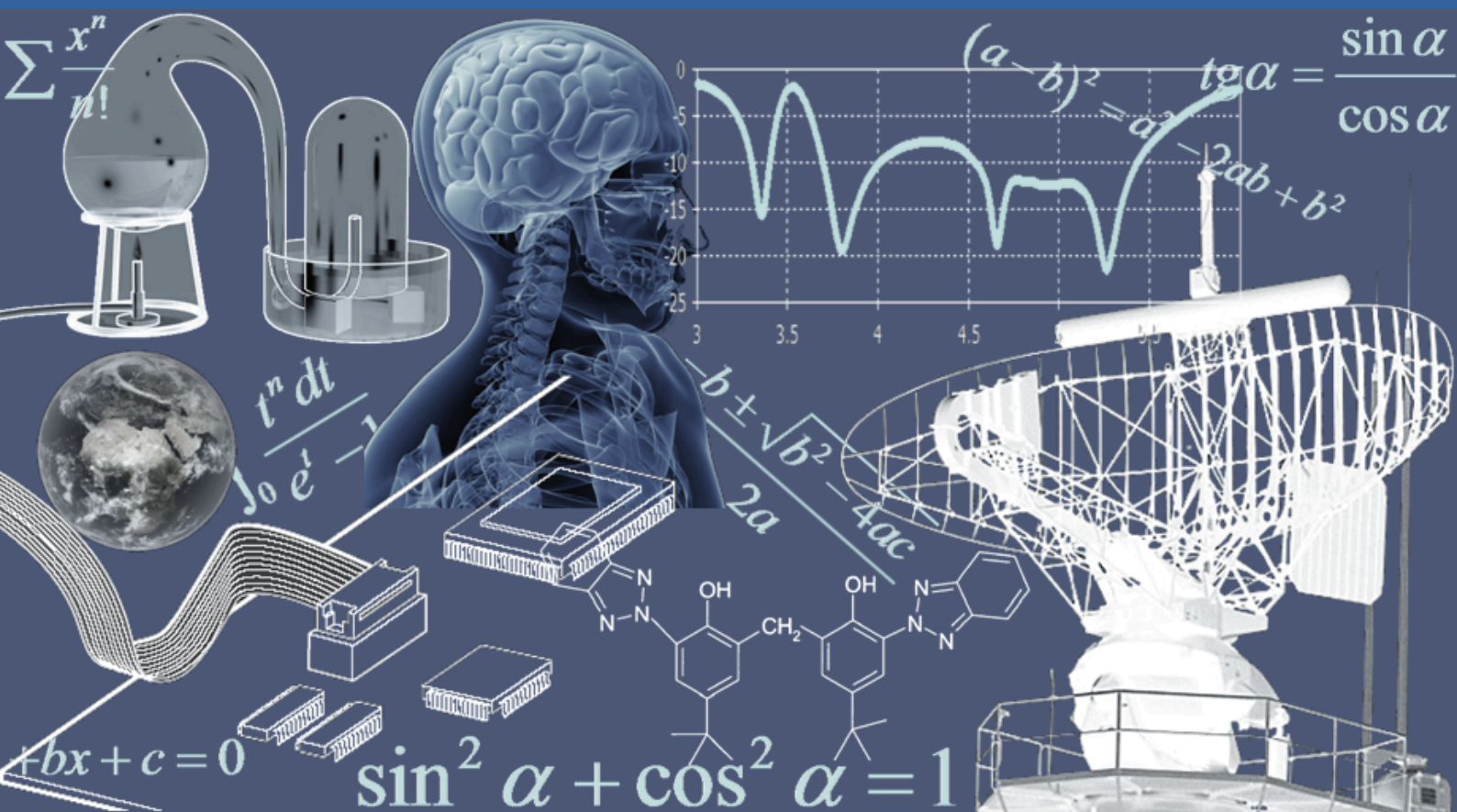


INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION AND APPLIED STUDIES

Vol. 47 N. 1 November 2025



International Peer Reviewed Monthly Journal



International Journal of Innovation and Applied Studies

International Journal of Innovation and Applied Studies (ISSN: 2028-9324) is a peer reviewed multidisciplinary international journal publishing original and high-quality articles covering a wide range of topics in engineering, science and technology. IJIAS is an open access journal that publishes papers submitted in English, French and Spanish. The journal aims to give its contribution for enhancement of research studies and be a recognized forum attracting authors and audiences from both the academic and industrial communities interested in state-of-the art research activities in innovation and applied science areas, which cover topics including (but not limited to):

Agricultural and Biological Sciences, Arts and Humanities, Biochemistry, Genetics and Molecular Biology, Business, Management and Accounting, Chemical Engineering, Chemistry, Computer Science, Decision Sciences, Dentistry, Earth and Planetary Sciences, Economics, Econometrics and Finance, Energy, Engineering, Environmental Science, Health Professions, Immunology and Microbiology, Materials Science, Mathematics, Medicine, Neuroscience, Nursing, Pharmacology, Toxicology and Pharmaceuticals, Physics and Astronomy, Psychology, Social Sciences, Veterinary.

IJIAS hopes that Researchers, Graduate students, Developers, Professionals and others would make use of this journal publication for the development of innovation and scientific research. Contributions should not have been previously published nor be currently under consideration for publication elsewhere. All research articles, review articles, short communications and technical notes are pre-reviewed by the editor, and if appropriate, sent for blind peer review.

Accepted papers are available freely with online full-text content upon receiving the final versions, and will be indexed at major academic databases.

Editorial Advisory Board

Amir Samimi, Ph.D. of Science in Chemical engineering, Process Engineer & Risk Specialist of Oil and Gas Refinery Company, Iran
Mahsa Ja'fari, Department of Chemical Engineering, Abadan Faculty of Petroleum, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran
Alin Velea, Paul Scherrer Institute, Switzerland
Kamyar Hasanzadeh, Aalto University, Finland
Ogbonnaya N. Chidibere, University of East Anglia, United Kingdom
Oumair Naseer, University of Warwick, United Kingdom
Wei Zheng, University of Texas Health Science Center at San Antonio, USA
Hu Zhao, University of Southern California, USA
Haijian Shi, Kal Krishnan Consulting Services, Inc, USA
Syed Ainul Abideen, University of Bergen, Norway
Malika Maataoui, Mohammed V University, Morocco
Fabio De Felice, University of Cassino and Southern Lazio, Italy
Giovanni Leonardi, Mediterranea University of Reggio Calabria, Italy
Siham El Gouzi, Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Spain
Mohamed KOSSAÏ, European Business School EBS Paris, France
Mustafa Batuhan AYHAN, Marmara University, Turkey
Andrzej Klimczuk, Warsaw School of Economics, Poland
Corinthias P. M. Sianipar, Tokyo University of Science, Japan
Irfan Jamil, Sinohydro Engineering, China
Sukumar Senthilkumar, Chonbuk National University, South Korea
Bratu (Simionescu) Mihaela, Bucharest University of Economic Studies, Romania
Mirela Maria Codescu, National Institute for R&D in Electrical Engineering ICPE-CA, Romania
Milen Zamfirov, St. Kliment Ohridski Sofia University, Bulgaria
Svetoslava Saeva, Neofit Rilski South-West University, Bulgaria
Dimitris Kavroudakis, University of the Aegean, Greece
Vaitsa Giannouli, Aristotle University of Thessaloniki, Greece
Nataša Pomazalová, Mendel University in Brno, Czech Republic
Hazem M. Shaheen, Damanhour University, Egypt
Shalini Jain, Manipal University Jaipur, India
Amin Jula, National University of Malaysia, Malaysia
Mahdi Moharrampour, Islamic Azad University, Buin zahra Branch, Iran
Ricardo Rodriguez, Technological University of Ciudad Juarez, Mexico
Yuniel E. Proenza Arias, Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba
Elizabeth Bissell Miller, University of Missouri, Columbia
Bertin Désiré SOH FOTSING, University of Dschang, Cameroon
Antonella Petrillo, University of Cassino and Southern Lazio, Italy
Hong Zhao, The Pennsylvania State University, USA
Jianjun Chen, The University of Chicago, USA
Shaju George, Royal University for Women, Kingdom of Bahrain
Chandrasekaran Subramaniam, Kumaraguru College of Technology, India
Ilango Velchamy, New Horizon College of Engineering, India
M. Kumaresan, M.P.N.M.J. Engineering College, India
Mohammad Valipour, University of Tehran, Iran
Mohameden Sidi El Vally, King Khalid University, KSA
Mona Hedayat, Boston Children's Hospital, Harvard Medical School, USA
Suresh Kumar Alla, Advanced Medical Technologies, BD Technologies, USA
Ahmed Hashim Mohaisen Al-Yasari, Babylon University, Iraq
Aziz Ibrahim Abdulla, Tikrit University, Iraq
Khalid Mohammed Shaheen, Technical College of Mosul, Iraq
Baskaran Kasi, Kuala Lumpur Infrastructure University College, Malaysia
Nurul Fadly Habidin, Universiti Pendidikan Sultan Idris, Malaysia
Adnan Riaz, Allama Iqbal Open University, Pakistan
Syed Noor Ul Abideen, KPK Agricultural University, Pakistan
Arab Karim, M'Hammed Bougara University of Boumerdes, Algeria
Zoubir Dahmani, UMAB University of Mostaganem, Algeria
Mohsen Brahmi, Sfax University, Tunisia
Mongi Besbes, University of Carthage, Tunisia
Mai S. Mabrouk, Misr University for Science and Technology, Egypt
Olfat A Diab Kandil, Misr University for Science and Technology, Egypt

Munir Ahmed G. Timol, Veer Narmad South Gujarat University, India
Saravanan Vasudevan, Arunai Engineering College, India

Table of Contents

Pétrologie des formations birimiennes de zaakro: Implication géodynamique de la partie sud du sillon volcanosédimentaire de Toumodi-Fètèkro (Dorsale Man-Léo, Côte d'Ivoire)	1-16
<i><u>Kouassi Brice Roland, Kouadio David Koffi, and Gnagnon Raymond Stephane Koffi</u></i>	
Energy Efficiency of Network Equipment: Best Hybrid Strategies	17-23
<i><u>Lagasane Ouattara Kra, Tahi Narcisse, Losseni Kone, and Olivier Asseu</u></i>	
Advancing French-Fon Neural Translation System through Cross-Linguistic Transfer and Continuous Improvement	24-30
<i><u>Béthel C. A. R. K. Atohoun, Jean-Paul Tognon, and Mikael A. Mousse</u></i>	
Le bar: Un prétexte d'une esthétique exutoire dans l'écriture de Tierno Monénembo	31-39
<i><u>Yao Dicy Gnengba and Baquissoga Satra</u></i>	
Interannual variability of intra-seasonal rainfall descriptors and drawbacks on the spatio-temporal dynamics of <i>Helicoverpa armigera</i> and <i>Jacobiella facialis</i> infestations on cotton in Côte d'Ivoire	40-49
<i><u>Sekpa Charles DEKOULA, Malanno KOUAKOU, Pitou Woklin Euloge Koné, Gouzou Juste Roland DIDI, Guy Fernand YAO, Kouame Brou, and Ochou Germain OCHOU</u></i>	
Mosquito species composition and distribution dynamics in Kalehe Territory, Democratic Republic of the Congo: A focus on <i>Anopheles funestus</i> s.s. and <i>Anopheles gambiae</i> s.s	50-55
<i><u>Séverin N'DO, Bazoma BAYILLI, Jacques 1er Jumeau KABORÉ, Janvier BANDIBABONE BALIKUBIRI, Bertin ZAWADI MUSAKA, Adrien Marie Gaston BELEM, and Bantuzeko CHIMANUKA</u></i>	
Utilisation des espèces fourragères par les pasteurs et agroéleveurs pour le traitement sanitaire des ruminants domestiques à l'ouest du Burkina Faso	56-67
<i><u>Nafizatou Coulibaly, Salifou Ouedraogo-Kone, Séverin N'DO, Relwendé Justin Ouedraogo, Abdoul Kader Gandema, Ouattara Lassina, and Paulin OUOBA</u></i>	
Caractérisation du niveau de contamination des eaux de surface par l'orpaillage illicite: Cas de la rivière Mé (sud-est de la Côte d'Ivoire)	68-87
<i><u>Anowa Evrade Larissa EBA, Kan Jean Kouame, Chy Charlène KOUASSI, René BALLIET, and Serge Kouacou DEH</u></i>	
Application de la théorie des jeux et de la télédétection à l'identification des zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire)	88-106
<i><u>KAMENAN Satti Jean-Robert, Marc Youan Ta, Adja Miessan Germain, and Kouassi Amani Michel</u></i>	
Analyse des déterminants de l'élevage pastoral face aux changements globaux à l'aide du modèle Random Forest au Burkina Faso	107-117
<i><u>Abdoul Kader Gandema, Salifou Ouedraogo-Kone, André Kiema, and Bilassé Zongo</u></i>	
Impact des cultures intercalaires de l'ail et de la citronnelle sur les attaques de <i>Diaphania hyalinata</i> (Lepidoptera: Crambidae) en culture de <i>Citrullus lanatus</i> (Thunb) à Man, Côte d'Ivoire	118-126
<i><u>Dohouonan Diabaté, Aka Ahou Jeanne-Debor, Ohoueu Ehouman Jean Brice, Akpessa Akpa Alexandre Moïse, and Tano Yao</u></i>	
Détermination de l'activité des enzymes hépatiques chez les consommateurs des bières, dans la ville de Gemena de 2022 - 2023, Province de Sud Ubangi, RDC	127-137
<i><u>Zachée Kombo Tehopele, MAMBESA BAINAMBOKA Martin, Daniel Mademogo, Cherubin Sangi Kelamose, Luc Boekoli Likonga, Justin NGAWI, and Richard Tanakula</u></i>	

Pétrologie des formations birimiennes de zaakro: Implication géodynamique de la partie sud du sillon volcanosédimentaire de Toumodi-Fètêkro (Dorsale Man-Léo, Côte d'Ivoire)

[Petrology of the Birimian formations of Zaakro: Geodynamic implication of the southern part of the Toumodi-Fètêkro volcano-sedimentary belt (Man-Léo Ridge, Côte d'Ivoire)]

Brice Roland Kouassi¹, Kouadio David Koffi², and Gnagnon Raymond Stephane Koffi²

¹UFR Sciences biologiques, Département géosciences, Université Peleforo Gon-Coulibaly, Korhogo, BP 1328, Côte d'Ivoire

²UFR Sciences de la terre et des ressources minières, Laboratoire de géologie, ressources minérales et énergétiques, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The study area is located northwest of Toumodi in the Toumodi-Fètêkro volcanic belt. This work would be a contribution by petrography and structural, to a better knowledge of Zaakro Birimian formations area. The macroscopic and microscopic petrographic study showed that the study area contains metavolcanic rocks, volcano-sedimentary rocks associated to an orthoschist. The metavolcanic formations composed of meta-andesite, metarhyodacite and meta-rhyolite, massive, schistosed or sheared, and volcano-sedimentary formations composed of pyroclastic, volcanic breccias, cinerites these two formations associated to an orthoschist. The texture and mineralogical composition of the rocks have changed. The rocks have undergone deformations are metamorphosed and the original minerals were transformed into secondary minerals (epidote, chlorite, amphibole, carbonates). At the structural level, two deformation mechanisms are highlighted ductile shearing and brittle. The major directions of veins and fractures are ENE-WSW. The abundant presence of sulphides in samples characterized hydrothermal alteration and might indicate the presence of gold mineralization. The formations of ZAAKRO was implemented following two types of volcanism: A basic effusive volcanism generating andesites, and acid generating rhyolites and rhyodacites; Explosive volcanism at the origin of the formation of pyroclastic (volcanic breccias and cinerites). They have subsequently undergone a regional metamorphism of low degree corresponding to green schist facies.

KEYWORDS: Toumodi, plutono-volcano-sedimentary, petrology, volcanism, green schist facies.

RESUME: La zone d'étude est située au nord-ouest de Toumodi au sein du sillon volcanosédimentaire de Toumodi-Fètêkro. Le présent travail se voudrait être une contribution, par la pétrographie et la structurale, à une meilleure connaissance des formations birimiennes de la zone de Zaakro. L'étude pétrographique macroscopique et microscopique a montré que la zone d'étude renferme les métavolcanites, les volcanosédimentaires et les orthoschistes. Les métavolcanites sont composées de métaandésite, de méta-rhyodacite et de métarhyolite, massives, schistosées ou cisailées et les formations volcanosédimentaires sont composées de pyroclastites, de brèches volcaniques et de cinérites. Les orthoschistes ont une origine andésitique ou rhyolitique. La texture et la composition minéralogique des roches ont profondément changé. Les roches mères ont subi des déformations, sont métamorphosées et les minéraux originels se sont transformés en des minéraux secondaires (épidote, chlorite, amphibole, carbonates, etc). Au plan structural, deux mécanismes de déformation sont mis en évidence le cisaillement ductile et le cisaillement fragile). Les filons et les fractures ont pour directions principales ENE-WSW. La présence abondante de sulfures dans les échantillons prélevés caractérise une altération hydrothermale et pourrait indiquer

la présence d'une minéralisation aurifère. Les formations de Zaakro ont été mises en place à la suite de deux types de volcanisme: un volcanisme effusif basique à l'origine des andésites et un volcanisme effusif acide générant les rhyolites et les rhyodacites; un volcanisme explosif à l'origine de la formation des pyroclastites, des brèches volcaniques et des cinérites. Elles ont par la suite subi un métamorphisme régional de faible degré correspondant au faciès schiste vert.

MOTS-CLEFS: Toumodi, plutono-volcanosédimentaire, pétrologie, volcanisme, faciès schiste vert.

1 INTRODUCTION

Les terrains paléoprotérozoïques (Birimien) de l'Afrique de l'Ouest sont connus comme étant ceux qui dominent l'ensemble du Craton Ouest- Africain [1]. Ces terrains renferment en effet des roches plutono-volcaniques, volcanoclastiques et sédimentaires, métamorphisées généralement sous des conditions de faciès schistes verts à localement amphibolitiques et intrudées par des massifs de granitoïdes (2,2-2,0 Ga; [2-3]. Les basaltes et la plupart des roches effusives se seraient formés entre 2,2 et 2,15 Ga (Birimien inférieur) [4] et les volcanoclastites et sédiments, généralement entre 2,15 et 1,9 Ga (Birimien supérieur), plus ou moins contemporains des granitoïdes qui les recourent [5]. Les ceintures de roches vertes birimiennes forment des séquences de roches volcano-sédimentaires et volcaniques, qui ont également des affinités tholéiitiques à calco-alcalines allant des basaltes aux rhyolites [6-7]. En Côte d'Ivoire, les formations birimiennes forment des sillons volcanosédimentaires généralement orientés NNE-SSW et bordés ou renfermant des granitoïdes. Dix-sept sillons volcanosédimentaires birimiens répartis sur deux alignements de référence qui sont Téhini-Dimbokro et Ferkéssédougou-Soubéré, ont été identifiés [8]. Celui de Toumodi- Fètêkro a fait l'objet de nombreuses études lithostratigraphiques et géochimiques sur tout son ensemble [9-10]. Cependant l'on a constaté que les volets pétrostructuraux et les cartes produites au cours de ces travaux ont été réalisés sur la base d'études menées à moyenne échelle, il serait donc important de réaliser une carte géologique simplifiée à grande échelle afin de décrire avec plus de précision le contexte pétrostructurale et géotectonique de cette localité. Ce travail est une contribution essentielle à la connaissance des caractères pétrologiques, tectoniques et métamorphiques des formations birimiennes de la zone de Zaakro. Ensuite, il se propose de mettre à la disposition d'utilisateurs potentiels une carte géologique simplifiée à grande échelle ainsi qu'un modèle géodynamique de la zone de Zaakro.

2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

La zone d'étude se situe entre les longitudes 5 ° 4' 0" W et les latitudes 6 ° 36 '0 " N. Plus précisément dans la partie sud du sillon Toumodi-Fètêkro à environ 750 m au nord-est du village de Zaakro. Elle est caractérisée sur le plan géologique par de tufs, d'andésites, de rhyolites, de brèches en intrusion dans les schistes quartzeux et de granodiorites (Morel et Salvado, 1988) (Fig.1).

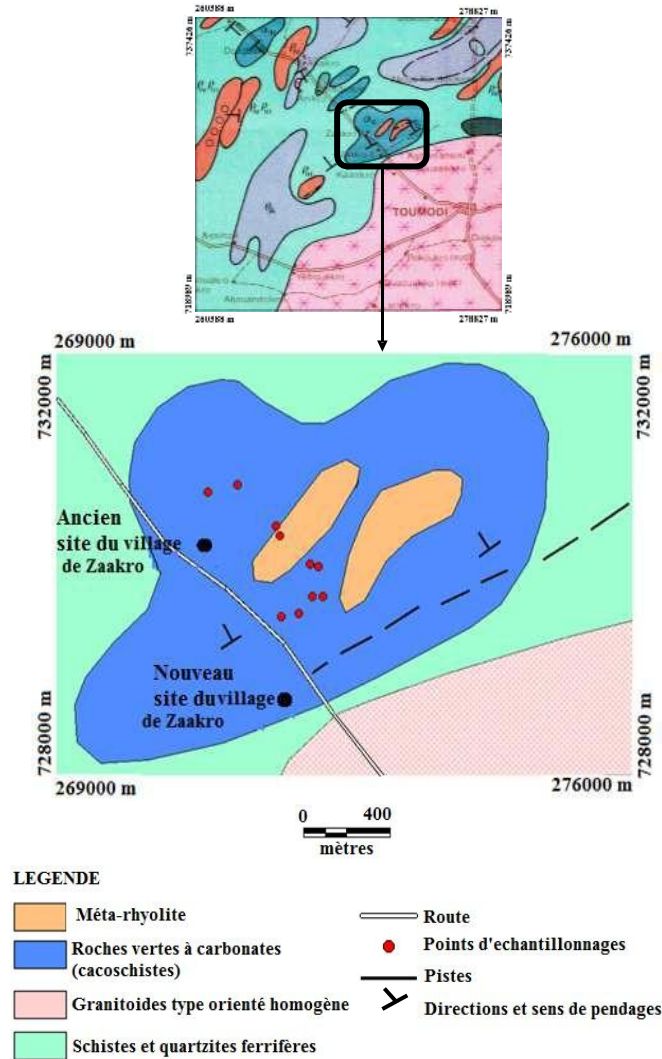


Fig. 1. Localisation des sites étudiés sur carte de fond géologique établie par Yacé (1976) [11]

La dorsale de Man (Fig.2.) recouvre une large région caractérisée par certains pays tels que le Libéria, la Sierra Léone, le Mali, la Guinée, le Ghana, le Burkina-Faso, le sud du Niger, le nord du Togo et la Côte d'Ivoire. Elle est constituée de deux grands domaines que sont les domaines Kenema-Man et Baoulé-Mossi. Le contact entre le domaine de Kenema-Man et Baoulé-Mossi est largement délimité par la faille incurvée du Sassandra qui longe la marge du bloc archéen, le séparant du domaine à prédominance paléoprotérozoïque de Baoulé Mossi au nord et à l'est (Fig.2), [12-13]. Cependant, des occurrences restreintes de croûte birimienne sont également présentes à l'ouest de la faille du Sassandra où elles sont situées sur le socle archéen, comme dans le cas de l'unité Ity-Toulepleu [14-15]), mettant en évidence le caractère transitoire du contact entre les domaines à prédominance archéenne (Kenema-Man) et paléoprotérozoïque (Baoulé-Mossi). Les occurrences connues de la croûte archéenne dans le craton ouest africain sont largement limitées à l'ouest de la faille du Sassandra (Fig.4). Cependant, une occurrence mineure est néanmoins présente dans le domaine SASCA qui comprend une petite occurrence de croûte archéenne séparée du principal bloc archéen du domaine de Kenema-Man par la croûte birimienne [16]. Bien que les âges mésoarchéens primitifs obtenus dans ce domaine soient comparables aux âges du plus grand bloc de Kenema-Man à l'ouest [17-18]), les deux domaines sont séparés par une zone de déformation majeure et des roches supracrustales et intrusives birimiennes (Fig.4) [19-20]). Il est donc difficile de savoir si la croûte archéenne du domaine SASCA constituait à l'origine une unité distincte, ou s'il s'agit d'une section remobilisée du plus grand bloc de Kenema-Man. La zone d'étude appartient au domaine Baoulé-Mossi structuré par le méga cycle orogénique éburnéen. Dans la région de Toumodi, trois groupes lithostratigraphiques ont été mis en évidence par [21], à savoir: le groupe de la rivière du Kan, le groupe volcanique de Toumodi et les granitoïdes intrusifs de type S. Le sillon de Toumodi-Fètêkro serait encaissé dans un substratum intrasialique de gneiss migmatitiques dabakaliens selon [22], datés à $2\ 186 \pm 16$ Ma par U/Pb sur zircon par [23]. Les travaux antérieurs réalisés au sein du sillon Toumodi-Fètêkro indiquent sur le plan pétrographique des granitoïdes, des métavolcanites, des volcanoclastites, des métasédiments et des

intrusives basiques. Les principales organisations structurales sont les structures plicatives, les associations de structures plutoniques et les couloirs de décrochement.

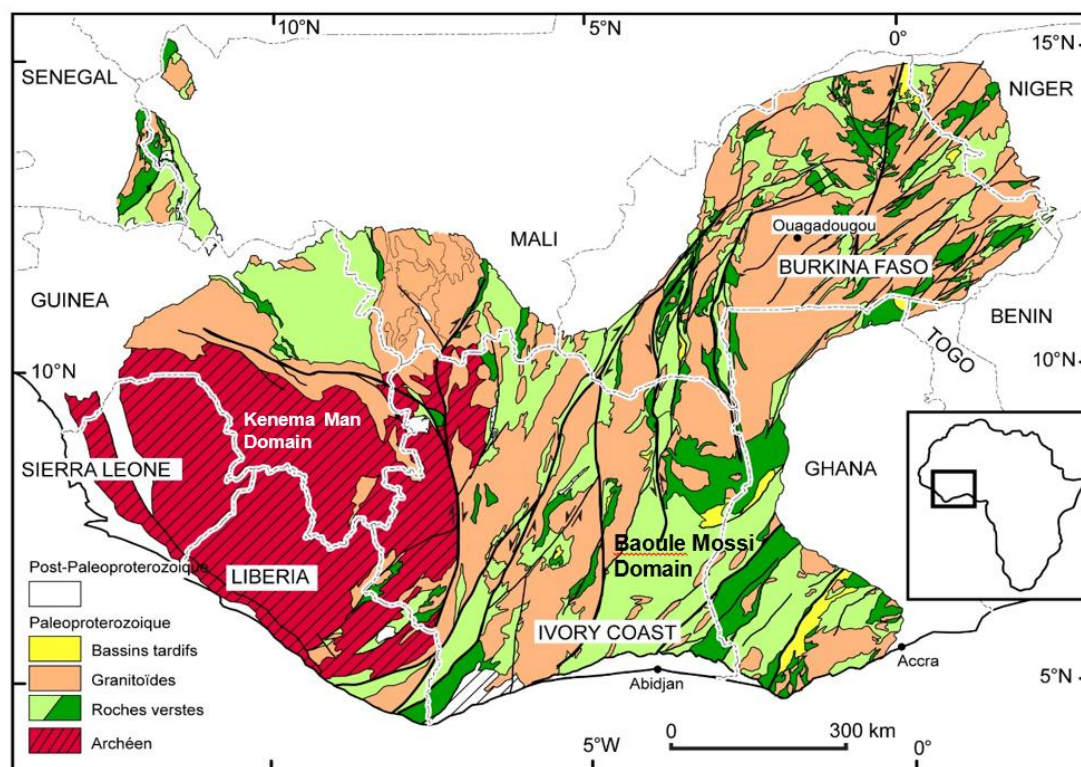


Fig. 2. Carte géologique régionale synthétique de la dorsale de Man [24] modifiée

3 METHODOLOGIE

• Pétrographie

L'analyse macroscopique concerne tous les caractères architecturaux visibles à l'oeil nu, observés à des ordres de grandeur variable, depuis la composition minéralogique en passant par les cristaux plus ou moins orientés dans une roche jusqu'aux grandes unités (faciès) d'un affleurement continu. Chaque affleurement est décrit selon un schéma qui comporte la forme de l'affleurement, la structure, la texture, la composition minéralogique, la couleur, la famille et l'état d'altération. Cela a permis de trouver ou de proposer, si possible, un nom à la roche.

Les lames minces ont été confectionnées à la PETROCI et ont par a suite été observées à l'aide du microscope polarisant au Laboratoire de Géologie Ressources Minérales et Energétiques à l'Université Felix Houphouët Boigny. Les minéraux ont été observés en lumière naturelle puis en lumière polarisée et les assemblages minéralogiques nous ont permis de corroborer l'étude pétrographique effectuées sur le terrain. Elle nous a permis également de caractériser les différents faciès rencontrés dans la zone d'étude.

• Structurale

L'analyse structurale a consisté à faire des observations sur les roches, leur déformation, les éléments structuraux (stratifications, schistosités, fractures, plis et axe de plis) et à effectuer des mesures en vue de l'étude de la déformation. Les données structurales ainsi constituées sont exportées sous forme de texte vers le logiciel de stéréographie GEOrient qui nous a permis de représenter et de visualiser la rosace directionnelle des mesures récoltées.

4 RESULTATS

4.1 ETUDE PETROGRAPHIQUE

Zaakro renferme trois ensembles lithologiques: les métavolcanites acides et basiques, les volcanosédimentaires et les orthoschistes. Ils sont en général recoupés par une série de filons de quartz et/ou de pegmatite. Les formations volcaniques affleurent généralement sous forme de collines, de blocs ou de bandes schistosées et/ou fracturées et sont faiblement affectées par le métamorphisme.

- **Les métavolcanites basiques**

Ce sont des métaandésites d'aspect massif légèrement à fortement déformées. Elles se présentent en bloc ou sous forme de colline en intrusion dans les orthoschistes (**Fig.3A**). Les minéraux sont invisibles à l'œil nu. Cependant l'on observe des phénocristaux d'amphibole. Les minéraux secondaires sont la chlorite et la séricite. De couleur grise à gris verdâtre et à texture microlitique porphyrique, elles sont intensément affectées de fractures, de schistosités de fractures généralement recoupées par des veines et filons de quartz et/ou de pegmatite. L'observation à la loupe a permis d'identifier les minéraux tels que les amphiboles et le quartz. On y observe des sulfures à l'œil nu.

- **Les métavolcanites acides**

Dans cet ensemble nous avons les métavolcanites acides et intermédiaires (Métarhyolites, métarhyodacites), car s'il est aisé de distinguer une métarhyodacite d'une métarhyolite au microscope en se basant sur la présence et l'importance du feldspath plagioclase, il est par ailleurs très difficile de distinguer ces deux types de roches sur le terrain.

MÉTARHYOLITE PORPHYRIQUE

Les métarhyolites sont de couleur beige ou grise et comportent des réseaux de fractures (**Fig.3B**). On note toutefois que ces roches sont affectées de schistosité. A l'affleurement elles se présentent généralement sous forme, soit subcirculaires circonscrits en intrusion roches vertes, soit en petites bandes étroites à la périphérie des roches vertes, soit en blocs disséminés dans les schistes. Ce faciès apparait altéré surtout au pied, sur les flancs et quelquefois au sommet des collines. Les minéraux sont invisibles à l'œil nu cependant les phénocristaux de quartz disséminés dans la matrice sont identifiables ainsi que de l'orthose.

MÉTARHYODACITE

La méta-rhyodacite représente le faciès intermédiaire entre la métarhyolite et la métaandésite. Elle est de couleur grise et renferme des phénocristaux de quartz visible à l'œil nu (**Fig.3C**). On peut distinguer ce faciès du précédent, par l'abondance de feldspath plagioclase.

PYROCLASTITES

Les pyroclastites sont de couleur vert pâle avec une chloritisation nettement marquée (**Fig.3D**). On note souvent un litage minéralogique qui se traduit par une alternance de minéraux ferromagnésiens et felsiques. Leur texture est microlitique porphyrique. Ces pyroclastites sont riches en phénocristaux d'amphibole et de pyroxènes identifiables à l'œil nu. Ces formations correspondent dans leur ensemble aux brèches volcaniques et aux cinérites.

BRÊCHES VOLCANIQUES

Les brèches correspondent au faciès grossiers avec des minéraux sombres (amphiboles) de taille millimétrique (**Fig.3E**). Elles sont formées de clastes de roches claires pris dans un ciment plus sombre. Les clastes varient en taille et en forme; ils sont disposés sans orientation préférentielle et apparaissent arrondis, subanguleux et parfois étirés. Les clastes sont formés de quartz et de feldspaths.

CINÉRITES

Ils correspondent au faciès fins dans lequel on peut aisément observer des stratifications simples et entrecroisées (**Fig.3F**). Les formations cinéritiques s'observent généralement sur les flancs des collines. Elles proviennent de l'accumulation de cendres volcaniques.

- **Orthoschistes**

Ils constituent la lithologie dominante dans la zone de Zaakro. On les observe pratiquement partout sur les différents sites. Ce faciès est très répandu dans les talwegs, peu sur les flancs et moins sur les crêtes. Ils sont d'origines variables du fait du contraste dans leur coloration: du jaune orangé à brun, au rouge ocre au pied, sur les flancs et au sommet des collines, de verdâtre à noirâtre dans les talwegs. Ils sont en général d'origine andésitique pour les méta-basites et rhyolitique pour les méta-acidites. Les schistes d'origine andésitique (**Fig.3G**) constituent le faciès majoritaire de la zone de Zaakro. Ils sont d'une part, colorés en vert du fait de la forte présence de chlorite et d'autre part, riches en calcite. Les schistes d'origine rhyolitique (**Fig.3H**) sont les schistes dont les roches mères sont des rhyolites. Ils apparaissent plus clairs que les schistes d'origine andésitique et sont de couleurs jaune orangé à brun ou rouge ocre. Le quartz s'y trouve en grains fins ou forme des filons. Les schistes de Zaakro sont fortement soumis à l'altération météorique. On note une transition graduelle du degré d'altération depuis les talwegs jusqu'au sommet des collines:

- fortement altérés dans les talwegs et aux pieds des collines;
- moyennement sur les flancs;
- faiblement sur les crêtes.

Ils ont une texture fine et affectés de schistosité dont les orientations varient entre N10° à N170° et pendent généralement vers le Nord-Ouest ou sont subverticaux.

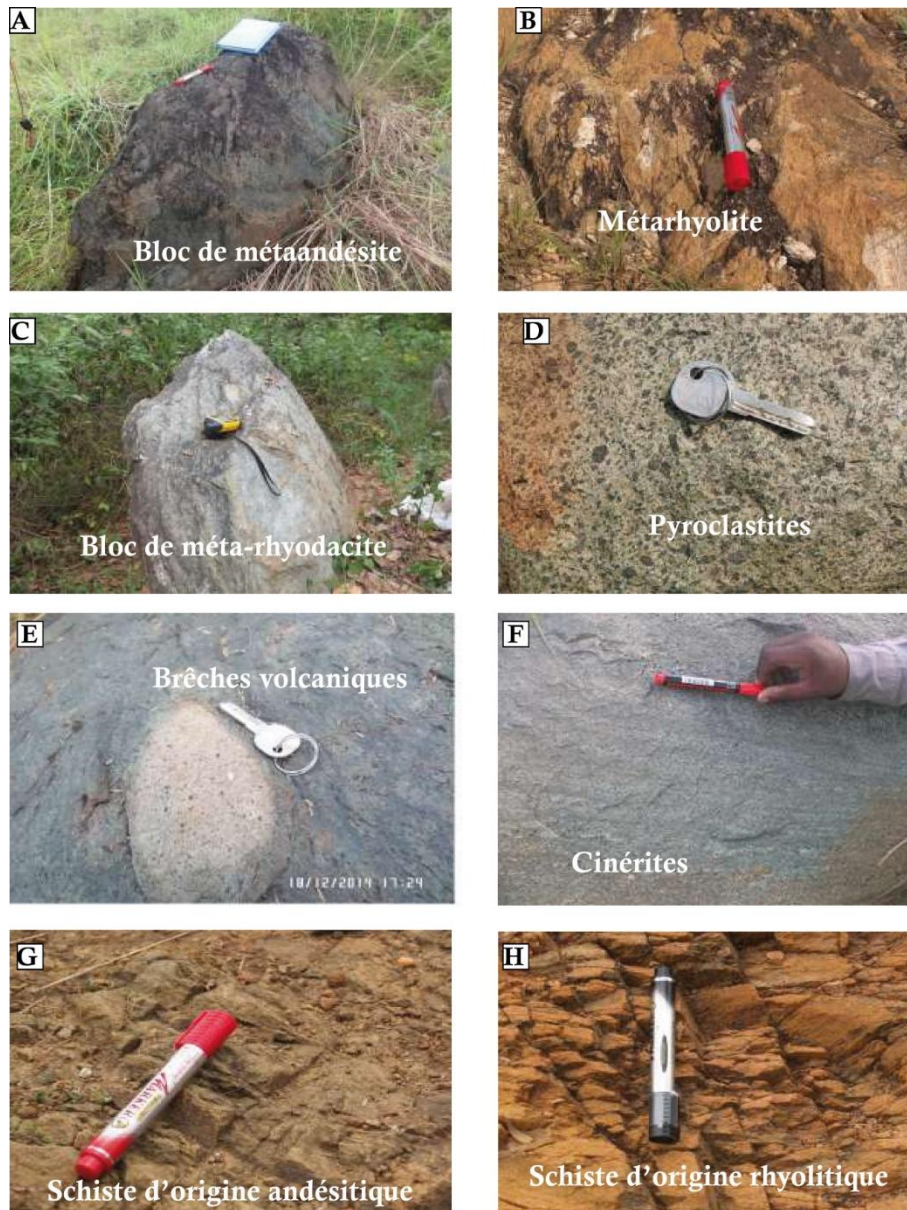


Fig. 3. Photographies des différentes lithologies de Zaakro (A: métavolcanites basiques; B, C, D, E et F: métavolcanites acides; G et H: orthoschistes)

4.2 ETUDE STRUCTURALE

Toutes les structures géologiques de cette localité ont été mises en évidence. Il s'agit des schistosités, des fractures, des plis, des décrochements, des stratifications ainsi que des cisaillements.

La schistosité est la principale fabrique planaire qui affecte tous les faciès étudiés. Elle est orientée généralement N070°. Elle pend généralement vers le nord-ouest ou est subverticale. Les minéraux observés dans les différentes lithologies ont tous une orientation préférentielle à l'exception de ceux des formations pyroclastiques. Sur le terrain on distingue les schistosités de flux et de fractures.

La schistosité de flux s'observe dans les schistes. Elle développe des plans qui affectent très finement l'ensemble de la roche (**Fig.4A**). Cette structure pénétrative a été aisément observée aussi bien dans les schistes à Zaakro 1 ainsi que dans ceux sur les autres sites. La schistosité de fracture quant à elle est présente dans tous les faciès rencontrés depuis les schistes en passant par les formations méta-volcano-plutono-basiques puis acides (**Fig.4B et 4C**). Il s'agit de fractures répétées, espacées bien visibles à l'œil nu. Dans les schistes au niveau de Zaakro 1 la direction des schistosités de fractures est N075° avec un pendage

de 70°NW. Les schistosités de fractures pendent généralement vers le NW ou sont subverticales. Les métaandésites sont les formations les plus affectées par ce type de déformation.

La zone de Zaakro est intensément déformée. Elle est affectée de nombreuses fractures (**Fig.4**). La fracturation matérialise la déformation cassante majeure subie par les formations de la zone. Elle s'observe fréquemment dans les métaandésites et dans la métarhyolite. On rencontre des fractures de direction N060-60°NW, N080-60°NW et N100°, N130° à pendage subvertical dans les formations de métarhyolite, dans les pyroclatites N085° et enfin dans les Métaandésites N070°-70S, N080°-68S N080-80°S, N080 et N100 à pendage subvertical (**Fig.4D, 4E, 4F**). Dans la zone la rosace directionnelle des fractures (**Fig.4G**) indique une direction secondaire des fractures qui est NNE-SSW et la direction principale qui est NE-SW. On note aussi des directions mineures N-S, E-W et NNW-ESE. Le plissement est moins prononcé à Zaakro. Les rares plissements sont mis en évidence par les filons (**Fig.5**). Nous notons précisément à Zaakro 1 (au pied de la chapelle), la présence d'un filon de pegmatite plissé à plan axial vertical (**Fig.5A**). On rencontre également de nombreux filons de quartz microplissés (**Fig.5C**). Ces plis sont la manifestation d'une déformation ductile. Outre ces plis, la zone présente des plis parasites dans les pyroclastites montrant les formes Z, M, S respectivement sur le flanc gauche à la charnière et sur le flanc droit. Ce pli est la conséquence d'un mécanisme de flambage (**Fig.5B**).

La zone est marquée par les deux types de décrochement (senestre et dextre). Les structures décrochantes s'observent principalement dans les métaandésites et concernent les filons de quartz et de pegmatite. A Zaakro 3, un décrochement senestre de filons de quartz se manifeste au sein du Métaandésite (**Fig.5D**). Par ce décrochement on note deux générations de filons de quartz. La première antérieure de direction N170° est recoupée par la seconde de direction N070°. Un autre décrochement senestre à rejet d'environ 50 cm de filon de pegmatite est observé. Ces décrochements caractérisent un mouvement ductile.

Les cinérites sont stratifiées (**Fig.3F**). Dans ces roches, les figures d'origine sédimentaire sont constituées de cendres déposées sous forme de strates ayant une amplitude millimétrique. Les lits sont à grain de couleur blanche de nature quartzofeldspathique, grise brune ou noirâtre ferromagnésiens bien stratifiés. Ils peuvent alterner avec des horizons pyroclastiques plus grossiers (brèches). Parfois ces lits s'entrecroisent on parle de stratifications entrecroisées. Le cisaillement est identifiable par des figures sigmoïdes et le décrochement senestre observés dans les métaandésites (**Fig.5F**). Il se manifeste également par la présence de cristaux fortement étirés et aplatis, ou même recristallisé, lors d'un mouvement cisailant. Au microscope on observe des phénocristaux de quartz pris dans un mouvement senestre.

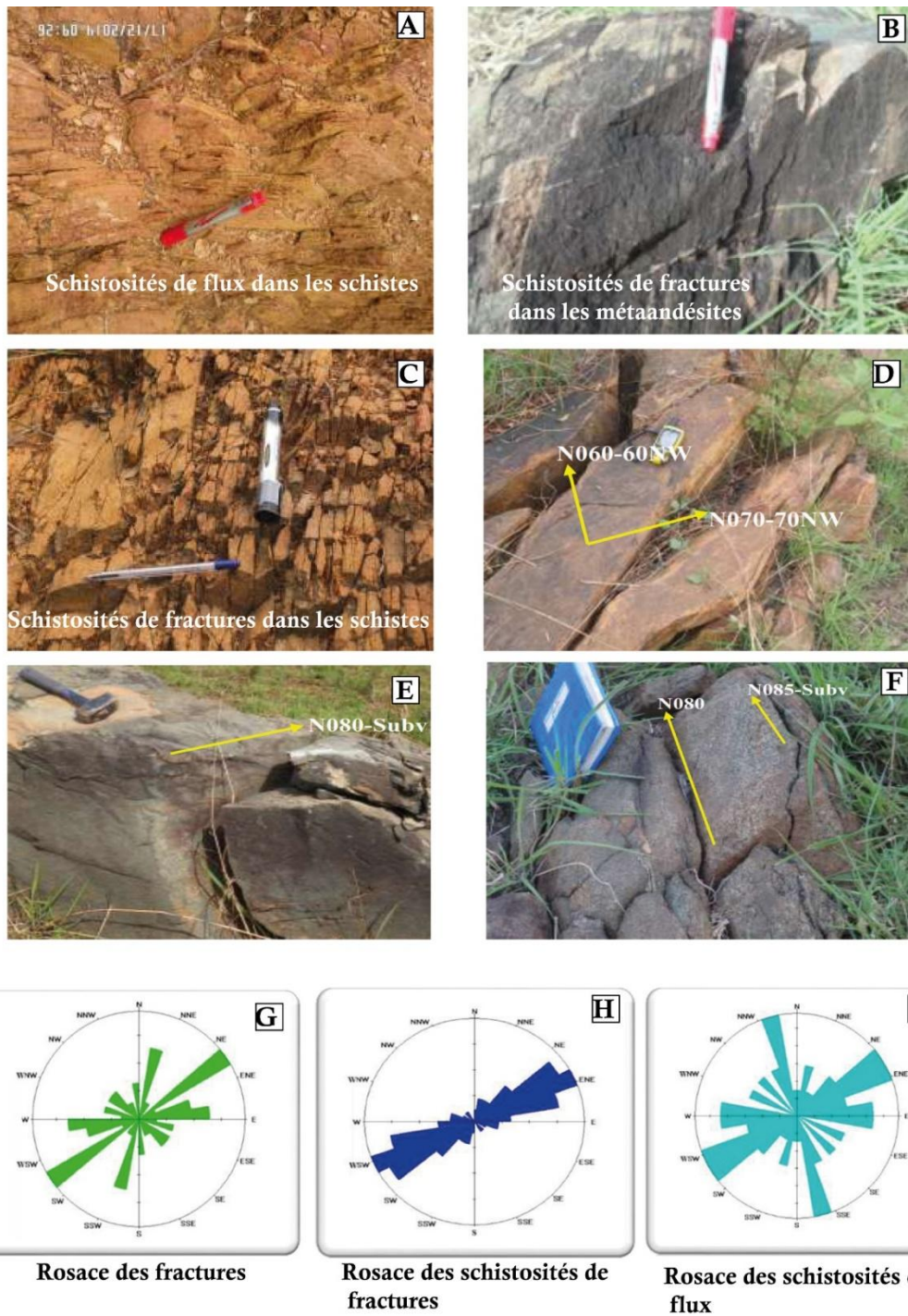


Fig. 4. Photographies des différentes schistosités, fractures et des rosaces directionnelles mettant en évidence les principales directions

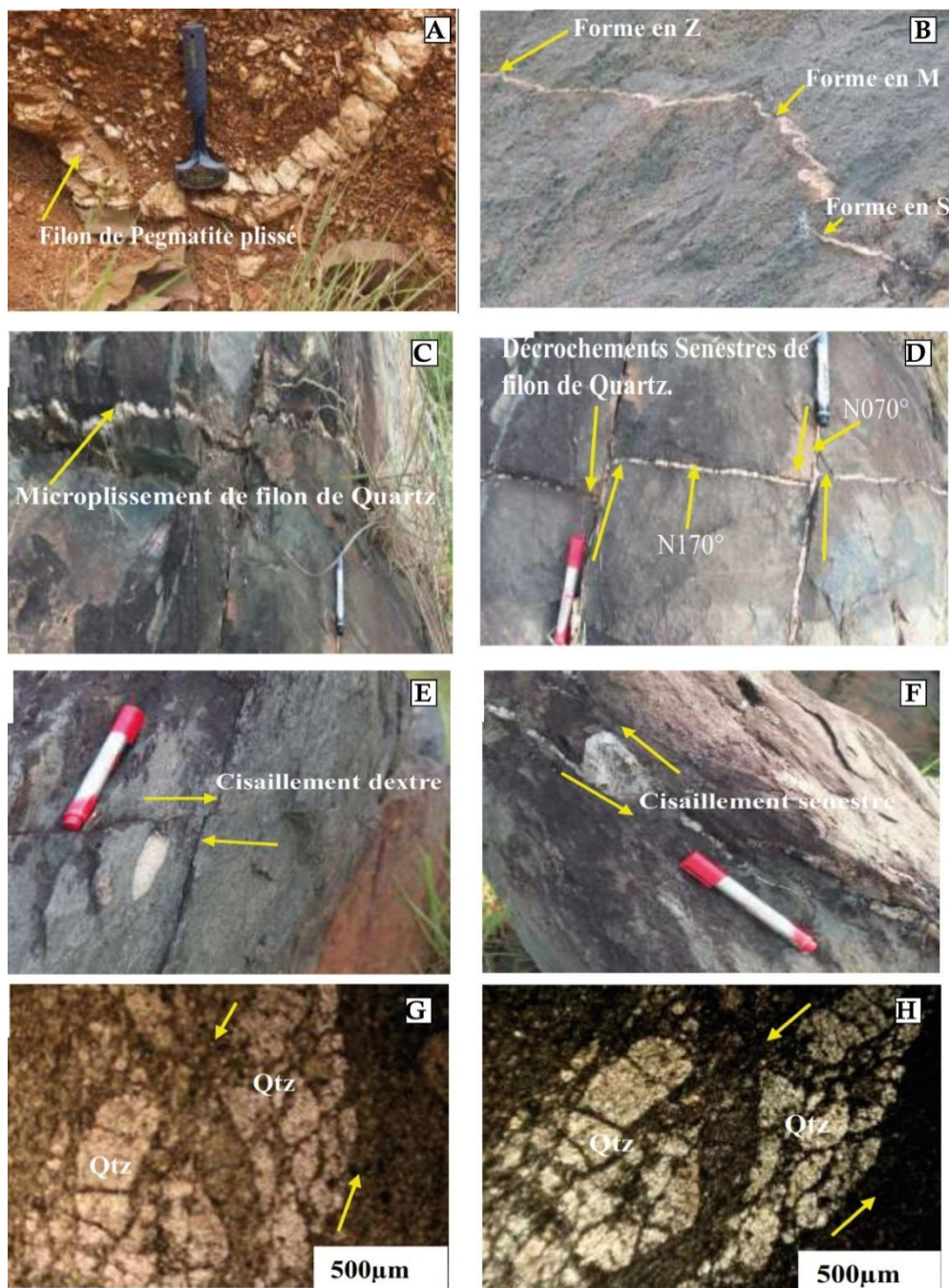


Fig. 5. Macrophotographies et microphotographies des différentes structures ductiles de zaakro

5 DISCUSSION

5.1 PETROGRAPHIE ET METAMORPHISME

Les sillons birimiens présentent des contextes lithostratigraphiques similaires, en dépit de quelques différences. L'étude pétrographique a montré que la zone de Zaakro est caractérisée par des roches méta-volcaniques, des volcanoclastites (brèches et cinérites) et des orthoschistes. De façon précise elle met en évidence cinq ensembles lithologiques que sont: les orthoschistes, les métaandésites porphyriques, les Métarhyolites porphyriques, les méta-rhyodacites et les pyroclastites composées de brèches et de cinérites. Les orthoschistes affleurent partout, ils correspondent en effet au faciès prédominant dans la zone d'étude. L'étude en révèle deux types qui sont: les schistes d'origine rhyolitique issus du métamorphisme de la

rhyolite et les schistes d'origine andésitique formés par le métamorphisme des andésites. A cet ensemble s'ajoutent les métavolcanites et les volcanoclastites.

L'analyse pétrographique détaillée des faciès a permis de décrire les transformations (évolutions) des phases minérales. Ces transformations correspondent à des assemblages de faciès métamorphiques et permettent de définir dans ces formations deux types de métamorphisme.

Un métamorphisme statique résultant de l'hydratation des phases minérales par les fluides hydrothermaux. La mésostase est entièrement chloritisée et épidotisée. On note la présence fréquente d'épidote et de carbonates en l'occurrence la calcite. Ces transformations se caractérisent par la paragenèse: Dolomite+ calcite + épidote + Piédmontite + chlorite + du faciès schiste vert dans les conditions de basse pression et basse température. L'altération hydrothermale est importante et marquée par des filons de quartz, de pegmatite, de calcite et surtout de sulfures;

Un métamorphisme dynamique qui se caractérise par le développement de la schistosité dans le faciès schiste vert. Ce métamorphisme se superpose au métamorphisme statique. Il affecte toutes les formations depuis les roches plutono-volcaniques basiques et acides jusqu'aux roches volcano-sédimentaires en passant par les schistes.

Les études de [25] montrent que les formations de Toumodi-Fètêkro appartiennent en effet à deux ensembles: volcaniques et sédimentaires.

Le premier ensemble est formé de metabasites tholéitiques, à signature océanique, et de métasédiments pélitiques appartenant à des ceintures de roches vertes.

Le deuxième ensemble est constitué de laves calco-alkalines andésitiques, de volcano-sédiments et de sédiments. Quant à [21], il met en évidence trois groupes lithostratigraphiques à savoir: le groupe de la rivière du Kan, le groupe volcanique de Toumodi et les granitoïdes intrusifs de type S. Tous ces auteurs soutiennent l'hypothèse du caractère volcanique effusif des formations dans le secteur de Zaakro. Mais avec la découverte des pyroclastites nous admettons en plus de ce volcanisme effusif un volcanisme de nature explosive.

5.2 STRUCTURALE

Les mesures structurales recueillies sur le terrain sont celle des schistosités de flux et de fractures, des fractures, des veines et filons de quartz et de pegmatite. Les déformations associées aux formations du secteur de Zaakro sont souples et cassantes.

La déformation souple est représentée par des microplis de filons de pegmatite de direction N170°; des figures sigmoïdales qui sont une manifestation d'un cisaillement sénestre; des schistosités de flux de direction N040°, N065°, N070°, N145; des plis parasites tandis que la déformation cassante s'illustre par des schistosités de fractures de directions N075°, N090°, N100; des fractures de direction N20, N60, N80; un réseau de filons de quartz et de pegmatite de directions N110°, N055°, N080° et N125° ainsi que des décrochements à mouvements dextre et sénestre.

La tectonique de la région de Zaakro, tout comme dans l'ensemble de la Côte d'Ivoire est dominée par l'influence de grands accidents ductiles généralement sénestres, dextres dans certains cas [26-27]. Les études de [25] soulignent que le complexe granitique de Kan occupe un couloir de cisaillement N-S large d'une vingtaine de kilomètres. Il signale également que dans le sillon de Toumodi- Fètêkro, l'accident du Kan jalonne au même titre que l'accident du N'Zi une large bande de décrochement N-S en

relais ou sub- alignés constituant ce que [28] a nommé « le décrochement ductile de Brobo ». Ce décrochement est issu d'un cisaillement N-S mettant ainsi en évidence le couloir de cisaillement N-S. De plus, selon [29], la phase D2 est associée aux plis majeurs et aux couloirs de décrochements N-S. Elle est également responsable de la structuration des séries birimiennes, orientées NNE-SSW à ENE-WSW. Elle est marquée par une schistosité S2 très pénétrative avec un pendage assez fort et s'accompagne enfin, d'un couloir de cisaillement avec des structures C/S, N-S à jeu sénestre. L'analyse des données de terrain, mettent en évidence dans la région étudiée deux grandes familles de direction NE-SW et ENE-WSW auxquelles s'ajoute une direction secondaire NNW-SSE. Les directions principales coïncident avec celles des séries birimiennes qui résultent d'une compression régionale NW-SE [30]; [7], [31-35]. La tectonique plicative se manifeste sur le terrain par des plis millimétriques à centimétriques, le plus souvent asymétriques. Des filons de pegmatite boudinés, des figures sigmoïdes sénestres et une schistosité assez nette témoignent de l'intensité des phénomènes de contrainte dont les roches ont fait l'objet. A l'échelle de la lame mince, ces contraintes se traduisent par des étirements ou des déformations de minéraux, des phénocristaux de quartz corrodés ou cassés. Toutes ces figures confirment le caractère cisailant des déformations. Enfin le pendage des structures est généralement NW ou subvertical.

5.3 CONTEXTE GEOTECTONIQUE

La zone de Zaakro ayant fait l'objet de cette étude, à l'échelle régionale se trouve dans la ceinture de roches vertes du sillon Toumodi-Fètêkro bordée par des massifs de granitoïdes. Le secteur montre un contexte lithologique peu diversifié qui peut être subdivisé en trois ensembles lithologiques majeurs.

Le premier ensemble est essentiellement formé de métavolcanites basiques représentées par des laves andésitiques, massives, schistosées ou cisailées.

Les roches mères sont métamorphisées et les minéraux originels se sont transformés en d'autres minéraux (dolomite, calcite, épidote, chlorite). Cette activité volcanique précède un volcanisme explosif générant le deuxième ensemble.

Le deuxième ensemble comprend des volcanoclastites (pyroclastites, brèches et cinérites) et les orthoschistes. Le volcanisme explosif est suivi par une activité volcanique intrusive. Les intrusions de laves acides (rhyolites et dacites) forment un troisième ensemble. Ces formations de faible étendue n'ont pas des contacts francs avec leurs encaissants (métaandésites et orthoschistes).

Le premier ensemble et le deuxième ensemble forment la classique ceinture de roches vertes du sillon de Toumodi-Fètêkro. Ces metabasites d'âge Paléoproterozoïque ont été mis en place dans un environnement continental, mais ne constituent pas le socle ancien. Toutefois, les volcanites basiques sont antérieurs aux pyroclastites et aux métasédiments [36]; [21]; [37]; [25].

La structure de ces formations montre toujours une certaine orientation. La texture et la structure initiale de la roche mère sont partiellement conservées ou ont complètement disparu. Les dépôts de pyroclastites se sont manifestés dans un domaine probablement sous-marin, volcanogène mais peu profond et parfois même subaérien Yacé (1982) [36].

Le troisième ensemble (rhyolites et dacites) montre un caractère tardif par rapport aux roches vertes. Les récentes datations de rhyolites provenant de la ceinture des Monts Boutourou et du bassin de Fètêkro ont respectivement donné 2195 ± 10 Ma par la méthode U-Pb sur zircon [38] et 2178 ± 7 Ma par la méthode Pb-Pb sur zircon [16]. Ces datations de grandes précisions correspondent aux périodes de mise en place des laves acides. Nous retiendrons donc pour la zone de Zaakro, une chronostratigraphie qui peut être résumée comme suit:

1. Formation des volcanites (andésite) suivie par un volcanisme explosif générant des pyroclastites;
2. Intrusion de dykes acides (rhyolites et dacites);
3. Déformation régionale plicative (d2) à l'origine de l'étirement dans la direction nord-est des fabriques tectoniques régionales accompagnée d'un métamorphisme de faciès schistes verts.

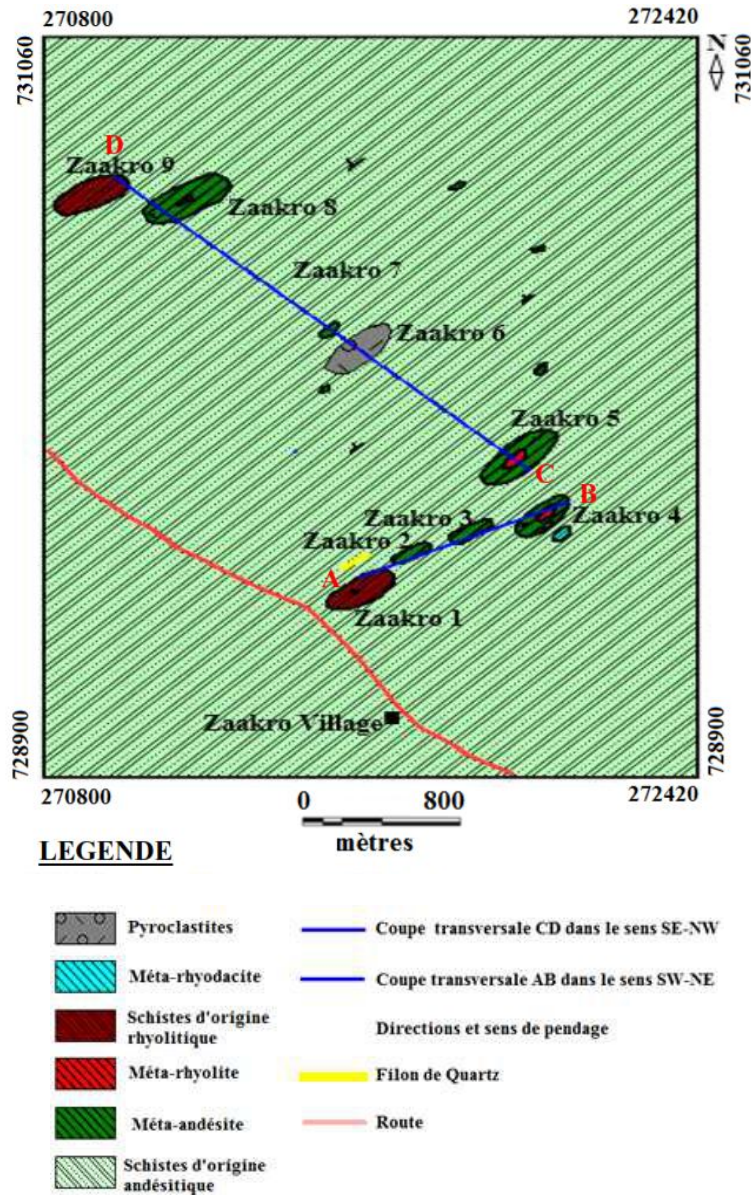


Fig. 6. Carte géologique simplifiée de la zone d'étude à l'échelle 1/60 000

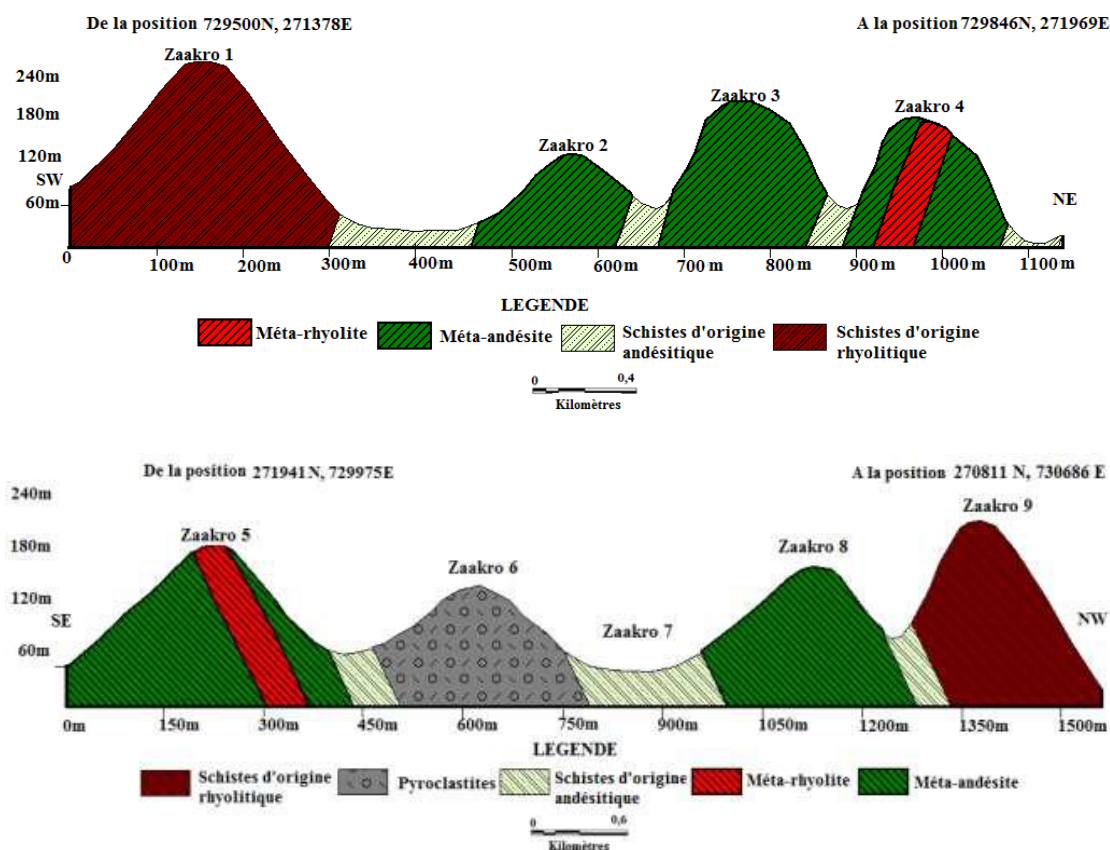


Fig. 7. Coupes transversales dans les formations géologiques de Zaakro

AB: Coupes transversales dans le sens SW-NE

CD: Coupes transversales dans le sens SE-NW

6 CONCLUSION

Au terme de cette étude, nous retenons que la géologie de la région de Zaakro est caractérisée par trois ensembles lithologiques majeurs: les métavolcanites représentées par la métaandésite, la Métrarhyolite et la métrarhyodacite; les volcano-sédimentaires correspondants aux pyroclastites, brèches et cinérites et les orthoschistes d'origine andésitique et rhyolitique. Les orthoschistes constituent la lithologie dominante du secteur. Les formations de Zaakro sont la conséquence de plusieurs processus géologiques qui rendent son histoire tectono-métamorphique plus complexe. Les roches mères ont subi des déformations et ont été métamorphosées. Les textures microlitiques des roches magmatiques ont généralement évolué vers des textures de roches métamorphiques de faciès schiste vert. La tectonique est caractérisée par la présence de schistosité de flux, de fractures, de filons de quartz, de filons de pegmatite et de microplis. L'analyse statistique de ces différentes structures présente des directions générales qui épousent généralement celles de l'ensemble éburnéen (NE-SW à NNE-SSW). Les déformations associées aux formations sont: la déformation cassante et ductile. Les éléments structuraux mis en évidence attestent que Zaakro est une zone de cisaillement. Le contexte géotectonique mis en évidence à partir de l'étude lithostructurale est marqué à la fois par un volcanisme effusif suivi par un volcanisme explosif.

REFERENCES

- [1] Pawlig S., Gueye M., Klischies R., Schwarz S., Wemmer K., Siegesmund S. (2006). Geochemical and Sr-Nd isotopic data on the Birimian of the Kedougou-Kenieba Inlier (Eastern Senegal): implications on the Palaeoproterozoic evolution of the West African Craton. *S. Afr. J. Geol.* 109: 411-427.
- [2] Hirdes W., Davis D. W., Ludtke G., Konan G. (1996). Two generations of Birimian (Paleoproterozoic) volcanics belts in northeastern Côte d'Ivoire (West-Africa): consequences for the 'Birimian Controversy'. 247-311.

- [3] Lompo M. (2010). Structural evolution of Paleoproterozoic belts (Eburnean event) in the Man-Leo Shield, West African Craton. Key structures for vertical to transcurrent tectonics. *Journal of African Earth Sciences*, 58: 19-36.
- [4] Castaing C., Billa M., Milési J.P., Thiéblemont D., Le Mentour J., Egal E., Donzeau M., Guerrot C., Cocherie A., Chèvremont P., Tegye M., Itard Y., Zida B., Ouedraogo I., Kote S., Kabore B.E., Ouedraogo C., Ki J.C., Zunino C. (2003). Notice explicative de la carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1 000 000. BRGM BUMIGEB: 147.
- [5] Gasquet D., Barbey P., Adou M., Paquette J.L. (2003). Structure, Sr-Nd isotope geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the granitoids of the Dabakala area (Côte d'Ivoire): evidence for a 2.3 Ga crustal growth event in the Palaeoproterozoic of West Africa? *Precambrian Res.* 127: 329–354.
- [6] Pouclet A., Doumbia S., Vidal M. (2006). Geodynamic setting of the Birimian volcanism in central Ivory Coast (western Africa) and its place in the Palaeoproterozoic evolution of the Man Shield. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 177: 105-121.
- [7] Baratoux L., Metelka V., Naba S., Jessell M.W., Gregoire M., Ganne J. (2011). Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the Eburnean orogeny (~2.2-2.0 Ga), western Burkina Faso. *Precambrian Res.* 191: 18-45.
- [8] Tagini B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Thèse de l'Université de Lausanne et publication SODEMI, 302 p.
- [9] Ouattara Z. (2015). Caractères lithostratigraphique, structural, géochimique et métallogénique du gisement d'or de Bonikro, sillon birimien de Fettekro, centre-sud de la Côte d'Ivoire. Doctorat, Univ. FELIX HOUPHOUËT -BOIGNY, 256 p.
- [10] Coulibaly I., (2018). Petrography of the volcanics and plutonites of the southern part of the Toumodi-Fettekro volcano-sedimentary sillon. Thesis Univ. Felix Houphouët Boigny d'Abidjan. 221p.
- [11] YACE I. (1976). Etude géologique du volcanisme éburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de Fettekro en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat d'Etat, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 373 p.
- [12] Feybesse J.L., Milési J.P. (1994). The Archean/Proterozoic contact zone in West Africa: a mountain belt of decollement thrusting and folding on a continental margin related to 2.1 Ga convergence of Archean cratons? *Precambrian Res.*, 69: 199-227.
- [13] Egal, E., Thiéblemont, D., Lahondere, D., Guerrot, C., Costea, C. A., Iliescu, D., Delor, C., Goujou, J. C., Lafon, J. M., Tegye, M., Diaby, S., Kolié, P., (2002). Late Eburnean granitization and tectonics along the western and northwestern margin of the Archean Kenema-Man domain (Guinea, West African Craton). *Precambrian Research*, 117, 57-84.
- [14] Feybesse J.L., Milési J.P., Johan V., Dommanget A., Calvez J.-Y., Boher M., Abouchami W. (1989). La limite Archéen-Protérozoïque inférieure d'Afrique de l'Ouest: une zone de chevauchement majeure antérieure à l'accident de Sassandra; l'exemple des régions d'Odienné et de Touba (Côte-d'Ivoire). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309, II: 1847-1853.
- [15] Kouamelan A. N., Delor C., Peucat J. J. (1997). Geochronological evidence for reworking of Archean terranes during the Early Proterozoic (2.1 Ga) in the western Côte d'Ivoire (Man Rise-West African Craton). *Precambrian Research*, 86: 177-199.
- [16] Kouamelan A. N. (1996). Géochronologie et Géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire: Implication pour la transition Archéen-Protérozoïque. Mémoire Géoscience n°73 Rennes, 293p.
- [17] Thiéblemont, D., Goujou, J.C., Egal, E., Cocherie, A., Delor, C., Lafon, J.M., Fanning, C.M., (2004). Archean evolution of the Leo Rise and its Eburnean reworking. *J. Afr. Earth Sci.* 39 (3-5), 97-104.
- [18] Eglinger, A., Thébaud, N., Zeh, A., Davis, J., Miller, J., Parra-Avila, L.A., Loucks, R., McCuaig, C., Belousova, E., (2017). New insights into the crustal growth of the Paleoproterozoic margin of the Archean Kéména-Man domain, West African craton (Guinea): implications for gold mineral system. *Precamb. Res.* 292, 258–289.
- [19] Doumbia S., Pouclet A., Kouamelan A.N., Peucat J. J., Vidal M. (1998). Petrogenesis of juvenile-type Birimian (Paleoproterozoic) granitoids in Central Côte d'Ivoire, West Africa: geochemistry and geochronology. *Precambrian Research* 87: 33-63.
- [20] Ouattara G. (1998). Structure du batholite de Ferkessédougou (secteur de Zuénoula, Côte d'Ivoire). Implication sur l'interprétation de la géodynamique du paléoprotérozoïque d'Afrique de l'Ouest à 2,1 Ga. Thèse Doctorat ès Sci., Univ. Orléans, 291 p.
- [21] Mortimer J. (1990). Evolution of the early Proterozoic Toumodi Volcanic Group and associated rocks, Ivory Coast. Ph D. Thesis CNAA. Portsmouth Plytech. Portsmouth. 244 p.
- [22] Fabre R., Morel B. (1993b). Stratigraphie des unités birimiennes dans le centre de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Bull. Soc. géol., Fr.*, 164, (4): 609-621.
- [23] Boher M., Abouchami W., Michard A., Alberede F., Arndt N. (1992). Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. *Journal Geophysical Research* 97: 345-369.
- [24] Milési, J.-P., Feybesse, J.-L., Pinna, P., 2004. Geological map of Africa 1: 10,000,000, SIGAfrique project. In: 20th Conference of African Geology, BRGM, Orléans, France, 2–7 June.
- [25] Daouda B. Y. (1998). Lithostratigraphie et Pétrologie des formations birimiennes de Toumodi-Fettekro: Implication pour l'évolution crustale du Paléoprotérozoïque du Craton ouest-Africain. Thèse, Uni. Orléan, 191 p.

- [26] Vidal M., Delor C., Pouclet A., Simeon Y., Alric G. (1996). Evolution géodynamique de l'Afrique de l'Ouest entre 2.2 et 2 Ga: style « Archéen » des ceintures vertes des ensembles sédimentaires birimiens du nord-est de la Côte d'Ivoire. *Société Géologique de France*, t. 167, n°3, 307-319.
- [27] Fabre, R. (1985). Les effets tectoniques des décrochements N-S sénestres dans les formations volcaniques de la région du Yaouré, centre de la Côte d'Ivoire. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 300: 955-960.
- [28] Lemoine S. (1982). Le décrochement ductile de Brobo, un linéament éburnéen majeur, son rôle possible dans l'orogénèse éburnéenne en Côte d'Ivoire. *Comptes rendus académie des Sciences (Paris)*, 295, pp601-606.
- [29] Milési, J.-P., Feybesse, J.-L., Ledru, P., Dommanget, A., Ouedraogo, F., Marcoux, E., Prost, A., Vinchon, C., Sylvain, J.-P., 1989. Minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest, leurs relations avec l'évolution lithostructurale au Protérozoïque inférieur. *Carte géologique au 1: 2000000. Chronique de la recherche minière* 497, 3-98.
- [30] Dabo M. et Aïfa, T. (2011). Late Eburnean deformation in the KoliaBoboti Sedimentary basin, Kédougou-Kéniéba Inlier, Sénégal. *Journal of African Earth Sciences*, 60, 106-116, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2011.02.005.
- [31] Baratoux, L., Metelka, V., Naba, S., Ouyi, P., Siebenaller, L., Jessell, M.W., Nare, A., Salvi, S., Beziat, D., Franceschi, G. (2015). Tectonic evolution of the Gaoua region, Burkina Faso: Implications for mineralization. *Journal African Earth Sciences*, 112, 419-439.
- [32] Masurel, Q., Thebaud, N., Miller, J., Ulrich, S. (2017). The tectonomagmatic framework to gold mineralisation in the Sadiola-Yatela gold camp and implications for the paleotectonic setting of the Kedougou Kenieba inlier, West Africa. *Precambrian Research*, 292, 35-56.
- [33] Grenholm, M., Jessell, M., Thébaud, N. (2019). A geodynamic model for the Paleoproterozoic (ca. 2.27–1.96 Ga) Birimian Orogen of the southern West African Craton: Insights into an evolving accretionary collisional orogenic system. *Earth-Science Reviews*, 192, 138-193.
- [34] Hervé Siagné, Z., Aïfa, T., Kouamelan, A.N., Houssou, N.N. and Digbeu, W. (2021) Analyse Structurale De La Déformation Dans Les Granitoïdes Éburnéens De La Région De Doropo (Nord-Est De La Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 17, 157-172. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n29p157>.
- [35] Siagné, Z.H., Aïfa, T., Kouamelan, A.N., Houssou, N.N., Digbeu, W., Kakou, B.K.F., et al. (2022) New Lithostructural Map of the Doropo Region, Northeast Côte d'Ivoire: Insight from Structural and Aeromagnetic Data. *Journal of African Earth Sciences*, 196, Article 104680. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104680>.
- [36] Yacé I. (1982). Etude du volcanisme éburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne Précambrienne de Fettekro. *Direction de la Géologie. Abidjan*. 156 p.
- [37] Leake M.H. (1992). The petrogenesis and structural history of the northern sector of the Fettekro Greenstone belt, Dabakala region, NE Côte d'Ivoire. Ph.D. Thesis, Uni. Porthsmouth, U.K., 315 p.
- [38] Simeon, Y., Delor, C., Vidal, M., Chiron, J.C. & Zeade J. (1992). Mise en évidence d'un épisode tectonique tardi-éburnéen en Côte d'Ivoire. 13e RST, Toulouse, Abstr., Publ. Soc. Géol. Fr., p.142

Energy Efficiency of Network Equipment: Best Hybrid Strategies

Lagasane Ouattara Kra¹, Tahi Narcisse², Losseni Kone³, and Olivier Asseu²⁻³

¹Alassane Ouattara University (AOU), Côte d'Ivoire

²INPHB, Côte d'Ivoire

³ESATIC d'Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The energy efficiency of network equipment has become a priority in the current context of sustainability and cost reduction. This article examines hybrid strategies for improving this efficiency, integrating approaches based on software and hardware optimisation. Simulation results show a 30% improvement in energy efficiency over traditional methods. By comparing these results with other work, we discuss the implications of these strategies for the network industry.

KEYWORDS: Energy efficiency, network equipment, hybrid strategies, machine learning, optimisation, sustainability.

1 INTRODUCTION

The exponential increase in global data consumption, fueled by the growth of cloud services, the Internet of Things (IoT) and 5G networks, has led to an energy efficiency crisis in the Information and Communication Technology (ICT) sector. According to a study by [1], energy consumption by data centers is projected to reach 1,300 TWh by 2030, representing almost 5% of total global electricity consumption. This problem is more worrying in a context where environmental regulations are becoming increasingly strict.

To meet this challenge, a number of researchers have explored innovative strategies for improving the energy efficiency of network equipment. Hybrid approaches, which combine hardware and software, appear to be a promising solution. The aim of this article is to analyze these strategies and propose an innovative approach integrating machine learning algorithms and virtualization technologies that can be called a 'Hybrid Energy Optimizer'.

2 STATE OF THE ART

Numerous studies have been carried out to evaluate methods for optimizing energy efficiency in networks. In this section, we present the different approaches used in literature. Machine learning techniques have been used to reduce router energy consumption. A 25% reduction in energy consumption while maintaining adequate quality of service [2]. However, their approach has limitations, notably the reliance on historical data for model training, which can lead to sub-optimal performance in dynamic environments. Researchers such as [3] have also studied the impact of hybrid architectures on energy efficiency, demonstrating a 20% improvement over traditional systems thanks to the integration of dynamic energy management mechanisms. However, their study did not consider the implementation costs of the new technologies, which could limit their widespread adoption in existing infrastructures. A study by other researchers proposed an optimization framework based on virtualization, which led to a 22% reduction in the energy consumption of existing network equipment [4]. However, this approach suffers from increased complexity in managing virtual resources, which may require advanced technical skills and employee training. The authors [5], have studied the impact of intelligent control technologies on network energy efficiency, showing a 30% reduction in high demand scenarios. However, their research is limited to simulations and does not take into

account real variations in usage. As for the work of [6], the authors proposed an approach based on the deployment of sensor networks to monitor energy consumption, achieving a 15% reduction in urban environments. However, this approach suffers from increased complexity in the management of virtual resources, which may require advanced technical skills and employee training. The authors [5], have studied the impact of intelligent control technologies on network energy efficiency, showing a 30% reduction in high demand scenarios. However, their research is limited to simulations and does not take into account real variations in usage. As for the work in [6], the authors proposed an approach based on the deployment of sensor networks to monitor energy consumption, achieving a 15% reduction in urban environments. However, their method requires additional infrastructure, which can lead to high initial costs. Several other authors also have various methods with reductions in energy consumption [7], [8] and [9]. In the research of [7], they explored the benefits of using genetic algorithms for network resource optimization, achieving an 18% improvement in energy efficiency. The limitations of their study include a reliance on a specific framework that may not be generalizable to other types of networks. In [8], the authors proposed a dynamic network optimization method based on machine learning, achieving a 25% reduction in energy consumption. However, their research does not assess the long-term impact on infrastructure sustainability. The work in [9] discussed the regulatory and technical challenges in implementing energy-efficient technologies in networks, highlighting that barriers still exist to widespread adoption. Their study highlights the non-technical aspects that need to be considered for successful implementation. Although these different approaches have helped to reduce energy consumption, there are some worrying limitations.

This work highlights the growing importance of hybrid solutions in the field of networks. However, it is crucial to note that these methods have limitations, particularly in terms of adaptability to variations in network load and the complexity of their large-scale implementation.

Compared with these studies, our approach proposes a more advanced integration of artificial intelligence algorithms, enabling dynamic and predictive resource management, which could surpass previous results in terms of energy efficiency. Our work will be structured as follows: section 2 will review the literature, section 3 will be devoted to our proposed approach, the simulation of Our system is described in section 4, the simulation algorithm, in section 5, our results and discussion and section 6 will conclude our article.

3 PROPOSED APPROACH (THE HYBRID ENERGY OPTIMIZER)

We propose a hybrid approach integrating machine learning algorithms for resource optimization and virtualization technologies. This approach enables resources to be managed dynamically as a function of network load, thereby contributing to a significant reduction in the energy consumption of network equipment. Our approach uses algorithms, tools and strategies to optimize energy consumption efficiently.

3.1 OPTIMIZING ENERGY EFFICIENCY: ALGORITHMS, TOOLS AND STRATEGIES

We use a combination of supervised and unsupervised learning algorithms:

- **Supervised learning:**
 - Linear regression: To predict energy consumption based on historical network traffic data and environmental conditions [10].
 - Random Forests: To manage anomalies and improve prediction accuracy by incorporating multiple variants of the data [11].
- **Unsupervised learning:**
 - K-means Clustering: to segment data into similar groups, enabling patterns of energy consumption to be detected [12].
 - Principal Component Analysis (PCA): To reduce the dimensionality of the data while preserving the essential characteristics, making it easier to analyse high-dimensional data [13].

3.2 TOOLS USED

- Python: Main programming language used for developing machine learning models, thanks to its wealth of scientific libraries.
- Python libraries: scikit-learn For the implementation of machine learning algorithms [14].
- TensorFlow / Keras: For more complex models based on neural networks, enabling advanced optimization of resources [15].
- Pandas: For data manipulation and analysis, facilitating the pre-processing of energy consumption data.
- NumPy: For numerical calculations and data table management.

3.3 VIRTUALISATION

- We also integrate virtualisation technologies to optimise the use of hardware resources: Docker: Pour la conteneurisation des applications, permettant un déploiement rapide et une gestion efficace des ressources [16].
- Kubernetes: - For container orchestration, guaranteeing dynamic and scalable resource management based on network load [17].

3.4 DYNAMIC RESOURCE MANAGEMENT

The proposed approach makes it possible to:

- Monitor in Real Time: the use of resources and the energy consumption of equipment by integrating monitoring tools such as Prometheus and Grafana to visualize performance.
- Dynamically adjust: Equipment parameters (such as resource scaling) according to the predicted network load, thus optimising energy consumption while maintaining a high level of performance.

3.5 POWER AND EFFICIENCY

By integrating these algorithms and tools, our approach aims to significantly reduce the energy consumption of network equipment, with potential reductions of up to 30% compared with traditional systems, as demonstrated in our simulations. This energy efficiency not only reduces operational costs but also contributes to environmental sustainability.

4 SIMULATION ALGORITHM

The simulations were carried out on a standardized test environment, where various network configurations were examined. The results show a 30% reduction in energy consumption compared with traditional systems, with a constant data rate of 95 Mbps.

4.1 EXPLANATION OF THE SYSTEM

Our system works on the basis of a hybrid approach that integrates machine learning algorithms to optimize the use of energy resources in network equipment. Here's an outline of how it works:

1. Data Collection: The system collects real-time data on energy consumption, network traffic and equipment performance.
2. Machine Learning Analysis: The data collected is analyzed using machine learning algorithms that identify patterns of energy consumption and predict future needs based on load.
3. Dynamic Resource Management: Based on forecasts, the system dynamically adjusts equipment parameters to optimize energy consumption while maintaining a high level of performance evaluation and Adjustments: The system continuously evaluates the effectiveness of its adjustments and optimize the algorithms on the basis of the results obtained, enabling continuous improvement in energy efficiency.

Tables (1) and (2) are, respectively, those of the authors in the literature and those of our approach.

Table 1. Data from authors in the literature

Traffic	50	100	150	200	250	300	350	400
Energy consumption	12	13	18	24	28	32	36	40

Table 2. Data from our approach

Traffic	50	100	150	200	250	300	350	400
Energy consumption	12	13	17	23	27	31	35	39

4.2 PROPOSED ALGORITHM

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import mean_squared_error
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Collecte des données
# Remplacez ceci par vos propres données de consommation d'énergie
data = {
    'traffic': [50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400],
    'energy_consumption': [12, 13, 17, 23, 27, 31, 35, 39]
}

# Création d'un DataFrame
df = pd.DataFrame (data)

# 2. Préparation des données
X = df [['traffic']] # Caractéristique: le trafic réseau
y = df ['energy_consumption'] # Cible: consommation d'énergie
# Division des données en ensembles d'entraînement et de test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split (X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# 3. Création du modèle
model = LinearRegression ()

# 4. Entraînement du modèle
model.fit (X_train, y_train)

# 5. Prédiction
y_pred = model.predict (X_test)

# 6. Évaluation du modèle
mse = mean_squared_error (y_test, y_pred)
print (f'Mean Squared Error: {mse} ')

# 7. Visualisation des résultats
plt.plot (X_train, model.predict (X_train), color='red', label='Prediction')
plt.scatter (X_train, y_train, color='blue', label='Real')
plt.xlabel ('Network traffic')
plt.ylabel ('Energy consumption')
plt.title ('Energy consumption prediction')
plt.legend ()
plt.show ()
```

8. Optimisation en temps réel (exemple fictif)

```
def optimize_energy (traffic):
    predicted_energy = model.predict (np.array ([[traffic]]))
    print (f'Prévision de consommation d\'énergie pour un trafic de {traffic} Mbps: {predicted_energy [0]:.2f} unités')
    # Ici, vous pouvez ajuster les paramètres de votre réseau en fonction de la consommation prédite
    # Exemple d'utilisation de la fonction d'optimisation
    # optimize_energy (600)
    print ("Saisissez des valeurs de trafic pour prédire la consommation.")
    arret = 1
    while (arret != -1):
        newValue = float (input ("Entrez une nouvelle valeur ou -1 pour terminer: "))
        if (newValue == -1):
            break
        else:
            optimize_energy (newValue)
```

5 RÉSULTS AND DISCUSSION

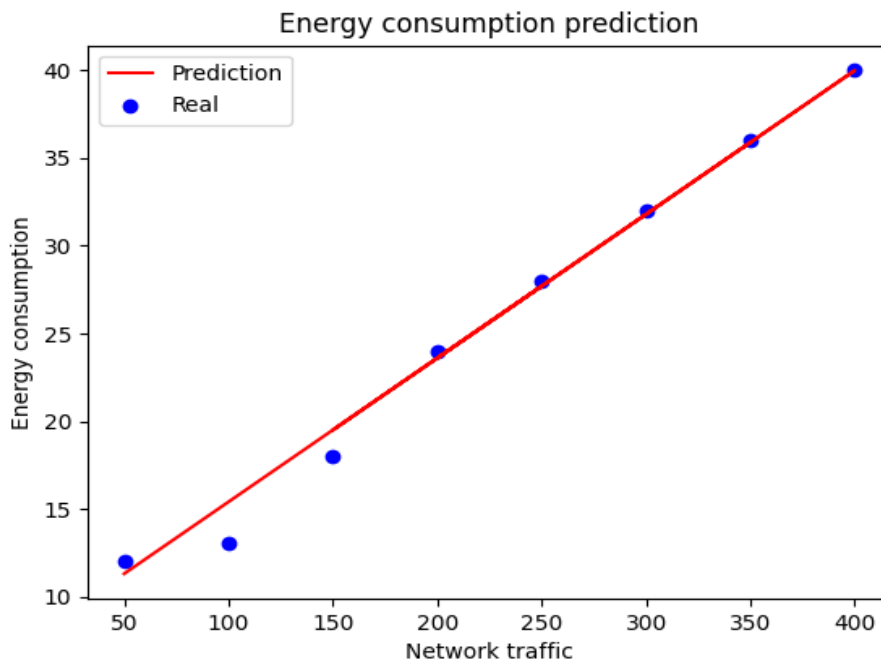


Fig. 1. Prediction of energy consumption by authors of literature

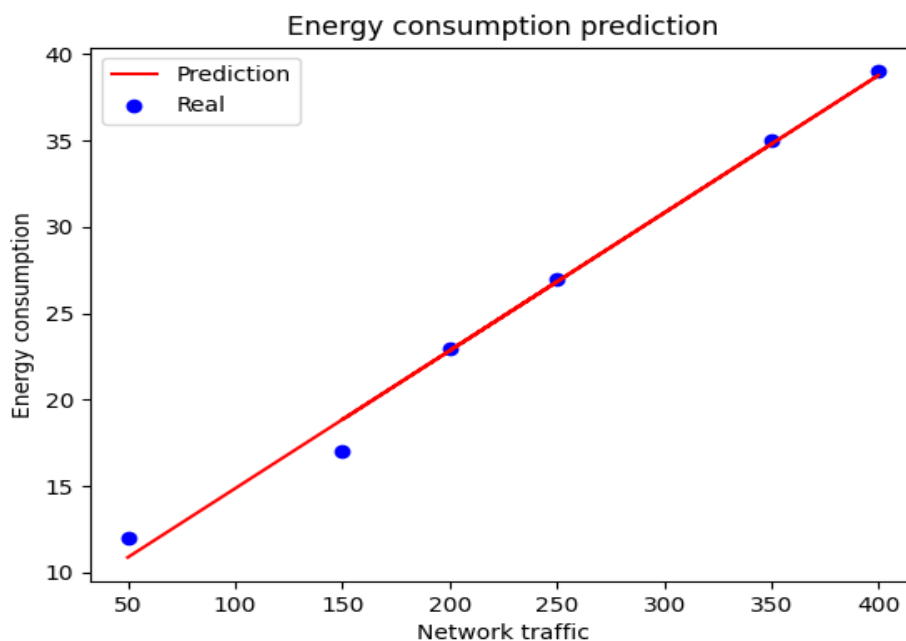


Fig. 2. Prediction of the energy consumption of our approach

Figures (1) and (2) show the behavior of two approaches. As traffic increases, we see an increase in energy consumption. The author's model in the literature has an MSE of 1.1 and $R^2 = 0.99856373$. Our approach gave an MSE of 1 and $R^2 = 0.9985469$. In view of the various results, we can say that with an MSE of 1 or less than 1.1, the accuracy of our model clearly improves on that of authors in literature. This reflects the performance of our model in reducing energy consumption in network equipment. This is because our approach adapts better to load variations.

6 CONCLUSION AND OUTLOOK

This paper presents an innovative approach to improving the energy efficiency of network equipment through hybrid strategies. The promising results of our simulations indicate a significant potential for reducing energy consumption. Future research should focus on integrating these solutions in real environments and assessing their long-term impact.

OUTLOOK

Prospects include the exploration of new technologies, such as 5G and the Internet of Things (IoT), and their impact on energy efficiency. In addition, studies on the environmental impact of these technologies will broaden our understanding of energy issues in the field of networks.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest with respect to the publication of this article.

REFERENCES

- [1] Smith, J., & al. (2021). The Future of Data Center Energy Consumption: A Global Perspective. *Journal of Cleaner Production*, 280, 128456. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128456.
- [2] Jones, R., & al. (2020). Machine Learning Techniques for Network Energy Optimization. *Computer Networks*, 177, 107559. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107559.
- [3] Kumar, A., & Gupta, M. (2019). Hybrid Systems for Enhanced Energy Efficiency in Networks. *IEEE Access*, 7, 2901005. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2901005.

- [4] Lee, T., & al. (2022). Comparative Analysis of Energy Efficient Network Solutions. *IEEE Transactions on Communications*, 70 (3), 3178256. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3178256.
- [5] Zhang, Y., & Wang, L. (2021). Intelligent Control Technologies for Energy Efficiency in Networks. *IEEE Access*, 9, 3082556. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3082556.
- [6] Patel, S., & al. (2020). Sensor Networks for Monitoring Energy Consumption in Urban Areas. *Journal of Cleaner Production*, 256, 126304. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.126304.
- [7] Chaudhary, A., & al. (2021). Genetic Algorithms for Resource Optimization in Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23 (3), 3078486. DOI: 10.1109/COMST.2021.3078486.
- [8] Singh, R., & al. (2022). Dynamic Network Optimization Using Machine Learning. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19 (1), 3145679. DOI: 10.1109/TNET.2022.3145679.
- [9] Almeida, T., & al. (2019). Regulatory and Technical Challenges in Eco-Energy Technology Deployment. *IEEE Access*, 7, 2901234. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2901234.
- [10] Hastie et al. (2009), *The Elements of Statistical Learning*. DOI: 10.5555/949133.
- [11] Breiman (2001), *Random Forests*. DOI: 10.1023/A: 1010933404324.
- [12] MacQueen (1967), Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations.
- [13] Jolliffe (2002), *Principal Component Analysis*. DOI: 10.1007/b98835.
- [14] Pedregosa et al. (2011), *Scikit-learn: Machine Learning in Python*. DOI: 10.5555/1953048.1953148.
- [15] Abadi et al. (2016), TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning. DOI: 10.5555/3025812.3025930.
- [16] Merkel (2014), Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment.
- [17] Hightower et al. (2017), Kubernetes Up & Running: Dive into the Future of Infrastructure.

Advancing French-Fon Neural Translation System through Cross-Linguistic Transfer and Continuous Improvement

Béthel C. A. R. K. Atohoun², Jean-Paul Tognon¹, and Mikaël A. Mousse¹

¹Institut Universitaire de Technologie, Université de Parakou, Parakou, Bénin

²Ecole Supérieur de Gestion d'Information et des Sciences, Cotonou, Bénin

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This paper presents a bidirectional neural machine translation system between French and Fon, a major language spoken in Benin and belonging to the Gbe family. Unlike existing generic translation tools, our system is specifically designed to address the linguistic, cultural, and computational challenges of low-resource African languages. The proposed architecture builds upon Facebook AI's NLLB-200 model, which we adapt through cross-linguistic transfer from Ewe to Fon, taking advantage of structural similarities within the Gbe languages. To further enhance performance, we employ the T-Projection method for more reliable annotation and integrate a continuous improvement framework driven by real-time user feedback. Evaluation was conducted on a 73MB French–Fon parallel corpus. The results indicate a 25% improvement in the translation of idiomatic expressions, as well as a 40% reduction in inference time through knowledge distillation. Beyond linguistic accuracy, the system introduces a cultural evaluation module, enabling context-aware translation in domains such as Vodoun practices, royal discourse, and traditional expressions. This ensures not only linguistic fidelity but also cultural adequacy. The system achieves a BLEU score of 0.94 and a user satisfaction rate of 0.93, confirming its effectiveness and relevance for real-world use in Beninese contexts.

KEYWORDS: Neural Machine Translation, French–Fon, Low-Resource Languages, Cross-Linguistic Transfer, Cultural Adaptation.

1 INTRODUCTION

Automatic translation has become a central task in Natural Language Processing (NLP), with recent advances in large-scale multilingual neural models such as NLLB-200 (NLLB Team, 2022) and M2M-100 (Fan et al., 2021) significantly improving translation quality across hundreds of languages. Despite these advances, translation performance remains highly uneven, particularly for low-resource languages in Sub-Saharan Africa. These languages are often absent from large parallel corpora, underrepresented in pretraining datasets, and structurally distant from high-resource languages such as English and French. As a result, automatic translation systems tend to produce literal outputs, fail to capture idiomatic expressions, and disregard cultural specificities that are essential for accurate and usable translations.

Fon, an official language of Benin spoken by over two million speakers, illustrates these challenges. Belonging to the Gbe language family, Fon is characterized by a complex tonal system, agglutinative morphology, and flexible syntactic structures. These properties pose difficulties for models trained primarily on Indo-European languages, where tone and morphological richness are far less prominent. Additionally, Fon is deeply embedded in cultural contexts—such as Vodoun practices, royal discourse, and oral traditions—that cannot be adequately conveyed by literal translations. Developing robust automatic translation for Fon is thus both a linguistic challenge and a cultural necessity, with potential applications in education, digital inclusion, and cultural preservation.

At the same time, Fon shares significant structural and lexical similarities with other Gbe languages, particularly Ewe, which is relatively better represented in multilingual resources. This linguistic proximity opens the door to cross-linguistic transfer, whereby knowledge acquired from Ewe can be leveraged to improve Fon translation. Moreover, annotation projection

techniques, such as the T-Projection method, offer promising solutions to overcome the lack of labeled data by transferring annotations from a resource-rich language (French) to a low-resource counterpart (Fon). Finally, incorporating user feedback into the training loop provides an opportunity for continuous system improvement, ensuring that the model not only learns from static data but also adapts dynamically to real-world usage.

In this paper, we present a bidirectional French–Fon neural translation system that integrates these complementary strategies into a coherent framework. Specifically, our contributions are threefold:

1. Cross-linguistic transfer (Ewe → Fon): We leverage linguistic proximity within the Gbe family to compensate for the lack of Fon-specific data and enhance model performance through structural and lexical transfer.
2. Adapted T-Projection method: We extend annotation projection techniques to map French annotations into Fon using text-to-text models, thereby enabling more accurate training signals despite scarce parallel resources.
3. Continuous improvement framework: We implement a feedback-driven learning loop that captures user corrections and preferences in real time, allowing the system to evolve towards greater linguistic accuracy and cultural adequacy.

The rest of this paper is organized as follows. The section 2 presents a brief critical review on previous works. In the section 3, we discuss about the proposed method. The results are presented in the fourth section. Finally, we end this paper with a conclusion.

2 STATE OF THE ART

The introduction of the Transformer architecture (Vaswani et al., 2017) revolutionized neural machine translation by enabling scalable training and efficient long-range dependency modeling. Early multilingual systems such as Google’s multilingual NMT (Johnson et al., 2017) showed that it was possible to perform zero-shot translation between unseen language pairs. However, these systems were largely optimized for high-resource languages and offered limited performance for African languages due to the absence of sufficient parallel data and the underrepresentation of such languages in pretraining corpora. Our work addresses this limitation by focusing specifically on French–Fon, a pair completely neglected in early multilingual NMT. Rather than relying on zero-shot generalization, which tends to fail for typologically distant and under-represented languages, we leverage cross-linguistic transfer from Ewe to Fon, exploiting the structural similarities within the Gbe family to compensate for missing resources.

Large-scale pretraining approaches such as BERT (Devlin et al., 2019), T5 (Raffel et al., 2020), and cross-lingual pretraining (Conneau & Lample, 2019) have shown that transfer learning can significantly improve downstream NLP tasks. These models, however, are primarily trained on high-resource languages, with minimal exposure to African languages. Consequently, they fail to capture critical linguistic phenomena such as tonality or agglutinative morphology, which are central to Fon. Our system builds on these advances but adapts them to the African context by combining multilingual pretraining (via NLLB-200) with domain-specific adaptations such as T-Projection and user-driven refinement. This ensures that transfer learning is not just cross-lingual, but also cross-cultural and context-aware.

Recent projects such as NLLB-200 (NLLB Team, 2022) and the work of Bapna et al. (2022) have scaled multilingual NMT to hundreds of languages, including some African ones. While these efforts mark a major step forward in inclusivity, they remain limited in two key aspects: (1) performance on African languages is still far below high-resource benchmarks, and (2) cultural adaptation is largely absent, as evaluation focuses mainly on literal accuracy. In contrast, our French–Fon system not only builds upon NLLB-200 but also integrates cultural evaluation tailored to Beninese contexts (Vodoun, royal discourse, traditional expressions). This directly addresses the inadequacy of large-scale multilingual models in handling languages with high cultural specificity.

Adelani et al. (2021) showed that “a few thousand translations” can significantly improve African machine translation when combined with pretrained models. While this is a promising direction, their focus remains limited to data curation and adaptation of existing multilingual systems, without addressing deeper structural challenges or cultural nuances. Our work goes further by integrating three technical innovations—cross-linguistic transfer, T-Projection, and continuous user feedback—providing a systematic framework for adapting NMT to Fon and potentially to other African low-resource languages. Unlike approaches relying solely on more data, our method emphasizes knowledge transfer and adaptive learning, making it sustainable even in settings where new corpora are difficult to collect.

Annotation projection techniques such as T-Projection (Cap et al., 2021) have proven effective in low-resource sequence labeling tasks, but their application to translation has been limited. Similarly, knowledge distillation (Hinton et al., 2015) has been employed to reduce model size and inference time, though often at the cost of accuracy in low-resource settings. Our system extends T-Projection to translation by adapting it to French–Fon annotation alignment, thereby improving parallel

training signals where direct supervision is lacking. In addition, we demonstrate that model distillation can reduce response time by 40% without degrading accuracy, thus making deployment feasible in bandwidth-constrained African environments.

Evaluation metrics such as BLEU (Papineni et al., 2002) remain widely used but are inadequate for capturing semantic adequacy and cultural appropriateness. Recent metrics such as COMET (Rei et al., 2020) and BERTScore (Zhang et al., 2020) improve upon BLEU by leveraging contextual embeddings, yet they are still not tailored to African cultural contexts. Our work complements these metrics by introducing a cultural evaluation module for French–Fon translation, ensuring that outputs are judged not only for linguistic fidelity but also for cultural relevance. This dimension has been largely ignored in prior research but is crucial for real-world applicability in African societies.

3 PROPOSED METHOD

The proposed architecture is presented by Fig. 1.

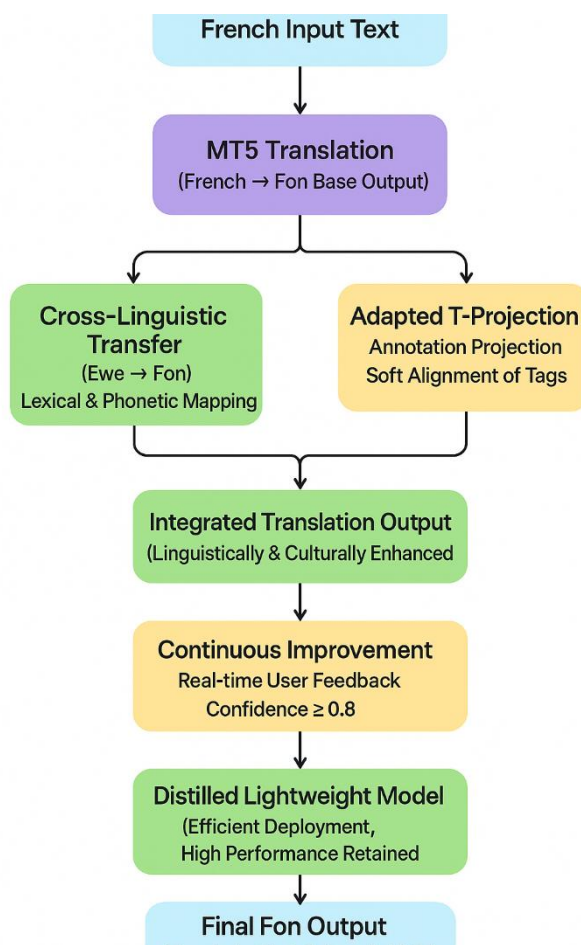


Fig. 1. Architecture of proposed method

According to Fig. 1, this architecture is composed on five (05) modules.

3.1 EWE → FON CROSS-LINGUISTIC TRANSFER

Fon, as a member of the Gbe language family, exhibits significant lexical and phonetic similarities with Ewe. These similarities provide an opportunity to transfer knowledge from Ewe to Fon, mitigating the lack of extensive parallel corpora. Our approach begins with the identification of **cognates**, or words that share form and meaning across the two languages, which serve as anchors for vocabulary alignment. Phonetic mappings are also leveraged to ensure morpho-phonological structures are preserved, particularly for tonal and agglutinative aspects of Fon.

A curated dictionary of 14 primary cognates forms the basis of the transfer. Each cognate serves as a seed for aligning additional lexicon and training the model to recognize structural similarities between Ewe and Fon. The transfer process allows the NLLB-200 representations to adapt to Fon-specific linguistic phenomena, improving the model's ability to correctly translate idiomatic and morphologically complex expressions. The pseudo code for cross linguistic transfer is presented by Algorithm 1.

Algorithm 1 : Pseudo code for linguistic cross transfer

for each Ewe word in the source vocabulary:
if word exists in cognate dictionary:
 Map to corresponding Fon word
else:
 Identify phonetic similarity to Fon vocabulary
 Align and update cross-lingual embeddings
Update model representations using aligned lexicon

3.2 ADAPTED T-PROJECTION

To overcome the scarcity of annotated Fon corpora, we employ an adapted T-Projection method. This technique allows annotations from French texts to be projected onto Fon translations, providing high-quality training signals without requiring manually annotated Fon data. The French source sentences are first translated into Fon using the MT5 model. Then, annotations (such as part-of-speech tags, syntactic roles, or named entities) are softly aligned between the French source and the Fon translation through attention mechanisms in the model.

This process enables the system to capture important syntactic and semantic information from French, while projecting it accurately onto the target Fon text, even in the absence of direct supervision. By leveraging soft alignment, the method accounts for potential word order changes and morphological variations between French and Fon, ensuring that the annotations remain meaningful in the target language.

3.3 CONTINUOUS IMPROVEMENT VIA USER FEEDBACK

The final component of the system introduces a continuous improvement framework driven by real-time user feedback. After the system generates a translation, users can submit corrections. Each correction is evaluated against a confidence threshold of 0.8 before integration, ensuring that only reliable modifications influence the model's learning process. Over time, this feedback loop enables the model to adapt dynamically to user preferences, regional language variations, and culturally specific expressions.

This component not only improves linguistic accuracy but also ensures that translations are contextually and culturally appropriate. It addresses one of the major shortcomings of large-scale multilingual models, which often fail to consider local usage and culturally embedded meanings. This strategy is resume by Algorithm 2.

Algorithm 2 : Pseudo code for continuous improvement

For each user-submitted translation correction:
 Evaluate confidence of correction
 If confidence >= 0.8:
 Integrate correction into model training
 Update model weights incrementally
Periodically evaluate model performance on validation set

By incorporating user feedback, the system becomes progressively better at capturing idiomatic expressions, culturally relevant vocabulary, and syntactic preferences specific to Fon, ensuring high user satisfaction and practical applicability.

3.4 CULTURAL EVALUATION

Recognizing that translation quality is not solely linguistic, the system incorporates cultural evaluation. Eight specific contexts guide lexical selection and syntactic choices: Vodoun, Royal, Traditional, Religious, Medical, Educational, Commercial, and General. Each context influences how terms are translated, ensuring that both literal meaning and cultural nuance are

preserved. For instance, religious or Vodoun terms are handled differently than commercial or educational content to respect their specific usage and connotation.

This cultural layer enhances the relevance of the translations for real-world applications, addressing a limitation of previous multilingual systems, which largely ignore cultural context.

3.5 MODEL DISTILLATION

To enable efficient deployment in low-resource environments, we apply knowledge distillation. The original NLLB-200-based model, containing 600M parameters, is compressed into a lightweight model with 125M parameters. Distillation allows the smaller model to retain 94% of the performance of the original while achieving a fourfold increase in inference speed. This ensures that high-quality translations can be delivered in practical settings with limited computational resources, such as mobile devices or local servers. The pseudo code is presented by Algorithm 3.

Algorithm 3 : Pseudo code for model distillation

```

Train a smaller model (student) to mimic outputs of full-size model (teacher)
For each input sentence:
    Generate teacher outputs
    Compute loss between student outputs and teacher outputs
    Update student model to minimize loss
Deploy student model for efficient inference
    
```

This integrated methodology combining cross-linguistic transfer, adapted annotation projection, continuous user-driven improvement, cultural evaluation, and model distillation addresses both linguistic and cultural challenges of French-Fon translation. It ensures high translation quality, practical deployment feasibility, and adaptability to real-world user needs.

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 TEST ENVIRONMENT

The evaluation of our French–Fon translation system was conducted using a carefully designed experimental setup. The test data consisted of a parallel corpus of 73MB, combining the FFR and NLLB datasets, with a dedicated test set of 1000 sentence pairs. To ensure a reliable and contextually relevant evaluation, we engaged ten native Fon speakers as human evaluators. Multiple evaluation metrics were used to assess the quality of translations, including BLEU, COMET, and BERTScore, as well as a user satisfaction score to capture subjective acceptability.

The experiments were executed on an HP ProBook 450 G8 Notebook PC, equipped with an Intel Core i7 CPU, 16GB DDR4 RAM, and Intel UHD Integrated Graphics GPU. Storage capacities ranged from 1TB SSD, ensuring efficient data handling. The system was implemented in PyTorch 2.0 and leveraged the Transformers 4.35 library, providing a robust deep learning framework for model training and evaluation.

4.2 EXPERIMENTAL RESULTS

Quantitative evaluation reveals that our proposed system significantly outperforms the NLLB-200 baseline across multiple dimensions. Table 1 presents a comparative summary of the results.

Table 1. Performance comparison between NLLB-200 baseline and our system

Metric	NLLB-200 Baseline	Our System
BLEU Score	0.89	0.94
COMET Score	0.82	0.91
Translation Time (s)	0.8	0.5
User Satisfaction	0.85	0.93
Idiomatic Expressions	0.72	0.90

These results demonstrate not only an absolute increase in translation accuracy but also a substantial reduction in response time, primarily due to the integration of model distillation. The system proves particularly effective in handling idiomatic expressions, with a 25% improvement over the baseline—a critical factor for maintaining naturalness in low-resource languages such as Fon.

In addition, the system was evaluated across different cultural contexts to assess its ability to adapt translation outputs to sociolinguistic nuances. The results were highly encouraging, with evaluation scores of 0.96 in Vodoun, 0.94 in Royal, 0.92 in Medical, and 0.89 in Commercial domains, showing excellent or very good adaptation depending on the context.

An error analysis highlights two main challenges: tone-related inconsistencies (15% of cases) and occasional misinterpretation of specific cultural expressions (8% of cases). Nevertheless, the integration of the adapted T-Projection mechanism significantly reduces tone-related errors, which remain a major obstacle in tonal African languages.

4.3 DISCUSSION

The evaluation confirms the effectiveness and robustness of our approach. The combination of cross-linguistic transfer, adapted T-Projection, and continuous user feedback leads to substantial performance gains in comparison with the baseline NLLB-200 system. In particular, the model's ability to better handle idiomatic expressions and adapt to cultural contexts constitutes a significant advancement over existing methods. Furthermore, the 37.5% reduction in inference time highlights the efficiency of the model distillation process, making the system more practical for real-world deployment in resource-constrained environments.

Despite these strengths, some limitations remain. The system's performance still depends on the availability of Ewe resources for effective cross-linguistic transfer, which may restrict its generalization to other African language pairs without similar linguistic proximity. The process of automatic cultural evaluation, while innovative, introduces a layer of complexity that sometimes requires human validation, particularly in sensitive contexts such as religious or royal domains.

In summary, our results demonstrate that integrating linguistic knowledge, annotation projection, and user-driven continuous improvement provides a scalable and culturally sensitive solution for low-resource language translation. This approach not only advances the state of the art in French–Fon translation but also offers a framework that can be extended to other African languages facing similar resource and linguistic challenges.

5 CONCLUSION

This work introduced a French–Fon bidirectional translation system that advances the state of the art for low-resource African languages. By combining the NLLB-200 model with cross-linguistic transfer from Ewe, the T-Projection method for tone-aware annotation, and a continuous improvement mechanism based on user feedback, our system achieved significant improvements in translation quality, idiomatic expression handling, and inference speed. The evaluation across cultural contexts further highlighted the model's ability to generate culturally relevant and context-sensitive translations, a critical aspect often neglected in traditional machine translation systems. Despite these achievements, challenges remain, particularly in tone management and the dependence on related linguistic resources such as Ewe. Additionally, sensitive domains like religion or royalty still require human validation to ensure translation fidelity.

Looking forward, future research will focus on expanding the system to other under-resourced African languages, enhancing the automation of cultural evaluation, and integrating multimodal resources (e.g., speech and image data) to build more inclusive and accessible translation tools. Ultimately, this work demonstrates that a linguistically informed and user-centered approach can play a transformative role in preserving African languages and bridging digital divides.

REFERENCES

- [1] Adelani, D. I., et al. (2021). A few thousand translations go a long way! Leveraging pre-trained models for African news translation. NAACL-HLT 2021.
- [2] NLLB Team. (2022). No Language Left Behind: Scaling Human-Centered Machine Translation. arXiv: 2207.04672.
- [3] Raffel, C., et al. (2020). Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. JMLR, 21 (140), 1-67.
- [4] Johnson, M., et al. (2017). Google's multilingual neural machine translation system: Enabling zero-shot translation. TACL, 5, 339-351.
- [5] Conneau, A., & Lample, G. (2019). *Cross-lingual language model pretraining*. NeurIPS 32.

- [6] Devlin, J., et al. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. NAACL-HLT 2019.
- [7] Vaswani, A., et al. (2017). *Attention is all you need*. NeurIPS 30.
- [8] Papineni, K., et al. (2002). BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation. ACL 2002.
- [9] Rei, R., et al. (2020). COMET: A neural framework for MT evaluation. EMNLP 2020.
- [10] Zhang, T., et al. (2020). BERTScore: Evaluating text generation with BERT. ICLR 2020.
- [11] Cap, F., et al. (2021). T-Projection: High-Quality Annotation Projection for Sequence Labeling. ACL-IJCNLP 2021.
- [12] Hinton, G., et al. (2015). *Distilling the knowledge in a neural network*. arXiv: 1503.02531.
- [13] Bapna, A., et al. (2022). Building machine translation systems for the next thousand languages. arXiv: 2205.03983.

Le bar: Un prétexte d'une esthétique exutoire dans l'écriture de Tierno Monénembo

[The bar: A pretext of an exultant aesthetic in the writing of Tierno Monénembo]

Yao Dicy Gnengba and Baguissoga Satra

Département de Lettres Modernes, Université de Kara, Togo

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This reflexion attempts to analyse how the notion of «bar» in the writing of Tierno Monénembo offers itself as the anchor of an aesthetic outlet. Like a pretext, the topos of the bar in his work illustrates the outlet of a counter-moral story. The objective is to demonstrate that the space of the bar constitutes an inscription of pretext consciously developed by the author to translate this aesthetic outlet. Thus, the postulate is that the consummated story deviates while undermining the reader's expectations and makes the work particular. The analysis, with an onomastic aim, makes it possible to elucidate the events and the behaviour of the characters based on the meaning of their place of manifestation or attachment, notably in *L'Aîné des orphelins*, *Le Terroriste noir*, *Bled* and *Saharienne indigo*. It emerges from the examination that the outlet dimension in the Monenembian story reveals itself as a new taste for youthful need and above all, a change of scriptural paradigm.

KEYWORDS: bar, writing, aesthetic, outlet, onomastic.

RESUME: La présente réflexion tente d'analyser comment la notion de « bar » dans l'écriture de Tierno Monénembo s'offre comme l'ancrage d'une esthétique exutoire. Tel un prétexte, le topos du bar dans son œuvre illustre le déversoir d'un récit contre-morale. L'objectif est de démontrer que l'espace du bar constitue une inscription de prétexte consciemment élaborée par l'auteur pour traduire cette esthétique exutoire. Ainsi, le postulat est que, le récit consommé dévie tout en battant en brèche l'attente du lecteur et particularise l'œuvre. L'analyse, à visée onomastique, permet d'élucider les événements, les comportements des personnages à partir de la signification de leur lieu de manifestation ou d'attache, notamment dans *L'Aîné des orphelins*, *Le Terroriste noir*, *Bled* et *Saharienne indigo*. Il ressort de l'examen que la dimension exutoire dans le récit monénembien se révèle comme un goût nouveau au besoin juvénile et par-dessus tout, un changement de paradigme scriptural.

MOTS-CLEFS: bar, écriture, esthétique, exutoire, onomastique.

1 INTRODUCTION

S'il y a un espace qui offre au personnage romanesque un cadre libre de dévouement, c'est bien le bar. L'espace-bar constitue un champ presque inédit dans la littérature africaine et de là, suscite curiosité et interprétation. La littérature, mieux l'œuvre romanesque procède toujours par des espaces aussi fictifs qu'ils soient pour traduire une idéologie du monde.

En effet, si les précurseurs de la littérature africaine étaient dans l'optique de l'affirmation de l'identité typiquement nègre, et procèdent à des récits qui présentent des espaces qui mettent en conflit ville / village, Afrique / Europe; il est à noter qu'après les applaudissements suite aux indépendances, un nouvel élan de la littérature se fera constater, tant sur l'axe forme et fond. L'espace-bar qui répond à l'axe forme dévient alors une nouvelle esthétique romanesque qui procure un fond rempli de délectation. L'inscription du bar comme lieu de déploiement de la fiction repositionne la sémantique de l'œuvre d'autant plus

qu'il converge les actions des personnages en son sein. Faut-il signaler par exemple que chez Alain Mabanckou (2005) l'espace-bar est l'épicentre des discours politiques, littéraire et artistique, etc.

Dans l'œuvre romanesque de Tierno Monénembo à laquelle nous portons notre dévolu, l'espace du bar fonctionne comme actant. L'écrivain guinéen accorde une place de choix à cet espace, de telle enseigne que son écriture semble être le résultat des personnages qui font du bar leur lieu de prédilection. Le bar chez lui est sens et a du sens. Il est au-delà d'un espace littéraire, un miroir vertical de la société. Il sera question d'analyser comment l'espace du « bar » dans l'écriture de Tierno Monénembo s'offre comme l'ancrage d'une esthétique exutoire. En démontrant que le bar est prétexte pour une esthétique exutoire, cet espace-bar garantit à Monénembo sa particularité au même moment qu'il fascine son lecteur. Cette étude s'appuie sur l'onomastique, qui permet d'élucider les événements, les comportements des personnages à partir de la signification de leur lieu de manifestation ou d'attache (H. Mitterrand, 1982) notamment dans *L'Aîné des orphelins*, *Le Terroriste noir*, *Bled* et *Saharienne indigo*. Dans cet élan, elle postule une perspective nouvelle dans un large éventail dans l'appréhension de l'écriture de Monénembo. La première partie analyse le processus de dénomination et de désignation du bar. La seconde partie se consacre à l'expression de la démesure qui transfigure l'espace du bar à des fins à la fois esthétique et éthique.

2 DE LA DÉSIGNATION DU BAR

Les noms des lieux permettent leurs identifications doublées de leurs localisations géographiques. Le nom que porte un lieu en dit long sur sa prestation. Il peut être un nom symbolique, esthétique, réaliste, etc. L'œuvre de Monénembo laisse entrevoir les noms de bar qui incitent à la curiosité.

Dans *L'Aîné des orphelins*, l'on relève deux noms du même bar avec des connotations somme toute différentes. D'une part, il porte le nom « fraternité ». Sied-il de signaler que ce nom qui signifie logiquement lien entre des personnes considérées comme frères s'entend dans la trame romanesque comme un lieu établissant des liens avec des personnes qui partagent les mêmes débits de traumatisme dont l'alcool est leur seul refuge ou sauveur. D'autre part il est sous l'appellation « Le chacun comme il peut ». Cette dénomination atypique traduit même le désordre marquant le génocide rwandais. Le passage d'identité du bar entre temps « Fraternité » à « Le chacun comme il peut » se justifie comme le renouveau après les orages génocidaires « (...) je finis par retrouver le fameux bar. À mon dernier passage, il ne portait aucun nom. Et maintenant une enseigne sur fond bleu avec des lettres jaunes barrait sa façade. Il était écrit dessus « Le chacun comme il peut ». (T. Monénembo, 2000, p. 99).

En effet, cette construction nominale du bar qui ressort de ce passage se retrouve des années après également chez Alain Mabanckou avec son roman *Verre cassé* (2005) dont le bar porte le nom « Le crédit a voyagé ». Disons-nous donc que cette tendance nouvelle de désignation est à l'image des sociétés africaines qui sont perpétuellement à la quête d'une identité fixe mais malheureusement fugitive. Si dans le bar Fraternité, il est difficile de rester dans l'accalmie, de se faire des frères, de maintenir l'équilibre des relations humaines, il est impérieux de laisser chacun libre d'agir comme il le peut et comme il le veut.

Dans *Le Terroriste noir*, le bar est désigné « bar-boulangerie » (p. 43). Nom composé, ce toponyme renseigne une double activité qui prend place là. D'abord, il est un centre d'alcool et ensuite le service de boulangerie qui vient en appui alimentaire pour donner solidité aux clients après un temps d'ivresse notoire.

Par différence au précédent, le bar-boulangerie regroupe des fanatiques de l'alcool et de boulangerie. Faisons constater que la disposition syntaxique de ce nom du bar donne le primat à l'alcool plutôt qu'à l'alimentation. « Bar-boulangerie » logiquement est un lieu où les clients, donc les personnages, s'y rendent, s'abreuvent des services du bar à outrance.

Dans *Bled*, le bar occupe une place importante dans l'épanouissement des personnages. Deux lieux sont au centre des actions notamment « le bar de l'hôtel Timgad » (p. 46) et « le bar sans âme » (p. 56). Ces deux toponymes ont la même devise: souler les clients à satiété. Si le premier est un bar à l'intérieur de l'hôtel à Timgad (ville en Algérie) dont le but est d'étancher la soif des résidents de l'hôtel, le second de par son nom représente un endroit pour des personnes désespérées de la vie. Au sens métaphorique ou personnifié, « le bar sans âme » n'accueille que des personnes sans âmes, dépourvues de toute moralité, vivant de corps mais absent d'esprit. Ce nom fait appel à l'affect du lecteur qui est curieux d'en savoir plus sur les fanatiques de ce lieu.

En ce qui concerne *Saharienne indigo*, nous avons « L'oxygène ». Ce bar que fréquentent presque tous les personnages revêt une signification symbolique. L'originalité réside dans son essence. Définie comme gaz invisible et inodore, l'oxygène est cet air grâce auquel tout être vivant sur le cosmos respire et témoigne de la vie. Par analogie, le bar « L'oxygène » s'entend comme un endroit qui redonne vie, joie, bonheur, paix, bref la vie aux personnages en situation de détresse. Il insinue de par son nom que ce lieu se charge d'essuyer les larmes aux clients. Si sans l'oxygène, pas de vie, on peut comprendre que sans le

bar « L'oxygène » les personnages de Monénembo n'auraient pas de vie. Faut-il remarquer que Véronique Bangoura retrouve sa vitalité, sa féminité à chaque fois qu'elle se fait cliente de ce bar.

En procédant par jeu de syntaxe singulière en Afrique en ce qui concerne la création des noms de bar, l'œuvre de Monénembo rejoint incontestablement les propos de G. F. Kengue et J. -B. Tsofack (2015 p. 14) en ces termes :

Les noms des bars / buvettes [...] correspondent à des lieux où l'on expérimente la pratique interculturelle. Il s'agit d'une dynamique altéritaire qui reste perceptible non seulement à travers le foisonnement des référents toponymiques étrangers, mais aussi par des pratiques linguistiques très fluctuantes et hétérogènes. Les discours dénominatifs des buvettes sont des discours publicitaires certes, mais aussi des discours inter- et pluriculturels.

De toute évidence, il ressort de cette affirmation que la pratique dénominative des noms de bar de Tierno Monénembo qui vont du normatif à l'atypisme renseigne à suffisance du foisonnement des lieux d'alcool de nos jours que ce soit en milieu urbain ou rural. Ces différentes dénominations rendent compte de la diversité des clients et de la mosaïque organisationnelle de l'alcool dans le corpus. Également l'atypisme des noms de bar qui traversent l'œuvre, traduisent un tant soit peu la richesse sociolinguistique de Monénembo qui se reconnaît dans cette pratique et par-delà les auteurs africains sans occulter le contexte d'écriture.

En utilisant le français pour désigner ces endroits d'alcool, il faut rappeler la question de « l'Ailleurs » dans une perspective d'hybridation. Faut-il ajouter que par cette invite de l'Ailleurs pour désigner les réalités africaines, au-delà de la narration, l'œuvre partage un imaginaire outre que celui de son auteur.

De plus, la diversité des désignations de toponyme de bar constitue un marquage de socialisation à un endroit précis. L'hétérogénéité spatiale est un signe de cohabitation sociale, ce qui fait dire à O. Ziati et J. Boumaajoune (2023, p. 43) qu'à partir du moment où ce n'est pas dans la langue africaine qu'est désigné l'espace du bar, cet espace oscille entre deux réalités. Ceci par le fait que par son installation, sa matérialité, il (espace du bar) se trouve en Afrique et par sa dénomination linguistique il appartient à une autre réalité culturelle hors de sa zone d'installation. Les noms des bars dans le corpus de Monénembo sont au même rang que les narrateurs dès l'instant que les identités des personnages au sein de son univers fictionnel se métamorphosent. À partir de là, il n'est pas sans rapprocher la création des personnages à celle des espaces du bar ceci, dans une harmonie fictive tout à fait singulière.

Si les noms des lieux ne témoignent pas d'une construction homogène/homophonique pourtant relevant du même écrivain, il est quand même bienséant de signaler que ces lieux accueillent des personnages qui trouvent plaisir au-delà de leur attente.

3 DE L'ESPACE DU BAR, UNE SCENOGRAPHIE DE L'ANORMALITE

Les lieux du bar dans l'œuvre romanesque de Monénembo constituent des espaces de débordement, de promiscuité, d'anormalité préférés et de médisance chronique. Dans cette logique, le comportement des personnages de Monénembo confirme l'analyse de O. Ziati et Boumaajoune (2023, p. 41), lorsqu'ils estiment que les auteurs africains ont fait du « bar un lieu de création où des personnages se rencontrent pour discuter des bouleversements et des mutations sociales [...]. C'est un lieu où des individus aux frontières de plusieurs cultures viennent boire, échanger les opinions à propos des problèmes existentiels différents, parler littérature, d'histoire de religion ou bien d'autres sujets ».

D'emblée, les personnages de Monénembo sont versés dans la consommation excessive de l'alcool en ces lieux. K. Mohamed insinue que le bar est toujours lié au motif d'alcool chez Monénembo. Ainsi à la lecture de L'Aîné des orphelins, on note que le bar est d'abord pour les personnages qu'ils soient adolescents ou d'une autre catégorie d'âge, un endroit d'ivresse afin de se livrer à des dérives inhabituelles :

Il me traîna vers le bar de l'Éden. Le patron n'aimait pas nous voir rôder par là. Mais il connaissait la serveuse, Scholastique. Il lui fit signe et elle nous apporta discrètement nos bières sur le trottoir. Quel meilleur endroit au monde pour se souler la gueule que le dépotoir de la rue des Coopératives ! Nous nous rendîmes là pour boire. Après quoi, nous nous mîmes à chanter avec la ferveur d'une bande de paysans arrosant à la bière de banane la fin des récoltes. Quand on chante, on le fait avec tout le corps que le bon Dieu vous a donné; quand on parle, c'est la bouche seulement qui s'ouvre. C'était bien mieux ainsi: chanter; chanter et ne rien dire. (T. Monénembo, 2000, p. 50-51).

Ici, le lieu du bar résonne comme un lieu protecteur. Il s'agit de Musinkoro et Faustin qui, tous fuyant les horreurs des « avènements », se réfugient dans un bar. Cependant, si le bar de l'Éden constitue une place sécurisée, l'inquiétude du patron du bar traduit l'intention et l'acte des deux ados. À en croire le narrateur-personnage, le propriétaire du bar est hostile à leur visite sur les lieux. Se souler et faire du bruit, chanter sans rien dire comme l'infère le passage relève de l'anormalité. Et cette anormalité choisie par ces enfants est tributaire des avènements génocidaires. Le comportement gauche de ces enfants dans

ce bar d'Eden n'est pas sans évoquer le mythe du jardin d'Eden. Si au début du jardin d'Eden tout était dans la quiétude exactement comme la saison avant le génocide, il faut faire constater que l'écart qui prévaut dans l'attitude des personnages au bar d'Eden est résultant du péché originel du jardin portant le même nom que le bar. La figure du patron de l'Eden n'est pas trop distante de celle de Dieu. Vendre la bière et être hostile à la visite des ados donc des clients, mettre un arbre au milieu du jardin et interdire à sa propre création d'en faire usage, quand bien même ce soit à portée d'elle, relève de l'absurdité, l'irrationnel. D'un ou de l'autre côté, nous pensons que cela relève de l'anormalité.

Outre le bar d'Eden, le bar de « La Fraternité » officie dans l'écart: «... j'allais au bar de la Fraternité pour suivre le journal » (p. 9). Si le bar est donc un lieu adéquat pour suivre le journal, l'espace du bar dans ce sens devient un lieu de culture, d'information. Mais, à pousser loin la réflexion, on peut se demander si le bruit qu'abrite cet espace permettrait à Faustin et ses à compagnons de suivre le journal-là. Quoi de surprenant de savoir que le lieu du bar soit devenu une place d'encensement:

Le dimanche soir, au bar de la Fraternité, j'étais fier quand j'entendais le speaker dire: « Pour finir, dans la catégorie "minimes", notons l'écrasante victoire (quatre buts à zéro !) du Minime Système de Nyamata contre le Volcan de Rusumo. Deux buts du petit Faustin Nsenghimana à lui tout seul. (T. Monénembo, 2000, p. 21-22).

Ce passage confirme davantage que le bar dans *L'Aîné des orphelins* est un espace tonitruant allant à l'encontre de la vie en société. Le bruit est fondement de vie « C'est là où il y a le bruit qu'il y a la vie, ma chère petite dame ! » (T. Monénembo, 2000, p. 100).

Au bar-boulangerie dans *Le Terroriste noir*, l'alcool fonde la rencontre des personnages qui se tirent d'affaires:

C'était un bar-boulangerie, mobilier misérable et comptoir en bois. Il y avait là une dizaine de clients, dont un vieillard portant casquette et barbe blanche, qui sirotaient dans un silence attristant la goutte que leur servait une jeune femme aux traits déjà durcis par les travaux des champs. Nul ne faisait attention à lui et aucun ne semblait armé. (T. Monénembo, 2012, p. 43).

Le verbe " siroter " dans un silence attristant en dit long sur les effets de cette boisson. Ainsi, l'espace de ce bar est par excellence un espace de relèvement de moral. Quand le personnage en fait usage il ressort ragailardi. Dans cette logique, on peut arguer que l'espace du bar, puisque c'est là qu'est vendu l'alcool, est pour les personnages un stimulant de force. Dans cette même perspective, tous les personnages qui fréquentent ce lieu même sans prendre de l'alcool /bière sont assimilés aux ivrognes. La bière qui s'illustre comme un plat préférentiel dans le bar est servi aux hôtes en signe apéritif.

L'ambiance était assez bonne, malgré les chapardages (de chaussures et de cigarettes, notamment) et les parties de quilles qui finissaient souvent en bagarres. On ne compta ni accident grave ni épidémie et le ravitaillement fut souvent bien meilleur que dans les familles. Yolande Valdenaire, qui connaissait tous les commerçants de Petit-Bourg et de Saint-André-les-Vosges, apportait du riz, des pâtes, des cigarettes et des bougies. Addi, qui était devenu l'enfant du pays, obtenait des paysans tout ce qu'il demandait: le fromage, le lait, les œufs, les radis et les choux. Huguette, quant à elle, offrait chaque semaine de la semoule et du pain, parfois même des bières. (T. Monénembo, 2012, p. 156).

Même si la conséquence immédiate de la prise de l'alcool/ bière est la bagarre, voire les accidents comme cela s'entrevoit dans le récit, les buveurs ne peuvent plus s'en départir, car ils sont dépendants; ils s'enlisent dans la contre moralité. *Bled* témoigne d'une description du bar comme espace allant du ridicule au sarcastique, relevant de l'atypisme et de l'insolite. Certes, les personnages viennent de leur propre conscience sur les lieux, mais et la boisson les enivre à telle enseigne qu'ils perdent la totale lucidité et deviennent objet de renvoi, ayant perdu le sens de la morale et de la valeur:

Puis on cessa de faire attention à toi. On se remit à boire sa bière ou à avaler sachorba, les oreilles distraitemment tendues vers le vieil appareil qui distillait de la musique andalouse. Vers vingt et une heures, les tables commencèrent à se vider, dehors on entendit le chœur des klaxons et le dérapage des pneus sur la neige durcie. Il ne restait plus que vous deux et les trois poivrots que le patron a l'habitude de vider à coups de pied au cul pour pouvoir fermer. L'alcool, à cette heure, avait fait son œuvre. Les gueules pouvaient s'ouvrir, même celles d'Aïn Guesma. (T. Monénembo, 2016, p52-53).

On peut le constater, c'est dans le bar que pour la première fois Loïc Pouliquen et Alfred Bamikilé se rencontrent et se font des compagnons. L'espace du bar devient dès lors un lieu de rencontre des destins toutefois différents mais dans une harmonie fictive. Aussi note-t-on que le débit de l'alcool fait revendiquer cet espace de bar d'être un lieu de soulerie.

Le bar est aussi appréhendé dans *Bled* comme un endroit pour les marginalisés, un abri de retrouvailles des malheureux: « c'est devenu le foutoir du coin, l'abri des exclus, des alcoolos, des truands, des sans-logis, des âmes en peine ! Impossible de traverser la ville sans se laisser pervertir par ce funeste endroit. » (T. Monénembo, 2016, p. 51).

À partir du moment où l'espace du bar sert de logis des sans-abris, des exclus, des gens n'ayant plus de moral pour être considérés, il nous semble que les lieux du bar en général et particulièrement chez Monénembo sont devenus des lieux de refuge. Quitte à établir les formalités pour y vivre convenablement.

À condamner ou à promouvoir, l'espace du bar fait partie du quotidien des populations surtout citadines. Sous cet angle, le bar devient un espace de décharge de douleurs ayant le même sens que les Églises ou Mosquée servant de lieu de confessionnal, un endroit indéniable pour partager des peines, un foyer qui sert de déversoir, un espace de transition inter/intra génération pour éviter « une seconde mort » comme le dirait J. B. Tsofack et al. L'alcool lié au motif de l'édification du bar justifie le comportement sadique de Mounir comme l'explique aisément Zoubida la narratrice: « mon tout nouveau comportement intrigua Touria. Elle vint me voir dans ma chambre et comme toujours à l'heure où Mounir et sa bande s'enivraient de pastis au bar de l'hôtel Timgad » (T. Monénembo, 2016, p. 46). La non fréquentation du lieu de bar, l'oubli de la prise d'alcool créent une distance entre certains personnages et leur divinité:

Curieux, mon vieil Alfred ! Je suis arabe, tu es bantou ! Je suis algérien, tu es camerounais ! Je crois en l'Unique, toi aux idoles. Et pourtant, nous nous entendons comme larrons en foire. Pourquoi ? Parce que tu respectes ta religion et moi, je respecte la mienne. Lakoum d'inoukoum wa liya dîni ! Moi, je m'interdis le porc et l'alcool. Chez toi, à l'inverse, le blasphème, c'est quand tu oublies de faire un tour au bar. Tes dieux sont toujours soûls. C'est par les libations et par la baise que tu accèdes au ciel. Moi, par la prière et par le jeûne. (T. Monénembo, 2016, p. 183- 184).

À tous égards, on constate que dans Bled, la mention du nom de bar est couplée de la prise d'alcool. Si la narratrice fait comprendre dans le passage susmentionné que c'est par le biais de l'alcool pris au bar pour faire la libation que le personnage Alfred peut accéder au ciel, il n'est pas trop prétentieux de dire que le bar/ alcool constitue une figure « surfaciale » du récit monénembien dotée de sens inépuisable.

Le bar dans ce roman, suivant le parcours des personnages en ces lieux, s'offre comme un nid douillet qui procure plaisir et délectation à tout client. Une fois de plus, l'espace-bar dans l'œuvre témoigne d'une certaine connivence entre les personnages même s'ils viennent des horizons différents. Quoi de juste pour traduire le caractère unificateur de ces lieux de joies, vus comme des endroits ayant des enseignes immorales.

Au bar « L'oxygène », dans *Saharienne indigo* se constatent les multiples agissements des personnages. Lieu de défoulement, de liberté ou de rencontre amoureuse, cet espace de bar oriente le récit et lui confère des interprétations autres. Comme tous les précédents, à « L'oxygène », l'alcool/la bière est un moyen d'enjailllement des clients et leur permet de se livrer à des actes nouveaux, hors-normes:

La musique fut interrompue deux fois de suite à cause des bagarres. Et puis

Raye, à peine plus soûle que moi, m'entraîna sur la piste parce qu'ils venaient de mettre Papa Wemba. Deux ou trois mecs vinrent tourner autour de nous pour imiter nos pas recherchés et nos diaboliques trémoussements. Mais l'événement que je souhaitais, ou plutôt que j'attendais, ne se produisit pas, en tout cas pas tout de suite. Alors que nous étions assises côte à côte dix minutes plus tard, un rastaman se pencha vers moi: – Salut, même-mère, comment allez-vous ? (L'Oxygène fait penser à une lointaine tribu, avec ses tics de langage et ses codes, madame Corre. On ne dit pas « ami » ou « frère » ou « sœur », on dit « même-mère ». Et la ville ? Vous savez comment on l'appelle, la ville ? « La tribu d'en face », ou alors « Babylone ».) Puis-je inviter cette jeune et jolie fille qui danse si bien les rythmes afro-cubains ? C'est ainsi que je fis la connaissance d'Alfadio. C'est ainsi que ma vie devint ce qu'elle est aujourd'hui (T. Monénembo, 2022, p. 84).

Ici, se déroulent des multiples événements dont l'espace-bar est au centre. D'abord, l'effet de la boisson qui éveille des talents inédits de Véronique Bangoura et sa copine Raye notamment la danse sous la conduite symphonique des chansons de l'artiste congolais Wemba. La facilité de rapprochement qu'offre l'atmosphère musicale suscite l'étalage de connaissances des personnages, ce qui justifie le caractère catalyseur de la boisson chez l'hôte de Véronique. Dans telle posture où « L'Oxygène » est devenu un espace d'enseignement, on peut se dire que l'auteur fait correspondre les lieux d'alcool au centre d'éducation. Le bar l'oxygène se pointe alors comme un fourre-tout où des discussions se font sans limite. Ainsi, en rebaptisant « L'Oxygène » de « Babylone » par le personnage à la gueule sans frein, l'auteur sous couvert de la narratrice semble dire que les bars/buvettes, constituent des lieux de désordre, de crime, de profanation volontaire et de désacralisation. L'usage de Babylone traduit la vanité humaine. Rappelons que Babylone signifie « la porte des dieux ». Arrimé le bar « L'Oxygène » à Babylone, c'est incontestablement le taxer de place de disgrâce puisque la « Tour de Babel » ne serait pas actée par Dieu.

Outre cela, on note dans les romans précédents que l'espace du bar est toujours le site privilégié pour se faire des énamourées. Dans l'extrait ci-haut, la narratrice fait savoir le lieu de rencontre avec son amant, l'acteur grâce à qui elle a connu les moments de jambes en l'air, lieu qui n'est autre que le bar « L'oxygène ». C'est là que sa vie prendra une autre dimension bonne ou mauvaise qu'elle soit:

Viens, me dit Raye un jour que nous finissions de ranger le fatras de la remise, je t'emmène quelque part ! Inutile de te farder: ils deviennent méconnaissables, les criminels, au bout de trois ans de cavale. Et puis tu vois bien, Saharienne Indigo s'est évaporé. Il a compris qu'on n'avait plus peur de lui. – Mais tout de suite, ma puce ! Oui, un flic, un vrai, serait déjà venu. Une demi-heure plus tard, nous étions à l'Oxygène, le maquis où ma vie allait prendre un nouveau tournant, plus surprenant et plus casse-gueule que le jour où j'avais tué mon père ! (T. Monénembo, 2022, p. 81).

Tout simplement, le bar « L'Oxygène » est le repère de la transformation de la vie de l'héroïne. L'accentuation de l'anormalité atteint son paroxysme à l'Oxygène. Si le nom de ce lieu dans Saharienne Indigo a une fréquence plus que d'autres espaces (46 emplois), c'est aussi à cause de la dangerosité des actes allant de vie à trépas qui poussent. L'Oxygène, au-delà de réunir des destins presque communs, est un espace de grand banditisme et de stockage des corps:

À l'Oxygène, un Irlandais mourut d'overdose et une fille fut retrouvée sur la décharge bordant la mer, un poignard au milieu du dos. Je ne fréquentais plus l'oxygène à cause de mon état mais Raye me rapportait des frites d'ignames et des nouvelles fraîches. (T. Monénembo, 2022, p. 101).

À suivre la logique des faits dans le roman, l'Irlandais n'est pas victime non seulement de la prise excédentaire de l'alcool au bar l'Oxygène mais également des agressions des agents qui mènent leur vie comme des bandits de grand chemin. La fille quant à elle serait victime d'une pression ou d'une maladie des dépendants sexuels qui forcent tout sans consentement. Les pratiques secrètes, les comportements de déviance, l'insécurité galopante qui s'observent à l'espace dans ce bar sont tributaires de la prise de l'alcool dont le lieu est tenu responsable.

L'anormalité, goût de préférence juvénile qui se remarque dans cette œuvre, s'articule à partir d'une écriture du débordement. Que ce soit par des propositions d'amant, consommation d'alcool, fumage de cigarette accompagnés d'ingurgitation de viande, ce melting pot conforte le caractère exutoire du lieu de bar.

Implicite, l'attitude incontrôlée des personnages en ces lieux de gaité sans norme, est le fruit de la diversité des individus dans les lieux urbains puisque tous les lieux de bar dans l'œuvre de Monénembo se situent géographiquement en ville. Dans cet élan, la localisation de ces espaces confirme la pensée d'Antony Mangeon (2017 p. 2): « Les littératures noires américaine antillaise et africaines sont étroitement liées. L'espace urbain est l'un de ses hauts lieux de sociabilité: la taverne où l'on peut danser, boire, et manger, et qui va d'ici au cabaret américain, au maquis africain en passant par le bar parisien ou marseillais ». Le critique français dans cette analyse ne dit pas autre chose que l'aspect composite du bar occasionne le débordement même s'il le qualifie de socialité à l'avance. Danser, boire, manger qui se suivent dans cet énoncé prouvent à suffisance qu'en ces lieux, on y va pour se verser dans le déhanchement (danser), pour somnoler dans l'ivresse (boire) et en fin se faire de l'énergie pour continuer la routine (manger). À n'en pas douter, les espaces du bar de Monénembo se placent dans cette perspective d'où le style brouillant qui s'observe à la lecture. Quoi qu'il en soit, le corpus d'étude, à s'en tenir aux espaces-bars, s'appréhende comme une scène de succession d'anormalité, l'opposé de l'éthique sociale.

4 LIEU DU BAR COMME ESPACE DE LA DEMESURE

Traiter de la démesure au lieu du bar dans le corpus, c'est appréhender le degré de dépravation morale qui gouverne les personnages et inscrit le style de Monénembo à l'antipode de la raison. Si les toponymes des bars précédemment diagnostiqués rendent compte en amont d'une certaine immoralité en filigrane, « le dire » des personnages en explicite cela.

Le récit de la démesure se hisse dans L'Aîné des orphelins comme une sorte de pansement permettant de se purger:

Le dimanche, je marquais des buts pour le Minime Système et, le soir, quand j'étais fatigué des délires éthyliques de mon père, j'allais au bar de la Fraternité, voir un film à la télé en lorgnant le derrière d'Augustine. On n'avait pas beaucoup de considération pour nous à cause des niaiseries de mon père et de son penchant invétéré pour la dive bouteille mais on nous aimait bien. (T. Monénembo, 2000, p. 119).

L'assouvissement de Faustin, enfant qu'il soit passe par l'admiration morphologique des parties sensuelles d'Augustine. Même s'il a marqué des buts, cette joie n'est que circonstanciée. Le terrain de foot n'offre pas la même sensation. Voilà l'arrière-fond de son idée qui sous-tend son dépêchement au bar la Fraternité. Faustin ne se limite pas que là, son odyssee du récit de pensée basé sur le maître mot: s'assouvir est de mise:

Je voyais les poils qui dépassaient de son slip. Ses cuisses étaient moins fermes, plus couvertes d'éraflures et de plis que celles de Claudine. Je l'aurais sautée quand même si elle avait voulu. Depuis que j'étais là, je n'avais pas approché une femme à moins d'un mètre cinquante. La nuit, je mouillais mes draps en pensant à Josépha ou à Émilienne. Je crois que je n'aurais pas hésité si cette folle de Mukazano s'était glissée dans mon lit [...] Quand le bar est animé, que la patronne connaît son affaire

et qu'il y a dans les parages quelques gonzesses potables, il suffit d'être un tout petit peu rusé, c'est-à-dire savoir se faire discret, pour se laisser entretenir. (T. Monénembo, 2000, p. 78- 96).

On le constate si bien, le personnage-narrateur est hanté instamment d'un appétit sexuel qu'il cherche désespérément à assouvir. À dire, le premier passage traduit sa fougue et son vide; vide à compléter. Par-là, son intention primaire, celle qui était d'aller au bar pour suivre la télé se déconstruit par lui-même. Il tente donc hic et nunc de remplir ce vide sentimental qui devrait se faire par l'acte que par la vue. L'action de voir par ricochet remplace « faire » faute de mieux et joue le même rôle que « faire ». Le récit biblique ne confirme pas cela lorsqu'il est écrit dans Mathieu 5 verset 28: « mais moi je vous le dis que quiconque regarde une femme pour la convoiter a déjà commis un adultère avec elle dans son cœur » ?

Le second morceau met à nu le caractère immoral de l'environnement du bar. La Fraternité est un lieu de pratique au rang de sacrilège. « Se faire discret et se laisser entretenir » laisse comprendre la pratique de sexe qui se déploie là. Faustin et sa bande de compagnons adolescents qu'ils sont, sont déjà imbus de désir charnel.

L'écriture de la démesure qui s'observe dans ce roman n'est que la somme de la dégringolade de la société rwandaise qui ne fait que se construire dans l'individualisme teinté de ruse. Si à 13 ans c'est l'intention sexuelle qui gouverne la raison, on n'est pas loin de la démesure.

Aussi patent que dans L'Aîné des orphelins, Saharienne indigo abonde dans la démesure. Ce constat s'observe plus dans le discours orienté de Raye à Véronique Bangoura:

Là, au milieu, c'est le Folto-Falta, le night-club dont je t'ai parlé. On y trouve le meilleur whisky, le meilleur disc-jockey, les plus belles filles, et donc les plus belles bagarres. Et à droite, le Motel Ziama. C'est là que tu louerai une chambre le jour où tu trouveras un mec - Cela s'appelait Les Pieds dans l'eau: le côté balnéaire de l'Oxygène. – Le plaisir et l'extase ! Sodome et Gomorrhe ! La licence et le vice ! ricana Raye. La journée, on se contente de se bécoter. Les choses sérieuses commencent au crépuscule. Ma toute première sortie ! Je vous l'ai dit, madame Corre, je ne connaissais rien de l'existence: ni les bars, ni le cinéma, ni le manège, ni le zoo.

– Trois ans, c'est l'intervalle idéal: avant, on t'aurait reconnue; après, tu aurais raté le coche, me chuchota Raye en me ramenant vers le maquis décoré, comme si c'était Noël, de loupottes et de guirlandes. Voilà, on a fait le tour. Ici, à tout moment, tu peux boire, danser, manger et... hi ! hi ! Elle pensait, je me demande bien pourquoi, que c'est à 18 ans que la flamme du désir irradie votre corps. Mon séjour chez Yâyé Bamby m'avait, en quelque sorte, préparée à ma nouvelle vie. La prison dorée, c'est plus gai et plus instructif que l'école, et Raye avait fini par me convaincre que la vie manquait de goût sans la bière fraîche et le shit. (T. Monénembo, 2022, p. 81-82).

Conduire Véronique à un lieu de grand désordre, lui demander de se tailler un endroit-là et se faire prendre les jambes en l'air par des inconnus, paraît-il de l'ordre du désordre. Aussi, le passage témoigne d'une véritable « place du sexe » par l'entremise des noms de lieux comme Sodome et Gomorrhe. Faut-il insinuer que ces deux toponymes que la narratrice fait correspondre à « L'oxygène » traduisent la perversion inégalée de l'humanité jusqu'alors. Pour preuve, le récit biblique explique que Dieu dans une fureur effrénée effaça ces deux villes en faisant pleuvoir sur elles une pluie de souffre et de feu pour s'être adonnées aux pratiques de l'homosexualité, l'orgueil et tous ses corollaires. On peut lire à cet effet les livres suivants: Genèse 18 verset 19; Ezéchiel 16 verset 49-50; Lévitique 18 verset 22 et Jude 7. Quoi de juste pour qualifier ces lieux d'espaces de dépravation. Et comme pour accentuer sur cette décadence d'une jeunesse sans repère, la narratrice juste après, fait mention de « la licence »; en conteste ou pas, cela signifie liberté, autorisation, anarchie qu'entraîne une liberté sans contrôle voire libertinage.

Monénembo pousse loin ses personnages aux déferlements de leurs immoralités comme l'explique si bien la narration:

Après le poulet-aloko, nous gagnâmes le night-club. Raye commanda des bières et nous allâmes nous asseoir. Un jeune homme traversa la cohue d'un pas mal assuré et passa devant nous.

– Celui-là, s'il me coinçait dans un recoin des toilettes, je me garderais bien de crier au secours.

Raye m'entraîna sur la piste après avoir réussi à étouffer son fou rire. Notre conversation continua malgré l'ampleur des décibels:

– Ça te démange tant ça ?

– Hé ! J'ai longtemps attendu, moi !

– Tu peux bien attendre encore un peu.

– Pas plus que maintenant.

– Vas-y donc, alors, saute sur le premier venu !

– Je n'hésiterais pas, je t'assure, si je revoyais le mec en casquette de velours mauve. (T. Monénembo, 2022, p. 83).

On le voit bien, la raison de l'usage de licence. S'il est de coutume que c'est le sexe masculin qui ose en matière de cuissage, force est de constater dans l'univers monénémbien que les personnages féminins en déconstruisent cette thèse. Quand la morale est battue en brèche et l'immoralité officie en qualité de norme, il n'est pas étonnant d'en arriver à la construction d'un récit affectionnant l'impudicité. Ipso facto, si la dépravation des mœurs, volet de la démesure semble irriter le lecteur non averti, il est utile de noter qu'en conteste fictionnel, cette écriture entachée de perversité s'énonce comme une esthétique que seule la fiction légitime.

5 ESPACE DU BAR COMME UN CHANGEMENT DE PARADIGME SCRIPTURAL

L'environnement du bar s'offre comme un espace polymorphe en ce sens qu'il offre toutes les possibilités aux visiteurs. Considéré comme tel, il devient une figure prostituée dans le récit de Monénembo dès lors qu'il ne fait pas de classification de fanatique et devient le lieu par excellence d'anarchie du tout dire, du faire tout à ciel ouvert.

Dans cet entendement, le lieu du bar devient le sujet romanesque par excellence. Là où il y a de l'humanité, la culture s'enracine, et la littérature ne saurait être absente. Le bar, en regroupant des vies de différents horizons qui expriment leur malheur, fait penser à la résilience. Il nous semble qu'au-delà des enjeux esthétiques qui fondent l'essence de la littérature, cette dernière a pour mission l'épanouissement spirituelle (au sens littéraire) de la société.

Préférer toujours les espaces primitifs villes/ villages, qui étaient à la genèse de la littérature africaine des lieux de préférence romanesque, c'est inscrire le projet de littérature dans la monotonie. La fixité spatiale ramène le dynamisme scriptural à la même sauce. Le nouvel espace qui prend forme chez Monénembo, paraît-il, être une revendication d'autres goûts esthétiques et conséquemment se libère des carcans de l'ancien goût romanesque, peut-on dire. Cet avis trouve du crédit chez A. Mabanckou (2005, p. 12): « Je veux garder ma liberté d'écrire, quand je veux, quand je peux, il n'y a rien de pire que le travail forcé... ». À bien comprendre, l'inscription de l'espace du bar qui devient un sujet inédit chez l'auteur dans le corpus témoigne de l'affranchissement des anciennes règles et place l'auteur dans un champ nouveau.

Cette hardiesse somme toute que semble réclamer le romancier guinéen ne s'écarte pas du comportement de ses personnages archétypes. Puisque dans son œuvre, les personnages font des produits des bars leur source de vie, un moyen de tenir la vie en vie; ce qui constitue un leitmotiv dans le récit de Véronique Bangoura: «... et Raye avait fini par me convaincre que la vie manquait de goût sans la bière » (p. 82) et vomissent leurs misères dans une anachronie totale. Également, la cacophonie constatée chez les personnages au bar et le style polyphonique opéré par l'auteur sont des indicateurs de construction d'une esthétique nouvelle.

Du bar « La Fraternité » à « L'Oxygène » en passant par « Bar-boulangerie » et « Sans âme », etc., les personnages principaux rencontrent d'autres qui partagent leurs souffrances. À la croisée de ces personnages en de tels espaces, les bars résonnent comme lieux de décharge, d'écoute, de transition pour passer à d'autres perspectives. Dans un entendement personnifié, il (bar) promeut à la résilience des personnages voués à toute forme de marginalité sociale.

Les multiples contacts entre les personnages dans les bars, la fusion des corps et esprits, le partage de cultures entre eux, acquittent aux personnages principaux leur appartenance à une territorialité fixe et les inscrivent dans une appréhension universelle.

Le renouvellement scriptural prend effet à partir de la démesure cosmopolite du bar, à lui, provenant des personnages de différents pays. Les personnages-narrateurs qu'ils soient hétéro/intra diégétiques retardent plus le récit quand il s'agit des endroits de consommation de bière. Cette posture prouve que l'œuvre de Monénembo place l'espace manichéen de la littérature africaine dans son arrière-plan en lui disant au revoir. Cette opacité de cet espace ancien favorise la visibilité du nouveau qui n'est autre que l'espace-bar. La traversée de ce nouvel espace dans tout le corpus marque explicitement le changement du paradigme scriptural qui n'est que la résultante des personnages d'un âge jeune qui constitue le personnel dans son écriture. Les lieux qu'affectionnent les personnages sont des lieux propices pour l'art romanesque. Quand on a de jeunes personnages aux ambitions démesurées, on ne peut qu'avoir que des vies sordides à des lieux insolites. Quoi de plus pour témoigner du basculement esthétique.

Plus encore, l'espace du bar favorise ce changement esthétique du moment où il fait sortir les personnages de leur froideur tout en leur permettant de délirer: « le vin et les lieux d'alcools libèrent la parole ou mieux encore libèrent la plume » (O. Ziati, J. Boumaajoune, 2023, p. 46). S'il y a libération de parole, ce qu'influe sur la plume (l'écriture), c'est qu'il y a renvoi de certaines

pratiques et adoption et expérimentation d'autres. Par ce topos analysé, Monénembo décolonise l'espace sinon exclut toute forme de ghettoïsation du roman africain.

En fin, le bar, espace a priori interstice, mais lourdement chargé de sens sous la plume de Monénembo, occasionne ce passage de goût à partir du moment où il se pointe être un topos perméable, ce qui est donc une qualité de l'art romanesque. Dès l'instant qu'il y a mixture d'histoire des personnages en ce lieu de transition, on ne peut que voir de goût nouveau qui supplante l'habituel. Également à travers l'inscription des personnages venus de tout-monde dans un bar qu'on pourrait nommer ainsi, l'espace du bar dans l'œuvre redéfinit même l'identité du récit romanesque.

6 CONCLUSION

On ne saurait clore cette analyse conduite jusqu'ici qu'en retenant que l'espace-bar dans le roman de Monénembo est d'abord un endroit qui traduit une esthétique exutoire. En ce sens que sur le plan comportemental, les personnages sont en déphasage avec la morale sociale. Ainsi, cette qualification se justifie par la dénomination des lieux fréquentés par lesdits personnages. En effet, le bar, espace bigarré (où on vient tout dire) est par essence un lieu exclu de toute contrainte. À partir de là, il n'est pas loin d'un futoir. Donnerions-nous raison à A. Mangeon (2017, p. 9) lorsqu'il argue que le maquis africain est un lieu de dérapage et de bordel. Le caractère exutoire du lieu du bar se rapporte à l'axe narratif à partir du moment où l'on constate la construction du récit décousu, sans aucune linéarité, conséquence directe de l'état d'ébriété des personnages. À l'aune de tout, il est donc logique que les topies bars chez Monénembo sont des constructions conscientes pour traduire la philosophie juvénile et par ricochet un changement de paradigme. S'il est bien de sentir venir cette écriture du trop-plein dans le corpus analysé à partir de l'espace bar déjà en germination dans *Les Écailles du ciel*, force est de constater que ce nouveau vent littéraire que s'approprie Monénembo, portera bonheur à la postérité notamment chez A. Mabanckou (2005), A. T. Apédo-Amah (2017) entre autres., où l'espace du bar ouvre et clôt les récits.

REFERENCES

- [1] APÉDO-AMAH Ayayi Togoata, 2017, *Le Chien qui fume*, Lomé, Graines de Pensées.
- [2] KENGUE Gaston François, TSOFAK, Jean-Benoît 2015, « On entre OK et on sort KO » comme à la buvette...! Des espaces d'alcool et de leur mise en mots en contexte urbain au Cameroun », *Ponti/Ponts. Langues, littératures, civilisations des pays francophones*, Milan, Mimesis Edition, vol. 1, n° 15, pp. 79-94.
- [3] KÉÏTA Mohamed M, 2011, *Approche psychocritique de l'œuvre de Tierno Monénembo*. Université Paris-Est Créteil Val de Marne.
- [4] MABANCKOU Alain, 2005, *Verre Cassé*, Paris, Seuil.
- [5] MANGEON Anthony, 2017, « Contes et comptoirs. Le bar, un lieu de littérature pour les diasporas noires », in *Cultures en transit dans l'espace urbain*, p. 53-61.
- [6] MITTERAND Henri (sous la direction de), 1982, *Les noms des lieux et de personnes*, Paris, Nathan.
- [7] MONÉNEMBO Tierno, 2000, *L'Ainé des orphelins*, Paris, Seuil.
- [8] MONÉNEMBO Tierno, 2012, *Le Terroriste noir*, Paris, Seuil.
- [9] MONÉNEMBO Tierno, 2016, *Bled*, Paris, Seuil.
- [10] MONÉNEMBO Tierno, 2022, *Saharienne Indigo*, Paris, Seuil.
- [11] SEGOND Louis, 1990, *La Sainte Bible*, (traduction King James).
- [12] ZIATI Ouafa, BOUMAAJOUNE Jaouad, 2023, « Le bar, lieu de création littéraire ou refus d'une génération en décadence ? Cas de *Le Crédit a voyagé*, dans *Verre Cassé* d'Alain Mabanckou », in *IOSR Journal of Humanities and Social Science*, vol. 28, p. 41-49.

Interannual variability of intra-seasonal rainfall descriptors and drawbacks on the spatio-temporal dynamics of *Helicoverpa armigera* and *Jacobiella facialis* infestations on cotton in Côte d'Ivoire

Sekpa Charles DEKOULA¹, Malanno KOUAKOU², Pitou Woklin Euloge KONÉ³, Gouzou Juste Roland DIDI⁴, Guy Fernand YAO¹, Brou KOUAMÉ¹, and Ochou Germain OCHOU²

¹Central Laboratory, Soils, Water and Plants (LCSEP), National Center for Agronomic Research (CNRA), 01 BP 633 Bouaké 01, Côte d'Ivoire

²Cotton Research Station, Entomology Laboratory, National Center for Agronomic Research (CNRA), 01 BP 633 Bouaké 01, Côte d'Ivoire

³Department of Agronomy and Forestry, University of Man, BP 20 Man, Côte d'Ivoire

⁴Faculty of Science and Technology, Animal Science and Genetics Research Laboratory, Alassane Ouattara University, BP V 18 01, Bouaké, Côte d'Ivoire

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Cotton yield decrease in Côte d'Ivoire are important because of the climate change and pest infestations. The target of this survey is to analyze the spatio-temporal dynamics of Intra-Seasonal Descriptors (ISD) of rainfall and the annual mean infestation levels (MILs) of two pests, *Helicoverpa armigera* and *Jacobiella facialis*, as well as their interactions. The analysis datas are mainly constituted of annual rainfall and entomological data of *H. armigera* and *J. facialis* covering the period 1971-2016. The spatio-temporal distributions of rainfall ISDs and pest MILs were statistically analyzed, mapped, and their interactions determined using InStat+ and Surfer 11 software. Outcomes showed an interannual variability in rainfall ISDs, with coefficients of variation exceeding 30%. For *H. armigera*, MIL peaks shifted from the South and Center (1995–2000) to the Center-East and North-East (2011–2016), with an overall declining trend in MILs, attributable to the adoption of the Insecticide Resistance Management Program (IRMP) in 1999. However, a recent increase in peak levels suggests that climatic conditions particularly reduced cumulative rainfall and fewer rainy days favor its development. Regarding *J. facialis*, MILs increased from 3 to 16 infested plants per 30 plants, due to the IRMP's limited focus on this pest, with the infestation hotspot shifting from the North (1995-2000) to the North-East and Center-East (2011-2016). These results demonstrated the relevance of integrating climatic conditions into pest management strategies.

KEYWORDS: Cotton, rainfall descriptors, variability, pests, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Cotton production stands for a significant source of income for the Ivorian agricultural economy. Especially grown in the northern and central parts of Côte d'Ivoire, cotton ranks fourth among agricultural exports after cocoa, rubber and cashews. Cotton production accounts for 7% of export earnings and contributes 1.7% to Côte d'Ivoire's gross domestic product (GDP) ([1], [2]).

However, the last two decades have been marked by a general downward trend in seed cotton yields. Indeed, cotton cultivation in Côte d'Ivoire is mainly carried out under rain-fed conditions. Yet, climate change and its consequences, including reduced and irregular rainfall, shorter rainy seasons and increased prevalence of pests and diseases, are exacerbating the

decline in yields and leading to poor harvests [3]. For example, yields fell from 1,380 kg/ha (1999/2000 season) to 952 kg/ha (2016/2017 season) according to [4]. These declines may be linked to the variability of Intra-Seasonal Descriptors (ISDs) of the effective rainy season, such as start and end dates, cumulative rainfall, and number of rainy days [5], as well as attacks by pests such as *Jacobiella facialis* and *Helicoverpa armigera* ([6], [7]).

According to [8], due to climate variations, some pests may cause major yield losses, either directly through damage or indirectly through the introduction and spread of diseases affecting crops such as cotton. However, interactions between climate and pests remain insufficiently studied in West Africa, particularly in Côte d'Ivoire. In this context, it is relevant to investigate whether relationships exist between certain intra-seasonal rainfall descriptors and the mean infestation levels (MILs) of two cotton pests, *Helicoverpa armigera* and *Jacobiella facialis*.

This study aims to analyze the spatio-temporal dynamics of Intra-Seasonal Descriptors (ISDs) of rainfall and the annual mean infestation levels (MILs)

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 STUDY SITES

The study area is located between 5°75' and 10°75' north latitude and between 3°5' and 8°5' west longitude. It covers an area of approximately 20,000 km². It spans 13 regions: Folon and Kabadougou, Béré, Bafing and Worodougou, Haut-Sassandra and Marahoué, Poro, Tchologo and Bagoué, Hambol and Gbèkè, and Béliér. This area is bordered to the north by Mali and Burkina Faso, to the west by Guinea and the Mountain District, to the south by the Gôh-Djiboua District, to the south-east by the N'zi and Iffou regions, and to the east by the Zanzan District (Figure 1)

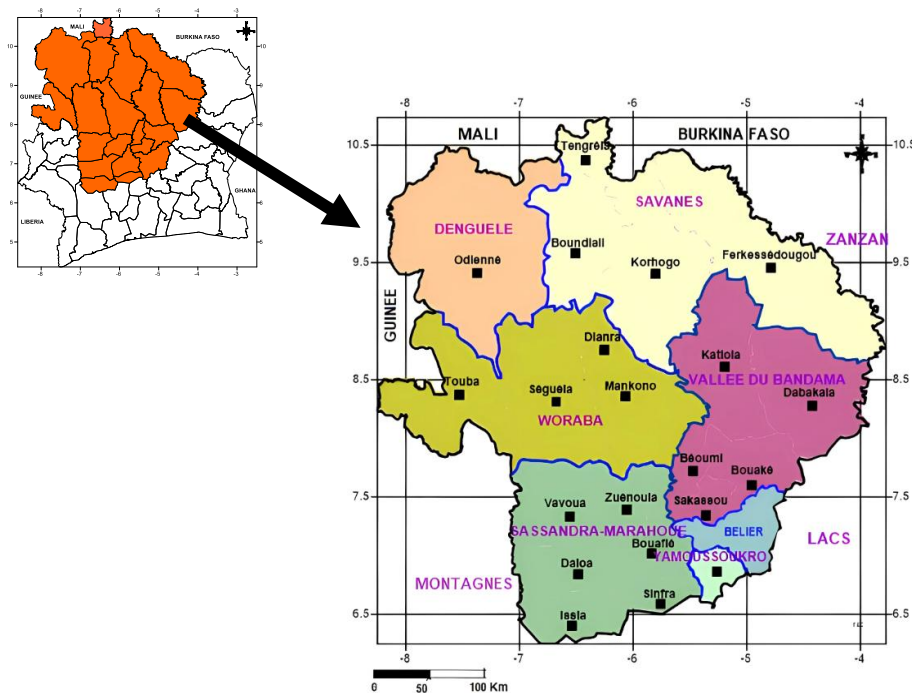


Fig. 1. Map showing the location of the study area

2.2 RAINFALL DATA

Daily rainfall data for the period 1971-2000 (30 years) were considered for this study. These data, reviewed and validated by the "Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) " were supplemented by data from the database of Central Laboratory, Soils, Water and Plants (LCSEP) of the National Center for Agronomic Research (CNRA). A dozen stations that complied with the 30-year series were selected (Table 1).

Table 1. of Words

Station Name	Station Type	Longitude	Latitude	Rainfall Pattern
Béoumi	Rainfall station	-5.57	7.67	Bimodal
Bouaflé	Rainfall station	-5.75	6.98	Bimodal
Bouaké	Synoptic station	-5.07	7.73	Bimodal
Boundiali	Rainfall station	-6.47	9.52	Unimodal
Dabakala	Rainfall station	-4.43	8.38	Bimodal
Katiola	Rainfall station	-5.1	8.13	Bimodal
Korhogo	Synoptic station	-5.62	9.42	Unimodal
Mankono	Rainfall station	-6.18	8.05	Unimodal
Niakaramandougou	Rainfall station	-5.28	8.67	Unimodal
Odienné	Synoptic station	-7.57	9.5	Unimodal
Ouangolodougou	Rainfall station	-5.15	9.97	Unimodal
Vavoua	Rainfall station	-6.47	7.37	Bimodal

2.3 ENTOMOLOGICAL DATA COLLECTION

Two species of pests were targeted for this study. The first species is the larvae of *Helicoverpa armigera* Hübner (Noctuidae), one of the most feared pests of cotton plants in Africa and around the world. This polyphagous caterpillar attacks flower buds, flowers and capsules, which empties from the inside, leaving a clean entry hole [9]. The second species of interest is the cotton leafhopper, *Jacobiella facialis* Jacobi, 1912 (Cicadellidae), a piercing-sucking insect of cotton. Its feeding punctures on plant organs cause yellowing along leaf margins, which may even lead to growth cessation or shedding of reproductive organs [6].

2.4 INTERANNUAL CHARACTERIZATION OF INTRA-SEASONAL DESCRIPTORS (ISDS) OF THE RAINY SEASON

As part of this study, a list of eight variables likely to influence rain-fed agriculture was selected as Intra-Seasonal Descriptors (ISDs) of the rainy season (Table 2). The characterization of ISDs first consisted of their determination. This determination, based on agronomic criteria, has been used in the work of several authors in Africa ([10], [11], [12], [13]). The criteria considered were adapted to the climatic conditions of Côte d'Ivoire ([14]; [15]). Thus:

Onset of the Rainy Season (ORS) was defined as the first day, from March 15 onwards for the unimodal rainfall regime, on which at least 20 mm of rainfall was recorded over two consecutive days, with no dry spell longer than 7 days during the subsequent 30 days. For the bimodal regime, the onset of the long rainy season was defined from February 1, and for the short rainy season from August 15, while applying the same criteria.

End of the Rainy Season (ERS) corresponds to the first day after a fixed date when a soil capable of holding 70 mm of available water is completely depleted by a daily evapotranspiration loss of 4 mm. For the unimodal regime, this fixed date is October 1. For the bimodal regime, it is July 1 for the long rainy season and November 1 for the short rainy season.

Length of the Rainy Season (LRS) corresponds to the difference between the onset and end dates of the rainy season.

Seasonal Rainfall Total (SRT) corresponds to the sum of daily rainfall amounts recorded on rainy days between the onset and end dates of the season.

Number of Rainy Days (NRD) corresponds to the total number of days with rainfall amounts greater than 1 mm between the onset and end dates of the season.

Mean Daily Rainfall (MDR) corresponds to the ratio between the seasonal rainfall total and the number of rainy days during the season.

Extreme Rainfall (ER) corresponds to the highest daily rainfall amount recorded during a rainy day.

Dry Spell (DS) is obtained by counting the number of consecutive days without rainfall observed between two rainy days.

To characterize the interannual variability of the ISDs, a descriptive analysis was carried out on all the determined variables using the Instat+ software.

Table 2. Intra-Seasonal Descriptors (ISDs) of the Rainy Season

Variable Acronym	Descriptors Name	Unit
ORS	Onset of the Rainy Season	date
ERS	End of the Rainy Season	date
LRS	Length of the Rainy Season	day
STR	Seasonal Rainfall Total	mm
NRD	Number of Rainy Days	days
MDR	Mean Daily Rainfall	mm/day
ER	Extreme Rainfall	day
DS	Dry Spell	day

2.5 SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF MEAN INFESTATION LEVELS

The pest data were first analysed using Excel 2013 to highlight the mean infestation levels of pests. Then, spatial distribution maps of these levels were generated for the two study periods (1995-2000 and 2011-2016) using the Surfer 11 mapping software.

2.6 RELATIONSHIP BETWEEN MEAN INFESTATION LEVELS AND INTRA-SEASONAL DESCRIPTORS

To assess the strength of the relationship between Mean Infestation Levels (MILs) and the various Intra-Seasonal Descriptors (ISDs) of the Rainy, the Bravais-Pearson linear correlation coefficient was calculated. The significance of the correlations between the different series was then determined using the Bravais-Pearson test at a 95% confidence level.

3 RESULTS

3.1 MEAN CHARACTERISTICS OF INTRA-SEASONAL DESCRIPTORS OF THE RAINY SEASON

3.1.1 UNIMODAL ZONE

The mean characteristics of the Intra-Seasonal Descriptors (ISDs) of the rainy season determined over the study period are presented in Table 3. On average, the rainy season begins on May 14 (± 17 days) and ends around November 6 (± 10 days). The mean rainfall recorded during this rainy season, which lasts on average 175 days (± 19), is estimated at 1,042 mm (± 259). The mean number of rainy days per season is 60 days (± 9). The mean daily rainfall is 17 mm/day (± 2). The mean duration of the longest dry spells is 14 days (± 3). The mean number of days with rainfall exceeding 50 mm (extreme rainfall events) is 3 days (± 1). Furthermore, the calculated coefficients of variation (CV) range from 3 to 33%. Except for the fine rainfall variable, the CVs of the other variables are relatively high.

Table 3. Intra-Seasonal Descriptors (ISD) of the Rainy Season

Variable Acronym	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)
ORS (date)	May 14	17	13
ERS (date)	November 6	10	3
LRS (days)	175	19	11
STR (mm)	1,042	259	25
NRD (day)	60	9	15
MDR (mm/day)	17	2	12
ER (day)	14	3	21
DS (day)	3	1	33

3.1.2 BIMODAL ZONE

The mean characteristics of the Intra-Seasonal Descriptors (ISDs) of the long and short rainy seasons determined over the study period are presented in Table 4.

The long rainy season begins on mean on April 5 (± 19 days) and ends around July 21 (± 17 days). Its mean duration is 108 days (± 24) with an average rainfall of 508 mm (± 169). The mean number of rainy days recorded during this season is 30 days (± 8), resulting in a mean daily rainfall of 13 mm/day (± 2). The longest dry spells during the season have a mean duration of 13 days (± 2). The number of days with rainfall exceeding 50 mm averages 4 days (± 1) during the long rainy season.

The short rainy season, on the other hand, occurs on average on August 26 (± 7 days) and ends around November 8 (± 11 days). It lasts 73 days (± 13) with a mean rainfall of 386 mm (± 121). The mean number of rainy days contributing to this seasonal total is 23 days (± 7), yielding a mean daily rainfall of 17 mm/day (± 3). During this short rainy season, the longest dry spells last on average 11 consecutive days (± 2). The number of rainy days with rainfall exceeding 50 mm averages 1.5 days (± 1). The calculated coefficients of variation (CV) range from 3 to 33% and are relatively high overall.

Table 4. Intra-Seasonal Descriptors (ISD) of the Rainy Season

Intra-seasonal Descriptors	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)
Long rainy season			
ORS (date)	April 5	19	20
ERS (date)	July 21	17	8
LRS (days)	108	24	22
STR (mm)	508	169	33
NRD (day)	30	8	27
MDR (mm/day)	13	2	15
ER (day)	13	2	15
DS (day)	4	1	25
Short rainy season			
ORS (date)	August 26	7	3
ERS (date)	November 8	11	4
LRS (days)	73	13	18
STR (mm)	386	121	31
NRD (day)	23	7	30
MDR (mm/day)	17	3	18
ER (day)	11	2	18
DS (day)	1.5	1	30

3.2 SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF PEST MILS

The Mean Infestation Levels (MILs) of *H. armigera* ranged from 0 to 0.9 caterpillar per 30 plants during the 1995–2000 period. The highest infestation peaks were recorded in the area below the 9th parallel north, i.e., in the central and southern parts of the cotton basin. These infestation peaks ranged from 0.5 to 0.9 caterpillar per 30 plants. In the northern area, MILs were below 0.3 caterpillar per 30 plants (Figure 2A). For the 2011–2016 period, MILs ranged from 0 to 0.4 caterpillar per 30 plants. The highest peaks were 0.4 caterpillar per 30 plants, located in the central and northeastern parts of the cotton basin. The MILs peaks during 2011–2016 were lower compared to the 1995–2000 period (Figure 2B). Mapping the spatio-temporal dynamics of *H. armigera* MILs reveals a significant shift in pest pressure distribution between the two reference periods. While decreasing, the infestation peaks moved from the South and Central zones to the East-Central and Northeast zones of the cotton basin.

The MILs of *J. facialis* during 1995–2000 ranged from 0 to 4 attacked plants per 30 plants. Peaks equal to or greater than 3 attacked plants were in the North-Central part of the cotton area, above the 9th parallel north, between longitudes 6° and 7° W. The spatial distribution during this period appeared homogeneous (Figure 2b). For the 2011–2016 period, MILs ranged from 0 to 16 attacked plants per 30 plants. Infestation peaks greater than 5 attacked plants were observed in the East-Central zone, reaching up to 6 plants, and in the Northeast zone, reaching nearly 16 plants (Figure 48B). Unlike the MIL peaks of *H. armigera*, the MILs peaks of *J. facialis* during 2011–2016 were higher than those of 1995–2000. Mapping the spatio-temporal dynamics of MILs between the two periods shows a shift of the infestation focus from the North in 1995–2000 to the Northeast and East-Central zones in 2011–2016.

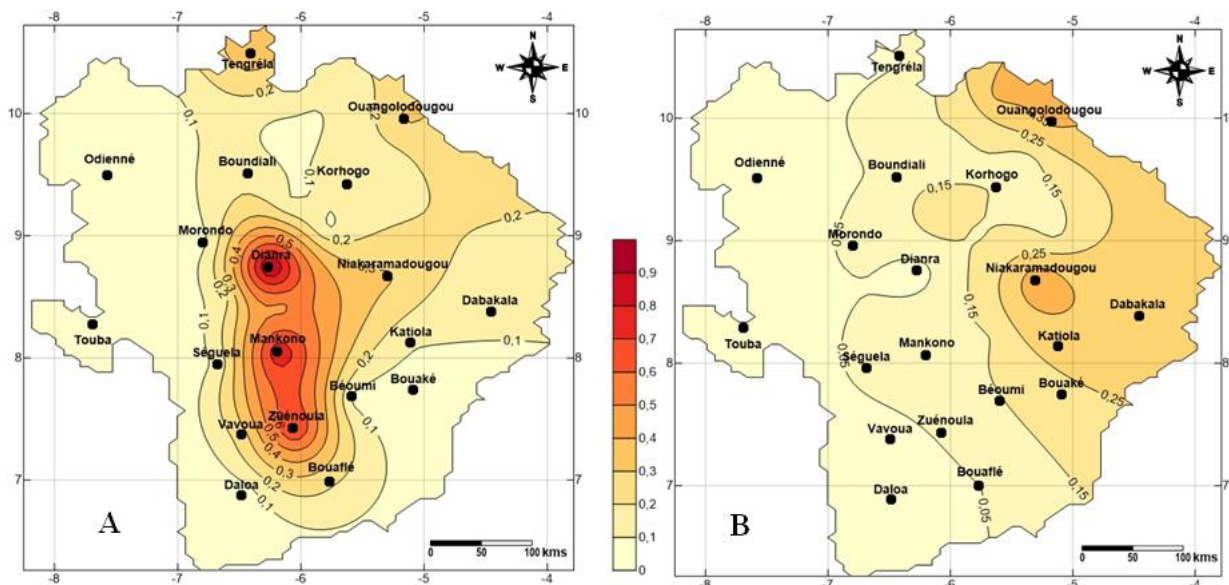


Fig. 2. Spatio-temporal dynamics of mean infestation levels of *H. armigera*; A: 1995-2000 and B: 2011-2016

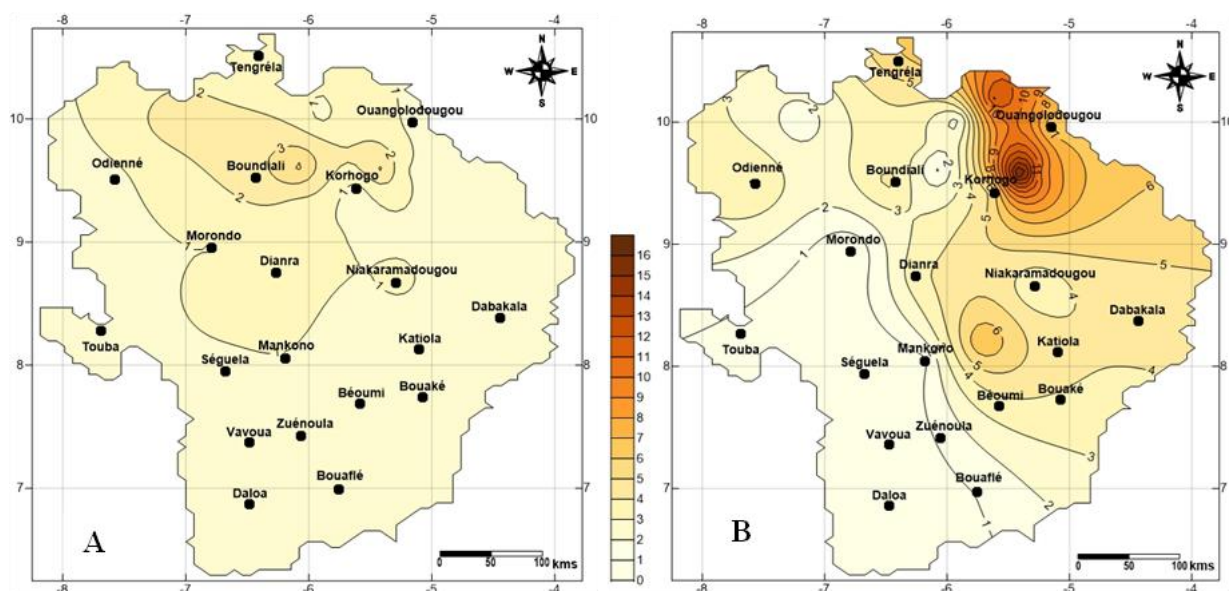


Fig. 3. Spatio-temporal dynamics of mean infestation levels of *J. facialis*, A: 1995-2000 and B: 2011-2016

3.3 RELATIONSHIP BETWEEN PEST MEAN INFESTATION LEVELS AND INTRA-SEASONAL DESCRIPTORS

The Table 5 presents the correlations between the Mean Infestation Levels (MILs) of the pests and the Intra-Seasonal Descriptors (ISDs) in the Ivorian cotton-growing area. For both pests, correlation analysis shows that MILs are positively correlated with ORS and HMP and negatively correlated with the six other ISDs. Moreover, the correlation coefficients (r) are all below 0.4 in absolute value.

However, for *H. armigera*, significant correlations were observed between MILs and ORS ($r = -0.27$; $p = 0.023$) and between MILs and LRS ($r = -0.29$; $p = 0.015$). Very significant correlations were found between MILs and STR ($r = -0.32$; $p = 0.007$) and between MILs and NRD ($r = -0.32$; $p = 0.006$). At a 95% confidence level, the p -values indicate that, to a lesser extent, ORS, LRS, STR, and NRD significantly influence MILs.

For *J. facialis*, the p -values indicate that the ISDs do not significantly influence MILs ($r < 0.3$ and $p > 0.05$).

Table 5. Correlation levels between pest MILs and ISDs

		MIL-ORS	MIL-ERS	MIL-LRS	MIL-STR	MIL-NRD	MIL-MDR	MIL-ER	MIL-DS
<i>Helicoverpa armigera</i>	Coef. (r)	0,27*	-0,05	-0,29*	-0,32**	-0,32**	0,19	-0,03	-0,01
	Prob. (p)	0,023	0,687	0,015	0,007	0,006	0,107	0,824	0,909
<i>Jacobiella facialis</i>	Coef. (r)	0,16	-0,17	-0,22	-0,12	-0,17	0,07	-0,03	-0,13
	Prob. (p)	0,196	0,172	0,076	0,319	0,166	0,576	0,794	0,309

r : correlation coefficient ; p: probability; * significant, ** very significant

4 DISCUSSION

The mean onset date of the rainy season occurs in the first half of May (May 14) under a unimodal regime, and around April 5 and August 26, respectively for the major and minor rainy seasons under a bimodal regime. This gradual establishment of the rainy season from South to North is associated with the meridional shift of the West African monsoon, as suggested by several studies conducted in this region [16]. Furthermore, the dates indicated are close to those reported by [14], who found onset dates between March 20 and May 19 in the unimodal regime and between March 15 and April 29 for the major rainy season and in August for the minor rainy season under the bimodal regime. In Togo, [17] obtained almost similar results: between April 15 and May 27 in the unimodal regime, in April for the major rainy season, and in September for the minor rainy season under the bimodal regime. The mean dates marking the end of the rainy season identified in this study, 6 November for the unimodal regime, 21 July for the main rainy season, and 8 November for the short rainy season in the bimodal regime, fall within the range reported by previous authors. For instance, [14] indicated the end of the rainy season between 1 and 30 November, [18] around 9 November, and [17] between 7 October and 4 November. In the bimodal regime, the average ending dates of the main and short rainy seasons (21 July and 8 November, respectively) are consistent with the findings of [14], who reported July for the main season and between 27 October and 10 November for the short season. The different lengths of the rainy season observed in the cotton basin are consistent with those reported by [19], who estimated them between 175 and 197 days in the unimodal regime, between 115 and 129 days for the major season, and between 56 and 74 days for the minor season in the bimodal regime. The average seasonal rainfall totals associated with these lengths exceed 1000 mm in the unimodal zone, reach 500 mm for the major season, and 380 mm for the minor rainy season. The sum of the totals from the two seasons in the bimodal zone is lower than the average total in the unimodal zone. This difference could be related to the presence of major and secondary reliefs in the northwestern and southern parts of the cotton basin, respectively. Indeed, according to [20], rainfall is positively correlated with the presence of mountain ranges. The mean numbers of rainy days are 53 in the unimodal regime, and 30 and 23 for the main and the short rainy seasons in the bimodal regime. The rainfall amounts per rainy day during the short season are like those of the rainy season in the unimodal zone (17 mm/day). This result indicates higher daily rainfall amounts during the short rainy season compared to the main season. The mean dry spells are 13 and 11 days, respectively, in the main and short rainy seasons. As for extreme rainy days, they amount to 4 days in the main season and 1.5 days in the short season. The relatively high standard deviations of annual rainfall and intra-seasonal descriptors indicate their interannual variability. These results are consistent with those of [21], who showed that high standard deviations reflect strong variability within ISDs.

Pests represent one of the major factors limiting cotton yield. Indeed, they can cause yield losses ranging from 50% to 75%, depending on the country, year, and locality ([22], [23]). Therefore, characterizing the spatio-temporal dynamics of pest MILs and ISDs provides essential information for optimizing pest management in cotton cultivation and increasing producer yields. The study revealed a shift in the peak MILs of *H. armigera* from the southern and central regions during 1995–2000 to the central-eastern and north-eastern regions in 2011–2016. Moreover, MILs observed during 2011–2016 (0 to 0.4 larvae per 30 plants) showed a decreasing trend compared to the 1995–2000 period (0 to 0.9 larvae per 30 plants). This decline in MILs is likely attributable to the implementation of the Insecticide Resistance Management Program (IRMP), adopted in 1999 across all cotton-growing areas. The program requires that all farmers subject their fields to a schedule of six insecticide treatments [7]. In this context, [7] demonstrated the significantly positive impact of the IRMP on these pests. Indeed, after the IRMP implementation in 1999, MILs that had been steadily increasing to reach infestation peaks of 0.23 and 0.79 larvae per 30 plants in the northern and southern zones, respectively, significantly declined during 1999–2007, with peaks not exceeding 0.12 larvae per 30 plants in the north and 0.19 larvae per 30 plants in the south. It is observed that MILs during 1995–2000 were comparable to the pre-IRMP period (1993–1998), whereas those in 2011–2016 showed an increase compared to the post-IRMP period (1999–2007). This upward trend in MILs suggests a resurgence of *H. armigera* in recent years [24].

This resurgence could partly be explained by climatic conditions. Significant correlations were observed between MILs and certain ISDs, with ORS ($r = 0.27$; $p = 0.023$) and LRS ($r = -0.29$; $p = 0.015$), and highly significant correlations with SRT ($r = 0.32$; $p = 0.007$) and NRD ($r = 0.32$; $p = 0.006$). Delays in ORS, reductions in SRT and NRD, and shortening of LRS create favourable conditions for pest development, i.e., lower rainfall and the possibility of higher sunshine exposure. These findings align with those of [25], who showed that the life cycle of this species is closely linked to climatic conditions. The proliferation of this pest could further intensify under the climate variability observed in recent decades. Regarding *J. facialis*, the peaks in mean infestation levels (MIL) shifted from the North-Central to the North-Eastern and Central-Eastern regions. MIL peaks increased from 3 attacked plants in 1995–2000 to nearly 16 attacked plants per 30 plants in 2011–2016, showing an upward trend. These results are consistent with those of [6] for similar periods (1993–2007 and 2011–2015). This upward trend may be explained by the fact that the Insecticide Resistance Management Program (IRMP) was primarily targeted against capsule-feeding larvae, which are the main contributors to yield losses ([26], [24]). Consequently, this situation may have facilitated the emergence of previously minor pests such as *J. facialis*. Additionally, the observed reduction in rainfall in recent years may have contributed to this increase, as rainfall is one of the environmental factors influencing leafhopper proliferation in cotton cultivation [27]. Contrary to [6], who reported significant correlations between MIL and rainfall totals in June and June-July, the correlations between MIL and intra-seasonal descriptors (ISDs) in this study were not significant. However, under favourable conditions for the development of this pest (reduced rainfall and high temperature), as described by [9] and [6], MIL could increase with future disturbances in climatic parameters such as rainfall and temperature, as reported by [28].

5 CONCLUSION

At the end of our work, we could assert without denying there is a substantial interannual variability in intra-seasonal rainfall descriptors and a spatio-temporal modification in the damage caused by the two pests, *Helicoverpa armigera* and *Jacobiella facialis*. Moreover, the significant correlations between intra-seasonal rainfall descriptors and mean infestation levels implement the impact of climate variability in general, and intra-seasonal rainfall patterns particularly, on pest proliferation. These findings underline the significance of integrating climatic conditions into pest management strategies.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to express their sincere gratitude to the National Center for Agronomic Research (CNRA) and the “Société d’Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) “ for making the data available, which was essential for the completion of this article.

REFERENCES

- [1] S. Y. Koffi, «Libéralisation de la filière coton en Côte d’Ivoire quinze ans après: empreinte spatiale et organisationnelle,» *Cinq Continents*, vol. 3, no. 7, pp. 5–17, 2013. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-359759>.
- [2] A. Sinan, K. K. Parfait, et S. T. Katienefohoua, «Mécanisation agricole et production cotonnière: cas de la sous-préfecture de Boron dans la région du Poro (Côte d’Ivoire),» *American Research Journal of Humanities Social Science (ARJHSS)*, EISSN, pp. 46–59, 2020.
- [3] J. N. Konan, I. J. Fofana, S. Silue, N. Diarrassouba, E. N’guessan, et A. Sangare, «Caractérisation agro-morphologique précoce de quarante-huit lignées de cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) en Côte d’Ivoire,» *Afrique Science*, vol. 11, no. 5, pp. 422–432, 2015.
- [4] INTERCOTON, «Statistiques,» 2018. URL: www.intercoton.org/statistiques.php?article=Statistiques&mark=5.
- [5] C. S. Dekoula, B. Kouame, K. E. N’goran, F. G. Yao, J. N. Ehounou, et N. Soro, «Impact de la variabilité pluviométrique sur la saison culturelle dans la zone de production cotonnière en Côte d’Ivoire,» *European Scientific Journal*, vol. 14, no. 12, pp. 143–143, 2018a. DOI: 10.19044/esj.2018.v14n12p143.
- [6] P. W. E. Koné, G. E. C. Ochou, G. J. R. Didi, C. S. Dekoula, M. Kouakou, K. K. N. Bini, M. Dagnogo, et G. O. Ochou, «Évolution spatiale et temporelle des dégâts du jasside *Jacobiella facialis* Jacobi, 1912 (Cicadellidae) en comparaison avec la distribution de la pluviométrie au cours des vingt dernières années dans les zones de culture cotonnière en Côte d’Ivoire,» *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 11, no. 3, pp. 1190–1201, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i3.21>.
- [7] G. E. C. Ochou, K. C. Kobenan, P. W. E. Kone, G. J. R. Didi, A. E. Dick, D. Mamadou, et O. G. Ochou, «Caractéristiques de l’évolution spatio-temporelle de *Helicoverpa armigera* hübner (Lepidoptera-noctuidae) dans les zones de production

- cotonnière de Côte d'Ivoire: Impact du programme de gestion de la résistance aux pyréthrinoïdes,» *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 27, no. 1, pp. 249–261, 2019.
- [8] J. Saguez, «Impact des changements climatiques et mesures d'adaptations pour les ravageurs présents et potentiels en grandes cultures au Québec,» Projet PV 3.2-DP-CÉROM-5 – Revue de littérature, 71 p., 2017.
DOI: 10.13140/RG.2.2.30698.82884.
- [9] O. G. Ochou, M. Kouakou, et K. K. N. Bini, «Reconnaissance des principaux ravageurs et maladies du cotonnier et leurs ennemis naturels,» Édition CNRA, 69 p., 2015.
- [10] M. V. K. Sivakumar, «Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and sudanian climatic zones of West Africa,» *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 42, pp. 295–305, 1988.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(88\)90039-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(88)90039-1).
- [11] R. D. Stern, D. Rijks, I. Dale, et J. Knock, «INSTAT+ for Windows V3.036,» *Statistical Services Center, University of Reading: Reading*, 2006.
- [12] S. U. Y. Allé, A. A. Afouda, K. E. Agbossou, et H. Guibert, «Évolution des descripteurs intra saisonniers des saisons pluvieuses au sud-Bénin entre 1951 et 2010,» *American Journal of Scientific Research*, vol. 94, pp. 55–68, 2013.
- [13] B. Kouamé, J. N. Ehounou, K. E. Kassin, C. S. Dekoula, G. F. Yao, K. E. N'goran, B. J. Kouakou, B. Koné, et N. Soro, «Caractérisation des paramètres agro-climatiques clés de la saison culturale en zone de contact forêt-savane de Côte d'Ivoire,» *European Scientific Journal*, vol. 14, no. 36, pp. 243–259, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n36p243>.
- [14] B. T. A. Goula, B. Srohourou, A. B. Brida, B. I. Kanga, K. A. N'zué, et G. Goroza, «Zoning of rainfall in Côte d'Ivoire,» *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, no. 11, pp. 6004–6015, 2010.
- [15] C. S. Dekoula, B. Kouame, K. E. N'goran, J. N. Ehounou, G. F. Yao, K. E. Kassin, et al., «Variabilité des descripteurs pluviométriques intrasaisonniers à impact agricole dans le bassin cotonnier de Côte d'Ivoire: cas des zones de Boundiali, Korhogo et Ouangolodougou,» *Journal of Applied Biosciences*, vol. 130, pp. 13199–13212, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.4314/jab.v130i1.7>.
- [16] D. J. Kodja, G. Mahé, E. Amoussou, M. Boko, et J. E. Paturel, «Assessment of the Performance of Rainfall-Runoff Model GR4J to Simulate Streamflow in Ouémé Watershed at Bonou's outlet West Africa,» *Earth Sciences*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints201803.0090.v1>.
- [17] E. Adewi, K. Badameli, et V. Dubreuil, «Évolution des saisons des pluies potentiellement utiles au Togo de 1950 à 2000,» *Climatologie*, vol. 7, pp. 89–107, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4267/climatologie.489>
- [18] D. Noufé, B. Lidon, G. Mahé, É. Servat, et J. L. Chaléard, «Impact de l'évolution des conditions agroclimatologiques sur les systèmes de culture à base de banane plantain: le cas de l'Est ivoirien,» *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 15, no. 1, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.16142>.
- [19] A. M. Kouassi, N. J. Kouassi, K. B. Djé, K. F. Kouamé, et J. Biemi, «Analyse de la durée de la saison pluvieuse en fonction de la date de démarrage des pluies en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire,» *Agronomie Africaine*, vol. 30, no. 2, pp. 147–156, 2018.
- [20] M. Diomandé, K. Dongo, K. B. Djé, K. K. H. Kouadio, D. Koné, J. Biémi, et B. Bonfoh, «Vers un changement du calendrier cultural dans l'écotone forêt-savane de la Côte d'Ivoire,» *Agronomie Africaine*, vol. 25, no. 2, pp. 133–147, 2013.
- [21] J. Boyard-Micheau, P. Camberlin, N. Philippon, et V. Moron, «Regional-scale rainy season onset detection: A new approach based on multivariate analysis,» *Journal of Climate*, vol. 26, no. 22, pp. 8916–8928, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00730.1>.
- [22] D. Badiane, M. T. Gueye, E. V. Coly, et O. Faye, «Gestion intégrée des principaux ravageurs du cotonnier au Sénégal et en Afrique occidentale,» *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 9, no. 5, pp. 2654–2667, 2015. DOI: 10.4314/ijbcs.v9i5.36.
- [23] M. Sarr, D. Badiane, et B. Sane, «Évaluation de l'efficacité de nouveaux programmes de protection phytosanitaire contre les principaux ravageurs du cotonnier *Gossypium hirsutum* L. au Sénégal,» *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 10, no. 5, pp. 2163–2174, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i5.18>.
- [24] O. G. Ochou, N. M. Doffou, K. E. N'goran, et K. P. Kouassi, «Impact de la gestion de la résistance aux pyréthrinoïdes sur l'évolution spatio-temporelle des principaux lépidoptères carpophages du cotonnier en Côte d'Ivoire,» *Journal of Applied Biosciences*, no. 53, pp. 3831–3847, 2012.
- [25] C. Cilas, F-R. Goebel, R. Babin, et J. Avelino, «Bio-agresseurs des cultures tropicales face au changement climatique: quelques exemples,» Versailles (France): Éditions Quae, pp. 75–83, 2015.
- [26] T. Martin, O. G. Ochou, N. F. Hala, J. M. Vassal, et M. Vaissayre, «Pyrethroid resistance in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner), in West Africa,» *Management Science: formerly Pesticide Science*, vol. 56, no. 6, pp. 549–554, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1526-4998\(200006\)56:6%3C549::AID-PS160%3E3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1526-4998(200006)56:6%3C549::AID-PS160%3E3.0.CO;2-Y).

- [27] H. Asifa, S. S. Muhammad, M. Abid, A. Saghir, et U. I. Noor, «Forecasting and modeling of sucking insect complex of cotton under agro-ecosystem of Multan-Punjab, Pakistan,» *Journal of Agricultural Sciences*, vol. 51, no. 4, pp. 997–1003, 2014.
URL: <http://pakjas.com.pk/papers/2369.pdf>
- [28] O. J. G. Kpan, F. M. Gnamba, Z. N. Gahi, B. Kouame, D. Baka, Y. M. S. Oga, et J. Biemi, «Simulation des précipitations et des températures annuelles du sud-est côtier ivoirien à l’horizon 2050 avec le logiciel LARS-WG 5 et le modèle HadCM3,» *Revue Africaine et Malgache de Recherche Scientifiques*, vol. 9, no. 1, pp. 23–31, 2021.

Mosquito species composition and distribution dynamics in Kalehe Territory, Democratic Republic of the Congo: A focus on *Anopheles funestus* s.s. and *Anopheles gambiae* s.s

Sévérin N'DO¹⁻²⁻³, Bazoma BAYILI⁴, Jacques 1^{er} Jumeau KABORÉ³⁻⁵, Janvier BANDIBABONE BALIKUBIRI⁶, Bertin ZAWADI MUSAKA⁶, Adrien Marie Gaston BELEM³, and Bantuzeko CHIMANUKA⁶⁻⁷

¹Laboratoire de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Parasitaires, Institut de Recherche en Sciences de la Santé (IRSS, CNRST), Direction Régionale de l'Ouest, 01 BP 545 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

²Lutte antivectorielle, Département des Maladies Tropicales, Médecins Sans Frontières (MSF) OCBA, Carrer de Zamora 54 Barcelona 08005, Barcelone, Spain

³Laboratoire de Recherche en Santé Animale, Université Nazi BONI, 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

⁴Programme Aménagement et Suivi des Ecosystèmes, Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA, CNRST), Direction Régionale de Recherche Environnementale et Agricole de l'Ouest, 01 BP 910, Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

⁵Unité de recherche Maladies à Vecteurs et Biodiversité, Centre International de Recherche-Développement sur l'Élevage en zone Subhumide (CIRDES), 01 BP 454 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

⁶Laboratoire d'Entomologie Médicale et Parasitologie, Centre de Recherche en Sciences Naturelles de Lwiro (CRSN, Lwiro), Goma entre de Lwiro, N3, Bukavu, RD Congo

⁷Faculté de Médecine et Pharmacie, Université Officielle de Bukavu, BP 570 Bukavu, RD Congo

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Malaria remains a major public health issue in the Democratic Republic of the Congo (DRC), with limited entomological data on mosquito species composition in some regions. This study investigates the mosquito species composition in Tushunguti, Kalehe Territory, with a particular focus on *Anopheles funestus* s.s. and *Anopheles gambiae* s.s. Adult mosquitoes were collected using CDC light traps and pyrethrum spray catches. Morphological identification was supplemented by molecular techniques (PCR) to confirm species identities. A total of 245 mosquitoes were collected, with *Culex* species being the most abundant (n=150), followed by *Anopheles funestus* and *Anopheles gambiae*. Molecular analysis identified 49 *Anopheles funestus* s.s. and 20 *Anopheles gambiae* s.s. specimens. The human biting rate (HBR) for *An. funestus* was significantly higher (0.071 bites/person/night) compared to *An. gambiae* (0.028). These results suggest that *An. funestus* plays a dominant role in malaria transmission in the area, particularly in indoor environments. The co-occurrence of both species underlines the need for targeted vector control strategies that address species-specific behavior and distribution. The study emphasizes the importance of continuous entomological surveillance to adapt malaria interventions based on local vector dynamics.

KEYWORDS: *Anopheles funestus*, *Anopheles gambiae*, Species composition, Mosquito distribution, Democratic Republic of the Congo.

1 INTRODUCTION

Malaria remains one of the leading causes of morbidity and mortality worldwide, disproportionately affecting sub-Saharan Africa, which accounts for over 90% of global cases and deaths [1]. Among the countries most affected, the Democratic Republic of the Congo (DRC) ranks second after Nigeria, contributing significantly to global malaria transmission [2]. The persistence of malaria in the DRC is largely due to the high efficiency of its primary vectors, *Anopheles gambiae* sensu stricto (*An. gambiae* s.s.) and *Anopheles funestus* sensu stricto (*An. funestus* s.s.), both of which exhibit marked anthropophilic and endophilic behaviors, making them particularly effective at transmitting *Plasmodium* parasites [3], [4].

These two vector species differ significantly in their ecological preferences and seasonal dynamics. *An. gambiae* s.s. typically breeds in temporary, sunlit pools and is highly influenced by seasonal rainfall patterns, while *An. funestus* s.s. favors more permanent, vegetated water bodies such as swamps and rice paddies, allowing it to persist year-round [5], [6]. These ecological differences influence their distribution, abundance, and contribution to malaria transmission across varying landscapes and seasons [7].

Understanding the species composition and behavior of malaria vectors is critical for developing and implementing effective vector control strategies, especially in the context of increasing insecticide resistance. Interventions such as long-lasting insecticidal nets (LLINs) and indoor residual spraying (IRS) have been cornerstones of malaria control programs. However, their efficacy is compromised by the emergence and spread of resistance mechanisms in *An. gambiae* s.s. and *An. funestus* s.s., as observed in several African countries, including the DRC [4], [8], [9].

Eastern DRC, particularly the Sud-Kivu Province, represents a region of intense malaria transmission but remains underrepresented in entomological research. The local geography, characterized by high rainfall, dense vegetation, and subsistence agriculture, provides ideal breeding conditions for a diversity of mosquito species. However, there is a lack of updated, location-specific entomological data for rural areas such as Tushunguti in Kalehe Territory, hindering targeted, evidence-based vector control interventions [9], [10].

To fill this gap, the present study aimed to characterize the mosquito species composition in Tushunguti, with a particular focus on *An. funestus* s.s. and *An. gambiae* s.s. By integrating morphological identification with molecular techniques, we sought to establish a baseline for vector species diversity and relative abundance. This work provides critical data to support the design of adaptive, ecologically informed malaria control strategies in this high-transmission region of eastern DRC.

2 METHODS

2.1 STUDY SITE

This study was conducted in Tushunguti (1°48'19" S, 28°45'00.5" E), a rural village located in Ziralo Administrative Grouping, Kalehe Territory, Sud-Kivu Province, eastern Democratic Republic of the Congo (DRC). Tushunguti lies within a region characterized by a tropical rainforest climate, with high humidity and abundant rainfall, which provides favorable conditions for mosquito breeding and year-round malaria transmission. The area is situated at an elevation of approximately 1300 m, and is dominated by subsistence agriculture, with households often surrounded by small-scale farms and standing water bodies such as rice paddies, ponds, and slow-flowing streams - ideal habitats for *Anopheles* mosquitoes. The population relies primarily on rainwater and nearby surface water sources, which further contributes to the proliferation of breeding sites. Malaria is endemic in the region, with both *Plasmodium falciparum* (*P. falciparum*) and *P. vivax* reported, though *P. falciparum* is the predominant species [10]. Previous entomological surveys in Sud-Kivu province have identified both *Anopheles funestus* s.s. and *Anopheles gambiae* s.s. as the primary malaria vectors. Tushunguti represents a typical high-transmission setting in eastern DRC, where the effectiveness of vector control interventions is increasingly challenged by insecticide resistance.

2.2 ADULT MOSQUITO COLLECTION TECHNIQUES AND IDENTIFICATION

Mosquito sampling was conducted using two complementary collection methods: Centers for Disease Control and Prevention (CDC) light traps and indoor resting collections via Pyrethrum Spray Catches (PSC).

CDC Light Trap Collections

CDC light traps were deployed in 55 households over a period of 11 nights, with five houses sampled per night. Traps were positioned indoors near sleeping areas where occupants were protected by long-lasting insecticidal nets (LLINs). Due to local

security constraints, traps were operated from 16: 00 to 08: 00. This method was designed to target endophagic, host-seeking mosquitoes during their nocturnal activity period.

Indoor Resting Collections

Indoor resting mosquitoes were collected from 10 additional households using pyrethrum spray catches (PSC). Rooms were prepared by laying white collection sheets on the floor and covering furniture. Aerosol insecticides were sprayed, and knocked-down mosquitoes were collected from the sheets approximately 10-15 minutes after spraying. This method was used to sample blood-fed and resting mosquitoes. All specimens were morphologically identified to genus and species level using the taxonomic key of Gillies and Coetzee [11]. Only *Anopheles* mosquitoes were retained for further analyses. Individual *Anopheles* specimens were stored in 1.5 ml tubes containing silica gel and kept at ambient temperature for subsequent molecular identification.

2.3 MOLECULAR ANALYSIS

Genomic DNA was extracted from individual mosquitoes using the standard cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) 2% protocol [12]. Species identification within the *Anopheles funestus* group and the *Anopheles gambiae* complex was performed using PCR-based protocols described by Koekemoer et al. [13] and Santolamazza et al. [14], respectively.

2.4 DATA ANALYSIS

Human biting rate (HBR), expressed as the aggressive density (number of bites per person per night), was estimated using CDC light trap collections according to the following formula:

$$HBR = \frac{\text{Total number of unfed Anopheles females collected}}{\text{Number of houses} \times \text{Number of collection nights}}$$

To analyze the count data from mosquito collections, a mixed-effects negative binomial regression model was applied using STATA/IC Version 13.1 [15]. Statistical significance was considered at a 95% confidence level ($p < 0.05$).

3 RESULTS

3.1 MOSQUITO ABUNDANCE AND SPECIES COMPOSITION

A total of 245 mosquitoes were collected using both sampling methods (Table). CDC light traps accounted for the majority of the catch, with 215 mosquitoes collected, while indoor residual collection yielded 30 specimens.

In CDC light traps, *Culex* spp. were the most abundant, representing 69.8% ($n = 150$) of the total catch, followed by *An. funestus* (20.0%, $n = 43$), *An. gambiae* (7.9%, $n = 17$), and *Mansonia* spp. (2.3%, $n = 5$). The mean number of mosquitoes per household was 3.91, with *Culex* spp. contributing the highest mean density (2.73 mosquitoes/house).

In contrast, Indoor resting mosquitoes collections revealed a different species composition. *An. gambiae* was predominant, accounting for 86.7% ($n = 26$) of the specimens, followed by *An. funestus* (13.3%, $n = 4$). No *Culex* or *Mansonia* spp. were recorded with this method. The average mosquito density per household was 3.00, with *An. gambiae* contributing the highest mean (2.60 mosquitoes/house).

Table 1. Comparison of mosquito species composition between CDC light traps and residual indoor collection

Mosquito species	CDC light trap (n= 55 houses)				Residual fauna (n= 10 houses)			
	n	Proportion %	Mean/house	SD	n	Proportion %	Mean/house	SD
<i>Anopheles funestus</i> s.s.	43	20.00	0.78	1.45	4	13.30	0.40	0.70
<i>Anopheles gambiae</i> s.s.	17	7.90	0.31	0.79	26	86.70	2.60	1.43
<i>Culex</i> spp.	150	69.80	2.73	3.27	0	0.00	0.00	0.00
<i>Mansonia</i> spp.	5	2.30	0.09	0.44	0	0.00	0.00	0.00
Total	215	100.00	3.91	-	30	100.00	3.00	-

n = number of mosquitoes; *SD* = Standard Error

3.2 HUMAN BITING RATE OF ANOPHELES MOSQUITOES

The overall human biting rate (HBR) for *Anopheles* spp., as estimated from CDC light trap collections, was 0.099 bites/person/night. Among the vector species, *Anopheles funestus* exhibited the highest biting rate at 0.071 bites/person/night, followed by *Anopheles gambiae* with a rate of 0.028 bites/person/night (Figure).

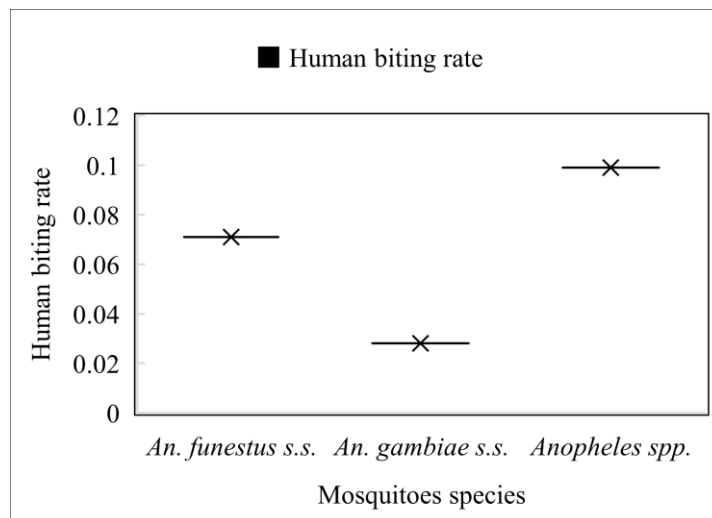


Fig. 1. Indoor human biting rate of *Anopheles* mosquitoes in Tushunguti in January and February 2018

3.3 MOLECULAR IDENTIFICATION OF MOSQUITO SPECIES

A total of 69 mosquitoes were successfully identified by polymerase chain reaction (PCR) as belonging to the *Anopheles funestus* group and the *Anopheles gambiae* complex. Among them, 49 specimens were identified as *Anopheles funestus* sensu stricto (*An. funestus s.s.*) and 20 as *Anopheles gambiae* sensu stricto (*An. gambiae s.s.*); confirming co-circulation of both major malaria vectors in the area.

4 DISCUSSION

This study provides updated insights into the mosquito fauna composition in Tushunguti, Kalehe Territory, a high-transmission zone in eastern DRC. The co-occurrence of *Anopheles funestus s.s.* and *Anopheles gambiae s.s.* confirms their continued role as the primary malaria vectors in this region, consistent with previous findings from Sud-Kivu and other parts of sub-Saharan Africa [8], [9]. These results are particularly important given the limited and outdated entomological data in this part of the DRC.

Our findings show a higher indoor biting rate and relative abundance of *An. funestus* compared to *An. gambiae*, suggesting a dominant role of *An. funestus* in local malaria transmission. This aligns with recent trends reported across Africa, where *An. funestus* has been resurging as a major malaria vector, especially in areas where environmental conditions support its preferred larval habitats such as permanent water bodies with vegetation [4], [6], [16]. The predominance of *An. funestus* in CDC light trap collections may also reflect its highly endophagic and anthropophilic behavior, which facilitates efficient transmission of *Plasmodium* parasites indoors.

In contrast, the higher proportion of *An. gambiae* in pyrethrum spray catches (PSC) underscores its endophilic resting behavior and its tendency to remain indoors post-feeding. This behavioral distinction between the two species highlights the need for combining multiple sampling methods in entomological surveillance to obtain a comprehensive understanding of vector ecology. It also supports the recommendation that vector control interventions, such as indoor residual spraying (IRS) and long-lasting insecticidal nets (LLINs), must consider species-specific behavioral patterns to maximize impact [7], [17].

The simultaneous presence of both vectors may also complicate malaria control efforts, especially if they display varying levels of insecticide resistance. Previous studies in the Sud-Kivu province have demonstrated resistance to pyrethroids in both *An. gambiae s.s.* and *An. funestus s.s.*, driven by metabolic and target site mechanisms [8], [9]. This resistance may compromise

the efficacy of current LLINs and IRS campaigns, emphasizing the urgent need to implement integrated vector management strategies, including novel tools such as insecticide-treated wall linings or attractive toxic sugar baits [10].

Molecular identification confirmed the species composition determined morphologically, demonstrating the importance of combining these approaches for accurate vector surveillance. Misidentification within the *An. gambiae* complex or *An. funestus* group can lead to incorrect inferences about vector roles, especially when cryptic sibling species are involved [13], [14]. The use of molecular techniques, as done in this study, provides robust evidence of species distribution and strengthens entomological baselines for future monitoring.

These findings have important implications for malaria control in Kalehe Territory and similar high-transmission settings. The local ecology, characterized by rice paddies, permanent streams, and subsistence agriculture, provides year-round breeding sites that favor vector persistence. Therefore, any vector control strategy should be tailored to address both larval and adult stages, ideally combining environmental management, larval source reduction, and adult vector control measures.

Lastly, this study reinforces the critical importance of ongoing entomological surveillance in remote and under-researched areas of the DRC. Vector populations and behaviors are dynamic and may shift in response to environmental changes or control interventions. Sustained monitoring can inform timely adaptations in control programs and prevent the resurgence of transmission in vulnerable communities.

5 CONCLUSION

This study confirms the co-existence of *Anopheles funestus* s.s. and *Anopheles gambiae* s.s. in Tushunguti, Kalehe Territory, with *An. funestus* emerging as the predominant species in indoor biting activity. The observed variation in species composition between sampling methods highlights the ecological and behavioral diversity of malaria vectors in this region. Understanding the relative abundance and biting behavior of these vectors is critical for tailoring effective vector control strategies. In areas like Tushunguti, where environmental conditions favor both species, control measures must consider species-specific differences in habitat use and feeding/resting preferences. These findings provide a valuable entomological baseline for ongoing surveillance and support the integration of ecological and behavioral data into malaria control planning in eastern DRC.

ACKNOWLEDGMENT

The authors extend their gratitude to the MSF teams in Barcelona (Spain) and Nairobi (Kenya), as well as to the Bukavu and Numbi project teams in Sud-Kivu Province, DRC, for their valuable support. We also sincerely thank the community of Tushunguti for their cooperation and participation during the experimental activities.

FUNDING

This study was supported by Médecins Sans Frontières (MSF) through the Transformational Investment Capacity initiative entitled 'Innovative Vector Control Tools for Malaria Control'. The funders had no involvement in the study design, data collection and analysis, decision to publish, or manuscript preparation.

CONFLICT OF INTEREST

No conflict of interest was declared by any of the authors associated with this work.

ETHICAL APPROVAL

This study protocol received approval from the National Health Ethics Committee of the Democratic Republic of the Congo (Approval No. CNES 001/DPSK/111PM/2017).

REFERENCES

- [1] WHO, *World malaria report 2023*. Geneva: World Health Organization, 2023.
- [2] WHO, *World malaria report 2024*. Geneva: World Health Organization, 2024. Accessed: Jun. 23, 2025.
- [3] M. Coetzee, R. H. Hunt, R. Wilkerson, A. D. Torre, M. B. Coulibaly, and N. J. Besansky, «Anopheles coluzzii and Anopheles amharicus, new members of the Anopheles gambiae complex,» *Zootaxa*, vol. 3619, no. 3, pp. 246–274, 2013, doi: 10.11646/zootaxa.3619.3.2.
- [4] R. Akoton *et al.*, «Vectorial competence, insecticide resistance in Anopheles funestus and operational implications for malaria vector control strategies in Benin Republic,» *Malaria Journal*, vol. 22, no. 385, pp. 1–12, 2023, doi: 10.1186/s12936-023-04815-9.
- [5] M. T. Gillies and B. De Meillon, *The Anophelinae of Africa South of the Sahara (Ethiopian Zoogeographical Region)*, vol. 54. Johannesburg: Publications of the South African Institute for Medical Research., 1968.
- [6] J. M. Mwangangi *et al.*, «Shifts in malaria vector species composition and transmission dynamics along the Kenyan coast over the past 20 years,» *Malaria Journal*, vol. 12, no. 13, 2013, doi: 10.1186/1475-2875-12-13.
- [7] W. Takken and N. O. Verhulst, «Host Preferences of Blood-Feeding Mosquitoes,» *Annual Review of Entomology*, vol. 58, no. 1, pp. 433–453, 2013, doi: 10.1146/annurev-ento-120811-153618.
- [8] J. Bandibabone *et al.*, «Investigating Molecular Mechanisms of Insecticide Resistance in the Eastern Democratic Republic of the Congo,» *Malaria Journal*, vol. 20, no. 464, pp. 1–14, 2021, doi: <https://doi.org/10.1186/s12936-021-04002-8>.
- [9] S. N'Do *et al.*, «Insecticide resistance profiles in malaria vector populations from Sud-Kivu in the Democratic Republic of the Congo,» *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 115, no. 11, pp. 1339–1344, 2021, doi: 10.1093/trstmh/traab116.
- [10] S. N'Do, J. Bandibabone, B. Musaka, C. Habamungu, A. M. G. Belem, and B. CHIMANUKA, «Evaluation de l'efficacité des appâts sucrés toxiques à base d'ivermectine contre Anopheles funestus s.s. et Anopheles gambiae s.s. résistants aux pyréthrinoides dans la province du Sud-Kivu en République démocratique du Congo,» *Science et Technique, Série Sciences de la Santé*, vol. 47, no. 1, pp. 165–179, 2024.
- [11] M. T. Gillies and M. Coetzee, *A Supplement to the Anophelinae of Africa South of the Sahara (Afrotropical Region)*. Publications of the South African Institute for Medical Research., 1987.
- [12] R. J. Post, P. K. Flook, and A. L. Millest, «Methods for the preservation of insects for DNA studies,» *Biochemical Systematics and Ecology*, vol. 21, no. 1, pp. 85–92, 1993, doi: 10.1016/0305-1978(93)90012-g.
- [13] L. L. Koekemoer, L. Kamau, R. H. Hunt, and M. Coetzee, «A cocktail polymerase chain reaction assay to identify members of the Anopheles funestus (Diptera: Culicidae) group,» *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 66, no. 6, pp. 804–11, 2002, doi: 10.4269/ajtmh.2002.66.804.
- [14] F. Santolamazza, E. Mancini, F. Simard, Y. Qi, Z. Tu, and A. della Torre, «Insertion polymorphisms of SINE200 retrotransposons within speciation islands of Anopheles gambiae molecular forms,» *Malaria Journal*, vol. 7, no. 163, 2008, doi: 10.1186/1475-2875-7-163.
- [15] StataCorp, *Stata Statistical Software: Release 16*. (2019). College Station, TX: StataCorp LLC.
- [16] J. M. Riveron, M. Osaé, A. Egyir-Yawson, H. Irving, S. S. Ibrahim, and C. S. Wondji, «Multiple insecticide resistance in the major malaria vector Anopheles funestus in southern Ghana: implications for malaria control,» *Parasites and Vectors*, vol. 9, no. 504, 2016, doi: 10.1186/s13071-016-1787-8.
- [17] M. R. Reddy *et al.*, «Outdoor host seeking behaviour of Anopheles gambiae mosquitoes following initiation of malaria vector control on Bioko Island, Equatorial Guinea,» *Malaria Journal*, vol. 10, no. 184, 2011, doi: 10.1186/1475-2875-10-184.

Utilisation des espèces fourragères par les pasteurs et agroéleveurs pour le traitement sanitaire des ruminants domestiques à l'ouest du Burkina Faso

[Use of fodder species by pastoralists and agro-pastoralists for the health treatment of domestic ruminants in western Burkina Faso]

Nafizatou Coulibaly¹, Salifou Ouédraogo-Koné^{1,2}, Sévérin N'Do³, Relwendé Justin Ouedraogo⁴, Abdoul Kader Gandema¹, Lassina Ouattara¹⁻⁵, and Paulin Ouoba⁵

¹École Doctorale Sciences Naturelles et Agronomie (SNA), Université Nazi BONI BP 1091, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

²Institut du Développement Rural (IDR), Université Nazi BONI BP 1091, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

³Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Institut de Recherche en Sciences de la Santé, Direction Régionale de l'Ouest (IRSS-DRO), Laboratoire de Recherches sur les Maladies Infectieuses et Parasitaire (LR-MIP), Burkina Faso

⁴Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Institut de Recherche en Sciences de la Santé (IRSS), Laboratoire de Recherche-Développement de Phytomédicaments et Médicaments (LRD, PM), Burkina Faso

⁵Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre (UFR, SVT), Université Nazi BONI BP 1091, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

⁴Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agricole (INERA), Burkina Faso

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In a context of limited access to modern veterinary care, this study aims to document the ethnoveterinary practices used by pastoralists and agro-pastoralists in the province of Houet in western Burkina Faso for the treatment of animal diseases. A survey was conducted between July and October 2022 among 270 livestock farmers, using semi-structured questionnaires, individual interviews and focus groups. A total of 44 plant species belonging to 28 families were identified. The most frequently cited species were *Faidherbia albida* (58.1%), *Khaya senegalensis* (54.2%), *Guiera senegalensis* (43%), *Parkia biglobosa* (31.8%), followed by *Vitellaria paradoxa* and *Sterculia setigera*. The leaves and bark were the most commonly used parts of the species listed. The fruits (5%) and pulp (7%), which are rarely prepared, were mainly administered as food (100% and 50% respectively). The leaves are used in all kinds of recipes and administered in parallel through force-feeding, food, exposure and application. The most commonly treated pathologies were animal trypanosomiasis (19.04%), envenomation (14.28%) and parasitic infestations (12.85%). Multiple factor analysis revealed significant differences between the two groups of livestock farmers in terms of the species used and the therapeutic approaches adopted. These results confirm the importance of endogenous knowledge in local animal health and could help in the search for resilient solutions for the health treatment of domestic farm animals.

KEYWORDS: survey, plant species, leaves, bark, animal pathology, feeding, force-feeding.

RESUME: Dans un contexte de recours limité aux soins vétérinaires modernes, cette étude vise à documenter les pratiques ethnovétérinaires utilisées par les pasteurs et agroéleveurs de la province du Houet à l'ouest du Burkina Faso pour le traitement des maladies animales. Une enquête a été conduite entre juillet et octobre 2022 auprès de 270 éleveurs, à l'aide de questionnaires semi-structurés, d'entretiens individuels et de focus groupes. Au total, 44 espèces végétales appartenant à 28 familles ont été recensées. Les espèces les plus fréquemment citées ont été *Faidherbia albida* (58,1%), *Khaya senegalensis* (54,2%), *Guiera senegalensis* (43%), *Parkia*

biglobosa (31,8%) suivit par *Vitellaria paradoxa* et *Sterculia setigera*. Les feuilles et les écorces ont été les organes les plus utilisés des espèces répertoriées. Les fruits (5%) et les pulpes (7%), très peu préparés, ont été majoritairement administrés par alimentation respectivement à 100% et 50%. Les feuilles sont présentées sous toutes les formes de recettes et administrées parallèlement en gavage ; alimentation ; exposition et application. Les pathologies les plus traitées sont été les trypanosomoses animales (19,04 %), l'envenimation (14,28 %) et les infestations parasitaires (12,85 %). L'analyse factorielle multiple a révélé des différences notables entre les deux groupes d'éleveurs quant aux espèces utilisées et aux approches thérapeutiques adoptées. Ces résultats confirment l'importance des savoirs endogènes dans la santé animale locale et pourraient aider dans la recherche de solutions résilientes pour le traitement sanitaire des animaux domestiques d'élevage.

MOTS-CLEES : enquête, espèces végétales, feuilles, écorces, pathologie animale, alimentation, gavage.

1 INTRODUCTION

L'élevage joue un rôle central dans les économies rurales du Burkina Faso, particulièrement dans la zone soudanienne, où les pasteurs et agroéleveurs dépendent largement de leurs troupeaux pour leur subsistance [1]; [2]. Cependant, les services vétérinaires modernes demeurent largement insuffisants en zones rurales, confrontés à des limitations logistiques, financières et de couverture géographique [1]. Cette insuffisance conduit les éleveurs à recourir systématiquement aux pratiques ethnovétérinaires issues du savoir traditionnel pour prévenir et soigner les maladies animales [3]; [1]; [4]; [5].

Les pratiques ethnovétérinaires reposent sur l'utilisation de plantes médicinales et de remèdes traditionnels transmis de génération en génération. A travers l'Afrique subsaharienne, elles constituent une médecine complémentaire largement répandue, utilisée par plus de 80 % des communautés rurales [6]; [7]; [8]; [9]. Au Burkina Faso, les plantes médicinales représentent jusqu'à 95 % des remèdes ethnovétérinaires recensés, en particulier chez les pasteurs [10]. Des familles botaniques telles que les Fabaceae, Combretaceae, Mimosaceae et Euphorbiaceae sont parmi les plus documentées dans les soins vétérinaires traditionnels [1]; [4]; [11]. Par exemple, dans le Sahel burkinabè, des espèces comme *Acacia macrostachya*, *Combretum glutinosum* ou *Mitragyna inermis* sont utilisées pour lutter contre les infestations gastro-intestinales [4]. Une autre étude conduite au Bénin a révélé une forte diversité de recettes à base de plantes telles que *Aframomum melegueta*, *Bridelia ferruginea* et *Momordica charantia* [5].

Ces pratiques sont motivées par la perception d'une efficacité thérapeutique, le coût élevé des médicaments vétérinaires modernes, ainsi que leur indisponibilité dans les zones rurales et l'accessibilité facile aux espèces fourragère végétale dans les pâturages naturels [6]; [12]. Par ailleurs, les recherches phytopharmacologiques récentes ont mis en évidence la richesse de ces plantes en composés bioactifs (flavonoïdes, tanins, alcaloïdes), reconnus pour leurs effets antimicrobiens et antiparasitaires [13]; [6].

Toutefois, l'absence de standardisation des méthodes de préparation (décoction, macération, infusion) et de dosage limite l'efficacité reproductible de ces traitements et soulève des préoccupations en matière de sécurité [14]. En parallèle, l'antibiorésistance croissante constitue une menace globale pour la santé animale et humaine [15], rendant urgente l'identification d'alternatives thérapeutiques accessibles, efficaces et durables.

Malgré leur utilité, les pratiques ethnovétérinaires utilisant les espèces fourragères restent faiblement documentées et risquent de disparaître à cause de l'érosion du savoir traditionnel, de l'urbanisation, et du manque de reconnaissance officielle et les difficultés rencontrées lors du pâturage par les éleveurs [1]; [16]; [8]; [5]. Ainsi pour contribuer à la reconnaissance et à la valorisation du patrimoine ethnovétérinaire local en vue d'une approche durable intégrée en faveur de la santé animale, la présente étude a été initiée pour identifier les pathologies animales traitées et les plantes fourragères utilisées dans les pratiques vétérinaires des pasteurs.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITE D'ÉTUDE

L'étude a été conduite dans la province du Houet, l'une des trois provinces de la région des Hauts-Bassins, à l'ouest du Burkina Faso. Cette région couvre environ 9,4 % du territoire national situé entre 11°27' de latitude nord et 4°21' longitude ouest. Le climat de la région est de type tropical soudanien, avec une pluviométrie annuelle comprise entre 800 et 1 100 mm, répartie de manière inégale selon les années et les localités. La température moyenne est de 31°C. La région dispose d'importantes ressources hydriques souterraines et d'une végétation relativement diversifiée [17]. Ce capital écologique en fait une zone propice à l'exploitation des ressources végétales locales à des fins thérapeutiques, en particulier dans le domaine vétérinaire [18]. Malgré son effectif élevé en ruminants [19], la région reste la principale zone d'accueil des bovins dans la crise sécuritaire qui prévaut. La charge animale associée aux conditions climatiques locales favorise la persistance de pathologies animales endémiques, émergentes et réémergentes avec prises en charge précaire dans les

zones marginalisées. Cette situation pousse les éleveurs à recourir à des pratiques ethnovétérinaires, fondées sur l'usage de plantes fourragères disponible localement.

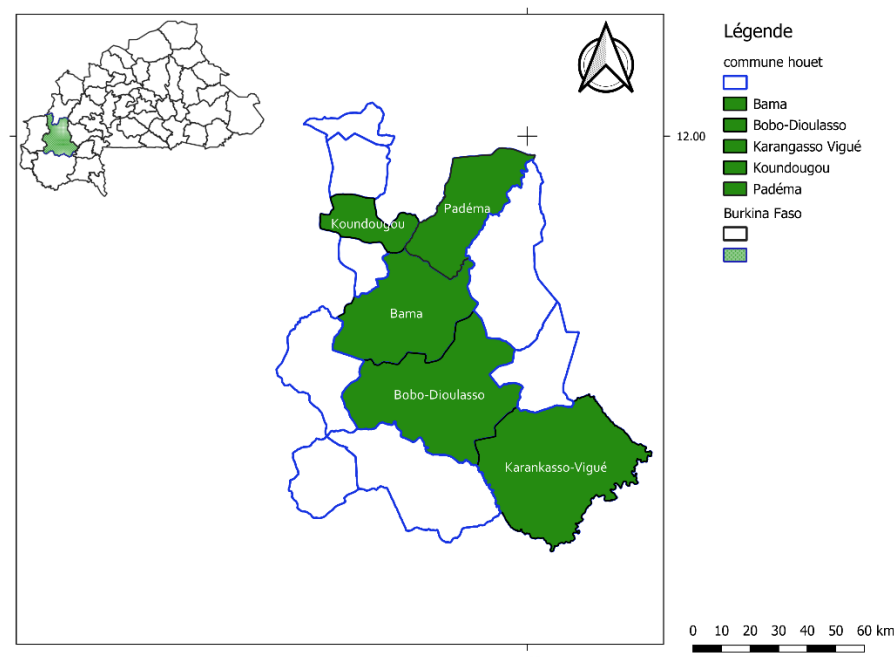


Fig. 1. Représentation géographique de la zone d'étude

2.2 POPULATION D'ETUDE ET CRITERES DE SELECTION

L'étude a concerné des pasteurs et agroéleveurs de la province du Houet, identifiés avec l'appui des services techniques de l'élevage et des structures communautaires locales. Ont été inclus les producteurs utilisant majoritairement des traitements à base de plantes ou de produits naturels, disposant d'un cheptel significatif, et ayant donné leur consentement libre à participer à l'enquête. L'enquête s'est déroulée dans plusieurs localités à forte concentration d'éleveurs, notamment les villages de Badara, Yirwall, Bama 5, Sourougoudougou et Tanwogoma dans la commune de Bama; Karangasso Vigué, Soumousso, Klesso, Gonkoro, Larba, Dèguèlé et Kien dans la commune de Karangasso Vigué; ainsi que dans les regroupements peulhs de Padema et Koundougou et dans la ville de Bobo-Dioulasso

2.3 ECHANTILLONNAGE

La taille de l'échantillon a été déterminée à l'aide de la formule de [21], en se basant sur la population active du secteur de l'élevage dans la province du Houet, avec une marge d'erreur fixée à 5%. Un total de 270 éleveurs a été enquêté. La répartition entre pasteurs et agroéleveurs a été établie selon les critères de mode d'exploitation définis par [22], en fonction du mode de production et de l'importance relative de l'activité agricole

2.4 COLLECTE DES DONNÉES

Les données ont été recueillies à l'aide d'un questionnaire semi-structuré, inspiré de [20], administré lors d'entretiens individuels et de focus groups. L'enquête a été menée dans plusieurs localités de la province du Houet, sélectionnées pour leur forte concentration d'éleveurs pratiquant les soins traditionnels. Les informations collectées portaient sur les pathologies rencontrées, les espèces fourragères utilisées, les formes de préparation et les modes d'administration des remèdes. L'enquête a été conduite en langue locale, par une équipe formée, entre juillet et octobre 2022.

2.5 PARAMÈTRES ÉVALUÉS

Les principaux paramètres de l'étude ont été la définition du profil sociodémographique, l'identification des plantes utilisées, les modes de préparations, les modes d'administration et les pathologies traitées. A travers les données collectées, les fréquences de citations ont été déduits et les associations des paramètres évalués. Pour les analyses, la pathologie maux de ventre regroupe les

ballonnements, les ulcères et maux de ventre cités par les enquêtés. Toutes les autres pathologies dont les proportions parmi les pathologies traitées n'excèdent pas 5% forment le groupe de autres maux.

2.6 ANALYSE DES DONNÉES

Les données ont été saisies sous Excel ensuite elles ont été nettoyées et regroupées. La base a été importée sur le logiciel R pour les analyses. Une analyse factorielle multiple (AFM) a été réalisée à l'aide des packages FactoMineR, Factoextra et Factoshiny afin d'explorer les relations entre les pathologies, les espèces végétales utilisées et les profils d'éleveurs. Des analyses de fréquences et des tests du χ^2 ont également été effectués pour évaluer les associations entre variables qualitatives, avec un seuil de significativité fixé à $p < 0,05$.

2.7 CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES

La participation à l'étude s'est faite sur la base du consentement libre et éclairé des éleveurs, après explication des objectifs de l'enquête dans leur langue locale. L'anonymat des participants a été respecté, et les données recueillies ont été traitées de manière confidentielle. Aucune information personnelle ni savoir traditionnel n'a été utilisé à des fins commerciales ou expérimentales en dehors du cadre de cette recherche.

3 RÉSULTATS

3.1 CARACTÉRISTIQUES SOCIO-DÉMOGRAPHIQUES

Le secteur de l'élevage des ruminants dans la zone d'étude est largement dominé par les hommes, qui représentent 98 % des répondants. La majorité des éleveurs sont mariés (97,61 %) et appartiennent majoritairement à la tranche d'âge comprise entre 30 et 60 ans (74,28 %). Sur la base des critères de classification retenus, 75,23 % des producteurs ont été identifiés comme pasteurs, tandis que 76,66 % déclarent recourir aux soins ethnovétérinaires pour la prise en charge des pathologies animales (Figure 2).

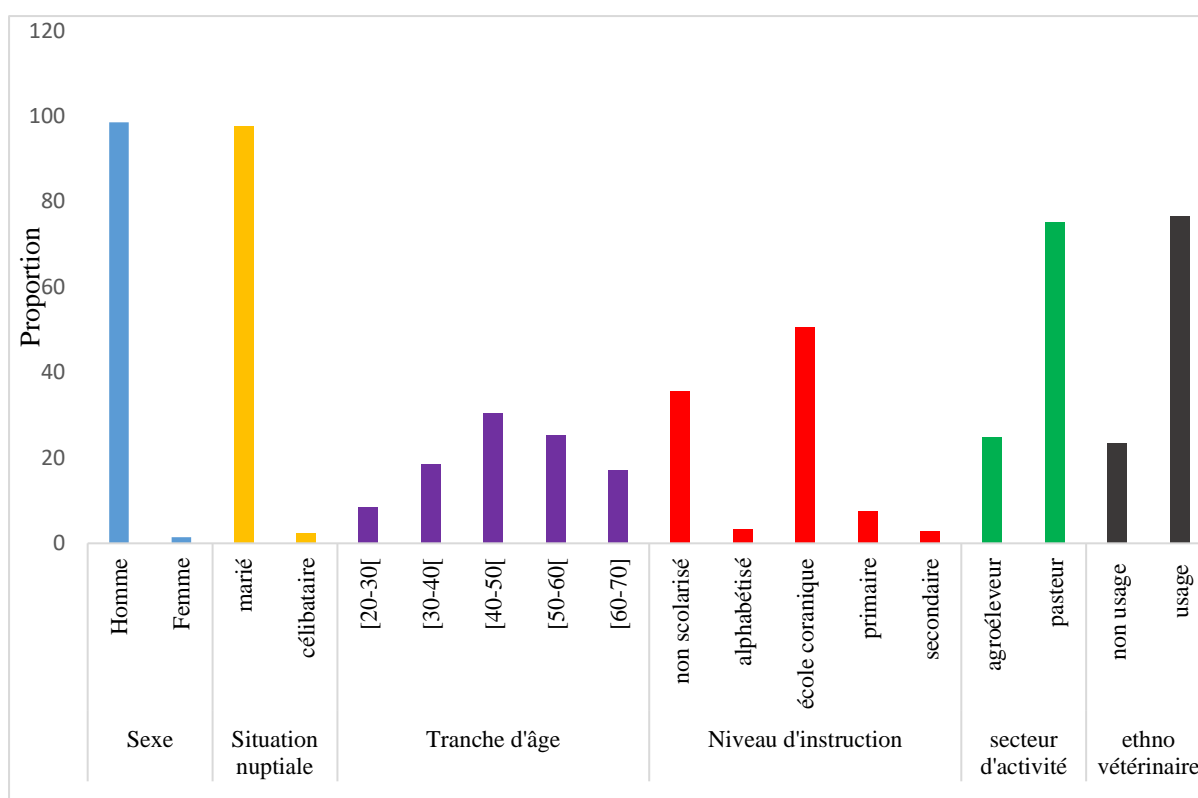


Fig. 2. Caractéristiques socio-professionnelles des producteurs enquêtés

3.2 PLANTES FOURRAGERES UTILISEE DANS LES TRAITEMENTS SANITAIRES

Au total, 44 espèces végétales ont été recensées au cours de l'enquête. Parmi celles-ci, *Faidherbia albida*, *Khaya senegalensis* ont été les plus fréquemment citées par les éleveurs, avec des taux de citation respectifs de 58,1 %; 54,2 %. D'autres espèces, telles que *Prosopis*

africana, *Securidaca longepedunculata* ont été citées mentionnées comme ingrédients secondaires dans la composition des recettes thérapeutiques (Figure 3).

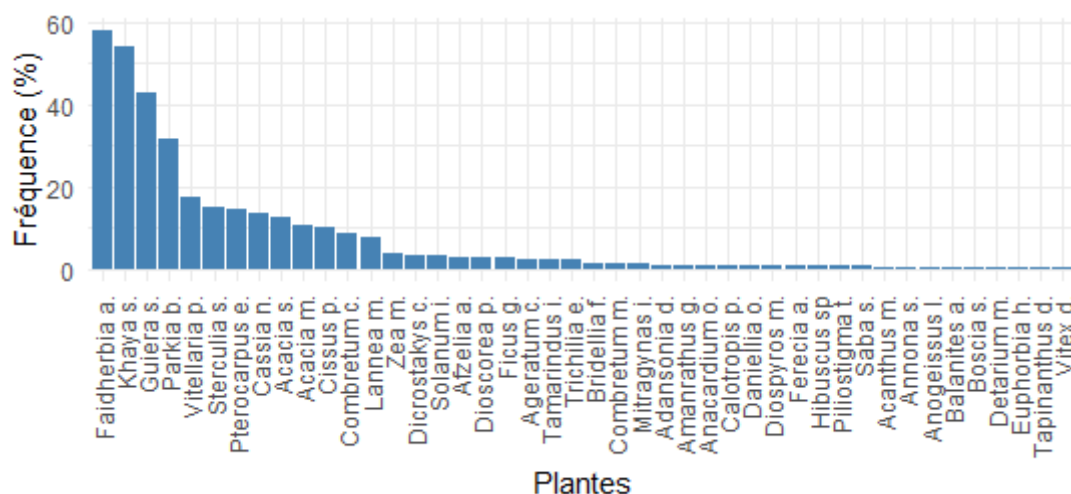


Fig. 3. Fréquence de citation des plantes utilisées dans le traitement sanitaire

La Figure 4 présente la répartition des 44 espèces recensées. Au total 28 familles botaniques sont représentées. La famille des Fabaceae est la plus représentée, avec une proportion de 15,90% des espèces citées, suivie des Combretaceae avec 9,09 %. Plus de 15 familles sont représentées chacune par une seule espèce. Les familles Mimosaceae et Caesalpiniaaceae présentent des proportions équivalentes dans l'échantillon étudié (6,81%).

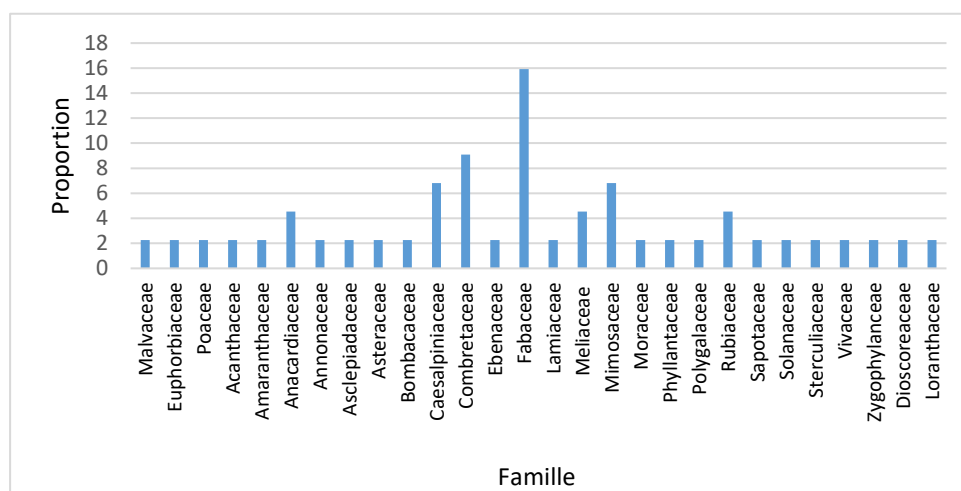


Fig. 4. Répartition des plantes médicinales en famille

La Figure 5 présente les organes utilisés des plantes citées. La majorité des plantes sont exploitées par les feuilles et les écorces. L'usage de *Faidherbia albida* et de *Parkia biglobosa* dans les soins par les producteurs privilégie les fruits et la pulpe respectivement.

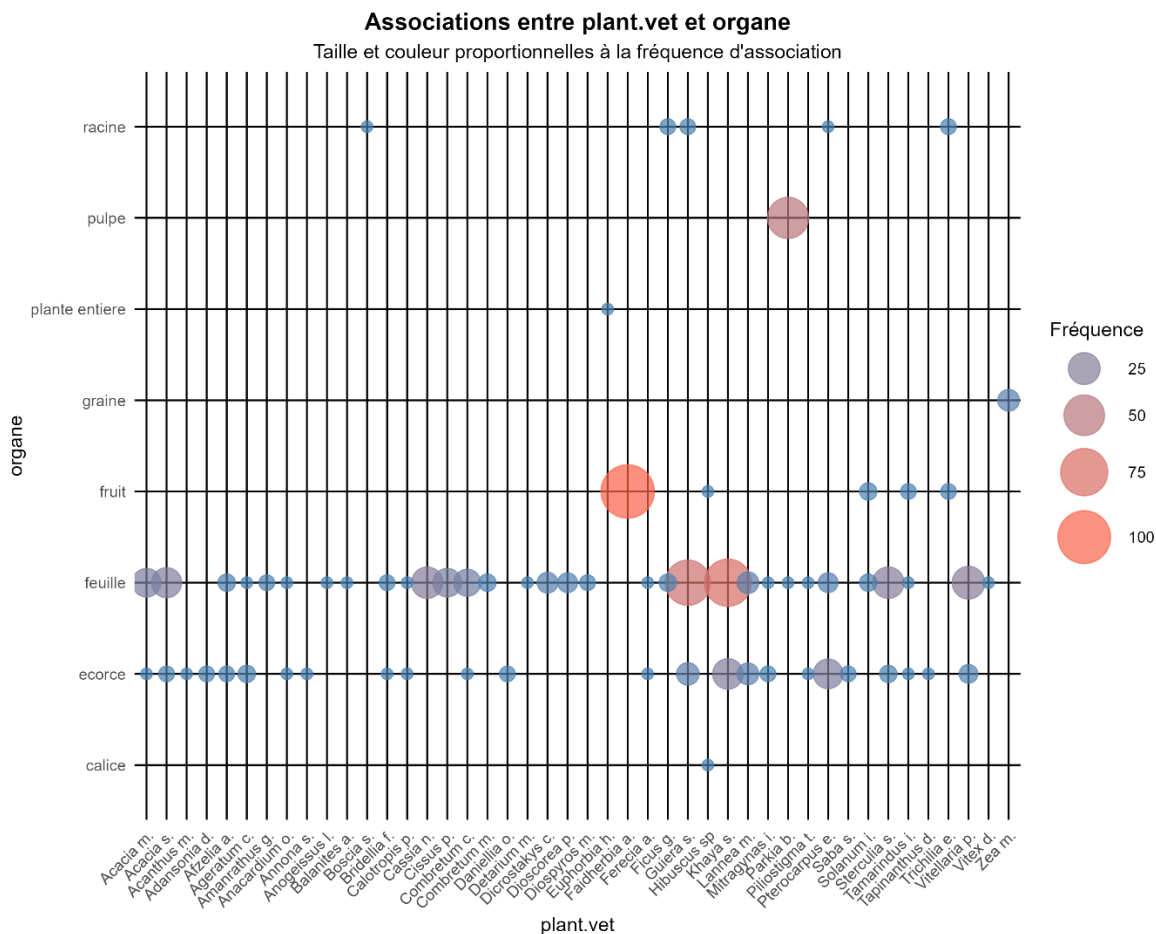


Fig. 5. Répartition des organes utilisés en fonction des plantes

3.3 MODE DE PREPARATION ET MODE D'ADMINISTRATION

La figure 6 présente la répartition des modes de préparation des plantes utilisées dans les soins vétérinaires. Les modes écraser (0.3%) ou mâcher (0.6%) représentent les proportions les plus faibles. Par contre la décoction est fortement utilisée par les producteurs.

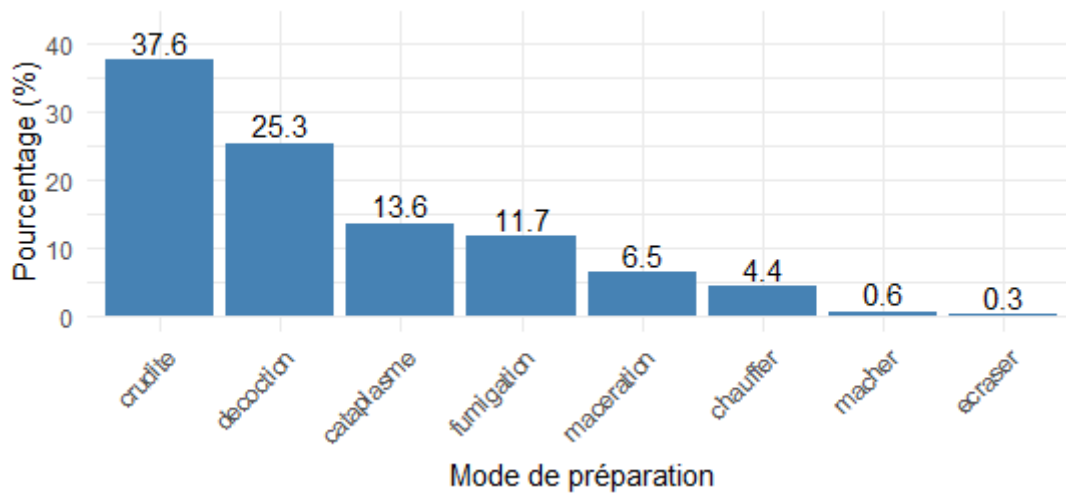


Fig. 6. Répartition des modes de préparation

La Figure 7 donne la répartition des modes de préparation en fonction des organes. Les feuilles sont majoritairement préparées par cataplasme, décoction ou fumigation pour les soins. Les écorces sont principalement préparées par décoction. Les fruits sont très peu préparés ainsi que les pulpes.

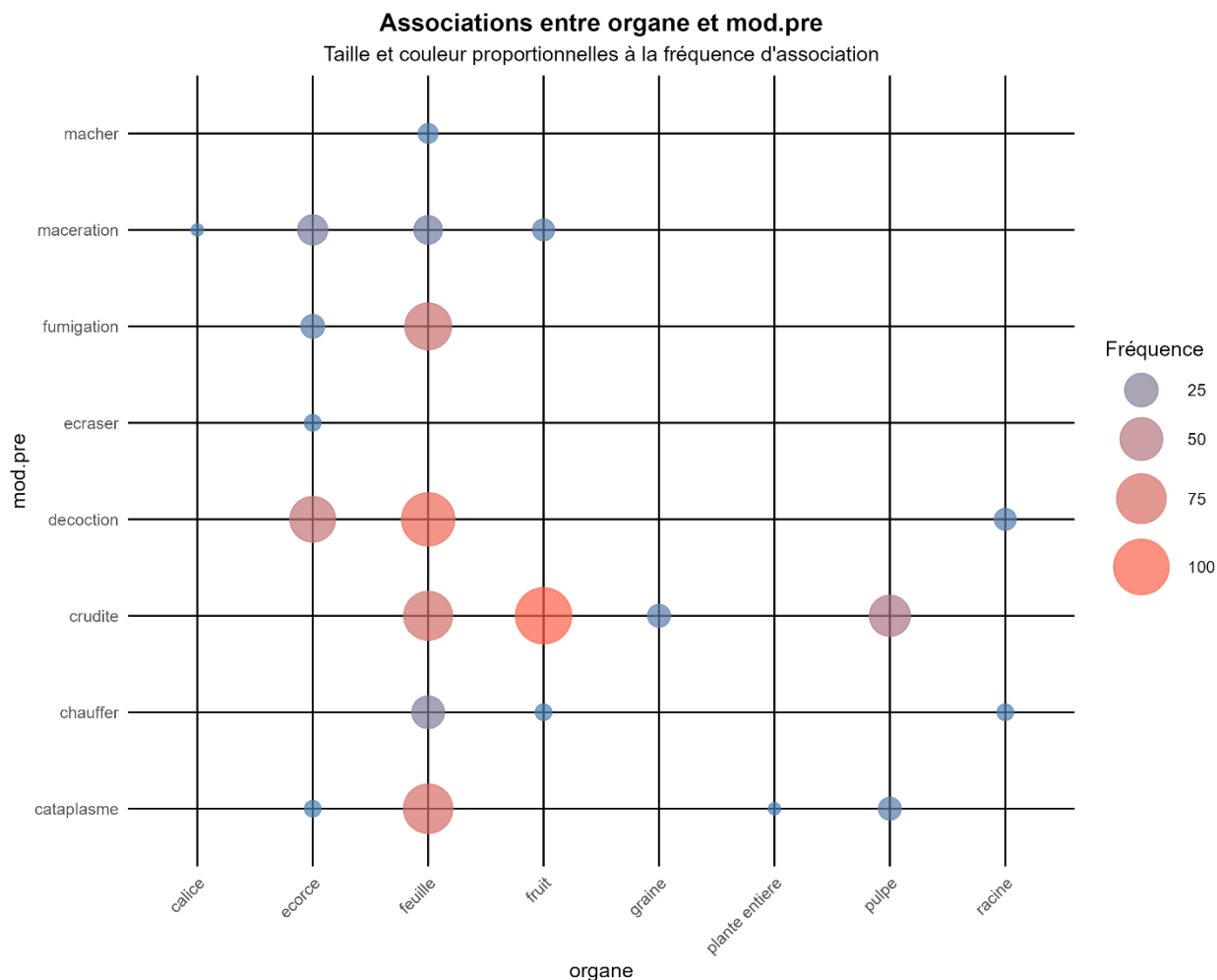


Fig. 7. Répartition des organes en fonction des modes de préparation

L'alimentation ressort de l'enquête comme le mode d'administration le plus utilisés par les pasteurs et agroéleveurs. Le gavage est également utilisé pour prodiguer des soins par les producteurs (Figure 8).

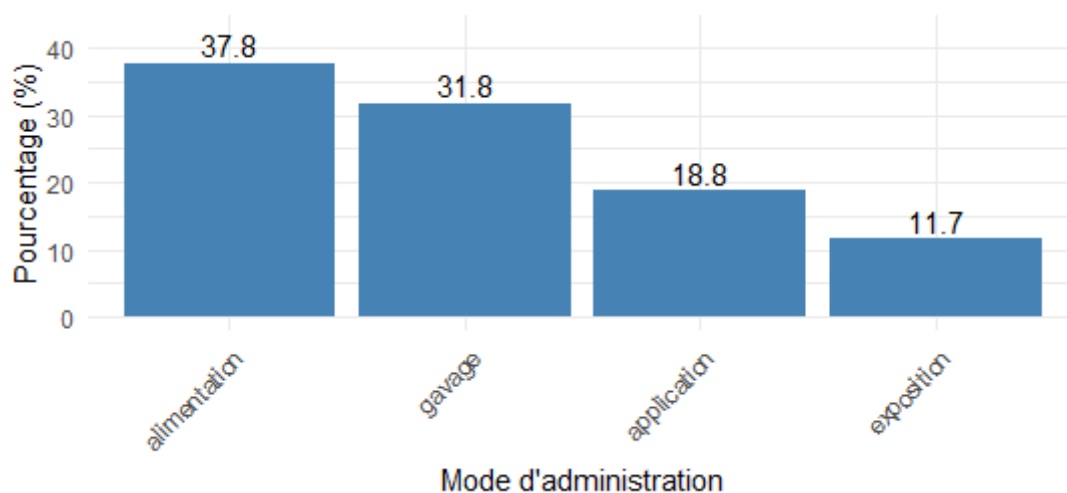


Fig. 8. Répartition des modes d'administration

La Figure 9 présente la répartition des modes d'administration par organes. Les feuilles sont associées à tous les modes d'administration. Les fruits des plantes sont fortement administrés par l'alimentation. Le mode exposition est associé aux feuilles et écorces.

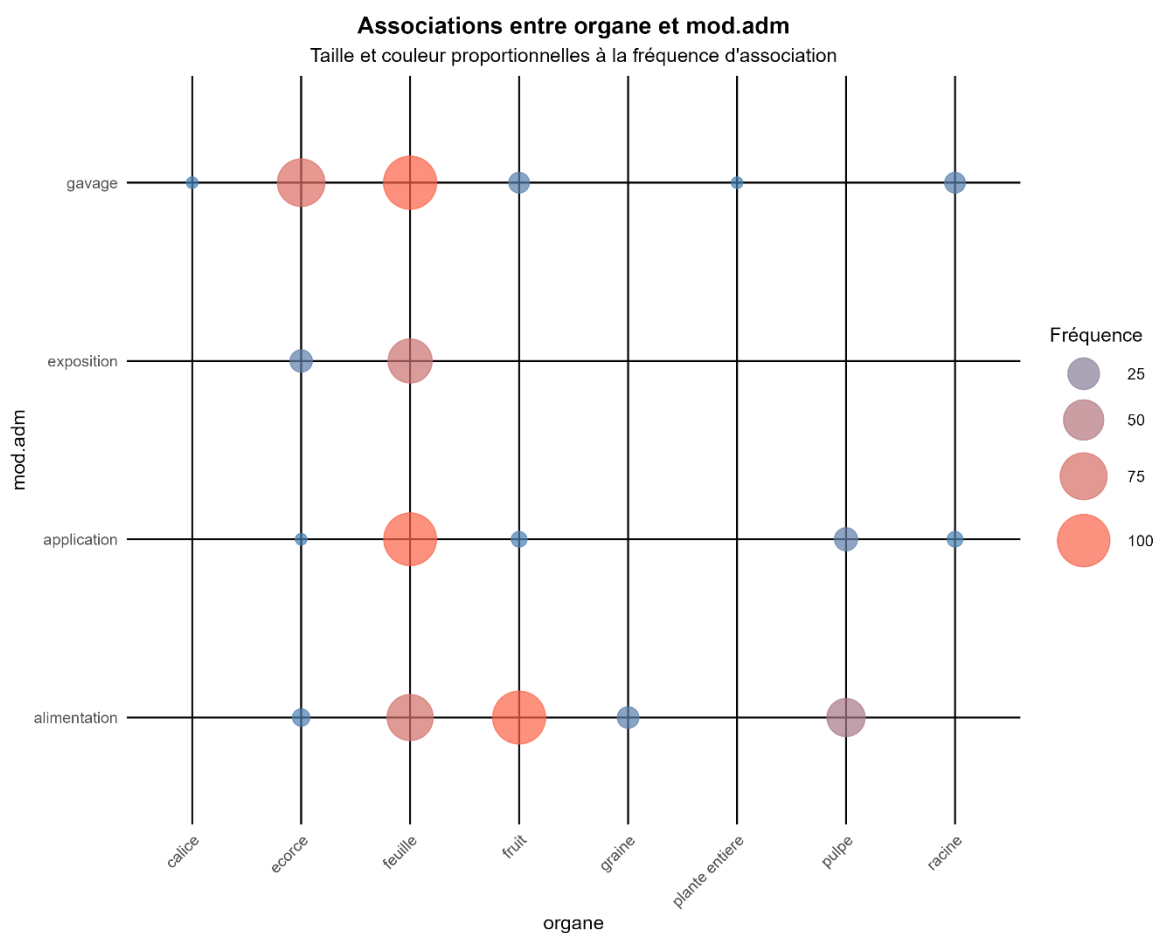


Fig. 9. Répartition des modes d'administration en fonction des organes

3.4 PATHOLOGIES TRAITÉES

Les pathologies les plus mentionnées par les producteurs sont les trypanosomoses 19,04%. Le test de Khi2 a donné une p-value inférieure à 0.05, la répartition des pathologies traitées par les producteurs dépendante d'autres facteurs. (Figure 10).

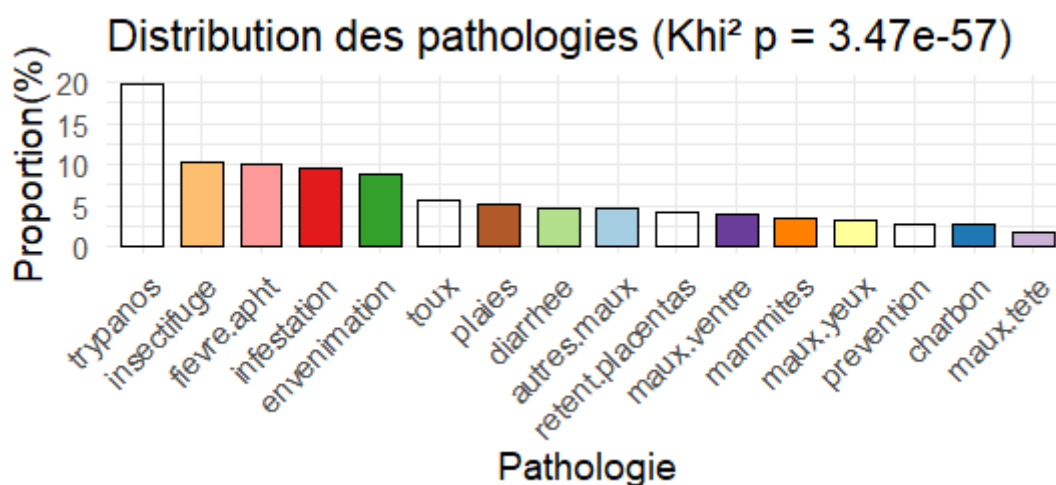


Fig. 10. Fréquence des différentes pathologies traitées par les producteurs

3.5 APPROCHE THERAPEUTIQUE EN FONCTION DES GROUPES D'ELEVEURS

L'analyse factorielle multiples (AFM) a permis de mettre en évidence les corrélation entre les espèces végétales utilisées dans les recettes thérapeutiques et les variations de pratiques selon les groupes de producteurs. Le cercle de corrélation met en lumière les espèces associées à chaque type de pathologie, tandis que le graphe des individus offre une représentation globale des approches différenciées entre pasteurs et agroéleveurs.

L'analyse révèle une forte variabilité dans l'usage des plantes, en particulier chez les pasteurs, avec une diversité d'espèces mobilisées dans le traitement des trypanosomoses animales. Les pratiques ethnovétérinaires divergent également de manière marquée pour le traitement de l'envenimation, des infestations parasitaires et d'autres pathologies regroupées. En revanche, les soins liés à la rétention placentaire, à la toux et à la fièvre aphteuse présentent des similitudes notables entre les deux groupes de producteurs.

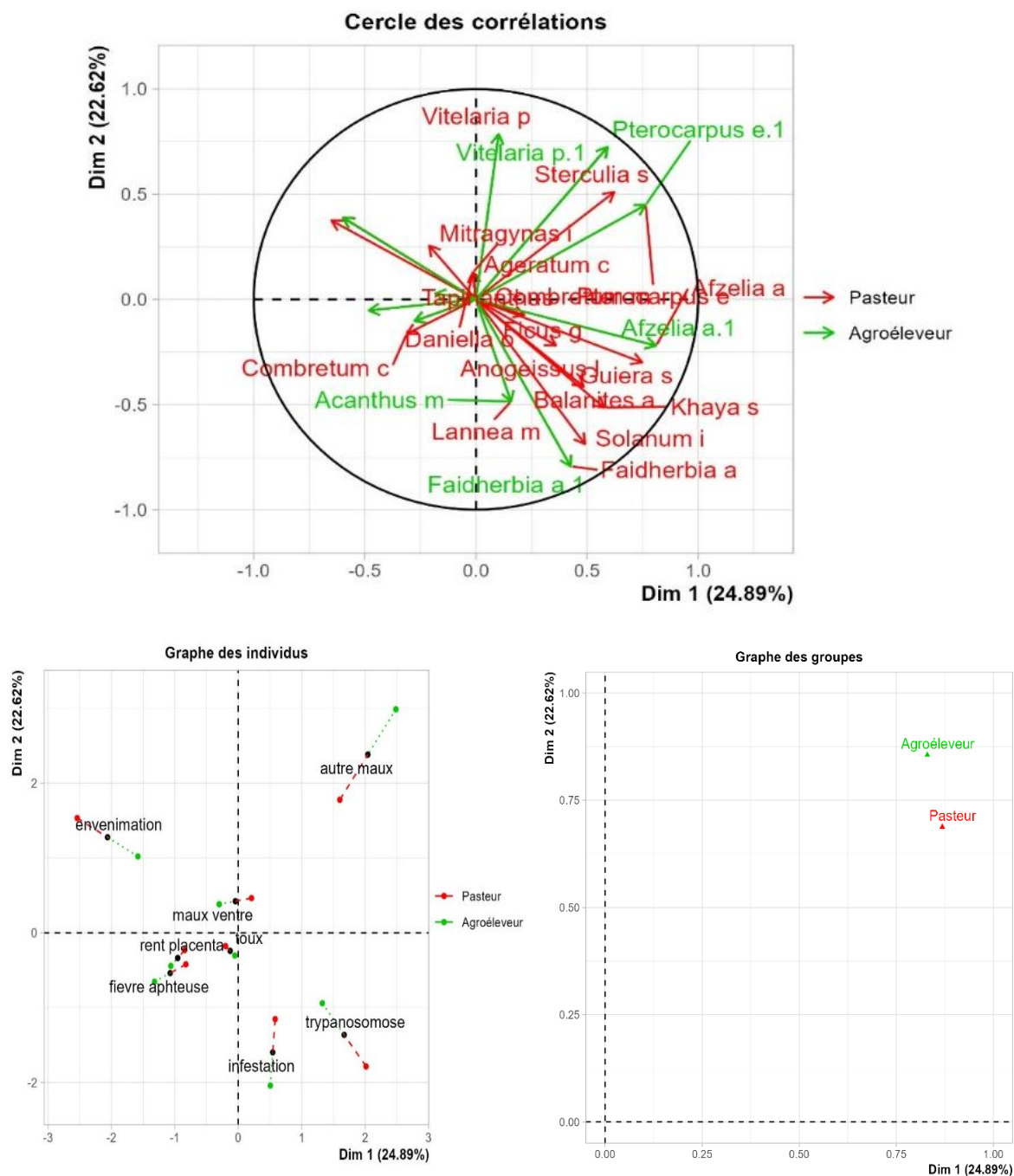


Fig. 11. Analyse factorielle multiples des traitements chez les groupes d'éleveurs

4 DISCUSSION

L'étude a permis de mettre en évidence la richesse et la diversité des pratiques ethnovétérinaires mobilisées par les pasteurs et agroéleveurs à l'ouest du Burkina Faso. Au total, 44 espèces végétales fourragères appartenant à 28 familles ont été recensées, confirmant l'importance des plantes médicinales dans la gestion locale des pathologies animales. Cette diversité floristique rejoint les travaux de [11] et de [4], qui soulignent également la prédominance des Fabaceae, reconnues pour leurs propriétés antimicrobiennes et antiparasitaires.

Parmi les espèces les plus citées, *Faidherbia albida* et *Khaya senegalensis* occupent une place centrale. *Faidherbia albida* est largement utilisée pour le traitement des affections respiratoires et des infestations gastro-intestinales, notamment en milieu semi-intensif. Ce constat est cohérent avec les observations de [4], qui ont documenté son usage contre les nématodes digestifs chez les petits

ruminants. De son côté, *Khaya senegalensis* est fortement mobilisée dans les pratiques extensives pour traiter les trypanosomoses animales, l'envenimation et la fièvre aphteuse, comme l'ont également noté [23] et [10].

L'analyse des recettes a montré une prédominance des traitements orientés vers les trypanosomoses animales, suivie de l'envenimation et des infestations internes. Ces résultats traduisent une hiérarchisation empirique des pathologies perçues comme les plus préjudiciables par les éleveurs, ce qui rejoint les priorités identifiées dans plusieurs zones sahéliennes [15]; [6].

Les liens observés entre les organes végétaux utilisés, les modes de préparation (décoction, macération, cataplasme) et les modes d'administration (gavage, alimentation, application) indiquent une structuration cohérente des savoirs thérapeutiques. Ces pratiques, bien qu'empiriques, montrent une logique pharmacotechnique locale, proche de certaines formes de rationalité observées dans la médecine conventionnelle [14]. L'absence du mode injectable pourrait traduire une limite technique ou une prudence liée à la sécurité d'usage.

L'analyse factorielle multiple (AFM) a révélé une forte variabilité des pratiques entre pasteurs et agroéleveurs, notamment dans le choix des espèces et des pathologies ciblées. Les pasteurs, plus mobiles et souvent confrontés à des conditions environnementales plus contraignantes, mobilisent une plus grande diversité d'espèces, en particulier pour les trypanosomoses animales. A l'inverse, les agroéleveurs, plus sédentaires et mieux connectés aux services vétérinaires modernes, s'appuient sur un répertoire plus restreint, mais souvent plus ciblé. Cette différenciation confirme les observations de [22], qui soulignent l'adaptation des savoirs ethnovétérinaires aux systèmes de production et aux dynamiques socioécologiques.

Enfin, certaines pathologies comme la rétention placentaire, la toux ou la fièvre aphteuse font l'objet de traitements plus homogènes entre les deux groupes, suggérant une convergence des savoirs sur des affections communes, peut être en lien avec leur fréquence ou l'efficacité perçue des traitements disponibles.

Dans l'ensemble, ces résultats soulignent non seulement la vitalité des savoirs ethnovétérinaires à l'ouest du Burkina Faso, mais aussi leur plasticité, leur ancrage écologique et leur potentiel pharmacologique. Toutefois, leur intégration dans des stratégies de santé animale durables nécessite des validations pharmacologiques, toxicologiques et socioéconomiques complémentaires.

5 CONCLUSION

Cette étude a permis de documenter les pratiques ethnovétérinaires des pasteurs et agroéleveurs du Houet, fondées sur l'usage de 44 espèces végétales pour le traitement de diverses pathologies animales. Les résultats révèlent une diversité de recettes et de savoirs, structurés selon les systèmes de production. Ces pratiques, encore largement utilisées, constituent une alternative accessible face aux limites des soins vétérinaires modernes. Leur valorisation nécessite toutefois des recherches complémentaires sur l'efficacité et la sécurité des espèces identifiées.

CONFLIT D'INTERET

Tous les auteurs déclarent aucun conflit d'intérêt.

CONTRIBUTION

C. N. a collecté, analysé les données et rédigé la première version document, O. S. a proposé le sujet et l'approche méthodologique et corrigé le document, N S a corrigé, rédigé le document corrigé et a apporté une analyse scientifique, O. J. et G. K. ont corrigé le document et réalisé les recherches documentaires, O. P. a participé à l'identification des espèces et O. L. a corrigé le document.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude aux services techniques de l'élevage de la province du Houet pour leur appui logistique, ainsi qu'aux responsables communautaires et aux éleveurs pour leur disponibilité et la richesse des savoirs partagés. Nos remerciements vont également à l'équipe d'enquêteurs pour leur engagement durant la collecte des données.

REFERENCES

- [1] N. Eiki, N. Sebola, B. Sakong, M. Mabelebele. Review on Ethnoveterinary Practices in SubSaharan Africa. *Veterinary Sciences*, pp 8-99, 2021.
- [2] FAO. *Le devenir de l'élevage au Burkina Faso : Défis et opportunités face aux incertitudes*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture: Rome, 2019.

- [3] S Dibong, E Mpondo Mpondo, V. Ngoye, M Kwin, J. Betti, Ethnobotanique et phytomédecine des plantes médicinales vendues sur les marchés de Douala, Cameroun. *Journal of Applied Biosciences* vol 37, pp 2496–2507, 2011.
- [4] A. R. I. Garba, H Adakal, T. Abasse, K. Koudouvo, S. Karim, A. Akourki, M. S. Gbeassor, Mahamane. Etudes ethnobotaniques des plantes utilisées dans le traitement des parasitoses digestives des petits ruminants (ovins) dans le SudOuest du Niger. *Int J Bio Chem Sci* vol 13, no 1534, 2019.
- [5] J. M. A. S. Ouachinou, A. C. Adomou, G. H. Dassou, H Yedomonhan, G. M. Tossou, A. Akoegninou. Connaissances et pratiques ethnobotaniques en médecines traditionnelles vétérinaire et humaine au Bénin: similarité ou dissemblance ? *J App Bioscience*, vol 113, no 11174, 2017.
- [6] C Iwaka, E. V. B. Azando, F. C. C Hountondji., H. S. S. Worogo, E Y. Attakpa, P, A Olounlade., M. S Hounzangbe-Adote. Medicinal plants of the African traditional pharmacopoeia in the management of bovine trypanosomosis: A review. *J Med Plants Res* vol 16,; pp 214–229, 2022.
- [7] T. Jiofack, C Fokunang, N. Guedje, V. Kemeuze, E. Fongnzossie, B A. Nkongmeneck P. M. Mapongmetsem, N. Tsabang Ethnobotanical uses of medicinal plants of two ethnoecological regions of Cameroon. *International Journal of Medicine and Medical Sciences* vol 2, pp 60–79, 2010.
- [8] C. McCorkle. An introduction to ethnoveterinary research and development. *Journal of Ethnobiology*, vol 6, pp 129–149, 1986.
- [9] WHO. Traditional Medicine Strategy 20022005. World Health Organization, Geneva, Switzerland. P 74 (document reference WHO/EDM/TRM/2002.1), 2002.
- [10] H Tamboura, H Kaboré, S. M. Yaméogo (1998). Ethnomédecine vétérinaire et pharmacopée traditionnelle dans le plateau central du Burkina Faso : cas de la province du Passoré. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, vol 2, pp 181–191, 1998.
- [11] L. Traoré, V. S. O. Yaro, A Soudré, S OuédraogoKoné, D Ouédraogo, B Yougbaré, et al. Indigenous knowledge of veterinary medicinal plant use in cattle treatment in southwestern Burkina Faso (West Africa). *South African Journal of Botany* vol 128, pp 189–199, 2020.
- [12] D Nguemo Dongock, A Laohudumaye Bonyo, P. M. Mapongmestem, E. Bayegone. Etude ethnobotanique et phytochimique des plantes médicinales utilisées dans le traitement des maladies cardiovasculaires à Moundou (Tchad). *Int J Bio Chem Sci* vol 12, pp 203–216, 2018.
- [13] S Assefa. Potential antitrypanosomal plants against African animal trypanosomiasis. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol 6, pp 77–85, 2017.
- [14] S. Polydor Étude des pratiques vétérinaires traditionnelles des peuples Ixil au Guatemala. *Médecine vétérinaire et santé animale* 2017.
- [15] S Assefa, W Shibeshi. Drug resistance in African animal trypanosomes: A review. *Afr J Microbiol Res*, vol 12, pp 380–386, 2018.
- [16] FAO/OMS. Deuxième Séminaire Mixte FAO/OMS sur la Santé Publique Vétérinaire dans la Région du Pacifique Occidental : Lutte Contre les Zoonoses, Manille, 10-19 mars 1970 : rapport final. Bureau régional de l'OMS pour le Pacifique occidental. [Internet] Available from: <https://iris.who.int/handle/10665/208671>, 1972.
- [17] INSD. *Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso. Synthèse des résultats définitifs* [Internet]. Ouagadougou Available from: http://cns.bf/IMG/pdf/plaquette_resultats_definitifs_rgph_2019__revu_30122022.pdf, 2022.
- [18] MEEVCC. *Annuaire des statistiques de l'environnement 2015. Programme d'Appui au Secteur Forestier (PASF)* [Internet]. Ouagadougou Available from: https://www.environnement.gov.bf/fileadmin/user_upload/rapport_de_l_annuaire_des_statistiques_de_l_environnement_2015.pdf, 2017.
- [19] MRA. *Annales des statistiques de l'élevage 2014* [Internet]. Ouagadougou Available from: http://cns.bf/IMG/pdf/annuaire_elevage_2014.pdf, 2015.
- [20] R Mehdioui, A Kahouadji. Etude ethnobotanique auprès de la population riveraine de la forêt d'Amsittène: Cas de la Commune d'Imi n'Tlit (Province d'Essaouira). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Vie*, vol 29, pp 11–20, 2007.
- [21] MB Slovin, ME Sushka, JA Polonchek. Methods of Payment in Asset Sales: Contracting with Equity versus Cash. *The Journal of Finance* vol 60, pp2385–2407, 2005.
- [22] M Koutou, M Sangaré, M Havard, E Vall, L Sanogo, T Thombiano, S. D. Vodouhé Adaptation des pratiques d'élevage des producteurs de l'Ouest du Burkina Faso face aux contraintes foncières et sanitaires. *Agronomie Africaine* vol 28, pp 13–24, 2017.
- [23] A Kamel. Enquête ethnovétérinaire des plantes médicinales utilisées dans la région de TiziOuzou. Université Blida 1: Ouled Yaïch Available from: <https://di.univblida.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/802/1713THV1.pdf?sequence=1&isAllowed=y> 2018.

Caractérisation du niveau de contamination des eaux de surface par l'orpaillage illécite: Cas de la rivière Mé (sud-est de la Côte d'Ivoire)

[Characterization of the level of contamination of surface water by illegal gold mining: Case of the Mé river (south-east of Ivory Coast)]

Anowa Evrade Larissa EBA¹, Kan Jean KOUAME^{1,2}, Chy Charlène KOUASSI¹, René BALLIET¹, and Serge Kouacou DEH¹

¹Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG), Côte d'Ivoire

²Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Côte d'Ivoire

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In a context of strong dependence of Ivorian populations on surface water resources, the Mé River occupies a strategic position, particularly for the supply of drinking water to the city of Abidjan. However, this resource is facing a growing threat due to the intensification of artisanal gold mining activities within its watershed. This study therefore aims to assess the impact of these activities on the water quality of the Mé River, with a view toward the sustainable management of this resource.

The methodological approach first involved a physicochemical analysis of the water resource in relation to the World Health Organization (WHO, 2017) guideline values, followed by a qualitative assessment using contamination and pollution indices based on trace metal elements (TMEs).

The results show an alkaline pH (10.2), low mineralization (113.13 µS/cm), and a very high average turbidity (13,115.78 NTU). The analyses also revealed high concentrations of cadmium (Cd; mean: 36.81 µg/L), copper (Cu; mean: 166.72 µg/L), mercury (Hg; mean: 46.31 µg/L), and lead (Pb; mean: 72.5 µg/L), indicating contamination of anthropogenic origin, directly linked to artisanal gold mining activities.

The contamination index shows a decreasing ranking of TMEs as follows: ICM (Cd) > ICM (Pb) > ICM (Hg) > ICM (Cu) > ICM (Mn) > ICM (As). Furthermore, the heavy metal pollution index (HPI) reveals that all analyzed water samples (100%) have an HPI value greater than 100, indicating a high pollution risk and rendering the water unsuitable for use.

KEYWORDS: gold panning, ETM, Mé river watershed, pollution index, contamination index.

RESUME: Dans un contexte de forte dépendance des populations ivoiriennes aux ressources en eau de surface, la rivière Mé occupe une place stratégique, notamment pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan. Toutefois, cette ressource fait face à une menace croissante due à l'intensification de l'orpaillage dans son bassin versant. Cette étude vise donc à évaluer l'impact de ces activités sur la qualité de l'eau de la rivière Mé, dans une perspective de gestion durable de cette ressource. L'approche méthodologique a consisté d'abord à une analyse physico-chimique de la ressource en rapport avec les valeurs guides de l'OMS (2017) et ensuite une étude qualitative à l'aide des indices de contaminations et de pollution par les éléments traces métalliques (ETM). Les résultats présentent un pH basique (10,2), une faible minéralisation (113,13 µS/cm) et une turbidité moyenne très élevée (13 115,78 NTU). Les analyses révèlent également de fortes concentrations en cadmium (Cd), (Moy: 36.81 µg/L), cuivre (Moy Cu: 166,72 µg/L), Mercure (Moy Hg: 46.31 µg/L) et en plomb (Moy Pb: 72,5 µg/L), indiquant une contamination d'origine anthropique, directement liée aux activités d'orpaillage. L'indice de contamination, indique un classement décroissant selon les ETM suivants: ICM (Cd) > ICM (Pb) > ICM (Hg) > ICM (Cu) > ICM (Mn) > ICM (As). Par ailleurs,

l'indice de pollution par les ETM (HPI) révèle que toutes les eaux analysées, soit 100 % ont un HPI supérieur à 100, ce qui signifie un risque élevé de pollution et donc jugées impropres à l'usage.

MOTS-CLEFS: orpaillage, ETM, bassin versant rivière Mé, indice de pollution, indice de contamination.

1 INTRODUCTION

Les ressources en eau douce constituent un patrimoine essentiel pour le bien-être des populations, la préservation des écosystèmes et le développement économique. Cependant, le problème de l'accès à l'eau devient crucial car la qualité de cette denrée essentielle à tous les besoins de la vie est de nos jours mise en péril, en raison de la diversité et de la toxicité des émissions polluantes, de la croissance démographique accélérée et des activités humaines [1]. Selon [2], la qualité de ces ressources est menacée par diverses activités anthropiques, notamment l'exploitation minière illégale, qui s'intensifie dans de nombreuses régions du monde.

En Afrique de l'Ouest, le secteur de l'exploitation aurifère a connu un développement intense au cours des trois dernières décennies, propulsé par la hausse des prix de l'or [3]. Cela a entraîné la prolifération et l'intensification de l'orpaillage anarchique [4]. Aujourd'hui, l'orpaillage contribue à la dégradation de l'environnement dans toute l'Afrique et plus particulièrement en Côte d'Ivoire [5]. Durant les dix dernières années, de multiples recherches ont été conduites en Côte d'Ivoire dans l'objectif de décrire et d'apprécier le degré de pollution des ressources en eau (de surface et souterraines) ainsi que des sédiments dans les milieux miniers (industriels et artisanaux). En effet, les travaux de [6], [4] ont révélé une contamination des eaux de surface et des sédiments en As, Mn, Ni et Zn dans la zone d'orpaillage de Kokumbo et ceux de [5] dans le département de Dimbokro, une contamination en As, Mn, Ni et Pb. Dans la zone minière de Zouan-Hounien, [7] ont également montré une forte contamination des eaux souterraines en Hg, (2233,48 (puits) et 427,94 (forage) et Pb, (3,10 (Puits), 4,08 (forage)). La rivière Mé, située dans le sud-est de la Côte d'Ivoire, illustre bien cette problématique. Or, le gouvernement ivoirien a choisi cette rivière comme source alternative pour le renforcement de la capacité d'alimentation en eau potable du District d'Abidjan. Alors que, cette rivière traverse une zone très favorable à l'agriculture dans laquelle les techniques culturales exigent l'usage excessif des produits phytosanitaires ([8], [9]). A cela s'ajoute l'exploitation clandestine de l'or qui est devenue une source potentielle de pollution de cette rivière ([10]). Ce cours d'eau est donc aujourd'hui soumis à une pression croissante liée à l'orpaillage artisanal sur l'ensemble de son bassin versant, créant ainsi des problèmes environnementaux tels que, la dégradation des terres agricoles, la pollution et la destruction du lit du cours d'eau, etc... Selon [11], la rivière Mé contribue à l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan en offrant une capacité de production de 259 000 m³/jour environ.

Le défi actuel consiste à établir un équilibre entre la préservation de la qualité et de la quantité des ressources en eau et l'environnement tout en répondant aux besoins d'exploitation des ressources naturelles, notamment l'or, pour subvenir aux exigences socio-économiques des communautés. L'activité d'orpaillage requiert quotidiennement des volumes considérables d'eau, qu'elle soit de surface ou souterraine, entraînant des rejets de déchets solides, susceptibles d'altérer la qualité des eaux superficielles et souterraines. Cette étude vise donc à évaluer les impacts de l'activité d'orpaillage sur la qualité de l'eau de la rivière Mé, afin de promouvoir une gestion durable de cette ressource face à ce défi environnemental omniprésent.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Cette étude a lieu sur la Mé, un cours d'eau côtier situé dans la région de la Mé, au sud de la Côte d'Ivoire. La Mé prend sa source au nord d'Adzopé sous le nom de "Min" ou "Mè", puis coule du nord au sud en parallèle avec le cours inférieur du fleuve Comoé et de l'Agneby, avec le Mafou comme principal affluent. Elle draine un bassin versant d'une superficie de 4140 km² et une longueur de 140 km, et est comprise entre les latitudes 5°30' et 6°20' Nord et les longitudes 3°30' et 4°10' Ouest. (Fig. 1)

Les régions traversées par la Mé sont caractérisées par la présence de nombreuses collines dont l'altitude moyenne ne dépasse pas 100 mètres et sont séparées par de longues vallées à l'aspect des précipices, d'où partent plusieurs marigots et rivières ([12]). A cet effet, la Mé et ses affluents empruntent plusieurs directions d'écoulement dont celle du cours d'eau principal ([13]). (Figure 2).

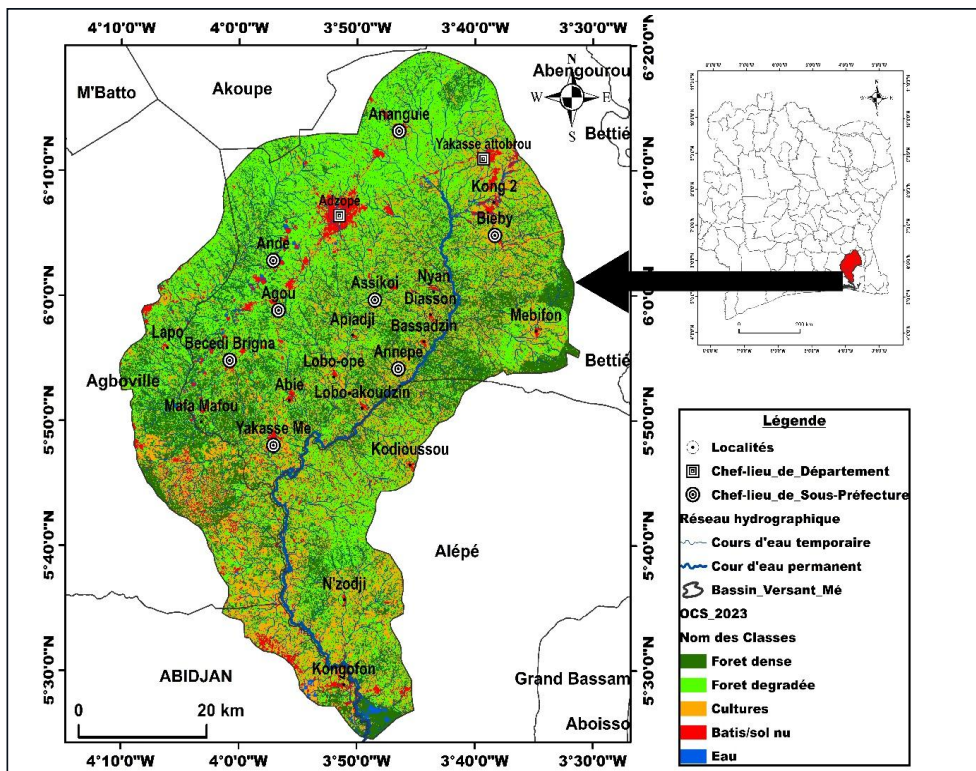


Fig. 1. Carte de la zone d'étude

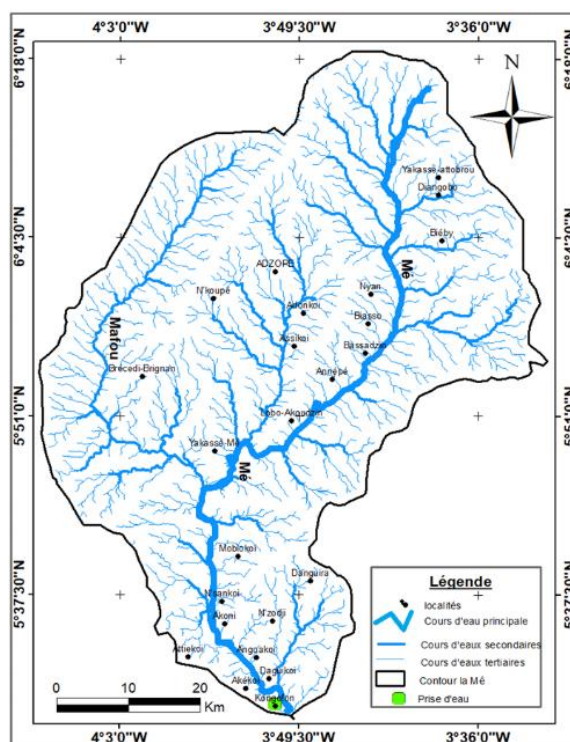


Fig. 2. Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude (SORO, 1987)

Ainsi, le bassin de la Mé est parcouru par de nombreux cours d'eau en raison de son relief et de l'abondance des pluies justifiée par une pluviométrie moyenne annuelle de 1706 mm sur la période 1996-2016 ([14])

La densité du réseau hydrographique varie en fonction de la nature du substratum constitué à la fois des Formations du Socle (Schistes et grauwackes; Granodiorites et diorites; Granitoïdes subalcalins à deux micas; Granites ferrugineux; et de formation métamorphique), et de Formations Sédimentaires, qui montrent une discontinuité marquée par la présence de la lagune Aghien qui recueille des alluvions quaternaires provenant de la Mé ([13])

Sur le plan économique, la région de la Mé repose essentiellement sur des activités agricoles à travers les cultures de rente (le cacao, l'hévéa et le palmier à huile) et les cultures Vivrières (la banane plantain, le manioc, l'igname, le maïs etc.) et secondairement de quelques unités industrielles spécialisées dans la transformation du bois. A cela s'ajoutent les activités clandestines d'orpaillage qui sont menées, en particulier autour des cours d'eau (Fig. 3). Ces pratiques, associées aux rejets non traités issus de l'agriculture, des zones urbaines et de l'industrie, sont considérées comme l'une des principales causes de la dégradation de la qualité de la rivière Mé au cours de ces dernières décennies.



Fig. 3. Activités d'orpaillage autour de la rivière Mé (kouassi-chy 2024)

La région de la Mé fait partie du régime équatorial de transition, avec deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches, avec une végétation de forêt dense. cette végétation a été réduite à de petits îlots, dont certains ont été classés ([13]. Toutefois, avec les activités de prospection et d'exploitation minières, on assiste à une réduction de ce couvert végétal.

2.2 MATERIEL

Le matériel utilisé est constitué de:

Matériel de terrain est constitué: d'un GPS de type GARMIN 64 SX pour la prise de coordonnées des sites de prélèvement, d'un appareil photo numérique pour les prises de vue,

Appareils de mesure *in situ* dont un multi-paramètre de type (HANNA 9829 pour *Ph* et *T*), un turbidimètre, et un conductimètre (HANNA 9835)

Outils de prélèvement des échantillons sont constitués: un sceau pour le prélèvement des eaux; des flacons stériles en PET de 0,5 litre pour collecter des échantillons d'eaux destinées au dosage des ETM; et une glacière pour la conservation des échantillons

Matériel de laboratoire est constitué: d'un spectromètre d'émission optique à plasma couplé inductif (ICP-OES) Agilent 5110, pour le dosage des éléments traces métalliques (ETM)

Les données sont constituées: de données cartographiques, et de données issues de l'analyse physico-chimiques.

2.3 APPROCHE METHODOLOGIE

La principale méthode développée pour atteindre l'objectif de cette étude est la méthode d'étude qualitative des eaux à l'aide des indices de contaminations et de pollution par les ETM.

2.3.1 POINTS DE PRELEVEMENT ET MESURE IN SITU DES PARAMETRES PHYSIQUES

Pour le prélèvement des échantillons, douze (12) points ont été identifiés sur le cours d'eau principal de la rivière Mé et certains de ses affluents, en tenant compte de la proximité des zones d'orpaillage (Fig. 4).

Elle a consisté à mesurer les paramètres dans le cours d'eau ou dans un seau en plastique préalablement rincés. Les paramètres mesurés in situ sont la température (T°), le potentiel d'Hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), les solides totaux dissout (TDS), et la turbidité.

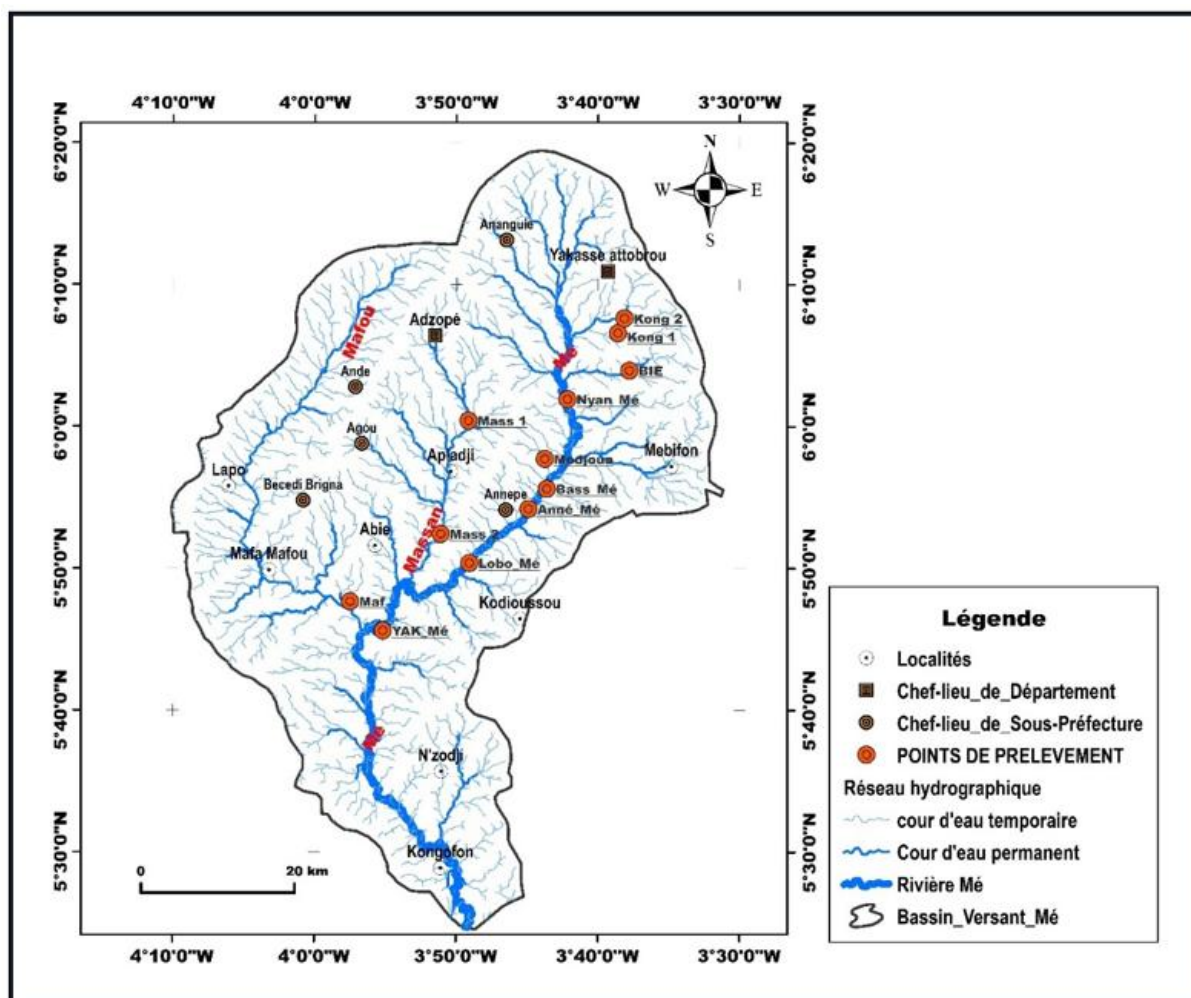


Fig. 4. Carte d'échantillonnage des eaux de surfaces du bassin versant de la Mé

2.3.2 PRELEVEMENTS ET ANALYSES DES PARAMETRES AU LABORATOIRE

Le prélèvement a été fait dans des flacons en polyéthylène (PET) préalablement rincés avec l'eau à prélever. Une fois remplis à ras pour éviter toute présence de bulles d'air, les flacons sont hermétiquement fermés, étiquetés, conservés. Tous ces échantillons ont été conservés à basse température dans des glacières contenant des packs réfrigérants et acheminés au laboratoire central de la SODECI pour les différentes analyses.

Le dosage des paramètres a porté sur les ETM que sont: l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Cuivre (Cu le Fer (Fe), le Mercure (Hg), le Manganèse (Mn), le Plomb (Pb) et le Zinc (Zn). Cette analyse a été faite à l'aide d'un spectromètre d'émission optique à plasma couplé inductif (ICP-OES) Agilent 5110. C'est un instrument d'analyse qui permet de déterminer la composition chimique d'un échantillon à partir de la lumière émise par les atomes excités dans un plasma, et qui passent à des niveaux d'énergie supérieurs.

Le spectromètre sépare la lumière émise en fonction des longueurs d'onde et un détecteur mesure l'intensité de la lumière pour chaque longueur d'onde, ce qui permet ainsi de déterminer la concentration de chaque élément dans l'échantillon

2.3.3 METHODE DE CLASSIFICATION QUALITATIVE DES EAUX

Pour cette étude, deux (02) indices ont été calculés pour estimer l'intensité de la contamination. Il s'agit de l'Indice de Contamination (IC) et de l'Indice de pollution par les ETM (HPI).

L'utilisation de ces indices a pour but de transformer les données de qualité de l'eau de surface en informations compréhensibles et utilisables par le public ([15]).

Indice de Contamination (IC)

Il exprime le rapport entre la concentration de l'élément mesuré et une concentration de référence, ([16]) (Equation 1).

$$IC = \frac{Ci}{CMA} \quad (1)$$

Avec IC: Indice de contamination; Ci: Concentration du métal sur le site; CMA: Concentration Maximale Admise.

Dans cette étude, les valeurs prises comme référence sont les standards de [17], notamment la concentration maximale admise (CMA).

Après le calcul des IC, On procède à une comparaison des valeurs sur les sites en se basant sur le calcul de l'indice de contamination moyen (ICM) et l'indice de contamination polymétallique ou total (ICMT). Selon Fahssi et al. (2016), les sites sont organisés de la manière suivante:

- IC < 2: Origine naturelle, aucune contamination;
- IC > 2: Contamination (activité anthropique).

l'ICM représente la moyenne arithmétique d'un paramètre sur les sites considérés, et l'ICMT la moyenne arithmétique de l'ensemble des ETM considérés. Ainsi les sites ayant des valeurs en ICM > 5 sont confrontés à une pollution métallique.

Indice de Pollution par les ETM (HPI)

Le calcul de l'indice de pollution permet de mesurer la pollution générale des grandes étendues d'eau par les ETM (HPI). C'est une méthode suggérée par [18]. Des auteurs dont [19] et [5], l'ont utilisé. L'indice HPI considère la toxicité relative de chaque métal en attribuant un coefficient ou un poids (Wi) à chaque paramètre sélectionné. Le système de notation est une échelle subjective variant entre 0 et 1, et son choix se base sur l'importance des critères de qualité individuels de manière comparative ou peut être évalué en rendant les valeurs inversement proportionnelles à la norme suggérée (Si) pour le paramètre. Les indices HPI ont été calculés à partir de l'équation2:

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n WiQi}{\sum_{i=1}^n Wi} \quad (2)$$

Avec

$$Wi = \frac{K}{Si} \quad (3)$$

$$Qi = \left(\frac{Vi}{Si}\right) * 100 \quad (4)$$

On a: Qi l'indice d'un paramètre; Wi la pondération d'un paramètre; Vi la valeur contrôlée d'un paramètre dans l'eau en µg/L; K la constante de proportionnalité égale à 1; Si la valeur standard d'un paramètre (ligne directrice adoptée égale limite OMS 2017); et n le nombre de paramètres.

Selon [20], la qualité de l'eau basée sur le HPI peut être classée en trois catégories (tableau 1).

Tableau 1. Classes définies par HPI (Prasad et al., 2014)

Valeur de l'indice HPI	Qualité de l'eau
HPI < 100	Risque faible
HPI = 100	Risque de seuil
HPI > 100	Risque élevé (Impropre)

3 RESULTATS

3.1 CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX DU BASSIN VERSANT DE LA ME

3.1.1 STATISTIQUE DESCRIPTIVE DES RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

Le tableau II présente les données statistiques (minimum, maximum, moyenne) relatives aux paramètres physico-chimiques des eaux de surface échantillonnées.

Tableau 2. Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques des eaux de la Mé et ses Affluents

Variable	Unité	Min	Max	Moy	Directives OMS (2022)
Température	°C	24.69	29.5	26.82	25
Potentiel d'hydrogène (Ph)	-	9.06	11.55	10.20	6.5-8.5
Conductivité Électrique (CE)	µS/cm	43	300	113.13	250
Turbidité	NTU	24.8	46000	4445.23	5

3.1.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES EAUX DE SURFACE

➤ Température

Les températures des eaux varient de 25,05°C au niveau du site Mass 1 à 29.4°C au niveau de Kong 1 avec une moyenne de 26.82 °C. La plupart des valeurs sont au-dessus de la norme OMS (Fig. 5).

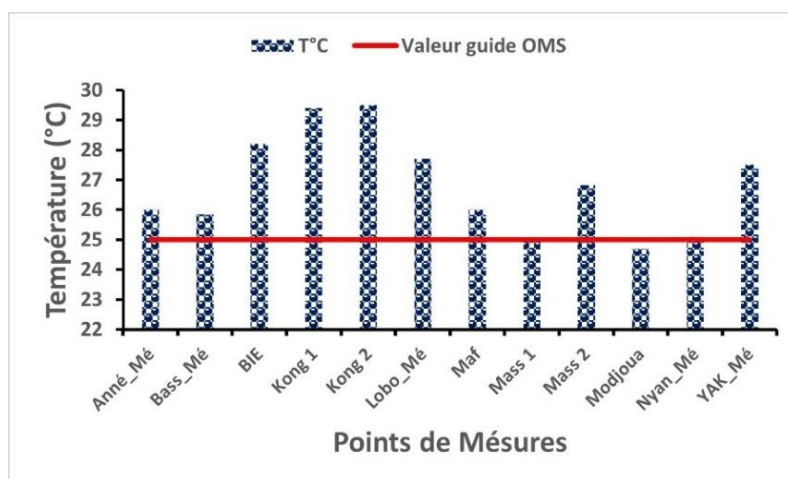


Fig. 5. Évolution spatiale de la température des eaux de surface

➤ **Potentiel d’Hydrogène (pH)**

Le pH varie de 9.06 observé au niveau Mass 1 à 11.5 mesuré au niveau Anné_mé La valeur moyenne du pH est de 10.20. On observe que toutes les eaux échantillonnées ont un pH supérieur à celui de la norme OMS (Fig.6). Elles sont extrêmement basiques.

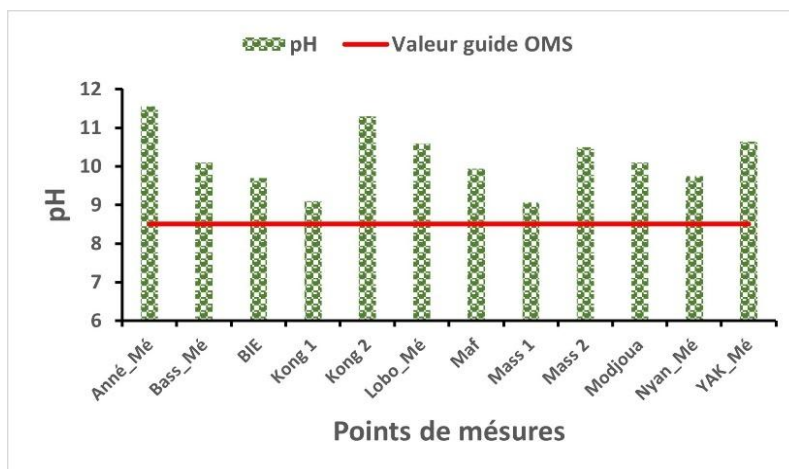


Fig. 6. Évolution spatiale du pH des eaux de surface

➤ **Conductivité Électrique (CE)**

La conductivité électrique mesurée varie entre 43 µS/cm au niveau de Modjoua et 300 µS/cm sur le site Mass 1. La valeur moyenne de la conductivité électrique est de 113.13 µS/cm. Toutes les valeurs, hormis celle de Mass 1 (300 µS/cm), sont en dessous de la norme OMS. Les eaux sont donc faiblement minéralisées (Fig.7).

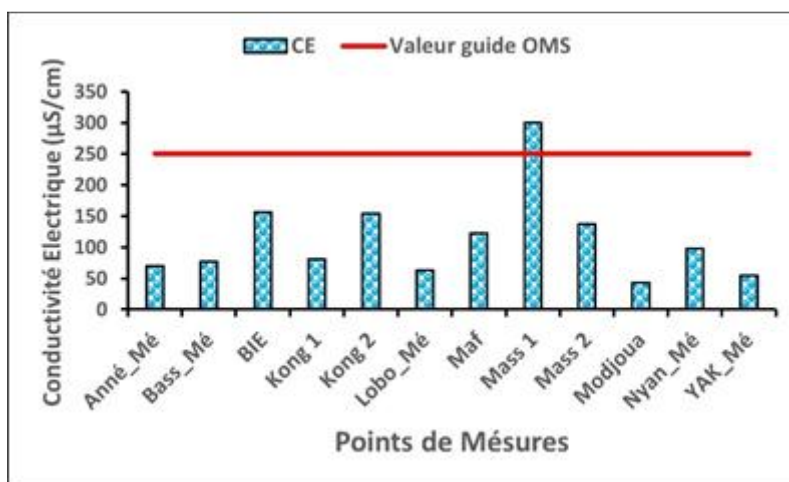


Fig. 7. Évolution spatiale de la conductivité électrique des eaux de la Mé

➤ **Turbidité**

Les valeurs de turbidité mesurées sont très élevées. Elles sont toutes au-delà de la norme OMS (Fig.8).Cependant, la plus faible valeur (24.8 NTU) est observée au niveau de Mass 1, et la plus forte (46000 NTU) sur le site Kong 2qui est une zone d’orpaillage très intense.

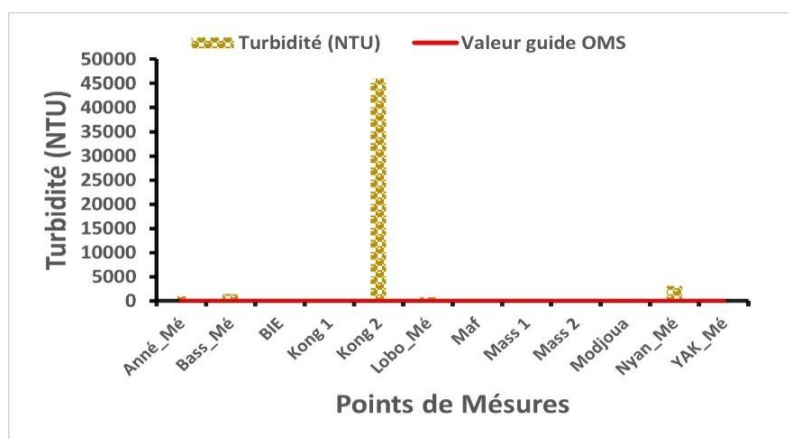


Fig. 8. Évolution spatiale de la turbidité des eaux de surface

3.1.3 CARACTERISTIQUES METALLIQUES DES EAUX DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE ME

3.1.3.1 STATISTIQUE DES ETM DANS LES EAUX DE SURFACE

Le tableau suivant présente les statistiques élémentaires des ETM des eaux de surface du bassin de la Mé

Tableau 3. Statistiques élémentaires des ETM des eaux de surface

Variables	Min	Max	Moy	Directives OMS (2022)
Arsenic (As)	2	32.8	12.17	<10
Cadmium (Cd)	0	100.7	36.81	<3
Cuivre (Cu)	10	280	166.67	<100
Fer (Fe)	15	450	204.58	<300
Mercure (Hg)	7.5	115	46.31	<6
Manganèse (Mn)	24	99	72.5	<50
Plomb (Pb)	15.6	216	94.75	<10
Zinc (Zn)	100	450	221.67	<3000

3.1.3.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES CONCENTRATIONS DES ETM DANS LES EAUX

➤ Arsenic

Les teneurs en arsenic dans les eaux de surface varient de 2 à 32,8 µg/L avec une moyenne de 12.17 µg/L. Les teneurs les plus fortes qui dépassent largement la valeur guide de l'OMS (10 µg/L) se rencontrent sur les sites Bass_mé (32.8 µg/L), Kong1 (28.8 µg/L) et Mass 2 (21.6 µg/L), et les très faibles se rencontre à Yakassé-Mé, Bie et Lobo-Mé (Fig. 9). Les fortes concentrations sont réparties sur les schistes, et grauwackes.

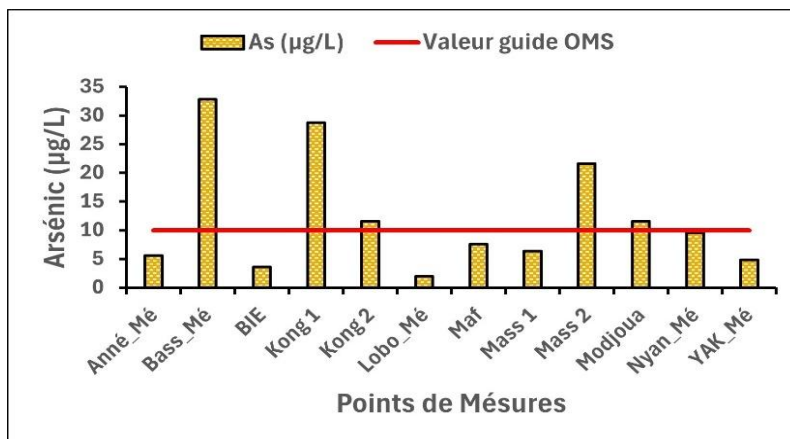


Fig. 9. Variation des concentrations en As des eaux de surface

➤ **Cadmium**

Les concentrations de cadmium sont comprises entre 0 et 100.7 µg/L avec une moyenne de 36.31 µg/L. La fig. 10 montre que les concentrations sont au-dessus de la norme OMS qui est de 0 µg/L. Les plus fortes valeurs se retrouvent au niveau des sites Modjoua (100.7 µg/L), Anné_mé (72.2 µg/L), et Maf (53.2 µg/L), les valeurs faibles (0.1 - 53.2 µg/L) sur les sites de Kong 1, Kong 2, BIE, Bass_mé. Les sites de Masse 2 et Lobo-Mé ont une concentration de 0 µg/L en cadmium.

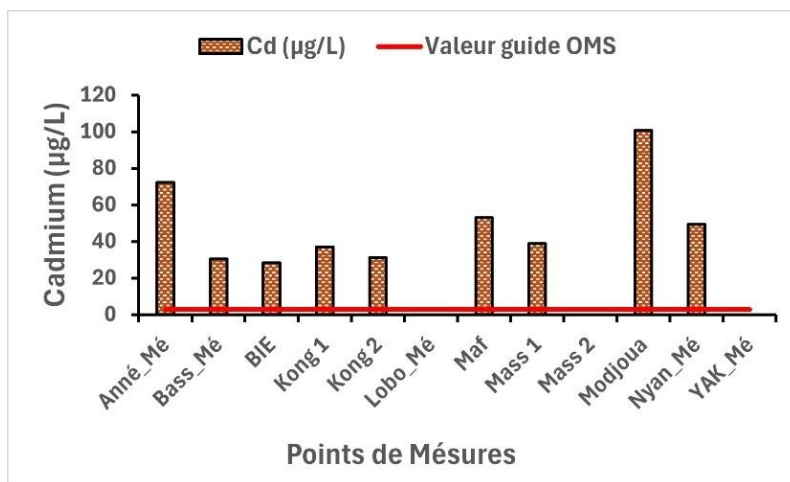


Fig. 10. Variation des concentrations en Cd dans les eaux de surface

➤ **Cuivre**

Les teneurs en cuivre varient de 10 µg/L à 280 µg/L avec une moyenne de 166.67 µg/L. La plupart des concentrations observées sur les différents sites sont au-dessus de la norme OMS qui est de 100 µg/L (fig. 11). Les faibles concentrations, comprises entre 10 -50 µg/l, sont p observées à Kong 1 et BIE. Les concentrations modérées, oscillant entre 51 -150 µg/l, se situent sur les sites Nyan, Modjoua, Bass et Mass 2. Enfin, les fortes concentrations, (151- 280 µg/l), se retrouvent Anné-Mé, Kong2, Lobo-Mé, Maf Massi1 et Yakassé-Mé (fig.11).

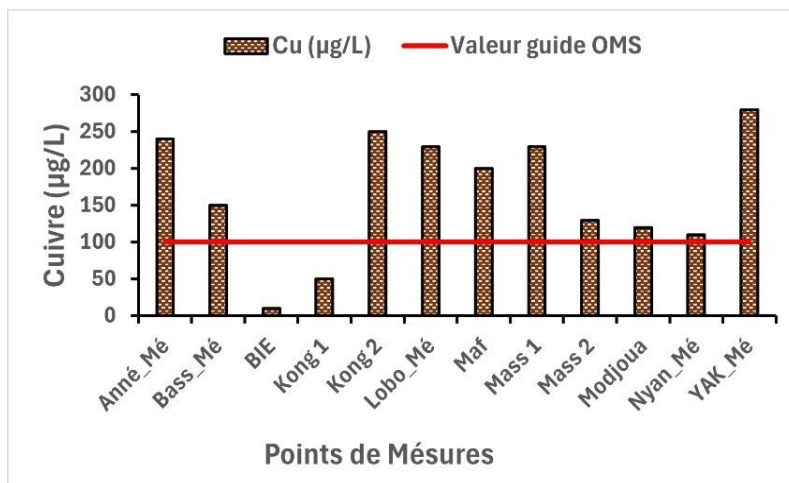


Fig. 11. Variation des concentrations en Cu dans les eaux de surface

➤ Fer

Les concentrations du Fer oscillent entre 15 µg/L et 450 µg/L avec une valeur moyenne de 204.58 µg/L inférieur à la valeur guide de l'OM (300 µg/L). Les sites Mass 1 (450 µg/L) et Yak_mé (360 µg/L) et Nyan_mé (340 µg/L) ont les concentrations les plus élevées (Fig.12).

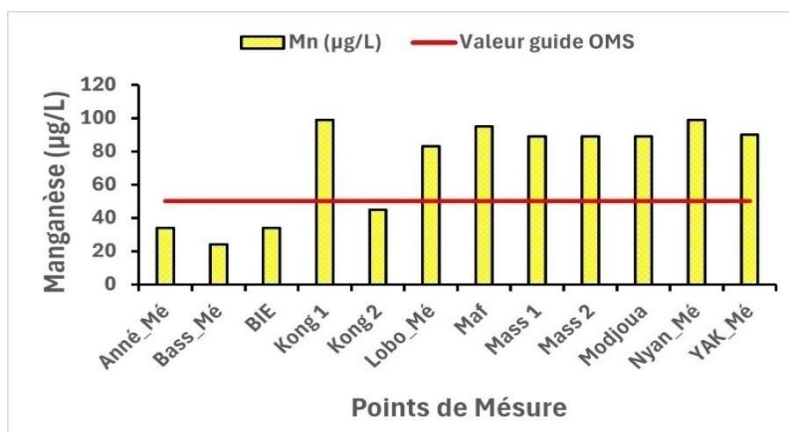


Fig. 12. Variation des concentrations en Fe dans les eaux de surface

➤ Mercure

Les teneurs en mercure varient de 7.5 µg/L à 115 µg/L (Kong 2) pour une moyenne de 46.31 µg/L, largement au-dessus de la norme OMS. La figure 16 montre la variation du mercure dans les eaux de surface dont les concentrations les plus élevées s'observent à Masse 2, Bass-Mé et Kong2 (Fig.13).

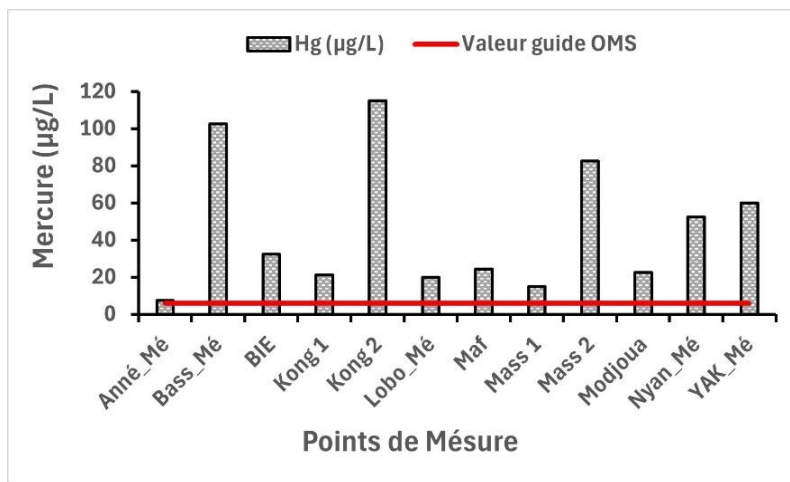


Fig. 13. Variation des concentrations en Hg dans les eaux de surface

➤ **Manganèse**

Les teneurs en manganèse sont comprises entre 24 µg/L et 99 µg/L avec une moyenne de 72.5 µg/L au-dessus de la norme OMS (50 µg/L). Les sites de fortes teneurs sont: Kong 1 et Nyan_mé (99 µg/L), Maf (95 µg/L), Yak_mé (90 µg/L) et (89 µg/L) sur les sites Modjoua, Mass 2 et Mass 1 (Fig.14).

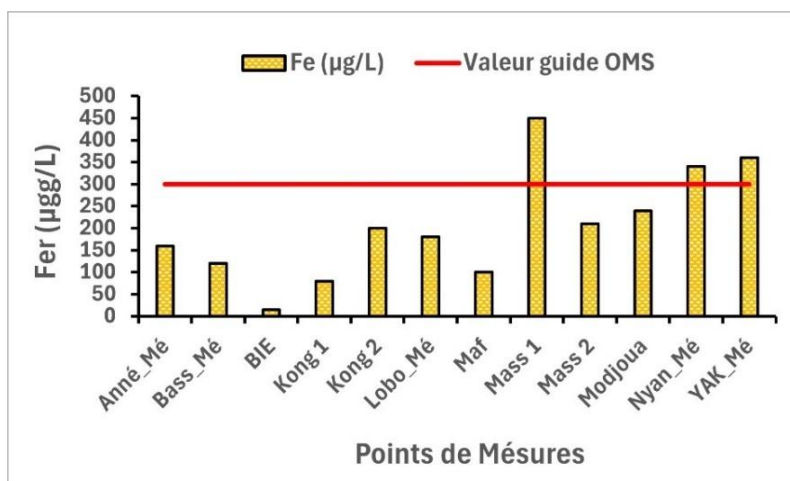


Fig. 14. Variation des concentrations en Mn dans les eaux de surface

➤ **Plomb**

Les teneurs en plomb sont comprises entre 15.6 µg/L et 216 µg/L avec une moyenne de 94.75 µg/L largement au-dessus de la norme OMS (Fig.15). Les plus grandes valeurs se retrouvent sur les sites Mass 2 (216 µg/L); Kong1 (204 µg/L), Modjoua (132 µg/L) et BIE (121.2µg/L).

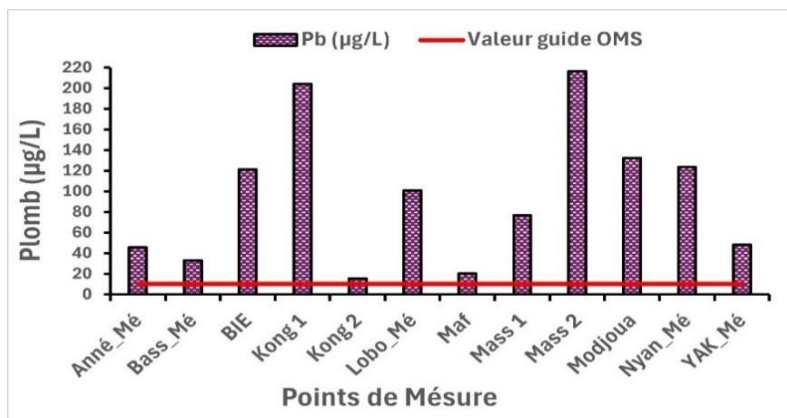


Fig. 15. Variation des concentrations en Pb dans les eaux de surface

➤ Zinc

Les teneurs en zinc varient de 100 µg/L à 450 µg/L avec une moyenne de 221.67 µg/L. Les valeurs les plus élevées s'observent sur les sites Yak_mé (450 µg/L), Maf (350 µg/L) et Mass 2 (320 µg/L). Cependant, toutes ces valeurs sont largement en dessous de la norme OMS (Figure 16).

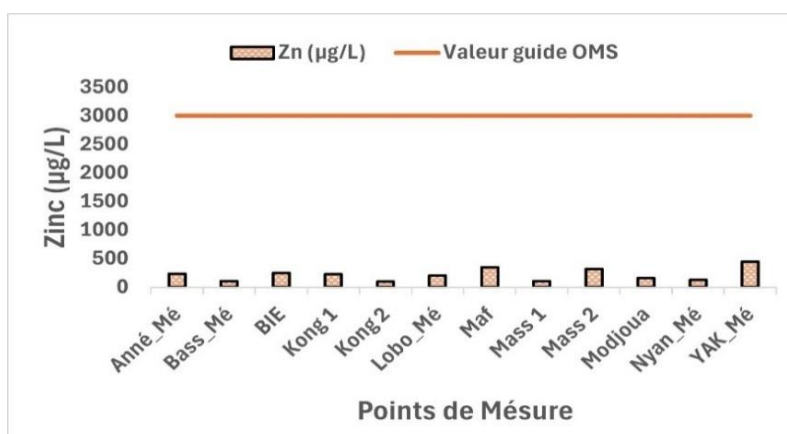


Fig. 16. Variation des concentrations en Zn dans les eaux de surface

Les concentrations de zinc, comprises entre (100 et 450 µg/l), se répartissent en trois niveaux. Les valeurs les plus faibles, entre (100 et 160 µg/l), se trouvent en périphérie du bassin notamment à Kong 2; Modjoua; Nyan_mé; Bass_mé et Mass 1. Les concentrations modérées, allant de (161 à 250 µg/l), sont situées autour du cours d'eau principal sur les sites de Kong 1; BIE; Anné_mé; et Lobo_mé. Enfin, les niveaux les plus élevés, de (251 à 450 µg/l), se localisent sur le cours d'eau principale et ses affluents précisément sur les sites de Mass 2; Maf et Yak_mé.

3.2 ÉTUDE QUALITATIVE DES EAUX DE LA ME

3.2.1 INDICE DE CONTAMINATION (IC)

Le tableau ci-dessous présente les résultats récapitulatifs des indices de contamination dans les eaux de la Mé. Ces résultats montrent que les IC varient selon les ETM étudiés d'un site à l'autre (Tableau IV). Ainsi:

- Fe, Mn et Zn ont des IC < 2 sur tous les sites;
- Cu à des IC < 2 sur presque tous les sites;
- As, Cd, Hg et Pb présentent des IC > 2 sur presque tous sites de prélèvements;

Tableau 4. IC, ICM et ICMT des ETM dans les eaux de surface

Sites	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn	ICM _t
Anné_mé	0.56	24.07	2.4	0.53	1.25	0.68	4.56	0.08	4.27
Bass_mé	3.28	10.13	1.5	0.40	17.08	0.48	3.3	0.04	4.53
BIE	0.36	9.50	0.1	0.50	5.42	0.68	12.12	0.08	3.6
Kong 1	2.88	12.35	0.5	2.27	3.54	1.98	20.4	0.08	5.25
Kong 2	1.16	10.45	2.5	0.67	19.17	0.9	1.56	0.03	4.56
Lobo_mé	0.2	0	2.3	0.60	3.33	1.66	10.08	0.07	2.28
Maf	0.76	17.73	2	0.33	4.08	1.9	2.04	0.12	3.62
Mass 1	0.64	12.98	2.3	1.5	2.5	1.78	7.68	0.04	3.68
Mass 2	2.16	0	1.3	0.70	13.75	1.78	21.6	0.11	5.18
Modjoua	1.16	33.57	1.2	0.80	3.75	1.78	13.2	0.05	6.94
Nyan_mé	0.96	16.47	1.1	1.13	8.75	1.98	12.36	0.04	5.35
Yak_mé	0.48	0	2.8	1.20	10	1.8	4.8	0.15	2.65
ICM	1.22	12.67	1.67	0.72	7.72	1.45	9.48	0.07	

IC_M = indice de contamination moyen; ICM_T = indice de contamination moyen polymétallique ou total.

- Les IC > 2 indiquent l'influence des activités d'orpaillage et la dégradation de la qualité des eaux de surface sur les sites (Figure 17).
- Les ICM < 2 (faibles) sont observés au niveau de Zn (0,07), Fe (0,72), As (1,22), Mn (1,45) et Cu (1,67) tandis que ceux du Hg (7,72), Pb (9,48), et Cd (12,67) présentent des valeurs élevées de ICM > 2. L'analyse des indices de contamination moyens (ICM) permet d'établir la classification suivante: **ICM (Cd) > ICM (Pb) > ICM (Hg) > ICM (Cu) > ICM (Mn) > ICM (As) > ICM (Fe) > ICM (Zn)**.

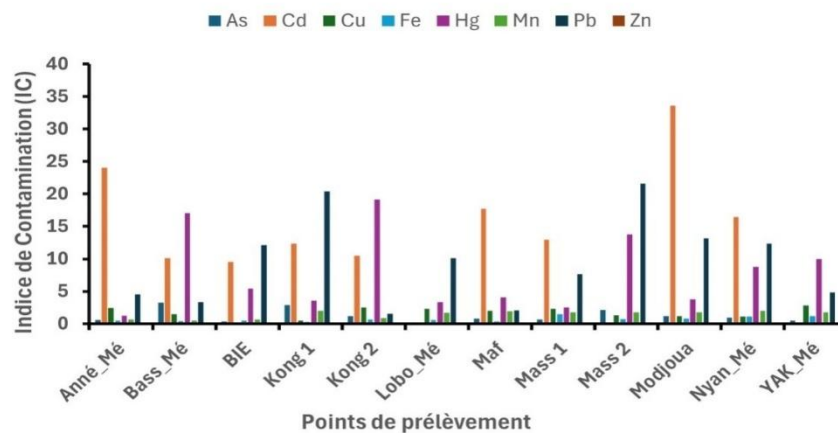


Fig. 17. Évolution de l'IC dans les eaux de la Mé

3.2.2 HPI DES EAUX DE LA ME

Les valeurs de l'indice de pollution (HPI) par les ETM des eaux sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Comme observé dans le tableau V, sur les douze (12) échantillons analysés, les valeurs de HPI obtenues sont comprises entre 223,78 et 1812,84, donc supérieures à 100, valeur au-dessus de laquelle les eaux sont considérées comme contaminées par les ETM. Toutes les eaux échantillonnées sur l'ensemble du bassin versant, soit 100 % présentent donc un risque élevé de pollution et impropre à la consommation.

Tableau 5. Indices de pollution par les ETM des eaux de surface du bassin versant de la Mé

Points de prélèvements	Valeurs de HPI	Qualité de l'eau
Anné_mé	1197	Risque élevé (impropre)
Bass_mé	941.70	Risque élevé (impropre)
BIE	726.79	Risque élevé (impropre)
Kong 1	966.29	Risque élevé (impropre)
Kong 2	953.43	Risque élevé (impropre)
Lobo_mé	223.78	Risque élevé (impropre)
Maf	944.68	Risque élevé (impropre)
Mass 1	768.75	Risque élevé (impropre)
Mass 2	643.16	Risque élevé (impropre)
Modjoua	1812.84	Risque élevé (impropre)
Nyan_mé	1135.39	Risque élevé (impropre)
Yak_mé	308.89	Risque élevé (impropre)

4 DISCUSSION

4.1 PARAMETRESPHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

L'analyse des paramètres physico-chimiques révèle une température des eaux qui varie de 24,7°C à 29,5°C, avec une moyenne de 27°C. Ces eaux sont légèrement plus chaudes comparativement à la valeur limite de l'OMS 2017 (< 25°C). Cependant, ces valeurs restent acceptables car inférieures à la température moyenne des eaux de consommation en zone tropicale humide (30°C) ([21]). Les travaux réalisés dans les zones minières par [19] et [22] à Divo; [5] à Dimbokro etc. ont donné également les mêmes résultats, avec des valeurs de Température comprises entre 25 et 30 °C. Contrairement à [4] à Kokoubo, qui ont trouvé des valeurs plus élevées (comprises entre 25,2° et 32,4°). En effet, entre 10 et 30 °C, la température n'a qu'un effet négligeable sur la mobilité des métaux ([23]). Cependant, dans une zone dans laquelle se développe l'activité minière, une température moyenne des eaux inférieure à 30°C pourrait influencer le drainage minier acide (DMA) qui est considéré comme l'une des menaces les plus graves à long terme pour les ressources en eau et la vie aquatique ([24]). Le pH des eaux varie de 9.1 à 11.55, avec une moyenne de 10,2. Cela indique que les eaux analysées sont fondamentalement agressives et peuvent présenter des risques d'incrustation. Ces valeurs sont supérieures à celles trouvées par [25] et [26] dans les eaux de Hiré qui est une zone d'activité minière. En effet, dans une zone d'extraction d'or, le pH figure parmi les éléments naturels cruciaux régissant la mobilité des éléments traces métalliques (ETM) à la frontière eau-sédiment et joue un rôle significatif dans l'adsorption des métaux ([4]). D'après [27], une diminution du pH provoque une hausse significative de la solubilité des éléments traces métalliques (ETM) et de leur mobilité, tandis qu'un pH alcalin restreint le transfert des métaux de l'état solide à l'état aqueux ([28]). La conductivité électrique quant à elle, fluctue entre 43 µS/cm et 300 µS/cm, avec une moyenne de 113.13 µS/cm. Cela montre que les eaux sont en grande partie faiblement minéralisées. Pour ce qui concerne la turbidité, les valeurs obtenues sont très élevées, avec une moyenne de 13115.78 NTU. Ces eaux reçoivent des effluents de traitement de minerais du fait du développement de l'orpaillage qui se déroule près des cours d'eau environnants. Cette pression sur les cours d'eau dans les zones d'orpaillage a été mise en exergue par plusieurs auteurs dont [29] à Hiré, [30] à Zouan-Hounien, [4] à Kokumbo, [5] à Dimbokro, [31] en République du Congo etc... De plus, les déchets liquides issus de l'orpaillage ont une teneur élevée en matières en suspension qui provoquent la turbidité de l'eau ([32]). La turbidité des eaux de surface du bassin versant de la Mé est liée aux activités anthropiques que sont l'agriculture et l'orpaillage. Hormis la conductivité électrique, toutes les moyennes des paramètres déterminées sont supérieures aux différentes normes [17].

4.2 ELEMENTS TRACES METALLIQUES DANS LES EAUX

Les teneurs moyennes des éléments traces métalliques (ETM) que sont le Fe (204.58 µg/L), le Zn (221.67 µg/L) sont inférieures au maximum acceptable dans les eaux de surface. Ces faibles niveaux peuvent s'expliquer par le fait que l'extraction de l'or n'induit pas une production élevée de ces ETM qui pourraient contaminer les eaux de surface. Cependant, les concentrations en Fe supérieure à la limite ont été détectées sur les sites Mass1 (450 µg/L), Nyan_mé (340 µg/L), Yak_mé (360 µg/L). Selon [4] qui au contraire ont trouvé une quantité moyenne supérieure aux normes OMS dans les eaux de Kokumbo (7,28 mg/L), ces concentrations pourraient être liées à l'impact des mines artisanales dans la zone, et constituent un important souci

environnemental. Pour les autres ETM, le manganèse (72.2 µg/L), le cadmium (36.81 µg/L), le Cuivre (166.67 µg/L), l'arsenic (12.17 µg/L), le mercure (46.31 µg/L) et le Plomb (94.5 µg/L), les teneurs moyennes sont largement supérieures aux normes admises par l'OMS. Ces concentrations pourraient être liées aux différentes mines artisanales présentes dans la zone. En effet les effluents chargés de métaux et la lixiviation des résidus solides provenant de ces activités sont déversés directement dans l'environnement. Concernant le Manganèse, un excès dans l'eau peut causer la cirrhose du foie chez l'homme. Toutefois l'inhalation est beaucoup plus dangereuse parce qu'elle génère des pneumonies, et si l'exposition est chronique il peut causer des problèmes neurologiques ([33]).

Pour le mercure, le site Kong 2 a enregistré la plus forte teneur (115 µg/L). C'est un effluent liquide provenant d'un site de lavage de minerai. Dans la zone d'orpaillage de Zouan-Hounien, des teneurs élevées en mercure ont été observées par [30]. Aussi, Dans la zone d'orpaillage de Kokumbo, des teneurs élevées en arsenic (56 µg/L) ont été également observées par [4]. En Côte d'Ivoire, les travaux réalisés dans les environnements miniers de Divo et Kokumbo ont montré de fortes teneurs en Fe et Mn ([34]), [35]; [19] et [22]). Ailleurs, Les travaux de [36] et [37] ont respectivement mis en évidence une contamination en Fer, Aluminium, Manganèse et Arsenic dans les rejets d'eau de la mine du Haut Beht dans la partie centrale du Maroc et un enrichissement des eaux en Cadmium, Argent et cyanure dû à l'exploitation de l'or à Monterrey en Colombie.

Par ailleurs, le pH joue un rôle important dans l'adsorption des métaux. Dans les eaux de surface du bassin, la moyenne du pH est de 10.2. En effet, une baisse de pH entraîne une augmentation de la solubilité et une mobilité des métaux lourds ([28]). De plus, un pH alcalin limite le passage des ETM de la phase solide à la phase aqueuse.

Dans la zone d'étude, selon les métaux dosés les IC varient d'un site à l'autre. En outre, Les valeurs des ICM inférieurs à 2 (faibles) sont observées au niveau de Zn (0,07), Fe (0,72), As (1.22), Mn (1.45) et Cu (1,67) tandis que celles supérieures à 2 sont observées aux niveaux du Hg (7.72), Pb (9.48), et Cd (12.27). En effet, les IC > 2 indiquent l'influence des activités d'orpaillage et la dégradation de la qualité des eaux de surface sur les sites.

Aussi, [4] soulignent que, les valeurs élevées de ces indices traduisent une augmentation de la mobilité des éléments métalliques et de la mise en suspension des métaux en milieu aquatique. La détermination de l'Indice de pollution (HPI), révèle que les douze (12) échantillons analysés ont des valeurs supérieures à 100, valeur au-dessus de laquelle les eaux sont considérées comme contaminées par les ETM. Donc, sur l'ensemble du bassin versant, selon HPI, 100 % des eaux présentent un risque élevé de pollution et sont impropres à la consommation.

5 CONCLUSION

Les résultats de l'analyse physico-chimique des eaux de la Mé révèlent un pH basique (10,2) et une conductivité électrique moyenne de 113,13 µS/cm, traduisant une charge minérale modérée. En outre, ces eaux présentent une forte turbidité, avec une valeur moyenne de 13 115,78 NTU, et une température moyenne de 26.82°C. L'analyse des éléments traces métalliques (ETM) dans ces eaux mettent en évidence une contamination par l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn) et le plomb (Pb). Ces contaminations, essentiellement localisées dans la zone d'orpaillage, sont directement imputables à l'intensification de cette activité. L'estimation de l'intensité de la contamination, réalisée à partir des indices de contamination, indique un classement décroissant selon l'ordre suivant: ICM (Cd) > ICM (Pb) > ICM (Hg) > ICM (Cu) > ICM (Mn) > ICM (As). Par ailleurs, l'indice de pollution par les ETM (HPI) révèle que toutes les eaux analysées, soit 100 % ont un HPI supérieur à 100, ce qui signifie un risque élevé. Elles sont donc jugées impropres à l'usage.

REFERENCES

- [1] Guiraud F. (1995): Actualisation de guide d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau de surface. Rapport BRGM R38853, 59 p.
- [2] KOUADIO, A., TOURÉ, S. ET KONAN, D. (2020). Analyse des impacts environnementaux de l'orpaillage en Afrique de l'Ouest. *Revue des Dynamiques Environnementales*, 18 (4), 67-80.
- [3] N'GOM N. M., MBAYE M., BARATOUX D., BARATOUX L., AHOUSI K.E., KOUAME K.J., FAYE. G., and SOW E.H. (2022). Recent expansion of artisanal gold mining along the Bandama River (Côte d'Ivoire). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol 112, 16 p.
- [4] AHOUSI K.E et YAPO A.P. (2021). Étude de la minéralisation des eaux de surface en éléments traces métalliques (ETM) des zones d'orpaillage de la sous-préfecture de Kokumbo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, Vol 19, N°4, pp 36-50.

- [5] YAPO A.P. (2024). Impact des activités d'orpaillage sur les environnements hydrologiques et la recharge des aquifères: cas du département de Dimbokro (centre est de la côte d'ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 277p.
- [6] AHOUSSE K.E., YAPO A.P., KOFFI Y.B. and KOUASSI A.M. (2020). Surface Water Sediments Characterization Using Metallic Trace Elements (ETM): Case of the Artisanal Gold Mining Sites of Kokumbo (Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Protection*, Vol.11, N°9, pp. 649-663.
- [7] DJADE P.J.O., TRAORE A., KOFFI K.J.T., KEUMEAN K.N., SORO G., et SORO N. (2021). Assessment of Health Risks Related to Contamination of Groundwater by Trace Metal Elements (Hg, Pb, Cd, As and Fe) in the Department of Zouan-Hounien (West Côte d'Ivoire). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol 9, pp 189-210.
- [8] TRAORE A., AHOUSSE K. E., AKA N., SORO.N. (2015): Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la côte d'ivoire). *Int j. Pure App.Biosci.* 3 (4), P.P.312-322.
- [9] AHOUSSE K.E., SEKA.A.M., TRAORE.A, (2019): Caractérisation d'un environnement hydrologique influencé par l'usage des pesticides en agriculture en côte d'ivoire: Cas du bassin versant de la Mé. *Journal of Applied Biosciences*, Vol: 161, pp. 16652-16662.
- [10] AFFESSI A.S. ET AFFESSI A., (2019): Migration incontrôlée, pratique de résilience et fragilisation des rapports sociaux dans l'exploitation clandestine de l'or à Nyan (Côte d'ivoire) *international journal of innovation and AppliedStudies*, Vol. 28, N° 1, pp. 191-202.
- [11] ONEP, 2023: Renforcement de l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan: Le Ministre de l'Hydraulique, de l'Assainissement et de la salubrité s'imprègne de l'état d'avancement des travaux (Revue de presse en ligne onep.ci du 9 juin 2023).
- [12] Avenard J.M. (1971): Aspect de la géomorphologie. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM. Paris, n 50, pp 7-71.
- [13] Soro N. (1987): Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, bassin versant de la Mé. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Scientifique, Technique et Médicale de Grenoble, 243 p.
- [14] DEH Serge Kouakou¹, EBA Anowa Evrade Larissa², KOUADIO Boyossoro Helene³, KOMA Achou Donald Hyacinthe², AHOUSSE Kouassi Ernest¹, KOUAME Kan Jean² and JOURDA Jean Patrice³ (2023) *Int. J. Adv. Res. (ijar)* 11 (07), 10-29 Article DOI: 10.21474/IJAR01/17202.
- [15] Mohamed E. Goher, Ali M. Hassan, Ibrahim A. Abdel-Moniem, Ayman H. Fahmy, Seliem M. El-sayed, (2014). Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia Canal. Nile River, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, Volume 40, Issue 3, 2014, Pages 225-233.
- [16] Rousseau A.N., Maihot A., Massicotte A.S., Duchemin M., Dupont J. and Villeneuve J.P. (1997) GIBSI: A Watershed-Based Software System for the Integrated Management of Surface Water Quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 25, 284-301.
- [17] OMS. (2017). *Guidelines to Drinking-water Quality* (fourth edition). (NLM classification: WA 675), 564p.
- [18] Mohan, S.V., Nithila, P., Reddy, S.J. (1966). Estimation of heavy metal in drinking water and development of heavy metal pollution index *J. Environ. Sci. Health A*, 31, pp. 283-289.
- [19] YAO K.S.A. (2022). Apport de l'hydrochimie et de la géochimie environnementale dans l'évaluation des ressources en eau des environnements miniers du département de Divo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 293 p.
- [20] PRASAD B, KUMARI P, BANO S, KUMARI S, 2014. Ground water quality evaluation near mining area and development of heavy metal pollution index. *Appl Water Sci.* 4: 11–17.
- [21] OMS, «Guidelines for Drinking water Quality», 4th edition, (2011) 51.
- [22] KOUADIO L.M. (2023). Contribution à l'évaluation des niveaux de contamination des eaux et des sols des sites d'orpaillage clandestin et élimination des métaux (Hg, Pb, Cd) et de l'arsenic des eaux polluées, à l'aide des argiles de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, 232p.
- [23] B. SERPEAUD, R. AL-SHUKRY, M. CASTEIGNEAU et G. MATEJKA, «Adsorption des métaux (Cu, Zn, Cd et Pb) par les sédiments superficiels d'un cours d'eau, rôle du pH, de la température et de la composition des sédiments», *Revue des Sciences de l'Eau*, 7 (1994) 343 – 365.
- [24] Stanislaw Dudka, et Domy C. Adriano (1997) -Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review. *Journal Environnement Qual* 26.590-602.
- [25] S. LOKO, K. E. AHOUSSE, Y. B. KOFFI, N. F. KAKOU, A. M. KOUASSI and J. BIEMI, (2013) «Microbiological and physico-chemical quality of groundwater from artisanal sites of mining exploitation in the South-West of Côte d'Ivoire: case of the area of Hiré», *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4 (9) (2013) 567 - 574.

- [26] K. S. A. YAO et K. E. AHOUSI (2020), «Caractérisation physico-chimique des eaux de surface dans un environnement minier du centre-ouest de la Côte d'Ivoire: Cas du département de Divo», *European Scientific Journal*, 16 (12) (2020) 293 – 315.
- [27] I. THORNTON, «Risk assessment related to metals: the role of the geochemist», Report of the International Workshop on Risk Assessment of Metals and their Inorganic Compounds, International Council on Metals and the Environment, Angers, France, (1996).
- [28] Matias Miguel Salvarredy Aranguren (2008). Thèse sur la contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approche géochimique, minéralogique et hydrochimique. Doctorat de l'université de Toulouse 372 p.
- [29] OUATTARA O et KAMBIRE B. (2020). Exploitation minière artisanale et dégradation de l'environnement dans la sous-préfecture de Hiré (Ouest de la Côte d'Ivoire). Collection Environnement et Biodiversité, N° 4, Abidjan, Editions Resol-Tropiques, 122 p.
- [30] DJADE P.J.O., TRAORE A., KOFFI K.J.T., KEUMEAN K.N., SORO G., et SORO N. (2020). Évaluation du niveau de contamination des eaux souterraines par les éléments traces métalliques dans le département de Zouan-Hounien (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, Vol 150, pp. 15457 – 15468.
- [31] WATHA-NDOUDY N., DIPAKAMA C.M., J.D. NZILA., NGUELET-MOUKAHA I., et KIMPOUNI V. (2022). Impact de l'orpaillage sur les écosystèmes forestiers du secteur de Souanké, République du Congo. *European Scientific Journal*, ESJ, Vol.18, N°36, pp 169-198.
- [32] N'DIAYE A.D, THIAM O, KOUKAN M., NAMR K.I. (2013). Turbidité et matière en suspension dans l'eau: application à l'évaluation des métaux contenus dans l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal. *Larhyss J*. Vol. 14, pp 93- 105.
- [33] G. S. PLUMLEE and T. L. ZIEGLER, «The medical geochemistry of dust, soils and other earth materials». In: B.S. Lollar (Ed.), *Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, (2003) 264 – 310.
- [34] HUE BI. F. F., KAMBIRE B., ET ALLA D. (2020). Mutations environnementales liées à l'orpaillage à Ity (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Annales de l'Université de Moundou, Série AFLASH*. Vol.7, N°2, pp 133-151.
- [35] AMA-CAUPHYS B.A, OUATTARA J-M. P, SANGARE D. and COULIBALY L. (2021). Impacts of Artisanal Gold Mining on Surface Water Quality and Sediment in Agbaou, Hire, Kokumbo and Angovia, Central-West Ivory Coast. *Res. J. Chem. Env. Sci*, Vol.9, N°3, pp 12-24.
- [36] M. EL FAHEM, A. BENZAOUAK, H. ZOUITEN, A. SERGHINI and M. FEKHAOUI, «Hydrogeochemical assessment of mine water discharges from mining activity. Case of the Haut Beht mine (central Morocco)», *AIMS Environmental Science*, 8 (1) (2021) 60 - 85. DOI: 10.3934/environsci.2021005.
- [37] A. MARTIN, J. ARIAS, J. LOPEZ, L. SANTOS, C. VENEGAS, M. DUARTE, A. ORTIZ-ARDILA, N. DE PARRA, C. CAMPOS and C. CELIS ZAMBRANO, «Evaluation of the Effect of Gold Mining on the Water Quality in Monterrey, Bolívar (Colombia)», *Water*, 12 (2020) 2523.
- [38] AFFESSI A.S. ET AFFESSI A., (2019): Migration incontrôlée, pratique de résilience et fragilisation des rapports sociaux dans l'exploitation clandestine de l'or à Nyan (Côte d'Ivoire) *international journal of innovation and Applied Studies*, Vol. 28, N° 1, pp. 191-202.
- [39] AHOUSI K.E., SEKA.A.M., TRAORE.A, (2019): Caractérisation d'un environnement hydrologique influencé par l'usage des pesticides en agriculture en Côte d'Ivoire: Cas du bassin versant de la Mé. *Journal of Applied Biosciences*, Vol: 161, pp. 16652-16662.
- [40] AHOUSI K.E et YAPO A.P. (2021). Étude de la minéralisation des eaux de surface en éléments traces métalliques (ETM) des zones d'orpaillage de la sous-préfecture de Kokumbo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, Vol 19, N°4, pp 36-50.
- [41] S. LOKO, K. E. AHOUSI., Y. B. KOFFI, N. F. KAKOU, A. M. KOUASSI and J. BIEMI, «Microbiological and physico-chemical quality of groundwater from artisanal sites of mining exploitation in the South-West of Côte d'Ivoire: case of the area of Hiré», *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4 (9) (2013) 567 - 574.
- [42] Y. H. A. YAPI, B. K. DONGUI, A. TROKOUREY, Y. S. S. BARIMA, Y. ESSIS et P. ATHEBA, «Évaluation de la pollution métallique des eaux souterraines et de surface dans un environnement minier aurifère à Hiré (Côte d'Ivoire)», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8 (3) (2014) 1281 - 1289.
- [43] K. S. A. YAO et K. E. AHOUSI, «Caractérisation physico-chimique des eaux de surface dans un environnement minier du centre-ouest de la Côte d'Ivoire: Cas du département de Divo», *European Scientific Journal*, 16 (12) (2020) 293 – 315.
- [44] M. EL FAHEM, A. BENZAOUAK, H. ZOUITEN, A. SERGHINI and M. FEKHAOUI, «Hydrogeochemical assessment of mine water discharges from mining activity. Case of the Haut Beht mine (central Morocco)», *AIMS Environmental Science*, 8 (1) (2021) 60 - 85. DOI: 10.3934/environsci.2021005.
- [45] MARTIN, J. ARIAS, J. LOPEZ, L. SANTOS, C. VENEGAS, M. DUARTE, A. ORTIZ-ARDILA, N. DE PARRA, C. CAMPOS and C. CELIS ZAMBRANO, «Evaluation of the Effect of Gold Mining on the Water Quality in Monterrey, Bolívar (Colombia)», *Water*, 12 (2020) 2523.

- [46] G. S. PLUMLEE and T. L. ZIEGLER, «The medical geochemistry of dust, soils and other earth materials». In: B.S. Lollar (Ed.), *Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, (2003) 264 - 310.
- [47] AHOUSSE K.E., YAPO A.P., KOFFI Y.B. and KOUASSI A.M. (2020). Surface Water Sediments Characterization Using Metallic Trace Elements (ETM): Case of the Artisanal Gold Mining Sites of Kokumbo (Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Protection*, Vol.11, N°9, pp. 649-663.
- [48] AMA-CAUPHYS B.A, OUATTARA J-M. P, SANGARE D. and COULIBALY L. (2021). Impacts of Artisanal Gold Mining on Surface Water Quality and Sediment in Agbaou, Hire, Kokumbo and Angovia, Central-West Ivory Coast. *Res. J. Chem. Env. Sci*, Vol.9, N°3, pp 12-24.
- [49] Avenard J.M. (1971): Aspect de la géomorphologie. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM. Paris, n 50, pp 7-71.
- [50] SERPEAUD, R. AL-SHUKRY, M. CASTEIGNEAU et G. MATEJKA, «Adsorption des métaux (Cu, Zn, Cd et Pb) par les sédiments superficiels d'un cours d'eau, rôle du pH, de la température et de la composition des sédiments», *Revue des Sciences de l'Eau*, 7 (1994) 343 – 365.
- [51] DJADE P.J.O., TRAORE A., KOFFI K.J.T., KEUMEAN K.N., SORO G., et SORO N. (2020). Évaluation du niveau de contamination des eaux souterraines par les éléments traces métalliques dans le département de Zouan-Hounien (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, Vol 150, pp. 15457 – 15468.
- [52] DJADE P.J.O., TRAORE A., KOFFI K.J.T., KEUMEAN K.N., SORO G., et SORO N. (2021). Assessment of Health Risks Related to Contamination of Groundwater by Trace Metal Elements (Hg, Pb, Cd, As and Fe) in the Department of Zouan-Hounien (West Côte d'Ivoire). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol 9, pp 189-210.
- [53] Stanislaw Dudka, et Domy C. Adriano (1997) -Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review. *Journal Environment Qual* 26.590-602.
- [54] Sampah Georges Eblin, Affoué Berthe Yao, Kouao Armand Anoh, and Kouakou Séraphin Konan (2022): Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux de la retenue de la Lobo (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire) *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028-9324 Vol. 31 No. 3 Dec. 2020, pp. 529-541.
- [55] FAHSSI A., YAHYA H.S.A, TOUZANI R. and CHAFI A. (2016). Évaluation spatiotemporelle de la contamination métallique des ressources hydriques superficielles de la basse Moulouya (Nord-est du Maroc). *J. Mater. Environ. Sci*, Vol 7, N°7, pp 2404 – 2423.
- [56] GUIRAUT F. (1995): Actualisation de guide d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau de surface. Rapport BRGM R38853, 59 p.
- [57] Mohamed E. Goher, Ali M. Hassan, Ibrahim A. Abdel-Moniem, Ayman H. Fahmy, Seliem M. El-sayed, (2014). Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia Canal. Nile River, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, Volume 40, Issue 3, 2014, Pages 225-233.
- [58] HASNA M. (2014). Les intoxications par les métaux lourds. *Toxicologie*, pp. 1-4.
- [59] HUE BI. F. F., KAMBIRE B., ET ALLA D. (2020). Mutations environnementales liées à l'orpaillage à Ity (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Annales de l'Université de Moundou, Série AFLASH*. Vol.7, N°2, pp 133-151.
- [60] THORNTON, «Risk assessment related to metals: the role of the geochemist», Report of the International Workshop on Risk Assessment of Metals and their Inorganic Compounds, International Council on Metals and the Environment, Angers, France, (1996).
- [61] K. A. F. YAO, «Développement d'une méthodologie pour une meilleure évaluation des impacts environnementaux de l'industrie extractive: cas de la mine d'or d' Afema (Sud-est de la Côte d'Ivoire) Thèse de doctorat, Université de Montpellier, France, (2018) 210 p.
- [62] KOUADIO L.M. (2023). Contribution à l'évaluation des niveaux de contamination des eaux et des sols des sites d'orpaillage clandestin et élimination des métaux (Hg, Pb, Cd) et de l'arsenic des eaux polluées, à l'aide des argiles de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, 232p.
- [63] KOUADIO, A., TOURÉ, S. ET KONAN, D. (2020). Analyse des impacts environnementaux de l'orpaillage en Afrique de l'Ouest. *Revue des Dynamiques Environnementales*, 18 (4), 67-80.
- [64] N'DIAYE A.D, THIAM O, KOUKAN M., NAMR K.I. (2013). Turbidité et matière en suspension dans l'eau: application à l'évaluation des métaux contenus dans l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal. *Larhyss J*. Vol. 14, pp 93- 105.
- [65] N'GOM N. M., MBAYE M., BARATOUX D., BARATOUX L., AHOUSSE K.E., KOUAME K.J., FAYE.G., and SOW E.H. (2022). Recent expansion of artisanal gold mining along the Bandama River (Côte d'Ivoire). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol 112, 16 p.
- [66] OMS, «Guidelines for Drinking water Quality», 4th edition, (2011) 51.
- [67] OMS. (2017). Guidelines to Drinking-water Quality (fourth edition). (NLM classification: WA 675), 564p.

- [68] ONEP, 2023: Renforcement de l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan: Le Ministre de l'Hydraulique, de l'Assainissement et de la salubrité s'imprègne de l'état d'avancement des travaux (Revue de presse en ligne onep.ci du 9 juin 2023).
- [69] OUATTARA O et KAMBIRE B. (2020). Exploitation minière artisanale et dégradation de l'environnement dans la sous-préfecture de Hiré (Ouest de la Côte d'Ivoire). Collection Environnement et Biodiversité, N° 4, Abidjan, Editions Resol-Tropiques, 122 p.
- [70] PRASAD B, KUMARI P, BANO S, KUMARI S, 2014. Ground water quality evaluation near mining area and development of heavy metal pollution index. *Appl Water Sci.* 4: 11–17.
- [71] Rousseau-Merck M.F, Zahraoui A., Touchot N, Tavitian A et Berger R. (1991) Chromosome assignment of four RAS-related RAB genes. *Hum Genet* 86 (4): 350-4.
- [72] Matias Miguel Salvarredy Aranguren (2008). Thèse sur la contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approche géochimique, minéralogique et hydrochimique. Doctorat de l'université de Toulouse 372 p.
- [73] TRAORE A., AHOUSSE K. E., AKA N., SORO N. (2015): Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la côte d'Ivoire). *Int j. Pure App. Biosci.* 3 (4), P.P.312-322.
- [74] YAO K.S.A. (2022). Apport de l'hydrochimie et de la géochimie environnementale dans l'évaluation des ressources en eau des environnements miniers du département de Divo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 293 p.
- [75] YAPO A.P. (2018). Activités d'orpaillage en Côte d'Ivoire et pollution des ressources en eau par les Éléments Traces Métalliques (ETM): cas de la Sous-préfecture de Kokumbo. Mémoire de Master, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 87 p.
- [76] YAPO A.P. (2024). Impact des activités d'orpaillage sur les environnements hydrologiques et la recharge des aquifères: cas du département de Dimbokro (centre est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 277p.
- [77] *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 45 (2025) 88 - 105 Kassi Alexis KOUAMÉ et al.
- [78] <https://pfoafrica.com/projets/usine-deau-potable-de-la-me/> visité le 09 Aout 2025.

Application de la théorie des jeux et de la télédétection à l'identification des zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire)

[Application of game theory and remote sensing to the identification of flood-prone areas in the Marahoué Watershed (Côte d'Ivoire)]

Kamenan Satti Jean Robert¹, Youan Ta Marc^{2,3}, Adja Miessan Germain⁴, and Kouassi Amani Michel⁵

¹Institut National Polytechnique Félix HOUPOUET-BOIGBY, Ecole doctorale polytechnique STI, UMRI Sciences et Techniques de l'ingénieur, Laboratoire des Sciences Géographiques, du Génie Civil et des Géosciences, Côte d'Ivoire

²Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

³Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

⁴Sciences de la Vie et de la Terre (SVT), École Normale Supérieure (ENS), Abidjan, Côte d'Ivoire

⁵Institut National Polytechnique Félix HOUPOUET-BOIGBY, Ecole Supérieure des Mines et Géologie, UMRI Sciences et Techniques de l'ingénieur, Laboratoire des Sciences Géographiques, du Génie Civil et des Géosciences

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Every year in Côte d'Ivoire, during the rainy season, several localities, including those within the Marahoué watershed, are subject to recurrent floods that cause loss of human lives, population displacement, and significant material damage. Identifying areas sensitive to this phenomenon is therefore crucial for the implementation of effective and sustainable preventive measures. This study thus aims to identify flood-prone zones in the Marahoué watershed by using current physical and hydrological characteristics derived from remote sensing observations, with the goal of supporting decision-makers in their sustainable development projects. The methodological approach employed begins with the delineation of the watershed into sub-basins, followed by the extraction of topographic, morphometric, hydrological, and environmental parameters associated with flooding, and the identification of sensitive areas through game theory algorithms (Borda and Condorcet). The results indicate that the downstream areas of the Marahoué watershed, particularly those located along the main river course, are highly sensitive to flooding. Conversely, upstream areas, which are generally situated at higher altitudes, were classified within the low to very low flood risk categories.

KEYWORDS: Theoretical computer science, Spatial modeling, Marahoué, Côte d'Ivoire, Floods, Borda, Condorcet.

RESUME: Chaque année en CÔTE D'IVOIRE, pendant la saison pluvieuse, plusieurs localités dont celles du bassin versant de la Marahoué sont sujettes à de fréquentes inondations occasionnant des pertes en vie humaines, des déplacements des populations et des dégâts matériels importants. Identifier les zones sensibles à ce phénomène est crucial pour la mise en œuvre des mesures préventives efficaces et durables. Ainsi cette étude vise donc à identifier les zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué en utilisant les caractéristiques physiques et hydrologiques actuelles, extraites à partir des observations de télédétection en vue d'aider les décideurs dans leur projet de développement durable. L'approche méthodologique employée débute par la délimitation du bassin en sous bassin, ensuite l'extraction des paramètres topographiques, morphologiques, hydrologiques et environnementaux associés aux inondations et de l'identification des zones sensibles aux inondations via les algorithmes de la théorie du jeu (Borda et Condorcet). Les résultats obtenus, indiquent que les zones situées en aval du bassin versant de la Marahoué sont très sensibles aux inondations. À l'inverse, les zones situées

en amont du bassin et qui sont dans la majorité à des altitudes plus élevées ont été classées dans les catégories de risque faible et très faible.

MOTS-CLEFS: Informatique théorique, Modélisation spatiale, Marahoué, Côte d'Ivoire, Inondations, Borda, Condorcet.

1 INTRODUCTION

Depuis toujours le globe terrestre est sujet à des inondations dévastatrices [1], [2], [3], [4]. Ce sont d'importants débits d'eau qui dépassent les berges naturelles ou artificielles d'un cours d'eau [5]. Du point de vue hydrologique, une inondation se produit lorsqu'un événement d'entrée d'eau inhabituellement extrême ou prolongé est rencontré dans le bassin et que le débit résultant dépasse la capacité du canal [6]. Ces dernières années, les inondations se sont intensifiées fort de l'urbanisation rapide, de la croissance démographique et du changement climatique [7]. 23% de ces inondations touchent pratiquement l'Afrique faisant de ce continent le deuxième le plus touché après l'Asie [8]. En Afrique de l'Ouest, particulièrement en Côte d'Ivoire, depuis les années 2000, les fréquentes inondations dans les communes d'Abidjan et dans plusieurs autres localités du pays suscitent un intérêt particulier de la part des autorités locales et de la communauté scientifique comme en illustrent les récents travaux de [9]; de [10]; de [11] et de [12]. En effet, tous les ans, des pluies torrentielles s'abattent à Abidjan et dans plusieurs localités du pays, faisant de nombreux dégâts matériels et des pertes en vie humaine [13], [14]. Cette réalité hydro climatique est connue dans la région de la Marahoué, notamment à Bouaflé et à Zuénoula où le principal hydrosystème est le fleuve Marahoué, un affluent du fleuve Bandama. C'est l'exemple des inondations de juin 2018 qui sont les plus dévastatrices de ces dernières années. Elles ont affecté les villes de Bouaflé et de Zuénoula en faisant cinq mille neuf cents (5900) sinistrés dont un (01) mort, respectivement deux mille quatre cents (2400) à Zuénoula et trois mille cinq cents (3500) à Bouaflé avec plusieurs dégâts matériels. Anticiper ces aléas hydrologiques avant leur occurrence et protéger les personnes et biens demeurent l'une des préoccupations des autorités tant locales que nationales. Bien évidemment, l'exécution d'une telle action passe nécessairement par l'identification des zones les plus exposés à ces aléas hydrologiques. Ceci permettra de définir des mesures préventives efficaces et durables dans le temps et dans l'espace. Quoiqu'il existe plusieurs méthodes qui permettent de mener à bien cette action, des études récentes de [15], de [16] et de [17] menées sur divers bassins, ont montré que celles qui utilisent les paramètres physiques et hydrologiques qui sont très souvent décrits par les paramètres topographiques, morphologiques et hydrologiques offrent une compréhension plus vaste de la réponse hydrologique du bassin et aussi contribuent fortement dans l'identification des zones vulnérables. À ces paramètres s'y ajoutent les ceux environnementaux qui ont une influence dans les risques d'inondations. Aujourd'hui avec le progrès technique, les méthodes mathématiques et informatiques à travers de nombreux algorithmes de calculs, le contexte se présente favorable pour une identification de qualité. À ce titre, l'utilisation des algorithmes de la théorie des jeux offre un potentiel énorme d'identification des zones sensibles aux inondations comme en illustrent les travaux de [18]. Ainsi, cette présente étude qui vient en complément des travaux antérieurs menées en Côte d'Ivoire et particulièrement dans le bassin versant de la Marahoué, est réalisée dans le but d'améliorer les méthodes existantes dans le cadre de la gestion des risques d'inondations. Elle se donne alors pour ambition d'identifier les zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué en utilisant les caractéristiques hydrologiques actuelles, géologiques et terrestres, extraites à partir des observations de télédétection et des algorithmes de la théorie de jeu en vue d'aider les décideurs dans leur projet de développement durable. Il s'agira d'abord d'extraire les principaux facteurs associés aux inondations, ensuite d'évaluer le niveau de sensibilité aux inondations à l'aide de la théorie du jeu et enfin de générer les cartes de sensibilités aux inondations.

2 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone objet de cette étude est dénommée bassin versant de la Marahoué. Elle est comprise entre les longitudes 5°5' et 7°1' Ouest et les latitudes 6°7' et 9°5' Nord (Figure 1). Sur le plan administratif (Figure 1), elle est à cheval sur les régions de la Bagoé, du Béré, du Haut-Sassandra, du Kabadougou, du Worodougou et de la Marahoué. L'environnement physique de l'espace d'étude présente un relief très contrasté marqué de plaines et des plateaux d'altitudes variant entre 400 m et 500 m [19] avec un climat soudanais dans la partie nord et un climat baouléen dans la partie sud. À ceux-ci, s'ajoutent des formations granitoïdes et des séries birimiennes qui constituent les principaux traits géologiques de la région [20], [21]. Son réseau hydrographique est dense et caractérisé par son principal fleuve qui est la Marahoué (un affluent du fleuve Bandama), long de 550 km et ses principaux affluents le Béré à l'Est et le Yani ou Bahoroni à l'Ouest puis se jette dans le Bandama blanc à l'endroit où se trouve le village de Bozi, peu après la ville de Bouaflé [22]. Quant à la vie socio-économique, elle est dominée par les activités agricoles, pastorales et minières [23], [11]. Les activités agricoles sont généralement développées autour des vivriers et des produits d'exportation qui sont sous la menace permanente des inondations et de la sécheresse. La production vivrière se compose de céréales, de légumes, de fruits, de bananes plantains, des ignames, du riz et du manioc. Les cultures de rentes destinées à l'exportation sont essentiellement le coton et l'arachide auxquelles s'ajoutent l'anacarde et la mangue pour la partie septentrionale du Bassin et principalement du café et du cacao pour la région de la Marahoué et du Worodougou [24], [25]. Concernant les activités pastorales développées à l'échelle du bassin, elles sont majoritairement tenues par les peuls transhumants venus du Mali et du Burkina-Faso auxquels s'ajoute une classe émergente de paysans éleveurs autochtones. Elles s'attellent principalement à

l'élevage de bovins, soutenue elle-même par la volaille, les cheptels ovins et caprins. Concernant les activités minières, le secteur d'étude est réputé pour son exploitation aurifère dans le département de Séguéla et de Bouaflé [26], [27]. Les pierres précieuses dykes kimberlitiques et lamproïte, riches en diamant sont exploités dans le département de Séguéla tant industrielle qu'artisanale [28], [25].

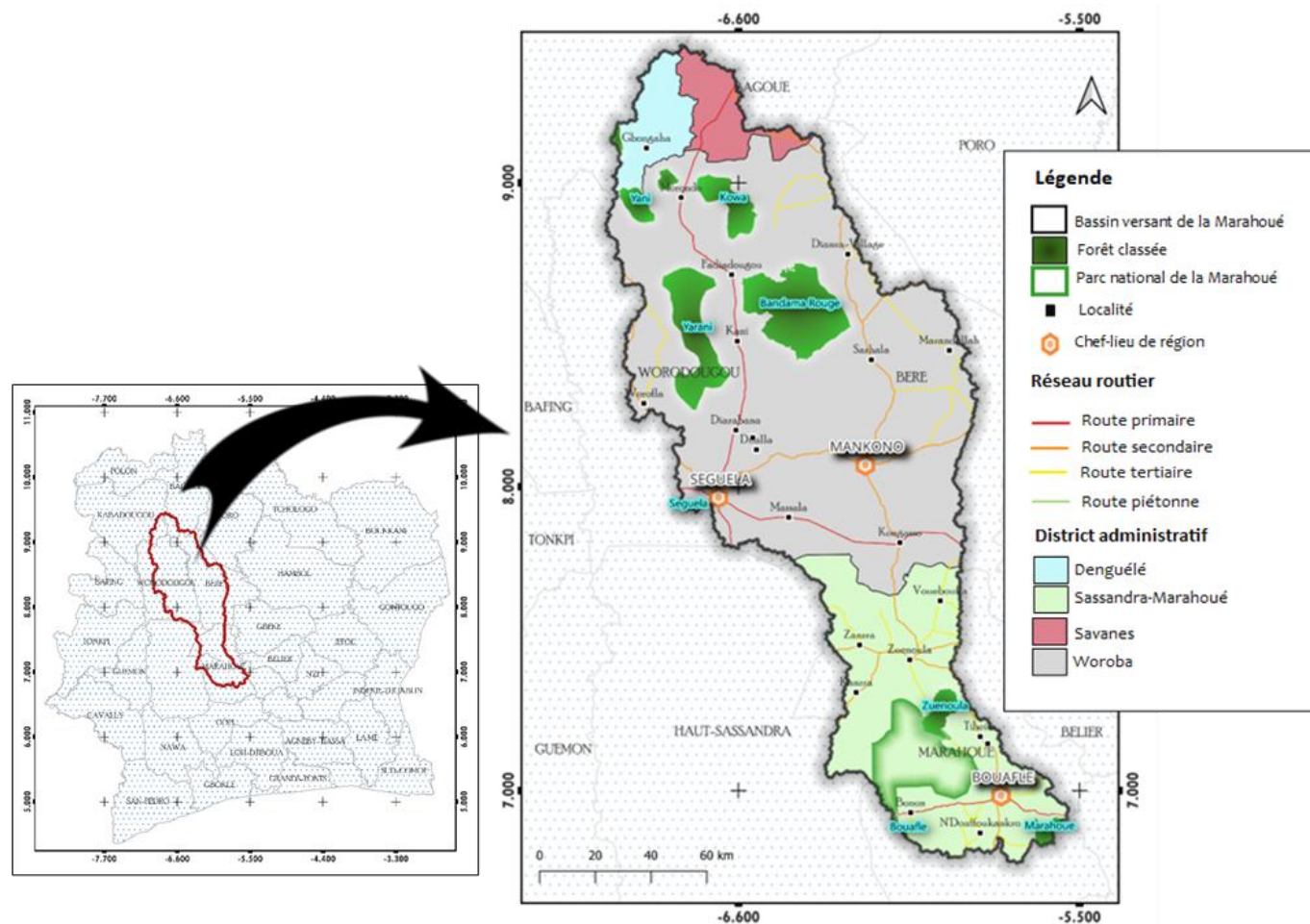


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

3 DONNÉES ET MATÉRIEL

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont composées de carte géologique, pédologique et topographique à l'échelle 1/2000 000 respectivement de 1971, 1960 et de 1972, disponibles en format papier au Centre d'Information Géographique et du Numérique, d'image SRTM de résolution 30 m qui est un Modèle Numérique d'Élévation (MNE), téléchargée à partir de la plateforme USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). À celles-ci s'ajoutent des données *in situ* qui sont essentiellement composées de données de pluies recueillies auprès de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Les données de pluies sont issues des enregistrements journaliers de la période 1961-2018 des stations de Béoumi, Bouaflé, Boundiali, Dianra, Kani, Madinani, Mankono, Séguéla, Vavoua et Zuenoula. Ce choix de ces stations est motivé d'une part, par la disponibilité des données et d'autre part, par la constitution d'un jeu de données assez représentatif pouvant permettre l'évaluation de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant. Toutes ces données recueillies dans cette étude, ont été traitées sur des ordinateurs équipés de plusieurs logiciels parmi lesquels les logiciels de télédétection et SIG (QGIS 3.10) pour le rendu des cartes et l'extraction des facteurs associés aux inondations, d'un environnement de développement interactif Google Colab pour l'exécution des scripts écrits en Python.

4 METHODES

L'approche méthodologique déployée dans cette étude, utilise une combinaison d'outils de télédétection, de SIG et des algorithmes de la théorie du jeu pour d'abord délimiter les sous bassins du versant de la Marahoué, ensuite extraire les paramètres associés aux inondations et enfin évaluer le niveau de sensibilité devant aboutir à cartographier les zones sensibles aux inondations.

4.1 DÉLIMITATION DES SOUS BASSINS

Les sous bassins de la zone d'étude ont été délimités selon des procédures usuelles et automatisées d'extraction de bassin versant dans un environnement SIG conformément aux travaux de [29] et [30] cités par [31]. Il s'agit de la correction du remplissage du MNE, de l'extraction de la direction de l'écoulement, de l'accumulation de l'écoulement, des ordres et caractéristiques des cours d'eau. La direction de l'écoulement a été calculée pour chaque pixel à l'aide du MNE rempli, c'est-à-dire la direction dans laquelle l'eau s'écoulera du pixel vers l'un des huit pixels. L'accumulation des flux a été utilisée pour générer un réseau d'hydrographie sur la base de la direction d'écoulement de chaque cellule et d'une valeur seuil qui spécifie le nombre de cellules matricielles à partir duquel une grille de cours d'eau doit être créée. Les cellules du raster de la source sont utilisées comme points d'écoulement au-dessus desquels la zone contributrice est déterminée.

4.2 EXTRACTION DES PARAMETRES ASSOCIES AUX INONDATIONS

4.2.1 EXTRACTION SPATIALE

L'extraction des paramètres associés aux inondations a été réalisée dans l'environnement Google Earth Engine en interaction avec Google Colab, et s'est articulée autour de deux étapes principales. Dans un premier temps, dix-huit (18) paramètres pertinents pour l'évaluation de la sensibilité aux inondations (Tableau 1) ont été sélectionnés à partir d'une revue approfondie de la littérature [32], [33], [34], [18]. Leur choix s'est fondé sur des critères tels que la disponibilité des données, la pertinence scientifique, l'efficacité analytique, la capacité à représenter la dynamique de l'écoulement ainsi que leur aptitude à caractériser les risques d'inondation. Dans un second temps, l'extraction spatiale proprement dite de ces paramètres a été effectuée conformément aux formules et méthodes associées, telles que présentées dans le Tableau 1. Toutes les phases énumérées ont été rigoureusement implémentées en langage python afin d'automatiser les tâches.

Tableau 1. Paramètres associés aux inondations

Catégories	Paramètres	Méthode / Formule
Topographiques	Altitude	Analyse SIG à l'aide du modèle MNE
	Pente	Analyse SIG à l'aide du modèle MNE
	Courbure de Profil (Pcou)	Analyse SIG à l'aide du modèle MNE
	Indice topographique de position (TPI)	$TPI_i = M_0 - \sum M_i/n$ [34]
	Indice de rugosité du terrain (TRI)	$TRI = \max^2 - \min^2 ^{(1/2)}$ [35]
Hydrologiques	Densité de drainage	$Dd = Lu/A$ [36]
	Précipitation	Moyenne annuelle de 1961-2018
	Fréquence d'écoulement (SF)	$Fs = Nu/A$ [36]
	Indice d'infiltration (IN)	$IN = Dd \times SF$ [35]
	Indice d'humidité topographique (TWI)	$TWI = \ln(As/\tan\beta)$ [37]
Morphologiques	Exposition	Analyse SIG (Modèle MNE)
	Indice de transport des sédiments (STI)	$STI = (As/22.13)^{0.6} (\sin\beta/0.0896)^{1.3}$ [38]
	Indice de puissance de flux (SPI)	$SPI = A \times \tan(\beta)$
Environnements	Distance au cours d'eau (DCE),	Analyse SIG à l'aide du modèle MNE
	Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)	Extrait des travaux de [39]
	Pédologie	
	Occupation du sol	
	Lithologie	

A: Superficie du bassin versant (m^2); Nu: Nombre total de cours d'eau; As= Accumulation des flux (m^2) et β =le gradient de la pente; Lu: Longueur total de cours d'eau; M_0 = altitude du point central, M_i = altitude de la grille, n = le nombre total de points environnants; max et min sont respectivement les valeurs les plus grandes et les plus petites des cellules dans les voisinages rectangulaires 3×3 de l'altitude.

4.2.2 EXTRACTION DES VALEURS MOYENNES ET PROPORTIONS DES PARAMETRES ASSOCIES AUX INONDATIONS

Les valeurs des paramètres associées aux inondations à l'échelle des sous bassins, ont été extraites selon leur nature catégorielle ou non. Concernant les paramètres de nature non catégorielle, notamment l'altitude, la pente, l'exposition, la courbure de profil (Pcou), la distance au cours d'eau (DCE), la densité de drainage (Dd), les précipitations, l'indice de position topographique (TPI), l'indice d'humidité topographique (TWI), l'indice de puissance de flux (SPI), l'indice de rugosité du terrain (TRI), l'indice de végétation par différence

normalisée (NDVI), la fréquence d'écoulement (SF), l'indice d'infiltration (IN), ainsi que l'indice de transport de sédiments (STI), leur traitement a été réalisé à l'aide d'outils d'analyse spatiale dans un environnement SIG où des statistiques zonales ont été calculées à partir des couches raster correspondantes en particulier la moyenne. Pour ceux de nature catégorielle (pédologiques, lithologiques et d'occupation du sol), leur quantification a été effectuée sur la base des proportions exprimées en pourcentage via Google Colab à l'aide d'un script écrit en python.

4.3 CARTOGRAPHIE DES ZONES SENSIBLES AUX INONDATIONS

4.3.1 PRÉSENTATION DES ALGORITHMES

ALGORITHME CONDORCET

Condorcet est une méthode de décision collective qui consiste à confronter chaque alternative à toutes les autres dans des duels successifs en retenant celle qui l'emporte face à chacune de ses concurrentes. Ainsi, une alternative est considérée comme gagnante selon Condorcet si elle est préférée à toutes les autres dans l'ensemble des comparaisons par paires [40]. Selon le formalisme mathématique, soit un ensemble d'alternatives $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$ et $M = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ un ensemble de m votants, chacun exprimant des préférences ordinales sur ces alternatives. Conformément à la règle de Condorcet, un gagnant est identifié par le biais de comparaisons binaires entre toutes les paires d'alternatives [41]. Selon [42], la préférence entre deux alternatives est définie à l'aide de la fonction suivante: $O_j(A_j, A_k) = 1$ si $A_j > A_k$ pour la majorité des votants $i \in M$, sinon $O_j(A_j, A_k) = 0$. Autrement dit $O_j(A_j, A_k)$ prend la valeur 1 si l'alternative A_j est préférée à A_k par la majorité des individus et 0 dans le cas contraire. Finalement, le score global d'une alternative A_j , noté $O(A_j)$ est ensuite déterminé en sommant les résultats de ses confrontations avec toutes les autres alternatives [43], soit:

$$O(A_j) = \sum O_j(A_j, A_k) \quad (\text{Eq.1})$$

ALGORITHME BORDA

L'algorithme de Borda consiste à classer un ensemble d'alternatives en fonction des préférences d'un groupe de votants. Chaque votant établit un ordre de préférence entre les alternatives, puis des points sont attribués en fonction du rang occupé par chaque option: Par exemple une alternative classée première reçoit m points (où m est le nombre total d'alternatives), la deuxième reçoit $m-1$ points, et ainsi de suite jusqu'à la dernière qui reçoit 1 point. Un total pondéré appelé le score de Borda d'une alternative i noté $BS(i)$, est calculé à l'aide de l'équation (Eq.2) inspirée des travaux de [41].

$$BS(i) = (n) \times (NFi_{occupe_premier_rang}) + (n-1) \times (NFi_{occupe_deuxieme_rang}) + \dots + (2) \times (NFi_{occupe_avant_dernier_rang}) + (1) \times (NFi_{occupe_dernier_rang}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Où NFi représente le nombre d'occurrence de l'alternative i dans l'ensemble des préférences

Le classement final des alternatives est établi en fonction de tous les scores Borda des alternatives, et celle ayant obtenu le score Borda le plus élevé est déclarée vainqueur selon la méthode de Borda.

4.3.2 CLASSEMENT GENERAL DES SOUS BASSINS SELON L'INFLUENCE DES PARAMETRES ASSOICIES AUX INONDATIONS

Cette étape a été effectuée sur la base des valeurs extraites pour l'ensemble des paramètres et le sens de l'influence proposé par [44], [45], [46] et [47]. Ainsi, les faibles altitudes et les pentes douces traduisent des zones d'accumulation favorables à la stagnation de l'eau, donc à une forte sensibilité aux inondations. L'indice de position topographique (TPI) mettant en évidence des valeurs négatives, indique que ces dernières correspondent aux zones déprimées, fortement exposées aux inondations, contrairement aux valeurs positives qui indiquent des secteurs de drainage. Quant à l'exposition des versants, dans le contexte tropical ivoirien, les versants orientés au nord conservent une humidité plus élevée et présentent un risque accru de saturation, tandis que ceux exposés au sud connaissent une évaporation plus importante et donc un risque plus faible. Les courbures concaves (P_{cou}) favorisent la stagnation et l'infiltration des eaux, amplifiant la probabilité d'inondation, alors que les courbures convexes facilitent l'écoulement. L'indice de rugosité topographique (TRI) distingue les terrains plats, où l'accumulation d'eau est dominante et accroît le risque, des reliefs accidentés qui favorisent un drainage plus rapide et réduisent la sensibilité aux inondations. De même, la proximité au réseau hydrographique (DCE) accentue le risque lorsque les valeurs sont faibles, car les zones proches du lit majeur sont plus exposées aux crues. Une densité de drainage (D_d) élevée, des précipitations fortes, un indice de saturation (TWI) ou encore un indice de puissance de flux (SPI) traduisent un accroissement du potentiel de ruissellement et donc du risque d'inondation. De même, une fréquence d'écoulement élevée (SF) reflète une forte réactivité hydrologique, accentuant la probabilité de crues. En revanche, un indice d'infiltration (IN) élevé ou un NDVI important (végétation dense) atténuent le risque en améliorant l'infiltration et en limitant le ruissellement de surface. Enfin, concernant la

lithologique, les roches peu perméables telles que les schistes, les roches métamorphiques intenses ou les gabbros favorisent l'accumulation d'eau et donc un risque élevé d'inondation. À l'inverse, des formations fracturées ou plus perméables comme les granites calco-alcalins permettent un meilleur drainage et réduisent la sensibilité aux inondations. Quant à l'occupation du sol (OCS), les zones urbanisées ou à cultures intensives, caractérisées par une imperméabilisation croissante des sols, accroissent considérablement le risque d'inondation. Tandis que les zones humides atteignant leur seuil de saturation, deviennent elles-mêmes des espaces vulnérables aux submersions, favorisant l'expansion spatiale des eaux de crue.

4.3.3 IDENTIFICATION DES ZONES SENSIBLES AUX INONDATIONS

L'identification des zones sensibles aux inondation a été effectuée à l'aide des algorithmes de notation issus de la théorie des jeux, notamment ceux de Condorcet, de Borda et du tableau des classement général des sous bassins selon l'influence des paramètres extraits. Concernant l'algorithme de Borda utilisé, un score spécifique a été attribué à chaque sous-bassin en fonction de sa position relative dans le classement général. Plus précisément, chaque sous-bassin a été noté selon son rang dans ce classement. Le score Borda pour chaque sous bassin a été calculé, permettant de dresser un classement global de ces derniers. À l'issue de cette phase, les sous-bassins ont été classifiés en cinq catégories de sensibilité aux inondations selon les scores Borda: très faible, faible, modéré, élevé et très élevé. Parallèlement, l'algorithme de Condorcet a été utilisé en se basant sur des comparaisons directes entre les sous-bassins, et ce, pour chaque paramètre associé aux inondations. À cet effet, une matrice de confrontation par paire a été construite dans laquelle chaque sous-bassin a été comparé à un autre sur la base du classement général. Ce processus a permis de déterminer pour chaque paire de sous-bassins, celui qui obtiendrait le plus grand nombre de "votes" en termes de risque d'inondation. À l'issue de cette phase, pour chaque sous-bassin, les résultats des confrontations ont été comptabilisés en termes de victoires, défaites et matchs nuls. Trois points ont été attribués pour une victoire, un point pour un match nul et zéro point pour une défaite. Enfin, un classement final a été établi en fonction du nombre total de points obtenus par chaque sous-bassin dans les confrontations permettant de classer les sous-bassins en cinq catégories de risques à savoir très faible, faible, modéré, élevé et très élevé.

5 RÉSULTATS

5.1 DÉLIMITATION DES SOUS BASSINS

La figure 2 présente la délimitation des sous bassins et le tableau 2 décrit les caractéristiques. L'analyse de la figure 2 et du tableau 2, montre que le secteur d'étude est défini sur une superficie de 21556, 20 km² pour un périmètre de 1634,01 km. Il est subdivisé en quatorze (14) sous bassins codés respectivement de SB1 à SB14. La superficie de chaque sous bassin varie de 279,62 à 4398,05 km². Quant au périmètre associé à chaque sous bassin, il varie de 99,86 à 469,01 km. Les valeurs minimales de ces deux paramètres sont enregistrées dans le sous bassin SB11, tandis que les maximales sont observées dans le sous bassin SB6. Au niveau de la distribution spatiale des sous bassins, le Nord du secteur d'étude regroupe les sous bassins SB1 à SB3; le Centre regroupe les sous bassins SB4 à SB10 et le Sud couvre les sous bassins SB11 à SB14.

Tableau 2. Caractéristiques des sous bassins

Sous bassins	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)
SB1	801,28	166,15
SB2	2249,21	306,77
SB3	2779,36	456,21
SB4	1325,51	218,32
SB5	377,62	118,54
SB6	4398,05	469,01
SB7	2280,12	341,52
SB8	1499,70	284,43
SB9	386,28	132,00
SB10	961,83	206,81
SB11	279,62	99,86
SB12	1104,03	196,04
SB13	1413,49	246,24
SB14	1700,09	318,98
Total	21556,20	1634,01

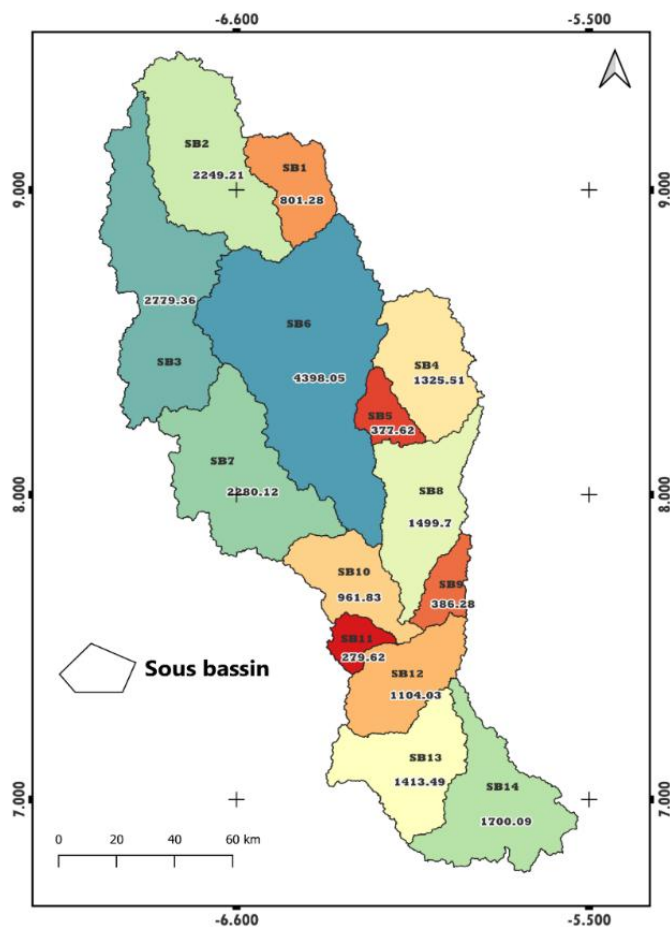


Fig. 2. Délimitation des sous bassins du secteur d'étude

5.2 EXTRACTION DES PARAMETRES ASSOCIES AUX INONDATIONS

La figure 3 présente la distribution spatiale des paramètres topographiques, morphologiques, hydrologiques et environnementaux du bassin de la Marahoué, complétées par les tableaux 3, 4, 5 et 6 qui résument leurs valeurs par sous-bassin.

EXTRACTION DES PARAMÈTRES DE NATURE CATÉGORIELLES

L'analyse spatiale des sols (Figure 3.p) combinée au tableau 3, montre une dominance des sols ferrallitiques moyennement désaturés dans la majorité des sous-bassins, tandis que les sols hydromorphes, peu évolués ou indurés sont identifiés comme les plus vulnérables aux inondations en raison de leur faible capacité d'infiltration et de leur localisation en zones dépressionnaires. Les données d'occupation du sol (Tableau 4) révèlent une forte hétérogénéité entre les sous-bassins, avec des zones amplement anthropisées (SB12, SB13, SB14) combinant plantations, cultures pérennes et habitats humains, et des zones moins utilisées (SB5, SB11). Les zones humides et marécageuses, présentes notamment dans les sous bassins SB6, SB7, SB13 et SB14, accentuent le risque d'inondation localisé. L'analyse lithologique (Tableau 5) met en évidence une homogénéité granitique favorable en amont (SB1–SB9) et une hétérogénéité accrue en aval (SB10–SB14) dominée par des formations métamorphiques peu perméables, accentuant le ruissellement. Les sous-bassins amont, à perméabilité modérée et sols majoritairement ferrallitiques, génèrent un ruissellement rapide mais limité, tandis que les unités aval présentent accumulation d'eau et saturation fréquente. La combinaison des caractéristiques pédologiques, lithologiques et de l'occupation du sol montre que certains sous-bassins (SB6, SB7, SB13, SB14, SB3 et SB8) sont particulièrement vulnérables aux inondations. Les sols ferrallitiques désaturés favorisent l'infiltration, tandis que les sols indurés, hydromorphes ou peu évolués agissent comme des surfaces imperméables, amplifiant le ruissellement. Les zones de plantations, cultures pérennes et habitats humains augmentent la pression hydrologique locale, nécessitant des stratégies de gestion ciblées.

EXTRACTION DES PARAMÈTRES DE NATURE NON CATÉGORIELLES

L'analyse des 14 sous-bassins (Tableau 6) révèle une forte variabilité des altitudes (214,97 à 408 m) et des pentes (2,50 à 3,61 %), traduisant des reliefs doux à modérément inclinés. L'exposition dominante vers l'est influence l'insolation et l'humidité du sol, tandis que le NDVI (0,52–0,61) indique une couverture végétale relativement dense. Les précipitations annuelles varient de 1007 à 1196 mm, structurant les régimes hydrologiques locaux. Les indices SF et IN montrent des contrastes dans la dynamique de ruissellement et la capacité d'infiltration des sols. Les indices TWI, SPI, TPI, TRI et STI confirment une hétérogénéité des zones d'accumulation, d'érosion et de transport de l'eau. Les sous-bassins situés en amont présentent des altitudes et pentes plus élevées favorisant un ruissellement rapide, tandis que ceux en aval, plus bas et moins pentus, favorisent l'accumulation et la saturation des sols. La densité de drainage plus élevée en amont accélère l'export des eaux vers l'aval. Globalement, le bassin montre une transition hydrologique amont-aval structurante pour la sensibilité aux inondations.

Tableau 3. Proportion en pourcentage des unités pédologiques sensibles aux inondations par sous bassin

Sous bassins	Sols hydromorphes à gley et pseudogley, et sols peu à évolués d'apport (%)	Sols remaniés ou typiques avec induration et bruns eutrophes trop (%)	Proportion moyenne (%)
SB1	13,4	1,25	7,33
SB2	13,4	1,25	7,33
SB3	12,68	6,68	9,68
SB4	12,57	0	6,29
SB5	12,82	0	6,41
SB6	14,96	0,71	7,84
SB7	14,96	0,71	7,84
SB8	12,78	0,97	6,88
SB9	9,82	0	4,91
SB10	12,76	1,17	6,97
SB11	12,01	10,19	11,1
SB12	12,01	10,19	11,1
SB13	12,01	10,19	11,1
SB14	12,01	10,19	11,1

Tableau 4. Proportion en pourcentage des unités d'occupation du sol par sous bassin

Sous bassins	Ocs2	Ocs4	Ocs9	Ocs10	Ocs11	Ocs12	Ocs13	Ocs16	Proportion moyenne
SB1	2,2	0,04	5,19	0,1	0,03	0,37	1,73	0,63	1,29
SB2	6,3	0,1	7,21	0,23	0	1,76	2,14	3,39	2,64
SB3	14,29	1,17	5,72	4,53	0	2,54	1,6	10,41	5,03
SB4	5,91	0,13	7,61	0,1	0,09	0,44	1,94	1,33	2,19
SB5	1,48	0,04	2,65	0,01	0,03	0,07	0,99	0,49	0,72
SB6	15,54	1,68	24,45	1,71	1,88	9,12	5,51	20,95	10,11
SB7	8,31	2,64	12,7	2,35	1,55	7,58	4,67	24,94	8,09
SB8	7,96	2,9	4,84	5,61	3,08	8,7	3,59	11,07	5,97
SB9	1,02	4,45	0,67	4,76	2,9	1,52	1,22	2,38	2,37
SB10	5,57	5,4	2,13	0,45	4,38	15,46	6,41	2,52	5,29
SB11	0,6	1,77	0,52	0,58	2,07	0,21	4,33	0,58	1,33
SB12	10	27	12	10	28	16,78	21,48	8	16,66
SB13	10,59	28,56	10,25	29,33	28,08	18	20	8,45	19,16
SB14	10,23	24,12	4,06	40,24	27,91	17,45	24,39	4,86	19,16

Ocs2: Culture d'anacarde; Ocs4: Culture de cacao-café; Ocs9: Habitat humain; Ocs10: Culture d'hévéa; Ocs11: Culture de palmier; Ocs12: Plan d'eau; Ocs13: Canne à sucre; Ocs16: Zones marécageuses

Tableau 5. Proportion en pourcentage des unités lithologiques par sous bassin

Sous-bassin	Lithologies principales et %
SB1	35,08 % granites, 21,49 % conglomérats, 11,27 % mylonites/conglomérats, 5,4 % schistes
SB2	66,42 % granitoïdes à biotite, 10,75 % formations métamorphiques, 4,33 % conglomérats
SB3	91,65 % granitoïdes à biotite, 3,4 % schistes/grauwackes, 0,79 % schistes
SB4	94,04 % granitoïdes à biotite, 3,32 % rhyolites/dacites, 1,02 % granites calco-alcalins
SB5	99,43 % granitoïdes à biotite, 0,57 % rhyolites/dacites
SB6	79,87 % granitoïdes hétérogènes, 6,32 % granitoïdes homogènes, 1,27 % granites divers, 0,74 % gabbros
SB7	80,24 % granitoïdes à biotite, 4,42 % granitoïdes homogènes, 1,36 % granitoïdes homogènes
SB8	59,35 % granitoïdes à biotite, 16,91 % granitoïdes subalcalins, 10,36 % schistes/grauwackes
SB9	43,54 % schistes/grauwackes, 39,54 % granitoïdes subalcalins
SB10	77,35 % granitoïdes à biotite, 4,27 % schistes/grauwackes
SB11	23,27 % granitoïdes à biotite, 16,28 % schistes/grauwackes, 36,94 % granitoïdes subalcalins
SB12	23,01 % migmatites, 16,28 % schistes/grauwackes, 15,24 % granitoïdes hétérogènes
SB13	49,20 % schistes/grauwackes, 19,97 % granitoïdes subalcalins
SB14	47,09 % schistes/grauwackes, 20,59 % migmatites

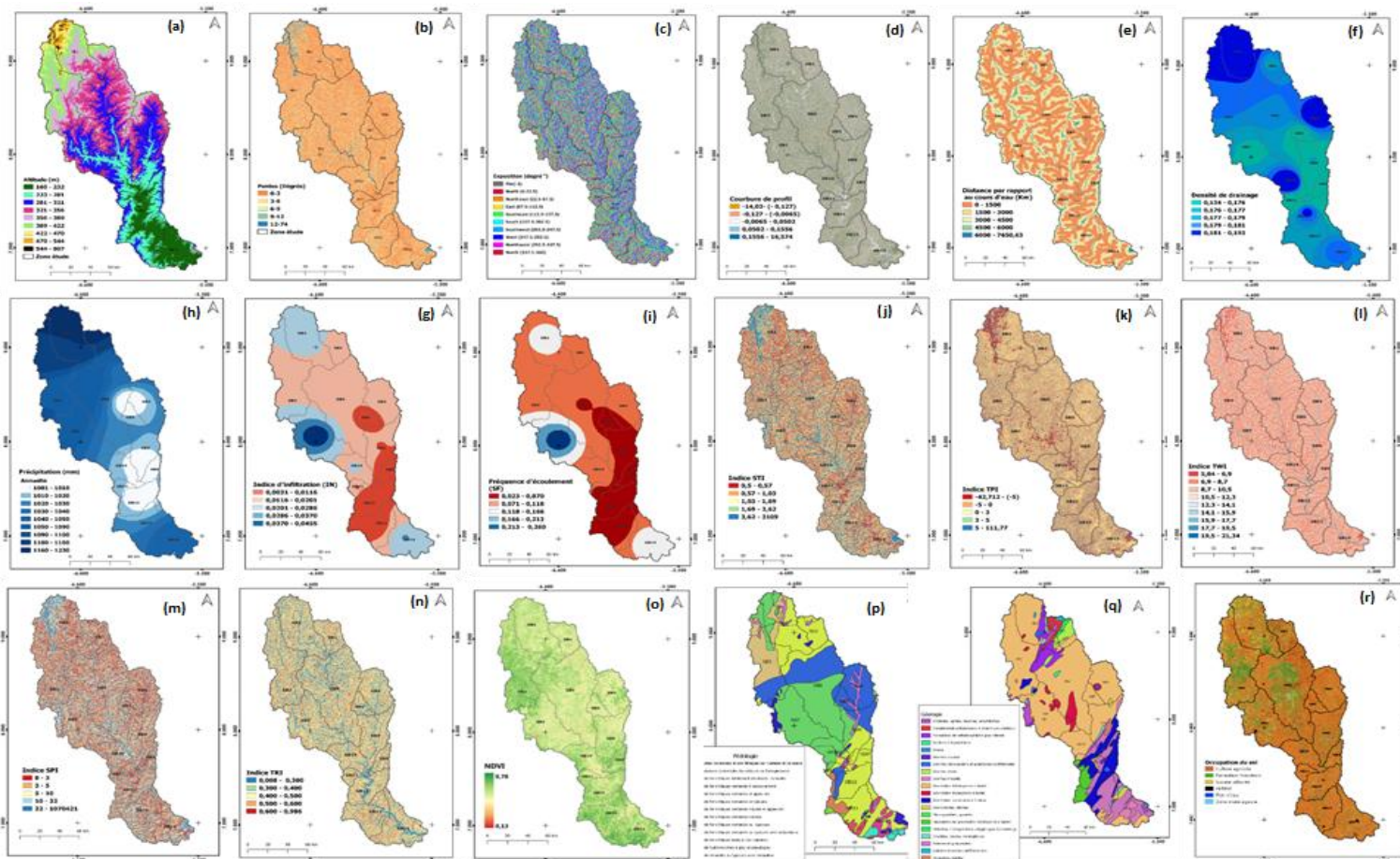


Fig. 3. Paramètres associés aux inondations (a): Altitude, (b): Pente, (c): Exposition, (d): Courbure du plan, (e): Distance par rapport au cours d'eau, (f): Densité de drainage, (g): Précipitation annuelle, (h): IN, (i): SF, (j): STI, (k): TPI, (l): TWI, (m): SPI, (n): TRI, (o): NDVI, (p): Pédologie, (q): Lithologie, (r): Occupation du sol,

Tableau 6. Extraction des paramètres de nature non catégorielles

Sous bassins	Altitude	Pente	Exposition: East	Exposition: Nord	Pcou	DCE	Densité D.	Préci.	SF	IN	STI	TPI	TWI	SPI	TRI
SB1	370,20	2,50	0,036	-0,03	0,018	1817,15	0,178	1141,36	0,108	0,019	3,35	-0,00011	6,14	-0,88	0,44
SB2	408,00	3,61	0,036	-0,03	0,018	1653,09	0,184	1195,72	0,116	0,0216	5,59	-0,00015	5,97	-0,67	0,427
SB3	398,06	3,14	0,036	-0,03	0,018	1767,32	0,180	1100,41	0,103	0,0183	5,62	0,00049	6,01	-0,76	0,427
SB4	333,89	2,57	0,07	-0,029	0,018	1727,50	0,181	1016,07	0,086	0,0165	3,37	-0,00006	6,10	-0,85	0,429
SB5	334,46	2,77	0,012	-0,028	0,017	1827,67	0,174	1010,07	0,046	0,008	3,44	-0,00001	6,04	-0,81	0,425
SB6	332,88	3,00	-0,011	-0,021	0,015	1739,01	0,178	1040,39	0,090	0,0159	7,21	-0,00004	6,02	-0,78	0,423
SB7	312,07	3,33	0,021	-0,022	0,016	1719,51	0,176	1051,82	0,173	0,0304	7,2	0,00006	5,90	-0,66	0,427
SB8	295,79	2,89	-0,011	-0,021	0,012	1719,65	0,171	1012,7	0,065	0,0118	5,92	-0,00034	5,99	-0,74	0,432
SB9	263,49	2,78	0,021	-0,02	0,014	2052,01	0,147	1007,47	0,038	0,0059	3,13	-0,00050	5,98	-0,72	0,449
SB10	271,55	3,06	0,021	-0,01	0,008	1628,71	0,181	1013,64	0,094	0,0186	15,21	0,00020	5,97	-0,72	0,43
SB11	260,61	2,68	0,072	0,017	0,008	1970,92	0,172	1011,72	0,070	0,0119	3,16	0,00026	6,04	-0,79	0,423
SB12	242,14	2,86	0,072	0,017	0,008	1784,26	0,175	1007,32	0,056	0,01	13,97	-0,00002	6,06	-0,77	0,429
SB13	239,07	3,08	0,072	0,017	0,008	1731,66	0,177	1026,22	0,058	0,0102	8,41	0,00014	5,95	-0,68	0,439
SB14	214,97	3,08	0,072	0,017	0,010	1819,80	0,178	1043,29	0,124	0,023	12,93	-0,00032	6,09	-0,78	0,426

5.3 CARTE DES ZONES SENSIBLES AUX INONDATIONS PAR LA THEORIE DU JEU

5.3.1 CLASSEMENT GENERAL DES SOUS BASSINS SELON L'INFLUENCE DES PARAMETRES ASSOCIES

Les tableaux 7 à 12 présentent les rangs des sous-bassins selon l'exposition, l'indice TRI, la courbure de profil, l'occupation du sol, les unités pédologiques et lithologiques. L'analyse combinées des tableaux, révèle une variabilité notable de leur influence sur le risque d'inondation. Les sous-bassins SB11 à SB14, orientés est/nord, présentent un risque élevé, tandis que les unités amont et centrales affichent des risques modérés ou faibles. L'indice TRI montre que des terrains peu ou moyennement accidentés contribuent différemment à la vulnérabilité avec SB6 et SB11 restant sensibles. La courbure de profil met en évidence l'accumulation dans les zones concaves (SB1, SB9) et un ruissellement rapide dans les zones convexes. L'occupation du sol souligne l'impact des zones anthropisées, agricoles et humides, avec SB6, SB7, SB13 et SB14 particulièrement vulnérables. Les sols hydromorphes, peu évolués ou indurés augmentent le ruissellement et la stagnation. Enfin, les formations lithologiques peu perméables à l'aval renforcent la vulnérabilité, SB12 à SB14 étant les plus exposés.

Tableau 7. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence de l'exposition

Sous bassins	East	Nord	Orientation dominante	Interprétation hydrologique	Rang
SB1	0,036	-0,03	Est / Sud	Risque modéré	11
SB2	0,036	-0,03	Est / Sud	Risque modéré	11
SB3	0,036	-0,03	Est / Sud	Risque modéré	11
SB4	0,07	-0,029	Fort Est / Sud	Risque légèrement élevé	10
SB5	0,012	-0,028	Faible Est / Sud	Risque modéré	9
SB6	-0,011	-0,021	Ouest / Sud	Risque faible	11
SB7	0,021	-0,022	Est / Sud	Risque modéré	8
SB8	-0,011	-0,021	Ouest / Sud	Risque faible	7
SB9	0,021	-0,02	Est / Sud	Risque modéré	6
SB10	0,021	-0,01	Est / Faible Sud	Risque modéré à faible	5
SB11	0,072	0,017	Fort Est / Nord	Risque élevé	1
SB12	0,072	0,017	Fort Est / Nord	Risque élevé	1
SB13	0,072	0,017	Fort Est / Nord	Risque élevé	1
SB14	0,072	0,017	Fort Est / Nord	Risque élevé	1

Tableau 8. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence de l'indice TRI

Sous bassins	TRI	Interprétation terrain	Sensibilité aux inondations	Rang
SB1	0,440	Moyennement accidenté	Risque modéré	13
SB2	0,427	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	5
SB3	0,427	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	5
SB4	0,429	Moyennement accidenté	Risque modéré	8
SB5	0,425	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	3
SB6	0,423	Peu accidenté	Risque élevé	1
SB7	0,427	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	5
SB8	0,432	Moyennement accidenté	Risque modéré	11
SB9	0,449	Relativement accidenté	Risque faible à modéré	14
SB10	0,430	Moyennement accidenté	Risque modéré	10
SB11	0,423	Peu accidenté	Risque élevé	1
SB12	0,429	Moyennement accidenté	Risque modéré	8
SB13	0,439	Moyennement accidenté	Risque modéré	12
SB14	0,426	Peu accidenté	Risque modéré à élevé	4

Tableau 9. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence de la courbure de profil (Pcou)

Sous bassins	Pcou	Interprétation	Rang
SB1	0,008	Concave (accumulation)	1
SB2	0,013	Convexe léger	9
SB3	0,013	Convexe léger	9
SB4	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB5	0,013	Convexe léger	9
SB6	0,014	Convexe	13
SB7	0,015	Convexe marqué	14
SB8	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB9	0,010	Concave (accumulation)	2
SB10	0,013	Convexe léger	9
SB11	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB12	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB13	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3
SB14	0,012	Quasi neutre à légèrement concave	3

Tableau 10. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence de l'OCS

Sous bassins	Ocs2	Ocs4	Ocs9	Ocs10	Ocs11	Ocs12	Ocs13	Ocs16	Taux moyen	Rang
SB1	2,2	0,04	5,19	0,1	0,03	0,37	1,73	0,63	1,29	13
SB2	6,3	0,1	7,21	0,23	0	1,76	2,14	3,39	2,64	9
SB3	14,29	1,17	5,72	4,53	0	2,54	1,6	10,41	5,03	8
SB4	5,91	0,13	7,61	0,1	0,09	0,44	1,94	1,33	2,19	11
SB5	1,48	0,04	2,65	0,01	0,03	0,07	0,99	0,49	0,72	14
SB6	15,54	1,68	24,45	1,71	1,88	9,12	5,51	20,95	10,11	4
SB7	8,31	2,64	12,7	2,35	1,55	7,58	4,67	24,94	8,09	5
SB8	7,96	2,9	4,84	5,61	3,08	8,7	3,59	11,07	5,97	6
SB9	1,02	4,45	0,67	4,76	2,9	1,52	1,22	2,38	2,37	10
SB10	5,57	5,4	2,13	0,45	4,38	15,46	6,41	2,52	5,29	7
SB11	0,6	1,77	0,52	0,58	2,07	0,21	4,33	0,58	1,33	12
SB12	10	27	12	10	28	16,78	21,48	8	16,66	3
SB13	10,59	28,56	10,25	29,33	28,08	18	20	8,45	19,16	1
SB14	10,23	24,12	4,06	40,24	27,91	17,45	24,39	4,86	19,16	1

Tableau 11. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence des unités pédologiques

Sous bassins	Sols hydromorphes à gley et pseudogley, et sols peu à évolués d'apport (%)	Sols remaniés ou typiques avec induration et bruns eutrophes trop (%)	Proportion moyenne (%)	Rang
SB1	13,4	1,25	7,33	8
SB2	13,4	1,25	7,33	8
SB3	12,68	6,68	9,68	5
SB4	12,57	0	6,29	13
SB5	12,82	0	6,41	12
SB6	14,96	0,71	7,84	6
SB7	14,96	0,71	7,84	6
SB8	12,78	0,97	6,88	11
SB9	9,82	0	4,91	14
SB10	12,76	1,17	6,97	10
SB11	12,01	10,19	11,1	1
SB12	12,01	10,19	11,1	1
SB13	12,01	10,19	11,1	1
SB14	12,01	10,19	11,1	1

Tableau 12. Classement des sous bassins en fonction du sens d'influence des unités lithologiques

Sous bassins	Sens d'influence sur le risque d'inondation	Rang
SB1	Élevé	4
SB2	Modéré	6
SB3	Faible	10
SB4	Faible	10
SB5	Faible	10
SB6	Élevé	4
SB7	Modéré	6
SB8	Modéré	6
SB9	Faible	10
SB10	Modéré	6
SB11	Faible	10
SB12	Très élevé	1
SB13	Très élevé	1
SB14	Très élevé	1

L'analyse du classement général des sous-bassins (Tableau 13), révèle que les premières places, indiquant le risque le plus élevé, sont occupées par les zones situées en aval SB12, SB13 et SB14, qui présentent des conditions favorables à l'accumulation d'eau (faible altitude, sols hydromorphes et lithologie peu perméable). Les rangs intermédiaires sont principalement attribués aux sous-bassins centraux et intermédiaires (SB6 à SB10), dont la vulnérabilité varie selon les paramètres, illustrant un équilibre entre pentes modérées et sols aux capacités d'infiltration diverses. Les sous-bassins amont (SB1 à SB5) obtiennent majoritairement les rangs les plus faibles, reflétant un risque modéré ou limité, en lien avec leur altitude élevée et leurs pentes prononcées favorisant un ruissellement rapide mais limitant l'accumulation. Certains sous-bassins, comme SB11, apparaissent à la fois sensibles pour certains paramètres (exposition, TRI, pédologie) mais moins pour d'autres, traduisant l'effet combiné des facteurs naturels et anthropiques.

Tableau 13. Classement général des sous bassins en fonction de l'influence des paramètres

Sous bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9	SB10	SB11	SB12	SB13	SB14
Altitude	12	14	13	10	11	9	8	7	5	6	4	3	2	1
Pente	1	14	12	2	4	8	13	7	5	9	3	6	11	10
Exposition	11	11	11	10	9	11	8	7	6	5	1	1	1	1
Courbure de profil	11	11	11	11	10	8	9	6	7	1	1	1	1	5
Distance au cours d'eau	10	2	8	5	12	7	3	4	14	1	13	9	6	11
Densité D.	5	1	4	2	11	7	9	13	14	3	12	10	8	6
Précipitation	2	1	3	8	12	6	4	10	13	9	11	14	7	5
SF	4	3	5	8	13	7	1	10	14	6	9	12	11	2
IN	11	12	9	8	2	7	14	5	1	10	6	3	4	13
STI	12	9	8	11	10	5	6	7	14	1	13	2	4	3
TPI	5	4	14	6	9	7	10	2	1	12	13	8	11	3
TWI	1	11	8	2	5	7	14	9	10	12	6	4	13	3
SPI	14	2	7	13	12	10	1	6	5	4	11	8	3	9
TRI	13	5	5	8	3	1	5	11	14	10	1	8	12	4
NDVI	2	7	13	3	1	6	4	8	8	8	4	11	14	11
Pédologie (%)	8	8	5	13	12	6	6	11	14	10	1	1	1	1
Ocs (%)	13	9	8	11	14	4	5	6	10	7	12	3	1	1
Lithologie (%)	4	6	10	10	10	4	6	6	10	6	10	1	1	1

5.3.2 ZONES SENSIBLES AUX INONDATIONS IDENTIFIEES

Le tableau 14 présente la distribution des scores de Borda obtenus à l'échelle des sous-bassins, tandis que le tableau 15 rend compte des résultats issus des différentes confrontations par paire selon l'algorithme de Condorcet. Ces analyses sont complétées par la figure 7, qui illustre la répartition spatiale des zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué.

Tableau 14. Distribution du score de Borda

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Point Borda	Rang
Points	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01		
SB1	2	2	0	2	2	0	0	1	0	1	3	2	2	1	131	10
SB2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	0	3	1	0	2	140	7
SB3	0	0	1	1	3	0	1	4	1	1	2	1	2	1	116	12
SB4	0	3	1	0	1	1	0	4	0	3	3	0	2	0	129	11
SB5	1	1	1	1	1	0	0	0	2	3	2	4	1	1	110	13
SB6	1	0	0	2	1	3	6	2	1	1	1	0	0	0	150	4
SB7	2	0	1	2	2	3	0	2	2	1	0	0	1	2	144	6
SB8	0	1	0	1	1	4	4	1	1	2	2	0	1	0	135	9
SB9	2	0	0	0	3	1	1	1	0	3	0	0	1	6	105	14
SB10	3	0	1	1	1	3	1	1	2	3	0	2	0	0	150	4
SB11	4	0	1	2	0	2	0	0	1	1	2	2	3	0	139	8
SB12	4	1	3	1	0	1	0	3	1	1	1	1	0	1	165	2
SB13	5	1	1	2	0	1	1	1	0	0	3	1	1	1	159	3
SB14	5	1	3	1	2	1	0	0	1	1	2	0	1	0	180	1

Tableau 15. Matrice des confrontations par paire des sous bassins (Algorithme de Condorcet)

vs	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9	SB10	SB11	SB12	SB13	SB14
SB1		(6;12)	(8;10)	(8;10)	(10;8)	(7;11)	(8;10)	(8;10)	(11;7)	(8;10)	(10;8)	(7;11)	(7;11)	(7;11)
SB2	(12;6)		(8;10)	(11;7)	(10;8)	(6;12)	(6;12)	(8;10)	(11;7)	(9;9)	(9;9)	(8;10)	(9;9)	(6;12)
SB3	(10;8)	(10;8)		(7;11)	(8;10)	(5;13)	(6;12)	(6;12)	(9;9)	(6;12)	(7;11)	(6;12)	(6;12)	(5;13)
SB4	(10;8)	(7;11)	(11;7)		(9;9)	(7;11)	(6;12)	(7;11)	(10;8)	(8;10)	(10;8)	(8;10)	(8;10)	(6;12)
SB5	(8;10)	(8;10)	(10;8)	(9;9)		(5;13)	(6;12)	(6;12)	(10;8)	(6;12)	(7;11)	(5;13)	(6;12)	(4;14)
SB6	(11;7)	(12;6)	(13;5)	(11;7)	(13;5)		(10;8)	(10;8)	(11;7)	(10;8)	(9;9)	(7;11)	(8;10)	(5;13)
SB7	(10;8)	(12;6)	(12;6)	(12;6)	(12;6)	(8;10)		(10;8)	(11;7)	(8;10)	(9;9)	(7;11)	(7;11)	(5;13)
SB8	(10;8)	(10;8)	(12;6)	(11;7)	(12;6)	(8;10)	(8;10)		(11;7)	(5;13)	(8;10)	(6;12)	(7;11)	(6;12)
SB9	(7;11)	(7;11)	(9;9)	(8;10)	(8;10)	(7;11)	(7;11)	(7;11)		(5;13)	(4;14)	(6;12)	(5;13)	(5;13)
SB10	(10;8)	(9;9)	(12;6)	(10;8)	(12;6)	(8;10)	(10;8)	(13;5)	(13;5)		(9;9)	(7;11)	(8;10)	(8;10)
SB11	(8;10)	(9;9)	(11;7)	(8;10)	(11;7)	(9;9)	(9;9)	(10;8)	(14;4)	(9;9)		(5;13)	(5;13)	(5;13)
SB12	(11;7)	(10;8)	(12;6)	(10;8)	(13;5)	(11;7)	(11;7)	(12;6)	(12;6)	(11;7)	(13;5)		(7;11)	(6;12)
SB13	(11;7)	(9;9)	(12;6)	(10;8)	(12;6)	(10;8)	(11;7)	(11;7)	(13;5)	(10;8)	(13;5)	(11;7)		(4;14)
SB14	(11;7)	(12;6)	(13;5)	(12;6)	(14;4)	(13;5)	(13;5)	(12;6)	(13;5)	(10;8)	(13;5)	(12;6)	(14;4)	

Tableau 16. Classement définitif des sous bassins à l'issu des confrontation (Algorithme de Condorcet)

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9	SB10	SB11	SB12	SB13	SB14
Victoires	3	4	2	4	2	9	7	6	0	7	4	11	11	13
Défaites	10	6	10	8	10	3	5	7	12	4	5	2	1	0
Nuls	0	3	1	1	1	1	1	0	1	2	4	0	1	0
Total	9	15	7	13	7	28	22	18	1	23	16	33	34	39

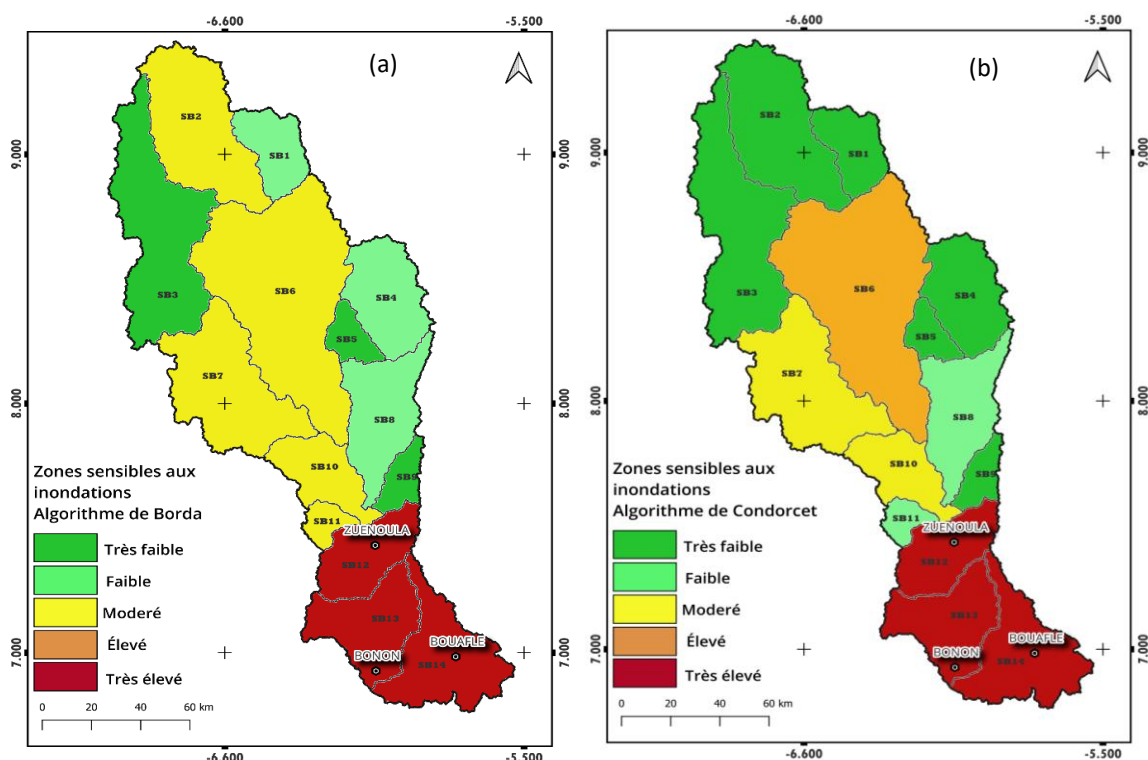


Fig. 4. Carte des zones sensibles aux inondations. (a): Borda, (b): Condorcet

Concernant l'algorithme de Borda (Tableau 14 et Figure 4.a), l'analyse des données met en évidence une hiérarchisation des sous-bassins fondée sur la régularité des positions obtenues dans les classements. Le sous-bassin SB14 se distingue nettement avec un score de 180 points, porté par un nombre élevé de premières places (cinq), traduisant un consensus marqué quant à sa sensibilité. Des sous-bassins tels que SB13 (165 points) et SB12 (159 points) affichent également des scores élevés, soulignant que la constance dans les classements supérieurs peut compenser un nombre plus limité de premières positions. À l'inverse, SB9, bien qu'occasionnellement bien classé, présente un score globalement faible (105 points), attribuable à une forte dispersion dans les classements souvent en bas de tableau. L'analyse spatiale (Figure 4.a) avec l'algorithme Borda, révèle que les sous-bassins SB12, SB13 et SB14 présentent les niveaux de sensibilité les plus élevés en termes de risque d'inondation, tandis que SB2, SB6, SB7, SB10 et SB11 se situent à un niveau de priorité modéré. Les sous-bassins SB1, SB3, SB4, SB5, SB8 et SB9 apparaissent quant à eux comme présentant une priorité faible à très faible en termes de sensibilité aux inondations. En termes de localisation, les sous-bassins situés en aval du bassin versant (SB12; SB13; SB14) semblent les plus exposés aux risques d'inondation, alors que plusieurs sous-bassins en amont, notamment SB1, SB3, SB4 apparaissent relativement peu sensibles. Les sous bassins intermédiaires SB5, SB8 et SB9 suivent aussi la même tendance. Cependant, cette tendance est totalement différente pour les sous bassins SB2, SB6, SB7 qui également sont situés en amont pour SB2, SB6 et dans la zone intermédiaire pour SB7. En effet, ces derniers présentent une sensibilité modérée traduisant une variabilité intrarégionale importante dans la sensibilité aux inondations. Concernant l'algorithme de Condorcet, le tableau 16 présente le classement définitif des sous-bassins SB1 à SB14 à l'issue des confrontations par paires (Tableau 15). Les résultats obtenus, révèlent une hiérarchisation marquée avec en tête le sous-bassin SB14 qui totalise 13 victoires, aucune défaite et un score maximal de 39 points. Ce résultat indique une domination complète dans l'ensemble des confrontations. Ensuite, suivent les sous-bassins SB13 avec 34 points et SB12 avec 31 points qui affichent également une performance élevée. À l'opposé, les sous-bassins SB3, SB5 et SB9 avec respectivement 7 points pour SB3, SB5 et 1 point pour SB9, se positionnent en fin de classement comme ayant cumulé un nombre élevé de défaites et très peu voire même aucune victoire. Ce résultat suggère une faible priorité en termes de risques d'inondations dans ces espaces. Les points obtenus par SB6, SB7 et SB10 traduisent une position médiane, marquée par une performance équilibrée pour SB7 et SB10 mais dominante pour SB6 avec une priorité élevée. En termes de sensibilité aux inondations, l'analyse de la figure 4.b permet de distinguer les sous-bassins les plus exposés selon une logique de consensus entre critères. Les sous-bassins classés en tête, notamment SB14, SB13 et SB12 qui sont situés en aval du bassin de la Marahoué, apparaissent comme les zones les plus sensibles aux inondations. Leur domination quasi systématique dans les confrontations par paires suggère une convergence des indicateurs de vulnérabilité les plaçant en priorité. La forte exposition aux inondations de ces sous bassins pourrait s'expliquer par la concentration des écoulements et la topographie qui accentuent les phénomènes de ruissellement et de submersion. À l'inverse, les sous-bassins SB1, SB2 et SB3, situés en amont, se caractérisent par une faible sensibilité aux inondations traduite par un nombre élevé de défaites dans les confrontations avec les autres. Leur position géographique, souvent associée à une plus grande capacité d'infiltration ou à des surfaces imperméabilisées plus faibles, pourrait

expliquer cette moindre exposition aux inondations. Concernant les sous bassins intermédiaires (SB8 et SB11) avec une sensibilité faible, présentent une situation géographique mixte incluant à la fois des secteurs intermédiaires et certains compartiments amont soumis à des pressions croissantes. Le sous bassin SB4 a été identifié très faiblement sensible aux inondations par l'algorithme de Condorcet

6 DISCUSSIONS

Les sous-bassins du versant de la Marahoué ont été classés en fonction de leur valeur numérique d'exposition aux inondations à l'aide des algorithmes de notation Borda et de Condorcet. L'analyse croisée des résultats issus de ces deux méthodes a mis en évidence une hiérarchisation cohérente des sous-unités hydrologiques en termes de sensibilité aux inondations. Ces résultats s'inscrivent dans une logique de priorisation spatiale fondée sur des approches d'agrégation multicritère, couramment mobilisées dans l'évaluation de la vulnérabilité hydrologique [48], [49], [50]. De manière convergente, les sous-bassins SB12, SB13 et SB14 localisés en aval du bassin versant de la Marahoué apparaissent comme les plus sensibles aux phénomènes d'inondation selon les deux méthodes de classement. Cette convergence des deux méthodes traduit une stabilité de la vulnérabilité spatiale, corroborée par les scores élevés de classement (méthode de Borda) et de domination (méthode de Condorcet). Cette concentration des zones sensibles aux inondations en aval du bassin est confirmée par de nombreux travaux scientifiques antérieurs. En effet, les zones situées en aval des bassins versants sont généralement caractérisées par une accumulation progressive des écoulements, une topographie plus plane ainsi qu'une dynamique sédimentaire qui ralentit les flux en augmentant ainsi le risque de submersion [51], [52], [53]. À cela s'ajoute une pression anthropique plus forte dans les zones basses, notamment en raison de l'urbanisation croissante, de la suppression des zones tampons naturelles et de l'artificialisation des sols comme le soulignent [54]. Des résultats similaires ont été obtenus par [43] dans le bassin versant du Tajan, situé à proximité de la ville de Sari en Iran. À travers une approche multicritère, ces auteurs ont identifié les sous-bassins les plus exposés aux inondations, ceux-ci étant localisés en aval et présentant une densité urbaine plus élevée. À l'inverse, les zones à plus faible probabilité d'inondation se situaient dans des secteurs à faible activités anthropiques et à des altitude et pentes très élevés. Par ailleurs, la vulnérabilité accrue des zones en aval s'explique également par la dynamique hydrologique des bassins versants. Les précipitations intenses sur les parties en amont génèrent des volumes importants de ruissellement, qui, en s'écoulant vers l'aval, entraînent une élévation du niveau des cours d'eau. Lorsque cette accumulation dépasse la capacité de rétention des lits fluviaux, un débordement se produit, inondant les zones périphériques situées en contrebas. Ce mécanisme est bien documenté par [55] qui décrivent ce processus comme une cause majeure des inondations dans les zones basses, notamment dans les contextes où l'infrastructure hydraulique est insuffisante ou dégradée. Les sous-bassins SB6, SB7 et SB10, situés dans des zones intermédiaires du bassin, présentent des classements médians, reflétant une variabilité spatiale intrarégionale. Leurs performances plus nuancées peuvent s'expliquer par des facteurs combinés: pentes modérées, occupation mixte du sol (zones agricoles en mutation, habitats semi-urbains), ainsi qu'un état de conservation variable de la couverture végétale. Ces résultats rejoignent les observations de [56], qui insistent sur la difficulté à catégoriser de manière binaire la sensibilité aux inondations dans des sous-unités intermédiaires du bassin. La sensibilité y est souvent liée à des facteurs locaux et dynamiques tels que les pratiques agricoles, la saturation des sols ou l'absence de réseaux de drainage. Les sous-bassins SB1, SB3, SB4, SB5, SB8 et SB9 situés en amont du bassin, présentent dans leur grande majorité des scores faibles confirmant une moindre sensibilité aux inondations. Ces résultats s'expliquent par la plus grande capacité d'infiltration des sols, des pentes plus marquées favorisant le ruissellement rapide, et une imperméabilisation moindre. Ces observations sont en phase avec les travaux de [57]. En effet, ces auteurs à travers un modèle d'hydrologie de bassin basé sur des données physiques et des zones de contribution variables, ont montré que l'accumulation du flux et la saturation du sol sont plus probables en zones aval qu'en amont. Cependant dans cette présente étude, certains sous-bassins localisés en amont, notamment SB2 et SB6 se sont distingué par une sensibilité modérée selon les résultats de l'algorithme de Borda et d'un autre côté, Condorcet a classé SB6 parmi les sous-bassins à sensibilité élevée. Ce résultat révèle ainsi une divergence d'interprétation entre les deux méthodes quant à la vulnérabilité de cette unité. Cette variabilité intra-amont suggère que l'altitude ou la position dans le bassin ne peuvent à elles seules expliquer la vulnérabilité. Par exemple, des facteurs tels que la compacité du sous-bassin et bien d'autres morphométriques y pourraient jouer un rôle important comme l'ont indiqué [58]. Parallèlement, le sous bassin SB9, malgré des classements ponctuellement favorables, est faiblement priorisé par Condorcet, traduisant ainsi une forte dispersion dans les préférences. Cela souligne la limite des approches linéaires dans la prise de décision et justifie l'intérêt de combiner plusieurs méthodes pour mieux cerner la sensibilité réelle. En effet, l'intégration conjointes des méthodes de Borda et Condorcet dans l'identification des zones sensibles aux inondations permet de renforcer la robustesse de la prise de décision. Selon [59], les algorithmes de la théorie de jeu reflètent le mieux le comportement des acteurs et des parties prenantes impliqués dans la prise de décision multi-objectifs. Aussi, les différences entre les résultats produits par les algorithmes de Condorcet et de Borda, sont aussi observé par [43]. Ces auteurs ont relevé que ces différences sont inéluctablement liées à la nature des algorithmes eux même. En effet, Borda valorise la constance dans les bons classements (effet de fréquence), tandis que Condorcet révèle les cas de domination nette dans les comparaisons directes (effet de préférence majoritaire). Dans un contexte d'incertitude, le recours à des méthodes hybrides est nécessaire comme l'a recommandé [60]. Au regard des résultats obtenus à partir des algorithmes de la théorie des jeux, les zones situées en aval du bassin versant de la Marahoué sont les plus sensibles aux inondations. Par conséquent elles ont un risque d'inondation très élevée. Quant à la partie septentrionale du bassin de la Marahoué, le risque d'inondation est faible et voire très faible. En définitive, toutes les approches utilisées pour identifier les zones sensibles aux inondations ont montré que les zones à haut et très haut niveau de sensibilité ont tendance à se situer au centre et au sud près de l'exutoire du bassin versant. Dans ce contexte, la surveillance des événements pluvieux dans ces zones sensibles s'avère opportun pour une alerte précoce. Bien évidemment la

modélisation des précipitations et des débits du cours d'eau d'un délai raisonnable pourrait fortement contribuer à la mise en place d'un système alerte précoce.

7 CONCLUSION

La présente étude a évalué le potentiel de la combinaison entre les données de télédétection et les algorithmes de la théorie des jeux, en particulier les méthodes de classement de Borda et de Condorcet, pour la cartographie des zones sensibles aux inondations dans le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire). Dans un contexte de forte pression anthropique, d'urbanisation non planifiée et d'accroissement des risques d'inondation, cette approche intégrée s'avère particulièrement pertinente pour soutenir la mise en place de systèmes d'alerte précoce. La sélection et l'analyse de dix-huit (18) paramètres liés aux inondations ont permis d'optimiser l'identification des zones les plus vulnérables. Les résultats mettent en évidence une sensibilité accrue aux inondations dans la partie sud du bassin, notamment au niveau des sous-bassins SB12, SB13 et SB14, caractérisés par une topographie relativement plane, une forte proximité du cours d'eau principal et une pression anthropique marquée. À l'inverse, les sous-bassins situés en amont (SB3, SB4, SB5, SB8 et SB9) apparaissent globalement moins exposés, grâce à des pentes plus importantes et à une meilleure capacité d'infiltration. L'analyse croisée des classements issus des méthodes de Borda et de Condorcet confirme cette hiérarchie spatiale, tout en soulignant l'existence de zones intermédiaires à sensibilité variable. Par ailleurs, l'étude corrobore les inondations récurrentes observées ces dernières années dans les localités de Bouaflé et de Zuénoula, situées en aval du bassin. Ainsi, cette approche fournit un outil puissant pour le suivi environnemental, la gestion durable du territoire et la prévention des risques d'inondation dans le bassin de la Marahoué. Les zones aval doivent, de ce fait, être considérées comme prioritaires dans les stratégies de gestion du risque, en particulier à travers la mise en place d'un système d'alerte précoce fondé sur la modélisation hydrologique en temps réel.

REFERENCES

- [1] Banque M. (2014). Gérer les risques de catastrophe pour protéger le développement. En ligne <https://www.banquemondiale.org/fr/results/2013/04/12/managing-disaster-risks-resilient-development>, consulté le 20 Mars 2023.
- [2] Guha-sapir D, Hoyois P., Wallemacq P. and BELOW R. (2016). Annual disaster statistical review 2016: The Numbers and Trends. Édit. CRED, Université catholique de Louvain, Bruxelles (Belgique), 91 p.
- [3] Ibrahim M. B. (2022). Evolution des dégâts et du cadre de gestion du risque des inondations à Niamey entre 1991 et 2020. *Sciences Humaines*, No. 16, pp. 29-42.
- [4] Bola G. B., Tshimanga R. M., Neal J., Hawker L., Trigg M. A., Mwamba L. and Bates P. D. (2022). Evaluation des risques d'inondation à périodes de retour multiples dans le bassin du fleuve Congo. In *Hydrologie, Climat et Biogéochimie du Bassin du Congo: Une Base pour l'Avenir*, pp. 537-559.
- [5] Kumar A., Samuel S. K. and Vyas V. (2015). Morphometric analysis of six sub-watersheds in the central zone of Narmada River. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 8, No. 8, pp.5685-5712.
- [6] Dingman S. L. (2008). *Physical Hydrology*. Waveland Press, Inc., 3^e édition, 656 p.
- [7] Huong H and Pathirana A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam, *Hydrol Earth Syst Sci.*, Vol. 17, pp. 379–394.
- [8] Perera D., Seidou O., Agnihotri J., Rasmy M., Smakhtin V., Coulibaly P. and Mehmood H. (2019). *Flood Early Warning Systems: A Review Of Benefits, Challenges and Prospects* United Nations University Institute for Water, Environment and Health, No. 8, Hamilton, Canada, ISBN 978-92-808-6096-2, 48p.
- [9] Saley M. B., Kouamé F., Péven M. J., Biémi J. and Kouadio B. H. (2005). Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire: apport des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Télédétection*, Vol. 5, Nos 1–2–3, pp. 53-67.
- [10] Vami B. H. N., Saley B., Wade S., Valere D. E., Kouame F. and Affian K. (2014). Cartographie du risque d'inondation par une approche couplée de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le département de Sinfra (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, Vol. 10, No. 2, pp. 170-191.
- [11] Assoko A. S. V. (2022). Conception d'outils de prévision des extrêmes hydrologiques en région tropicale ouest africains : cas du bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat en Hydrologie et environnement. Institut national polytechnique Felix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 240p.
- [12] Njeugeut M. A. C. N., Ta, M. Y., Satti J.-R. K., Assoma T. V., and Jourda, J. P. (2023). Cartographie Automatique des Zones Inondées et Evaluation des Dommages dans le District d'Abidjan depuis Google Earth Engine. *European Scientific Journal*, ESJ, 19 (32), Article 32. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n32p54>.
- [13] Hauhouot C. (2008). Analyse du risque pluvial dans les quartiers précaires d'Abidjan. Etude de cas à Attécoubé. *Geo-Eco-Trop*, Vol. 32, pp. 75–82.
- [14] UNDDR. (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDDR). <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>.

- [15] Bashir B. (2023). Morphometric Parameters and Geospatial Analysis for Flash Flood Susceptibility Assessment: A Case Study of Jeddah City along the Red Sea Coast, Saudi Arabia. *Water*, Vol. 15, No. 5, Article 870, <https://doi.org/10.3390/w15050870>.
- [16] Obeidat M., Awawdeh M. and Al-Hantouli F. (2021) Morphometric analysis and prioritisation of watersheds for flood risk management in Wadi Esal Basin (WEB), Jordan, using geospatial technologies. *J Flood Risk Management*. 2021; Vol. 14, No. 2, Article e12711, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12711>.
- [17] Utlu M. and Özdemir H. (2018). The Role of Basin Morphometric Features in Flood Output: A Case Study of the Biga River Basin, No. 36, pp. 49-62. <https://doi.org/10.26650/JGEOG408101>.
- [18] Pourzangbar A., Oberle P., Kron A. and J. Franca M. (2024). Analysis of the utilization of machine learning to map flood susceptibility, *Journal of Flood Risk Management*, Karlsruhe Institute of Technology, Allemagne, 44p.
- [19] Lévêque C., Dejoux C. and Itlis A. (1983). *Limnologie du fleuve Bandama, Côte d'Ivoire*. O.R.S.T.O.M., France, *Hydrobiologia*, Vol. 100, pp. 113-141.
- [20] Tagini B. (1971). *Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale*. SODEMI Abidjan, 302 p.
- [21] Kouamé, K. A., Koudou, A., Sorokoby, V. M., Kouamé, K. F., and Kouassi, A. M. (2017). Relation entre les écoulements de surface et souterrain dans le bassin versant du haut Bandama en Côte d'Ivoire. *LARHYSS Journal*, No. 29, pp.137-152.
- [22] Soro G., Noufé, D., and Goula, B. (2018). Analyse de la sensibilité d'un modèle hydrologique global aux estimations de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle: application au bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, No. 33, pp. 155-168.
- [23] Peltre Wurtz, J., and Steck, B. (1979). Influence d'une société de développement sur le milieu paysan. Coton et culture attelée dans la région de la Bagoué (Nord Côte d'Ivoire). ORSTOM.
- [24] Dje Bi D. D. (2015). Évaluation et Planification des ressources en eau du Bassin versant de la Marahoué (centre ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire, Université Nangui Abrogoua, 83p.
- [25] Adon G. C. R. (2015). Évaluation des potentialités en eau de l'hydrosystème de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse, Université Félix Houphouët Boigny, 177p.
- [26] Denis G. (2016). L'exploitation Artisanale De L'or En Côte D'ivoire: La Persistance D'une Activite Illegale. *European Scientific Journal*, ESJ, Vol. 12, No. 3, pp.18-36, <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n3p18>.
- [27] Kouadio A. C., Kouassi K., and Assi Kaudjhis J. P. (2018). Orpaillage, disponibilité alimentaire et compétition foncière dans les zones aurifères du département de Bouaflé. *TROPICULTURA*, Vol. 36, No. 2, pp. 369-379.
- [28] Pouclet A., Allialy M., Daouda-Y. B. and Esso B. (2004). Découverte d'un diatrème de kimberlite diamantifère à Séguéla en Côte-d'Ivoire. *Comptes Rendus Géosciences*, Vol. 336, No. 1, pp. 9-17.
- [29] Ozdemir H, Bird D. 2009. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. *Environ. Geol.* 56, pp. 1405–1415.
- [30] Ahmed S.A., Chandrashekarappa K.N., Raj S.K., Nischitha V., and Kavitha G. (2010). Evaluation of morphometric parameters derived from ASTER and SRTM DEM – a study on Bandihole sub-watershed basin in Karnataka. *J Indian Soc Remote Sens.* 38, pp. 227–238.
- [31] Bhatt S. and Ahmed S. A. (2014). Morphometric analysis to determine floods in the Upper Krishna basin using Cartosat DEM. *Geocarto International*, Vol. 29, No. 8, pp. 878-894.
- [32] Das S. (2018). Système d'information géographique et zonage des risques d'inondation basé sur l'AHP du bassin de Vaitarna, Maharashtra, Inde. *Arabe. J. Géosci.* Vol. 11, 576.
- [33] Liuzzo L.; Sammartano V. and Freni G. (2019). Comparaison entre différentes méthodes distribuées pour la cartographie de la sensibilité aux inondations. *Ressource en eau. Géré*, Vol. 33, pp. 3155–3173.
- [34] Sellami E. M., Maanan M. and Rhinane H. (2022). Performance of machine learning algorithms for mapping and forecasting of flash flood susceptibility in tetouan, morocco. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLVI-4/W3-2021, pp. 305-313.
- [35] Waiyasuri K., Wetchayont P., Tananonchai A. and Suwanmajo D. (2023). Flood Susceptibility Mapping Using Logistic Regression Analysis In Lam Khan Chu Watershed, Chaiyaphum Province, Thailand. *GEOGRAPHY, Environment, Sustainability*, Vol. 16, No. 2, pp. 41-56.
- [36] Horton R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 13, No. 1, pp. 350-361.
- [37] Costache R., Hong H. and Pham Q. B. (2020). Comparative assessment of the flash-flood potential within small mountain catchments using bivariate statistics and their novel hybrid integration with machine learning models, *Science of The Total Environment*, No. 711, Article 134514.
- [38] Wang Z., Chen X., Qi Z. and Cui C. (2023). Flood sensitivity assessment of super cities. *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, Article 5582.
- [39] Kamenan S. J.-R., Youan T. M., Adja M. G., and Kouassi A. M. (2025). Using Deep Learning and the combination of multi-sensor images to map land use and land cover in the Marahoué watershed, *International Journal of Innovation and Scientific Research*, M. Vol. 80, No. 1, pp. 6–24.
- [40] Adhami M., Sadeghi S. H., Duttmann R. and Sheikhmohammady M. (2019). Changes in watershed hydrological behavior due to land use comanagement scenarios. *Journal of Hydrology*, No. 577, Article 124001.
- [41] Eloudi H., Hssaisoune M., Reddad H., Namous M., Elaloul A., Hajji S., Faouzi E. and Bouchaou L. (2023). Determination of the potential soil losses and prioritization of sub-watersheds: Insight from North African highland system, *Scientific African*, Vol. 22, Article e01930, 14p.

- [42] Khiavi A. N., Vafakhah M. and Sadeghi S. H. (2023). Application of participatory approach in identifying critical sub-watersheds based on flood generation potential in the Cheshmeh-Kileh Watershed, Mazandaran Province. *Water and Soil Management and Modeling*, Vol. 3, No. 3, pp. 90-107.
- [43] Avand M., Khiavi A. N., Khazaei M. and Tiefenbacher J. P. (2021). Determination of flood probability and prioritization of sub-watersheds: A comparison of game theory to machine learning. *Journal of Environmental Management*, No. 295, Article 113040.
- [44] Di B. G., Montanari A., Lins H., Koutsoyiannis D., Brandimarte, L. and Blöschl, G. (2010). Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, No. 22.
- [45] Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Van D. Z. E. H., Poesen J. and Alewell C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, Vol. 51, pp. 23–34.
- [46] Elkhachy I. (2015). Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Vol. 18, No. 2, pp. 261–278.
- [47] Youssef A. M., Pradhan B., and Sefry S. A. (2016). Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, No. 1, 12p.
- [48] Malczewski J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 20, No. 7, pp. 703-726.
- [49] Hadipour V., Vafaie F. and Deilami K. (2020). Coastal Flooding Risk Assessment Using a GIS-Based Spatial Multi-Criteria Decision Analysis Approach. *Water*, Vol. 12, No. 9.
- [50] Nkonu R. S., Antwi M., Amo-B. M. and Dekongmen B. W. (2023). GIS-based multi-criteria analytical hierarchy process modelling for urban flood vulnerability analysis, Accra Metropolis. *Natural Hazards*, Vol. 117, No. 2, pp. 1541-1568.
- [51] Luu C., Von M. J. and Kanjanabootra S. (2018). Assessing flood hazard using flood marks and analytic hierarchy process approach: a case study for the 2013 flood event in Quang Nam, Vietnam. *Natural Hazards*, Vol. 90, pp. 1031–1050.
- [52] Deroliya P., Ghosh M., Mohanty M. P., Ghosh S., Durga R. K. H. V. and Karmakar S. (2022). A novel flood risk mapping approach with machine learning considering geomorphic and socio-economic vulnerability dimensions. *Science of The Total Environment*, Vol. 851, No. 1, Article 158002.
- [53] El-magd S. A., Maged A. and Farhat H. I. (2022). Hybrid-based Bayesian algorithm and hydrologic indices for flash flood vulnerability assessment in coastal regions: machine learning, risk prediction, and environmental impact. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, pp. 57345–57356.
- [54] López-dóriga U. and Jiménez J. A. (2020). Impact of Relative Sea-Level Rise on Low-Lying Coastal Areas of Catalonia, NW Mediterranean, Spain. *Water*, Vol. 12, No. 11, Article 3252.
- [55] Saha A., Pal S. C., Arabameri A., Blaschke T., Panahi S., Chowdhuri I., Chakraborty R., Costache R. and Arora A. (2021). Flood Susceptibility Assessment Using Novel Ensemble of Hyperpipes and Support Vector Regression Algorithms. *Water*, 13, No. 2, Article 0241.
- [56] Bronstert A., Niehoff D. and Bürger G. (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 2, pp. 509-529.
- [57] Beven K. J. and Kirkby M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- [58] Narendra B. H., Setiawan O., Hasan R. A., Siregar C. A., Pratiwi, Sari N., Sukmana A., Dharmawan I. W. S. and Nandini R. (2024). Flood susceptibility mapping based on watershed geomorphometric characteristics and land use/land cover on a small island. *Global Journal of Environmental Science and Management*, Vol. 10, No. 1, pp. 301-320.
- [59] Madani K. (2010). Game theory and water resources. *J. Hydrol.*, Vol. 381, No: 3–4, pp. 225–238.
- [60] Coulibaly A. (2019). *Décision de groupe, Aide à la facilitation: Ajustement de procédures de vote selon le contexte de décision*. Thèse de Doctorat en Informatique et Télécommunication. Université Toulouse 1 Capitole, Toulouse, France, 130p.

Analyse des déterminants de l'élevage pastoral face aux changements globaux à l'aide du modèle Random Forest au Burkina Faso

[Analysis of the determinants of pastoral livestock farming in the face of global changes using the Random Forest model in Burkina Faso]

Abdoul Kader Gandema^{1,2}, Salifou Ouedraogo-Kone^{1,2}, André Kiema³, and Bilassé Zongo^{1,4}

¹Université Nazi Boni (UNB), 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

²Institut du Développement Rural (IDR), Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Ressources Naturelles et des Sciences de l'Environnement (LERNSE), Burkina Faso

³Centre de Recherches Environnementales, Agricoles et de Formation de Kamboinsin (CREAF), Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), 01 BP 476 Ouagadougou 01, Burkina Faso

⁴UFR, Sciences de la Vie et de la Terre (UFR, SVT), Université Nazi BONI, Burkina Faso

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In Burkina Faso, pastoralism plays an important role in the development of animal production. However, the factors of its survival today remain insufficiently controlled. The objective of this study is to determine the important variables involved in predicting the survival of pastoralism in Sahelian countries plagued by insecurity. This study was conducted in two agroecological zones of Burkina Faso. It consisted of the selection of variables using the Random Forest package of Minitab 19.1 software to assess the importance of these variables in predicting the future practice of pastoral mobility. The results showed that the number of cattle was high among migrants with great variability (60 to 80 heads). Native herders have the highest numbers of small ruminants respectively 25 to 35 for sheep and 20 to 33 for goats. The results of the model showed eleven (11) variables strongly influenced the importance of the variables; The main variables were the village (55.48%), cattle population (14.754%), animal acquisition method (8.716%), and age (4.461%). Geographical and zootechnical factors were predominant, unlike social variables, which had little influence. In the current context of major social changes, it would be important to emphasize that a strategic approach could benefit the sustainability of pastoral farming. In order to ensure the survival and prosperity of this ancestral practice, it would be wise to carefully consider and effectively integrate the important variables.

KEYWORDS: trajectory, pastoral mobility, sustainability, mutation.

RESUME: Au Burkina Faso, le pastoralisme joue un rôle important dans le développement de la production animale. Cependant, les facteurs de sa survie de nos jours demeurent insuffisamment maîtrisés. L'objectif de cette étude a visé à déterminer les variables importantes entrant dans la prédiction de la survie du pastoralisme dans les pays sahéliens en proie à l'insécurité. Cette étude a été conduite dans deux zones agroécologiques du Burkina Faso. Elle a consisté à la sélection des variables à l'aide du package Random Forest du logiciel Minitab 19.1 pour évaluer leurs importances dans la prédiction de la pratique future de la mobilité pastorale. Les résultats ont montré que l'effectif des bovins a été élevé chez les migrants avec une grande variabilité (60 à 80 têtes). Les éleveurs natifs présentent les effectifs de petits ruminants les plus élevés respectivement 25 à 35 pour les ovins et 20 à 33 pour les caprins. L'analyse d'importance des variables a identifié onze (11) qui présentent une influence significative sur les prédictions du modèle. Les principales variables ont été le village (55,48 %), l'effectif bovin (14,754 %), le mode d'acquisition des animaux (8,716 %), et l'âge (4,461 %). Les facteurs géographiques et zootechniques étaient prédominants, contrairement aux variables sociales, peu influentes. Dans le contexte actuel de

changements sociaux majeurs, afin d'assurer la survie et la prospérité de cette pratique ancestrale, il serait important de souligner qu'une approche stratégique pourrait bénéficier à la pérennité de l'élevage pastoral.

MOTS-CLEFS: trajectoire, mobilité pastorale, durabilité, mutation.

1 INTRODUCTION

Les systèmes d'élevage pastoraux dans le contexte africain sont sujets de questionnements quant à leur avenir. Des postulats des nouvelles politiques d'intensification concourent à la non-durabilité de la pratique du système pastoral [1]. Notons que le pastoralisme est un élevage sur parcours, capable de tirer le meilleur parti de la variabilité des ressources naturelles. Cette filière joue un rôle crucial dans la lutte contre la pauvreté permettant une augmentation des revenus dans les zones rurales. Les systèmes pastoraux fournissent près de 90 % de la viande et plus de 95 % du lait au marché national du Burkina Faso [2]. Dans les pays d'élevage, optimiser la production animale pour répondre à la demande, réduire l'impact environnemental et améliorer la nutrition des petits exploitants est crucial [3]. Cependant, l'accroissement de la productivité et des productions animales est entravé par des contraintes de changement global. En effet, dans la sous-région, les transformations structurelles modifient les moyens de subsistance et la viabilité des économies, avec la crise politico-sécuritaire qui pose des contraintes spécifiques au pastoralisme [4], [5]. De la problématique d'accès aux équipements et aux aménagements pastoraux, les éleveurs font face à la récente crise sécuritaire [6]. De nos jours, l'insécurité est devenue le centre des débats sur le pastoralisme en Afrique de l'Ouest [7]. Face à ces événements, les pasteurs et agropasteurs ont développé des stratégies pour augmenter leur résilience. Cette étude a été initiée pour une meilleure compréhension des facteurs favorables à la durabilité de cette pratique. L'objectif a été d'analyser les principaux déterminants qui influencent la production et la gestion du bétail dans les systèmes pastoraux du Burkina Faso, en tenant compte des changements climatiques, des politiques agrosylvopastorales et de la situation sécuritaire.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE D'ÉTUDE

2.1 ZONE D'ÉTUDE

L'étude a été réalisée au Burkina Faso (figure 1). Pays situé à l'ouest du Burkina Faso. L'enquête s'est déroulée dans quatre régions administratives à savoir les Cascades, les Hauts-Bassins, le Sud-Ouest et le Sahel. Ces régions sont situées aux antipodes des zones agroécologiques à savoir la zone sud-soudanienne et nord-sahélienne. Ces régions sont traversées par l'axe de transhumance transfrontalière Mali - Burkina - Côte d'Ivoire. La zone sud-soudanienne est située au sud du parallèle 11°30', avec une pluviométrie moyenne annuelle variant entre 900 et 1200 mm. La zone nord-sahélienne, située au nord du parallèle 14°00'N, avec une pluviométrie annuelle moyenne variant entre 300 et 600 mm [8].

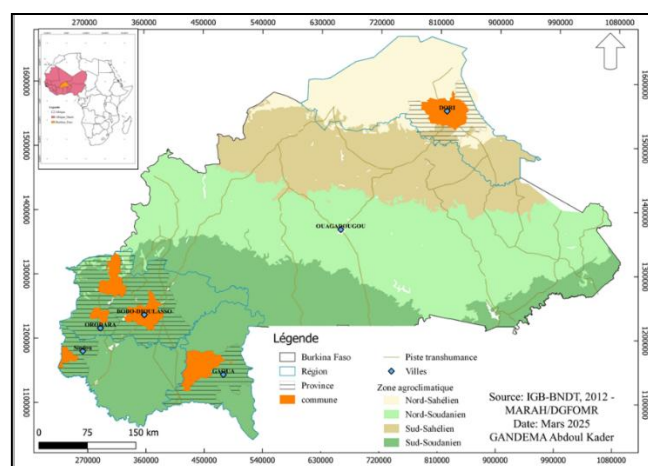


Fig. 1. Zone d'étude

2.2 COLLECTE DE DONNÉES

Des interviews individuelles avec l'aide de questionnaires semi-structurés ont été réalisées avec les pasteurs, agropasteurs déplacés internes ou autochtones. Trente-huit (38) villages dans neuf (9) communes ont été retenus pour notre enquête. La méthode

d'échantillonnage aléatoire a été utilisée. Le choix des villages a été fait en fonction du niveau d'insécurité dans la zone. Les critères de ce choix ont été basés essentiellement sur l'accueil ou le départ des PDI et des principales pistes de transhumance. Le questionnaire a porté sur la caractéristique sociodémographique, le mode d'élevage, la technique d'intensification, les changements dans les pratiques d'élevage ces dix dernières années et le système pastoral peulh. Le nombre d'individus à enquêter a été déterminé à l'aide de la formule d'Anderson (2025) sur : <https://fr.surveymonkey.com/mp/sample-size-calculator/>. L'effectif de la population des pasteurs et agropasteurs a été obtenu grâce au rapport MinEFP-INSD (2022). Pour une population de 3,3 millions, l'échantillon estimé a été d'environ 267 pasteurs et agropasteurs pour obtenir des résultats représentatifs avec une marge d'erreur de 6 % et un niveau de confiance de 95 %.

2.3 ANALYSE STATISTIQUE

Les données ont été collectées par l'application KoBoCollect. Le logiciel R a été utilisé pour calculer les fréquences de citation et le test de khi2 au seuil de 5 % pour la comparaison des fréquences. L'utilisation de l'algorithme Random Forest a été implémentée via le logiciel Minitab (version 19.1), afin de modéliser la pratique de l'élevage pastoral dans le futur. Les Random Forest constituent un outil d'apprentissage automatique adopté pour les tâches de classification en raison de leur facilité d'interprétation face aux modèles complexes [10]. Le principe des forêts aléatoires consiste à combiner plusieurs arbres de décision binaires construits à partir de plusieurs échantillons bootstrap issus de l'échantillon d'apprentissage et à choisir aléatoirement à chaque nœud un sous-ensemble de variables explicatives [11]. Le modèle Random Forest a été paramétré avec un optimal de 60 arbres, selon l'analyse de la déviance binomiale. La base de données a été divisée en deux sous-ensembles à savoir le jeu d'apprentissage (70 %) et le jeu de test (30 %) pour valider la performance du modèle.

3 RÉSULTAT

3.1 CARTÉRISATION SOCIALE DES ENQUÊTES

Le tableau 1 révèle que la population étudiée est majoritairement peulh (59,2 %) et sénoufo (19,3 %), les autres ethnies étant minoritaires. Le taux de non-scolarisation est élevé (81,0 %), avec seulement 9,3 % ayant un niveau primaire et 1,3 % un niveau secondaire. Les éleveurs sont principalement des migrants (63,7 %), suivis des natifs (20,9 %) et des déplacés internes (15,4 %). 91,4 % des éleveurs n'appartenant à aucune association. La population est vieillissante, avec peu de jeunes de moins de 35 ans (13,8 %), une majorité d'éleveurs âgés de 35 à 65 ans (76,5 %) et 9,6 % de plus de 65 ans. La taille des familles est majoritairement inférieure ou égale à 10 personnes (63 %), tandis que 29,6 % ont entre 10 et 20 membres.

Tableau 1. *Caractéristiques sociales des éleveurs*

Variables	Modalités	Fréquence (%)	P-value
Ethnie	Peul	59,2	< 2.2e-16
	Sénoufo	19,3	
	Lobi	8,0	
	Mossi	4,5	
	Autre	4,2	
	Toussian	3,2	
	Bobo	1,6	
Statut	Migrant	63,7	< 2.2e-16
	Natif	20,9	
	Déplacé interne	15,4	
Tranche âges	≤ 35ans	13,8	< 2.2e-16
] 35 ; 65ans [76,5	
	> 65ans	9,7	
Taille de la famille	≤ 10 personnes	63,0	< 2.2e-16
	10 - 20 personnes	29,6	
	20 - 30 personnes	3,9	
	30 à 40 personnes	2,3	
	> 40 personnes	1,2	

3.2 CARACTÉRISATION DES EFFECTIFS

La figure 2 illustre la répartition de la taille des troupeaux bovins, ovins et caprins selon le statut des éleveurs. Les déplacés internes (0 à 40 têtes) présentent des troupeaux bovins de taille variable, avec de faibles effectifs. Chez les migrants (60 à 80 têtes), la taille des troupeaux bovins présente une faible variabilité avec des troupeaux plus importants. Les natifs (30 à 60 têtes) ont une distribution d'effectifs bovins similaire aux déplacés internes. Concernant les ovins, les troupeaux des déplacés internes (5 à 7 têtes) sont considérablement réduits. Les migrants (20 à 25 têtes) présentent une hétérogénéité, avec des troupeaux de tailles variables. Les natifs (25 à 35 têtes) possèdent en moyenne des troupeaux ovins plus grands et stables. Pour les caprins, les déplacés internes (5 à 8 têtes) possèdent des petits troupeaux, similaires aux troupeaux des migrants. Les natifs (20 à 33 têtes) possèdent les plus grands troupeaux de caprins avec une stabilité. Les déplacés internes possèdent les troupeaux des petits ruminants moins dispersés avec des effectifs plus petits.

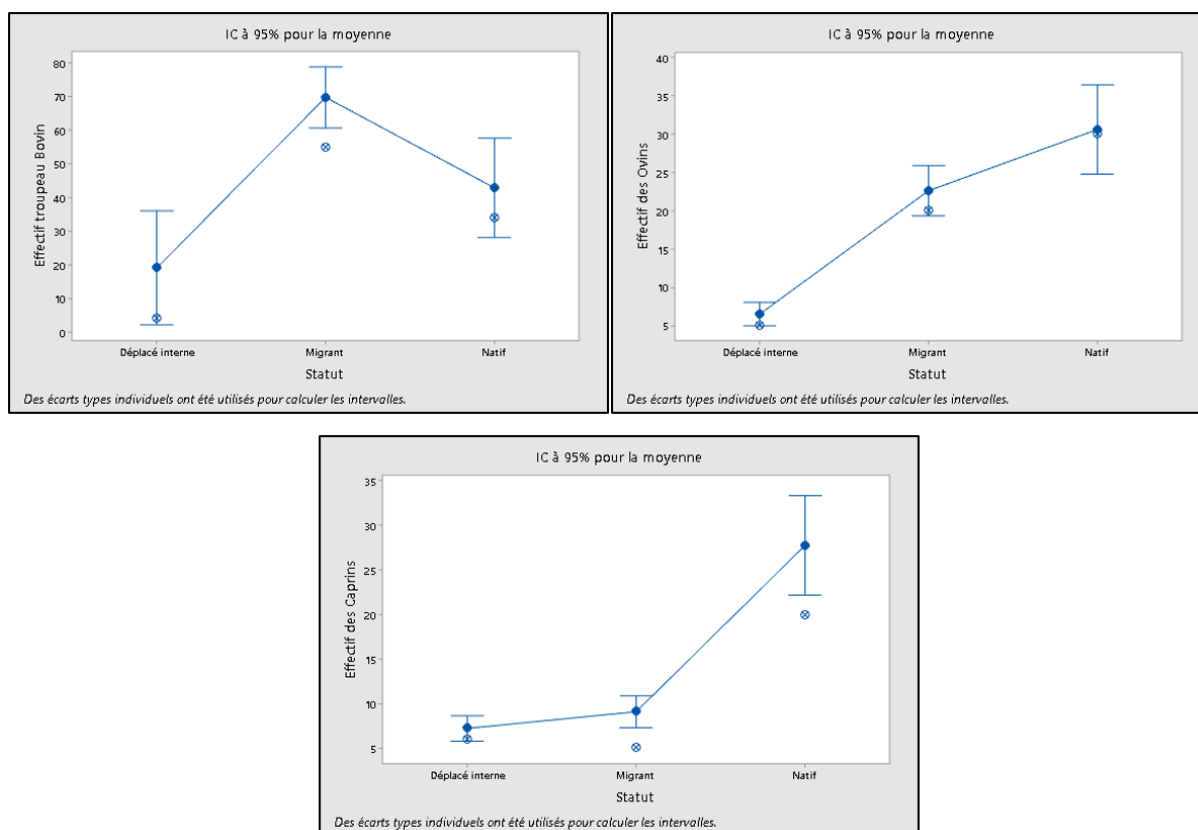


Fig. 2. Répartition de la taille des troupeaux (bovins, ovins et caprins) selon le statut des éleveurs

3.3 CIRCUIT DE PATURAGE DES PASTEURS ET AGROPASTEURS

La figure 3 présente les principaux circuits de pâturage du bétail durant les saisons. En saison pluvieuse, le circuit 1 est majoritairement pratiqué par 66,4 % des éleveurs enquêtés. Dans ce circuit, les animaux vont du parc à la zone de pâture, puis, après un repos, les animaux vont à l'abreuvement et retournent au parc. Le second circuit est pratiqué par 16,4 % des éleveurs. Quant au circuit 3 (5,7 %), assez similaire au circuit 1, mais avec une transition directe entre l'abreuvement et le repos. Les principaux circuits de pâturage du bétail durant les saisons sèches chaude et froide ont été similaires. En effet, en saison sèche chaude, trois itinéraires ont été observés à savoir le circuit 1 (80,7 %), le circuit 2 (8,4 %) et le circuit 3 (4,2 %). En saison sèche froide, le circuit 1 est également dominant (74,8 %). Ce dernier consiste à un départ du parc pour le pâturage, abreuvement, repos et retour au parc. Le circuit 2 (7,1 %) place l'abreuvement avant le pâturage, quant au circuit 3 (6,3 %), on constate une alternance pâturage et repos. La pâture en saison sèche froide se caractérise par une pâture dominante avec un repos après abreuvement. En saison sèche chaude, on constate une pâture systématique avec des circuits plus homogènes. La saison pluvieuse se caractérise plus avec un circuit plus varié avec repos dominant avant abreuvement.

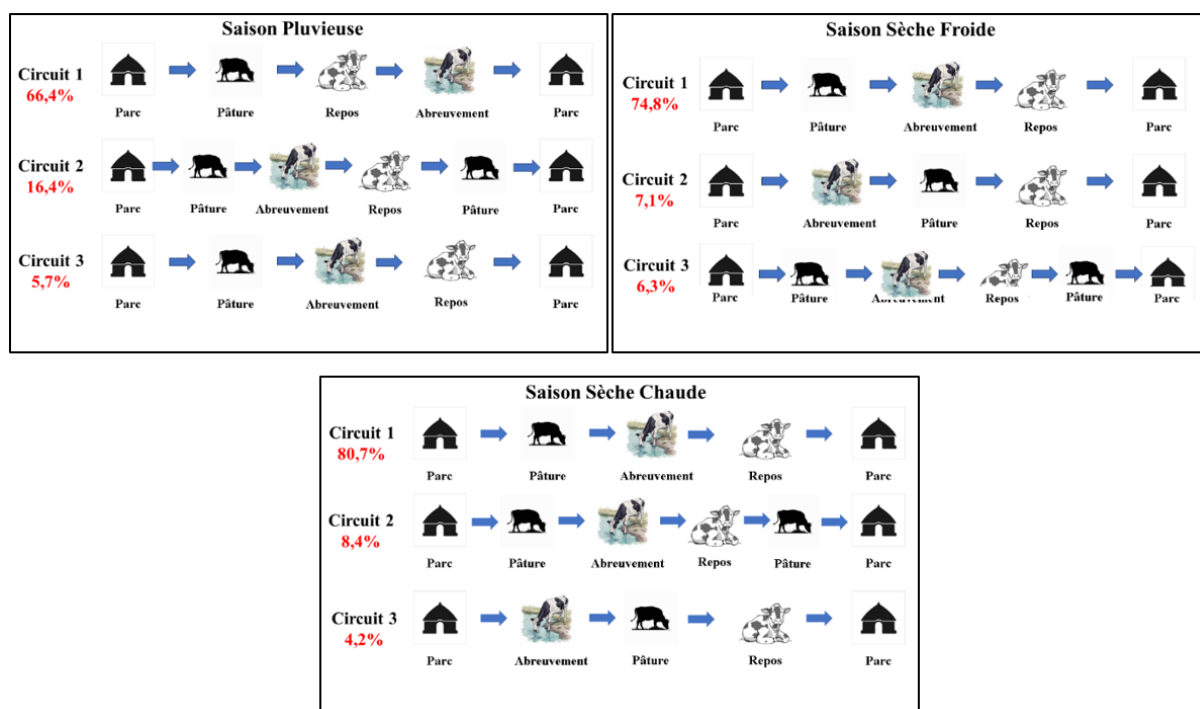


Fig. 3. Principaux circuits de pâturage

3.4 FACTEURS DE DURABILITE DE L'ELEVAGE PASTORAL

Le tableau 2 révèle l'influence relative de plusieurs variables et la perte moyenne par exclusion. La variable village est prédominante (55,48 %). L'effectif bovin arrive en deuxième position (14,754 %), suivi par le mode d'acquisition des animaux (8,716 %). L'âge (4,461 %) et la pratique de la transhumance (3,787 %) ont une influence modérée, cette dernière affectant la gestion des troupeaux et l'exposition aux risques.

Tableau 2. Influence relative des variables et la perte moyenne par leur exclusion

Variables	Influence relative des variables (%)	Perte moyenne par exclusion
Village	55,480	0,165
Effectif troupeau bovin	14,754	0,178
Mode d'acquisition des animaux	8,716	0,094
Âge de l'éleveur	4,461	0,057
Pratique de la transhumance	3,787	0,049
Statut des animaux	3,594	0,048
Effectif des Caprins	3,230	0,068
Taille du ménage	2,706	0,056
Effectif des Ovins	2,122	0,037
Nombre de bergers	0,672	0,039
Statut de la famille	0,477	0,042
Genre de l'éleveur	0,000	0,030
Ethnie de l'éleveur	0,000	0,030
Niveau d'instruction	0,000	0,030
Activité principale	0,000	0,030
Statut du berger	0,000	0,030
Ethnie du berger	0,000	0,030

Le tableau 3 présente la décomposition additive des prédictions des variables suivant cinq (5) cas du modèle. Ce tableau illustre l'importance de chaque variable dans le futur de l'élevage pastoral pour chacun des 5 cas spécifiquement. Il révèle les résultats clés sur

le fonctionnement du modèle de prédiction et les facteurs qui influencent la pratique de l'élevage pastoral dans le futur. Les cas 1,3 et 4 ont présenté une probabilité de prédiction élevée à la continuité de l'activité pastorale (72.1 %, 82.1 %, 91.5 %). Deux (2) cas ont prédit sur l'abandon de l'activité de pastoralisme avec des probabilités de prédiction modérées et élevées (58.7 % et 90.8 %). La variable « Village » a une contribution qui a varié (+0,151 pour le cas 1, +0,211 pour les cas 3 et 4). L'effet de l'effectif du troupeau bovin a aussi varié considérablement. L'effet a été négatif -0,195 et -0.117 pour les cas 1,3 et 4 et positive pour les cas 2 et 5 (+0,195). L'impact de la transhumance sur la survie du pastoralisme a varié selon les scénarios, avec des contributions respectives de 0,100, -0,075 et 0,77 pour les cas 1, 2 et 3.

Tableau 3. Contributions des variables aux prédictions du modèle par cas

Case	Predicted (Prob.)	Base	Village	Genre	Âge	Ethnie	Niveau_instruct	Tail ménage	Activité princ	Statut	Effectif ovin	Effec troupeau bovin	Effectif caprin	Nbre bergers	Statut berger	Ethnie berger	Statut animaux	Mde acquisi anx	Transhumnce
1	Oui(0,721)	0,681	0,151	0,00	-0,048	0,00	0,00	0,083	0,00	0,071	-0,002	-0,195	0,210	-0,057	0,00	0,00	-0,060	-0,214	0,100
2	Non (0,587)	0,319	-0,004	0,00	-0,029	0,00	0,00	0,056	0,00	-0,075	0,006	0,195	-0,157	0,059	0,00	0,00	0,119	0,173	-0,075
3	Oui(0,821)	0,681	0,211	0,00	0,049	0,00	0,00	-0,039	0,00	0,055	-7,8.10 ⁻⁴	-0,117	0,175	-0,046	0,00	0,00	-0,053	-0,171	0,077
4	Oui(0,915)	0,681	0,211	0,00	0,035	0,00	0,00	-0,024	0,00	0,031	-8,3.10 ⁻⁵	-0,117	0,069	-0,028	0,00	0,00	-0,028	0,105	-0,019
5	Non (0,908)	0,319	0,035	0,00	0,122	0,00	0,00	0,034	0,00	-0,023	0,003	0,195	-0,127	0,021	0,00	0,00	0,104	0,173	0,051

La figure 4 présente la courbe ROC du modèle de prédiction permettant ainsi d'évaluer la performance du modèle de classification de la pratique de l'élevage pastoral dans le futur. L'analyse de la courbe ROC a permis de rejeter l'hypothèse nulle de classification non informative (AUC = 0.5). Le modèle de l'étude a démontré une capacité de discrimination statistiquement significative et robuste. Il a identifié correctement une proportion élevée de vrais positifs. Les résultats ont présenté une bonne capacité prédictive du modèle. La probabilité de prédiction de la pratique dans le futur de l'élevage pastoral ("Oui") a été bonne.

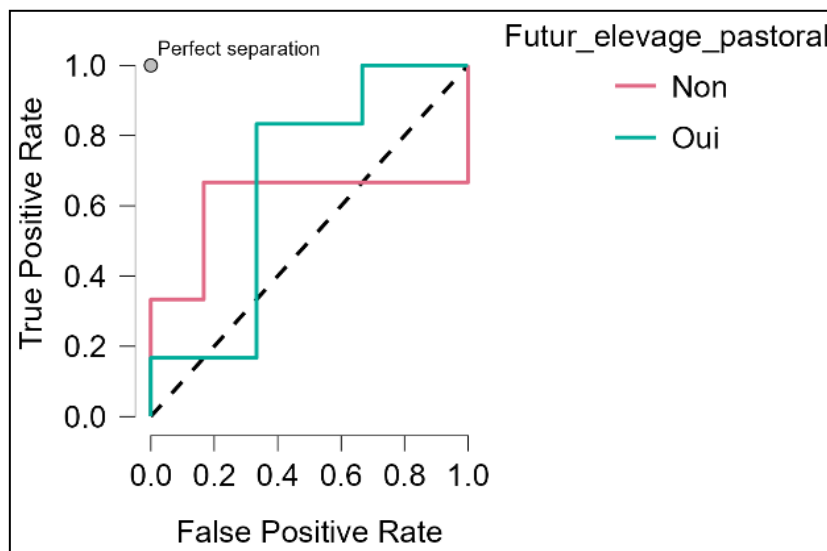


Fig. 4. Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic)

Ce tableau 4 présente une évaluation des performances du modèle de classification binaire utilisé. Pour évaluer la validité du modèle à partir des métriques de performance fournies, examinons chaque indicateur clé. Pour la performance globale du modèle, l'exactitude (Accuracy) a été de 80 %, Le AUC (Area Under Curve) a été de 0,694, indiquant une séparation modérée entre les classes "Oui" et "Non". Pour la classe « Oui », la précision (PPV) a été de 90,9 %, avec un Recall de 83,3 %. La Classe « Non » présente une précision (PPV) de 50 %. Lorsqu'il prédit "Non", il est correct seulement 50 % du temps. Une faible proportion de faux positifs pour "Non" (16,7 %).

Tableau 4. Mesures de performance du modèle

Métriques	Oui	Non	Total
Support	12	3	15
Accuracy	0,800	0,800	0,800
Precision (Positive Predictive Value)	0,909	0,500	0,827
Recall (True Positive Rate)	0,833	0,667	0,800
False Positive Rate	0,333	0,167	0,250
False Discovery Rate	0,091	0,500	0,295
F1 Score	0,870	0,571	0,810
Matthews Correlation Coefficient	0,452	0,452	0,452
Area Under Curve (AUC)	0,722	0,667	0,694
Negative Predictive Value	0,500	0,909	0,705
True Negative Rate	0,667	0,833	0,750
False Negative Rate	0,167	0,333	0,250
False Omission Rate	0,500	0,091	0,295
Threat Score	2,500	0,400	1,450
Statistical Parity	0,733	0,267	1,000

La figure 5 a permis d'examiner les relations entre plusieurs variables concernant la pratique de l'élevage pastoral. Avec deux variables cibles, le graphique présente chaque éleveur en un point avec la frontière de décision. En effet, la frontière de décision est une ligne séparant le nuage de point en deux zones distinctes où le modèle prédit "Oui" et une autre où il prédit "Non". Les frontières ont été très irrégulières (Ages × Effectif bovin; Effectif ovin × effectif bovin) et lisse (Effectif bovin × effectif caprin; Effectif bovin × Nombre de berger). Le modèle présente néanmoins des points mal classés. La variable nombre de berger présente une distribution similaire des points en fonction des autres variables. Les variables effectives de troupeau bovin présentent une frontière lisse et les points sont majoritairement regroupés en points.

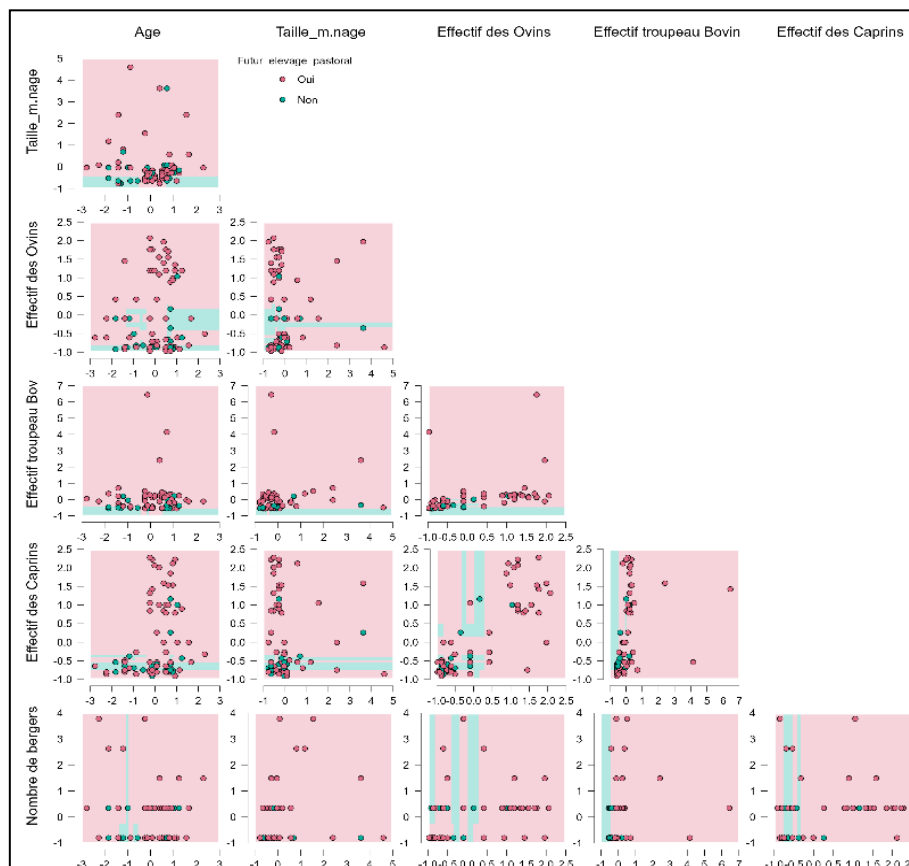


Fig. 5. Nuage de points par variable concernant la mobilité pastorale

4 DISCUSSION

4.1 CARTÉRISATION SOCIALE DES ENQUÊTES

Les éleveurs enquêtés sont majoritairement des Peul et Sénoufo. Le nombre élevé des éleveurs Peulhs et Sénoufos indique une diversité ethnique. Dans la zone d'étude, les couloirs de passage existent et datent depuis les années 1970 et prennent leur source au Nord du pays. Ce qui pourrait justifier l'installation des Peulhs dans la zone. En plus les prédispositions de la zone d'étude lui confèrent un climat favorable aux pratiques pastorales. Les Peulhs pratiquent un système d'exploitation opportuniste des ressources fourragères basé sur la stratégie de la mobilité [12], [13] atteste que face aux changements climatiques, la diversification et la mobilité notamment la transhumance sont les pratiques les plus rencontrées dans les élevages. Nos résultats sont similaires à ceux de [14]. L'auteur a trouvé plus de Peulh dans les différents types des élevages au Nord-Est du Bénin. Nos résultats sont similaires également à ceux de [15]

qui avait trouvé un effectif plus important d'éleveurs Peul dans la transhumance de saison de pluie par rapport aux autres ethnies à Ouara et à Torokoro au Burkina Faso. Nos résultats sont aussi similaires à ceux de [16], [17] respectivement au sud-ouest du Burkina Faso et au Nord du Bénin. Ces résultats ont montré une majorité d'éleveurs non scolarisés et peulhs. L'élevage pastoral se pratique de manière très variable selon l'ethnie, la région, et parfois la pluviosité de l'année, elle est l'apanage des Peulhs et concerne essentiellement les gros ruminants [18]. Malgré la présence des Peulhs, on note que l'activité est aussi exercée par d'autres ethnies de la localité. Cette minorité pratique ce type d'élevage dans le souci de préserver leur cheptel face aux aléas sociaux et climatiques. La mobilité pastorale et l'élevage bovin ne sont pas l'apanage des éleveurs de l'ethnie Peulh à ce sens dont toutes les ethnies y sont impliquées dans le souci de préserver leur moyen d'existence. Les résultats de [19] ont trouvé 20,7 % de Mossi et de Gourmantché dans les Sahel. L'âge de la majorité des éleveurs est situé entre 35 et 65 ans. Les éleveurs enquêtés sont nettement âgés et la faible représentation des jeunes pourrait également refléter un exode rural et/ou un désintérêt pour l'élevage pastoral pour d'autres opportunités. Ce résultat pourrait s'expliquer par la taille de l'effectif, car il est difficile de cumuler un nombre d'effectifs de bovin à partir d'un certain âge. [15] a trouvé que 86 % de ces enquêtés ont un âge supérieur ou égal à 40 ans. Le niveau faible de scolarisation limite non seulement l'accès aux informations, mais aussi aux innovations pastorales. Les déplacés internes indiquent le contexte de vulnérabilité lié à des crises sécuritaires.

4.2 CARACTÉRISATION DES EFFECTIFS

Les effectifs de troupeaux bovins, ovins et caprins ont varié en fonction des statuts des éleveurs enquêtés. Plusieurs facteurs pourraient expliquer ces faits à savoir le niveau de stabilité, l'accès aux ressources et la capacité à investir dans l'élevage. L'insécurité des espaces naturels est un obstacle important au pastoralisme. Il accroît la vulnérabilité des pasteurs et attise la suspicion à leur égard [20]. Sans nul doute l'une des causes qui obligent les pasteurs à rechercher les zones où ils seront en sécurité avec leurs troupeaux. De nos résultats, les déplacés internes apparaissent comme un groupe vulnérable. Les migrants occupent une position intermédiaire. Chez les déplacés internes, les tailles de troupeaux (bovin, ovin et caprin) faibles et peu dispersés peuvent être interprétées comme une conséquence directe des déplacements forcés. Entre la perte de bétail lors des mouvements, l'accès limité aux ressources pastorales et la difficulté à reconstituer le capital animal. La faible variabilité observée dans leurs troupeaux suggère un niveau d'homogénéité, traduisant une vulnérabilité généralisée au sein de ce groupe. Les migrants ont présenté une disparité. Leurs troupeaux bovins ont été importants, avec une faible variabilité. Les natifs possèdent les troupeaux les plus grands de petits ruminants. Leurs troupeaux bovins sont comparables en taille à ceux des déplacés internes, mais avec une distribution plus étendue. Cette situation pourrait traduire un meilleur accès aux ressources naturelles et une plus grande sécurité foncière et sociale. Leurs pratiques d'élevage s'inscrivent dans une continuité temporelle qui favorise la constitution et la stabilité du cheptel. En effet, les travaux de [15] ont montré que le facteur ethnique a un poids important sur le type de mobilité. Toujours selon l'auteur, en plus du facteur ethnique qui est certes important, le nombre de troupeaux, la taille du troupeau, l'expérience de l'éleveur semblent déterminants dans le choix du type de mobilité. Nos résultats sont partiellement en accord avec ceux trouvés par [15]. Nos résultats sont similaires à ceux obtenus par [14] qui a trouvé un effectif moyen de bovin de 70 têtes chez les transhumants. Cette similarité pourrait être liée au contexte de zone agroclimatique et du type d'élevage. Cependant, les effectifs des bovins obtenus ont été supérieurs à ceux trouvés par [19] au Sahel (36 ± 33 têtes de bovins). Quant au caprin, nos résultats ont été différents quant aux effectifs d'ovin et de caprin de [19]. En effet au Sahel, l'auteur a trouvé en moyenne 14 ± 14 têtes d'ovins et 14 ± 17 têtes de caprins.

4.3 CIRCUIT DE PATURAGE DES PASTEURS ET AGROPASTEURS

L'analyse des circuits de pâturage indique une forte influence des saisons sur l'organisation quotidienne des déplacements du bétail. Les pasteurs et agropasteurs, pour réduire l'impact de cette pression climatique et sauver leurs troupeaux adopte différent type de mobilité c'est-à-dire faire bouger les troupeaux d'une zone à l'autre [21]. En fonction des saisons, les éleveurs adaptent leurs pratiques. Le circuit incluant les étapes parc, pâturage, abreuvement, repos et le retour au parc domine dans l'ensemble des saisons. En saison pluvieuse, une diversité des itinéraires est observée. Dans cette période, les ressources pastorales sont abondantes et accessibles, les éleveurs adoptent alors des circuits moins contraignants, avec une tendance de repos avant l'abreuvement. Ce choix pourrait s'expliquer

par le confort lié à l'environnement, mais aussi la disponibilité des zones ombragées favorables au repos. En saison sèche chaude, les circuits se structurent de manière homogène ce qui suggère une rationalisation des déplacements des animaux et des Hommes face à la rareté des ressources. Le stress lié à cette saison semble emmener les éleveurs à adopter un itinéraire linéaire, réduisant les distances et les efforts physiques. En saison sèche froide, les itinéraires présentent des ajustements considérables. Ces variantes sont la résultante des conditions climatiques démentes qui permettent une pâture la journée couplée à une organisation souple des activités pastorales. Plusieurs auteurs ont travaillé sur la mobilité saisonnière. Selon [22], les facteurs climatiques, écologiques, sécuritaires, démographiques et économiques à la recherche de pâturage, de sites d'abreuvement et de marchés ont été les principales causes des mouvements des éleveurs. [23] ont travaillé sur les variables des périodes pastorales. Cela conclut de la disponibilité temporelle et spatiale des ressources pastorales qui est un des indicateurs saisonniers [24]. Nos résultats pourraient traduire cette capacité d'adaptation des éleveurs aux conditions saisonnières. Les circuits opérés semblent optimisés pour répondre aux exigences combinées de la productivité fourragère, de la disponibilité en eau et du bien-être animal. Ils soulignent également l'importance du repos dans l'organisation des circuits, positionné stratégiquement pour la gestion des déjections animales. En effet, les circuits montrent une corrélation entre le parage et le lieu de repos des animaux. Cette corrélation va dans le souci de valoriser les déjections des animaux. Cette valorisation se fait soit dans les parcs de repos soit directement dans les champs de cage. Ces opérations sont tributaires de la saison. En effet, en saison sèche chaude, où la ressource fourragère se fait rare, les éleveurs ont tendance à parquer les animaux dans les champs de cage. La fonction fertilisante assurée par des herbivores domestiques met en jeu la mobilité qui est directement liée aux rythmes saisonniers et quotidiens des déplacements du bétail [25].

4.4 FACTEURS DE DURABILITE DE L'ÉLEVAGE PASTORAL

L'analyse de la contribution relative des variables dans le modèle révèle une classification des facteurs influençant le futur de l'élevage pastoral. Plusieurs auteurs ont adopté le modèle Random Forest dans leur étude [26], [27]. L'importance de la variable "village" indique que les dynamiques locales, les contextes agroécologiques, les pratiques sociales ou encore les dispositifs institutionnels pourraient exercer une influence majeure. Cela montre l'idée du caractère territorial et intrinsèque de chaque village dans la pratique de l'élevage. Nos résultats sont en accord avec [28]. En effet selon les auteurs, le futur de l'élevage est fortement relié à des caractéristiques territoriales notamment avec l'utilisation de ressources naturelles, l'existence de divers systèmes de production et des pratiques. L'effectif bovin constitue également un facteur structurant. Cela pourrait s'interpréter comme le reflet de l'importance économique et sociale du cheptel bovin dans les exploitations. L'élevage de bovin pourrait influencer les décisions de gestion et d'atténuation des chocs face aux niveaux d'exposition aux risques. L'importance de l'élevage des bovins suscite auprès des chercheurs des études plus spécifiques à l'espèce. En effet [29], a étudié l'interaction agriculture et élevage de bovin à l'ouest du Burkina Faso, au sud-ouest du Burkina Faso [16], a étudié la dynamique des troupeaux bovins. Au Burkina Faso, l'effectif de bovin a été estimé à 9,939,785 têtes en 2022 [30]. Par habitant, la consommation de lait provenait de l'élevage extensif bovin [31]. Le mode d'acquisition des animaux (8,716 %) arrive en troisième place. Il montre la diversité culturelle des trajectoires d'acquisition ou de reconstitution du cheptel. Ces modalités ont été l'achat, la dot, l'héritage et le prêt. Cela marque aussi la relation de l'éleveur à ses animaux et les stratégies mises en place pour la valorisation, la protection et la mobilité du cheptel. Les autres variables (âge, transhumance) ont une influence modérée, mais non négligeable. L'âge pourrait refléter l'expérience, les savoirs pastoraux et les capacités d'adaptation. La transhumance affecte l'accessibilité et l'exploitation des ressources pastorales et l'exposition aux problèmes sécuritaires. La transhumance est un système d'élevage bénéfique, qui contribue à la sécurité alimentaire et à la stabilité économique et politique [32], [5], lors des scénarios sur la transhumance, l'a décrite comme une activité importante qui mobilisera les ressources naturelles disponibles et réduira les déséquilibres territoriaux. Le statut des animaux (3,594 %) présente un impact marginal, tout comme les effectifs caprins et ovins (respectivement 3,23 % et 2,122 %), qui semblent jouer un rôle secondaire. Les résultats du modèle mettent en évidence la complexité des déterminants de la gestion pastorale et soulignent la nécessité d'intégrer la dimension spatiale, les caractéristiques structurelles des élevages, ainsi que certains éléments sociaux et zootecniques pour mieux comprendre les logiques d'action des éleveurs. Certains auteurs ont trouvé d'autres déterminants majeurs dans le processus de transformation des systèmes d'élevage pastorale. En effet, au Sénégal, l'internet mobile et le téléphone auraient une capacité transformatrice pour les systèmes d'élevage [33]. Le pastoralisme est confronté à des défis liés à la modernisation, au changement climatique, à la démographie et à la sécurité [1].

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

L'élevage pastoral est sous une crise qui nécessitant des ajustements fondamentaux. L'analyse par Random Forest a permis d'identifier les variables clés qui influencent la pratique de l'élevage pastoral dans le futur. Le modèle a été performant, et a mis en évidence l'importance du contexte actuel. Ces résultats constituent une base utile pour orienter les instances de décisions de l'élevage et guider les stratégies de gestion des ressources naturelles. Toute intervention doit être pensée à une échelle du village avec une approche intégrative en tenant compte de cette hiérarchie de variables pour le développement de politiques et d'actions adaptées.

REMERCIEMENTS

AKG et SOK ont œuvré à la conception des travaux et rédaction de la première version du manuscrit. AK et BZ ont assuré la révision critique du manuscrit.

REFERENCES

- [1] V. Ancey, S. Mercandalli, S. Magnani, C. Rangé, C. Patat, P. Girard et C. Noûs, « Penser l'avenir du pastoralisme en Afrique sub Saharienne à travers le rapport social d'activité », in XIIIe Congrès de l'Association Française d'Économie Politique, 2024.
- [2] FAO, « Le devenir de l'élevage au Burkina Faso. Défis et opportunités face aux incertitudes », Rome, Italie: FAO, 2019.
- [3] A. Wane, I. Touré, A. D. Mballo, A. Ndiaye, Z. Souli, P. Ramde, M. B. Diao et E. H. Botoni, « Analyse des évolutions des revenus et des réactions des ménages agropastoraux sahéliens face aux chocs dans la zone d'intervention du PRAPS », 2024.
- [4] V. Ancey, S. D. Magnani, C. Rangé, et C. Patat, « Le pastoralisme et la jeunesse pastorale au Burkina Faso », GRET; IRAM; Réseau Billital Maroobe, 2024.
- [5] V. Ancey et J.-M. Sourisseau, « Une approche territoriale et anticipatrice pour une transhumance apaisée à la frontière entre le Togo et le Burkina Faso. Synthèse. », Food and Agricultural Organisation; CIRAD, 2024.
- [6] B. Bonnet et B. Guibert, « Stratégies d'adaptation aux vulnérabilités du pastoralisme: Trajectoires de familles de pasteurs (1972-2010) », Afrique contemporaine, no 1, pp. 37-51, 2014.
- [7] C. Rangé, S. Magnani, et V. Ancey, « « Pastoralisme » et « insécurité » en Afrique de l'Ouest », Revue internationale des études du développement, no 243, pp. 115-150, 2020.
- [8] M. Ouedraogo, « Impact des changements climatiques sur les revenus agricoles au Burkina Faso », Journal of Agriculture and Environment for International Development - JAEID, vol. 106, no 1, 2012.
- [9] MinEFP-INSD, « Caractéristiques des ménages et de la population », INSD, No. 2, Burkina Faso, 2022.
- [10] Z. M'Hamedi, C. Dartigues-Pallez, et T. Bell, « RFIViz: Random Forest Interactive Visualisation, un outil simple pour comprendre les modèles », in EXPLAIN'AI 2024, 2024.
- [11] R. Genuer, J.-M. Poggi, et C. Tuleau-Malot, « Variable selection using Random Forests », Pattern recognition letters, vol. 31, no 14, pp. 2225-2236, 2010.
- [12] H. Kagoné, « Gestion des écosystèmes pâturés en zone Nord Soudanienne », 2000.
- [13] D. Ouedraogo, « Perception et adaptation des éleveurs pasteurs au changement climatique en zones sahélienne, Nord et Sud Soudanien du Burkina Faso », DEA, Université Polytechnique de Bobo, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 2011.
- [14] I. Alkoiret, D. Awohouedji, A. Gbangboche, et R. H. Bosma, « Productivité des systèmes d'élevage bovin de la commune de Gogounou au Nord-Est Du Bénin », Annales des Sciences Agronomiques, vol. 14, no 2, 2011.
- [15] H. E. Botoni, « Interactions Elevage-Environnement. Dynamique des paysages et évolution des pratiques pastorales dans les fronts pionniers du Sud-Ouest du Burkina Faso », PhD Thesis, Université Montpellier III, Montpellier, France, 2003.
- [16] S. Nougara, A. Kiema, A. Soudre, et B. Sawadogo, « Analyse de la dynamique du troupeau bovin en Région Sud-Ouest du Burkina Faso », Afrique SCIENCE, vol. 21, no 5, pp. 137-152, 2022.
- [17] O. G. Kouato, P. V. Houndonougbo, D. A. J. Dossou, S. Babatounde, C. Agbangla et A. Chrysostome, « Caractérisation des systèmes d'élevage des caprins au Nord du Bénin », Afrique Science, vol. 18, no 3, pp. 22-35, 2021.
- [18] A. A. Midekor, « Cartographie des utilisations du sol et des ressources en eau et analyse des perspectives associées à l'élevage dans le bassin du Kou. », Mémoire de DEA, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 2009.
- [19] A. Kiema, G. B. Tontibomma, et N. Zampaligré, « Transhumance et gestion des ressources naturelles au Sahel : contraintes et perspectives face aux mutations des systèmes de productions pastorales », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, no Volume 14 Numéro 3, 2015.
- [20] I. Sawadogo, E. K. Illy, B. Ly, Diallo, I. Badini, J. Magnini et M. Nassef, « Caractérisation de la sécurité de la tenure collective dans les systèmes pastoraux au Burkina Faso. Londres: Supporting Pastoralism and Agriculture in Recurrent and Protracted Crises (SPARC)«, 2024.
- [21] F. Grünwald, « Entre aridité et radicalisme : le pastoralisme au Sahel à la croisée des chemins », FERDI Document de travail, Working Paper P316, 2023.
- [22] A. Zan, B. Sawadogo, J. Bonkougou, Y. S. C. Some et C. D. Bassole, « Déterminants de la mobilité et des dynamiques spatio-temporelles des ruminants dans la Province du Mouhoun au Burkina Faso », Revue Internationale du Chercheur, vol. 5, no 1, 2024.
- [23] G. Louis Djohy, B. Sounon Bouko, R. V. Cao Diogo et J. Afouda Yabi, « Comprendre le comportement alimentaire et spatial des troupeaux bovins en libre pâture pour une gestion durable des ressources pastorales : étude de cas dans le bassin de l'Ouémé Supérieur au Bénin », BASE, vol. 28, no 4, 2024.
- [24] D. G. Louis et S. B. Boni, « Mobilité pastorale et ses dynamiques spatio-temporelles dans la commune de Tchaourou au Bénin », Annales de l'Université de Moundou, vol. 7, no 3, pp. 6-28, 2021.
- [25] E. Landais, P. Lhoste, et Guerin, « Systèmes d'élevage et transferts de fertilité », 1991.

- [26] A. F. Gonzalez Mora, « Contribution d'un modèle statistique (Random Forest) à l'élevage de précision de systèmes de poules pondeuses en volière comme outil de prédiction de la qualité de l'air et de la performance du poulailler. », PhD Thesis, INRS, Canada, 2020.
- [27] J. Young, J. H. Skarlupka, M. S. Cox, R. T. Resende, A. Fischer, K. F. Kalscheur, J. C. McClure, J. B. Cole, G. Suen et D. M. Bickhart, « Validating the Use of Bovine Buccal Sampling as a Proxy for the Rumen Microbiota by Using a Time Course and Random Forest Classification Approach », *Appl Environ Microbiol*, vol. 86, no 17, p. e00861-20, 2020.
- [28] C. Manoli, B. Dedieu, et A. Ickowicz, « Livestock farming systems and local development: a review of the multiple dimensions of Territory livestock science », in *Building sustainable rural future: The added value of systems approaches in times of change and uncertainty*, Vienna, Austria, pp. 2167-2175, 2010.
- [29] A. Belem, Y. F. Lankoandé, et M. Traoré, « évaluation du potentiel fourrager des résidus de récolte dans les exploitations cotonnières à l'ouest du Burkina Faso. », *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition & Development*, vol. 24, no 6, 2024.
- [30] DGESS-MARAH, « Annuaire Statistique de l'élevage (Enquêtes nationales sur les effectifs du cheptel 1989 et 2003, estimations de 2005 à 2020) », 2024.
- [31] S. Traore, M. Sissao, G. R. Bayili et R. R. Djikoldingam, « Dispositif de collecte et de conservation du lait cru en fonction des critères nutritionnels et microbiologiques au Burkina Faso et applicable à l'Afrique de l'Ouest », *Revue Internationale des Sciences et Technologie*, vol. 21, no 6, pp. 64-79, 2022.
- [32] J. E. C. Timpong, I. Samuels, F. O. Sarkwa, A. K. Opong, A. O. Majekodumni et H. T. Wario, « Transhumance pastoralism in West Africa – its importance, policies and challenges », *African Journal of Range & Forage Science*, vol. 40, no 1, pp. 114-128, 2023.
- [33] S. Ferrari, M. Moniot, B. Ba, A. Asseloka, M. L. Ndiaye, N. Paget, P. Bonnet et J. D. Cesaro, « Pastoralisme et frugalité numérique : évaluation des usages chez les ménages pastoraux au Sénégal », *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 2024.

Impact des cultures intercalaires de l'ail et de la citronnelle sur les attaques de *Diaphania hyalinata* (Lepidoptera: Crambidae) en culture de *Citrullus lanatus* (Thunb) à Man, Côte d'Ivoire

[Impact of garlic and lemongrass intercropping on *Diaphania hyalinata* (Lepidoptera: Crambidae) attacks in *Citrullus lanatus* (Thunb) cultivation in Man, Côte d'Ivoire]

Diabate Dohouonan¹, Aka Ahou Jeanne-Deborah², Ohoueu Ehouman Jean Brice³, Akpessa Akpa Alexandre Moïse², and Tano Yao⁴

¹Département Agronomie et Foresterie, UFR Ingénierie Agronomique Forestière et Environnementale, Université de Man, BP 20 Man, Côte d'Ivoire

²Université Félix Houphouët-Boigny, UFR Biosciences, Laboratoire des milieux naturels et environnement, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Centre National de Recherche Agronomique, Man, Côte d'Ivoire

⁴Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The watermelon *Citrullus lanatus* contributes to food security. Its production is decreased by the attacks of *Diaphania hyalinata*. This study was carried out to evaluate the repellent effect of garlic (*Allium sativum*) and lemongrass (*Cymbopogon citratus*) on *D. hyalinata* in watermelon cultivation. The experimental setup was a Fisher block with four treatments. Insects were collected ten times, one observation per week, using the direct observation method. In the control plot, the attack rate on *C. lanatus* plants was 95.83%. The attack rate was lower on the *C. lanatus* plots than on plots associated with lemongrass (68.75%) than on plots associated with garlic plants (87.50%) and plots treated with Tihan 175 O-TEQ (83.33%). The plant attack intensity was type II on the plots with treatments and type III on the untreated plot (I = 35.42%). The highest fruit attack rate was recorded on the control plots. The *C. lanatus* fruit attack rates on plots with lemongrass (23.79%) or garlic plants (23.73%) and those treated with Tihan 175 O-TEQ (23.87%) were similar. Yield losses caused by *D. hyalinata* were higher on the control plot (66.49%) than on the *C. lanatus* plots associated with lemongrass (23.86%), garlic (22.17%) and Tihan 175 O-TEQ treatment (23.50%). The percentage reduction in attacked fruit compared with the untreated control was 75% for *C. lanatus* plots combined with lemongrass, 85% for plots combined with garlic and 75% for plots treated with Tihan 175 O-TEQ. Plants of *A. sativum* and *C. citratus* intercropped with *C. lanatus* cultivation increased yields.

KEYWORDS: *Allium sativum*, biological control, *Citrullus lanatus*, *Cymbopogon citratus*, intercrop, Hymenoptera.

RESUME: La pastèque *Citrullus lanatus* participe à la sécurité alimentaire. Malheureusement, sa production est limitée par les attaques de *Diaphania hyalinata*. Cette étude a pour objectif d'évaluer l'effet répulsif de l'ail (*Allium sativum*) et la citronnelle (*Cymbopogon citratus*) sur *D. hyalinata* en culture associée à la pastèque. Le dispositif expérimental est un bloc de Fisher avec 4 traitements. La collecte des insectes a été réalisée dix fois par des observations directes, à raison d'une observation par semaine. Sur la parcelle témoin, le taux d'attaque des plants de *C. lanatus* était de 95,83%. Ce taux était plus faible sur les parcelles de *C. lanatus* associées avec la citronnelle (68,75%) que sur celles associées avec l'ail (87,50%) et sur celles traitées

avec Tihan 175 O-TEQ (83,33%). Les intensités des attaques des plants sur les parcelles avec traitement sont de type II et de type III sur la parcelle non traitée ($I = 35,42\%$). Le taux d'attaque des fruits sur la parcelle témoin est le plus élevé. Les taux d'attaque des fruits de *C. lanatus* sur les parcelles associées à la citronnelle (23,79%) ou à l'ail (23,73%) et celles traitées avec Tihan 175 O-TEQ (23,87%) sont similaires. Les pertes de rendement causées par *D. hyalinata* sont plus élevées sur les parcelles témoins (66,49%) que sur celles associées à la citronnelle (23,86%), à l'ail (22,17%) et celles traitées avec Tihan 175 O-TEQ (23,50%). Le pourcentage de réduction des fruits attaqués par rapport au témoin est de 75% pour les parcelles de *C. lanatus* associées à la citronnelle, de 85% pour les parcelles associées à l'ail et de 75% pour les parcelles traitées avec Tihan 175 O-TEQ. Les plantes *A. sativum* et *C. citratus* contribueraient à améliorer le rendement des cultures.

MOTS-CLEFS: *Allium sativum*, *Citrullus lanatus*, cultures en association, *Cymbopogon citratus*, hyménoptères, lutte biologique.

1 INTRODUCTION

La pastèque *Citrullus lanatus* Thunb. (Cucurbitaceae) occupe une place importante dans l'agriculture mondiale [1]. Cette plante est cultivée pour son fruit riche en protéines, en vitamines (A, C), en composés phénoliques et en minéraux tels que le potassium et le magnésium qui interviennent dans la santé humaine après consommation [2-4]. *C. lanatus* contribue à une meilleure hydratation du corps humain en raison de sa forte teneur en eau et protège contre certaines maladies cardiovasculaires [3, 4]. La production mondiale de pastèques a dépassé les 100 millions de tonnes, avec la Chine, l'Inde et les États-Unis figurant parmi les principaux producteurs [3,4]. Cette culture est fréquemment confrontée à des attaques d'insectes ravageurs, notamment *Diaphania hyalinata* (Lepidoptera: Crambidae) et des maladies qui obligent les paysans à utiliser des pesticides. *D. hyalinata* est un important ravageur des cucurbitaceae. Cet insecte consomme les feuilles et les fruits des cucurbitaceae en y laissant des trous et cause des pertes de rendement variant entre 10 et 100% [5-7]. La densité de *Diaphania* sp. au niveau des plants de melon se situe entre 1 et 2,2 [6]. Les taux d'attaque se situent entre 12 et 47% au niveau des plants de cucurbitaceae [6, 7]. Ces pesticides diminuent par leurs toxicités la population de la faune auxiliaire utile pour la pollinisation et pour la lutte contre les ravageurs cibles. De nombreuses études ont montré que l'usage des insecticides ont des effets négatifs sur l'homme, la faune auxiliaire notamment les hyménoptères et de nombreux coléoptères prédateurs des ravageurs et l'environnement [8-11]. Ainsi, l'usage des insecticides constitue une contrainte majeure susceptible de nuire à la viabilité économique des exploitations et à la sécurité alimentaire [12, 13]. De plus, l'utilisation excessive de produits chimiques entraîne la pollution du sol, de l'eau et de l'air, affectant la santé des écosystèmes et la perte de la biodiversité des organismes non cibles [14]. Les insectes ravageurs peuvent également développer une résistance aux insecticides utilisés, rendant leurs efficacités et conduisant à l'application de doses de plus en plus élevées [12, 15]. En conséquence, l'utilisation d'insecticides chimiques représente un défi majeur pour la durabilité de la production agricole, le maintien de la biodiversité et la préservation de l'environnement [16, 17]. Dans ce contexte, l'utilisation de plantes à effet insecticide émerge comme une alternative prometteuse. Certains extraits de plantes, telles que le neem (*Azadirachta indica*), le pyrèthre, le tabac et le ricin, contiennent des composés bioactifs tels que des alcaloïdes, des flavonoïdes et des terpènes, qui ont des effets répulsifs, antiappétants et insecticides contre une large gamme de ravageurs [18, 19]. De plus, l'utilisation de plantes à effet insecticide contribue à préserver la biodiversité des insectes et à maintenir l'équilibre écologique des systèmes agricoles [20]. Les plantes à effet insecticides présentent l'avantage de réduire la dépendance aux insecticides chimiques, tout en étant moins nuisibles pour les organismes non ciblés, notamment les pollinisateurs et les prédateurs naturels des ravageurs. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'effet répulsif de l'ail (*Allium sativum*) et la citronnelle (*Cymbopogon citratus*) sur les attaques de *D. hyalinata* en culture de pastèque *C. lanatus*.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MILIEU D'ÉTUDE

Cette étude a été effectuée dans la parcelle entomologique de l'Université de Man (7°21'09"N et 7°36'57"W), dans la région du Tonkpi à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Le climat de cette zone est monomodal caractérisé par une saison sèche et une saison pluvieuse. La température moyenne annuelle est de 25 °C. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1632 mm, avec une hygrométrie de 82%. Les sols de type ferrallitique à fertilité chimique moyenne sont largement dominants [21].

2.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental est un bloc de fisher avec 4 traitements. Trois grains de pastèque ont été semés par poquet, soit 6 poquets par billon de 7,5 m de long, 1,5 m de large et 0,30 m de haut. L'écartement entre les billons a été de 0,8 m au sein d'un traitement constitué de 4 billons. Chaque billon constitue une répétition. Les traitements ont été séparés les uns des autres de 5 m. Une bordure de 1 m de large a été établie autour des traitements. Après la germination, un démariage a été effectué pour obtenir deux plants par poquet. Les plants de la citronnelle (*Cymbopogon citratus*) et l'ail (*Allium sativum*) ont été plantés en quinconce, le même jour que les semis des grains de la pastèque, respectivement sur 4 billons de *C. lanatus* séparés de 5 m. Quatre autres billons ont été traités avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (Lubendiamide 100g/L + Spirotétramate 75 g/L) et 4 billons n'ont reçu aucun traitement. Des désherbages des parcelles ont été effectués au besoin.

2.3 DENOMBREMENT DES INSECTES ET ESTIMATION DES ATTAQUES

Le dénombrement des larves de *D. hyalinata* et leur attaque ont été effectués 10 fois durant l'essai sur 12 plants de pastèque par parcelle élémentaire, chaque semaine, par des observations directes. L'échantillonnage a été effectué du 23^{ème} au 90^{ème} jour après repiquage de 6 heures à 8 heures de façon hebdomadaire trois jours après chaque traitement sur les feuilles. Les faces inférieures et supérieures des plants de pastèque ont été observés pour s'assurer de la présence ou de l'absence des insectes. Les larves collectées ont ensuite été conservés dans des piluliers étiquetés contenant de l'alcool à 70 %. Chaque étiquette indiquait le numéro de l'échantillon, la date, l'heure et le lieu de collecte. L'identification des insectes a été effectuée à l'aide d'une loupe binoculaire et de la littérature [7, 22]. À partir du 90^{ème} jour au 110^{ème} après les semis, quatre récoltes des fruits effectuées à un intervalle d'une semaine sur les 4 billons de chaque traitement. Les fruits attaqués par *D. hyalinata* et les fruits sains ont été séparés, comptés et pesés. Le taux d'attaque des plants et des fruits, le pourcentage de réduction des attaques des fruits et les pertes de rendements occasionnés par *D. hyalinata* ont été calculés.

Le taux d'attaque des plants et des fruits de *C. lanatus* par *D. hyalinata* a été calculé selon la formule suivante:

$$Ta = \frac{Na * 100}{Nt} \quad (1)$$

Avec :

Ta = Taux d'attaque (%);

Na = Nombre de plants ou de fruits de *C. lanatus* attaqués par *D. hyalinata* par traitement;

Nt = Nombre total de plants ou de fruits récoltés par traitement.

L'intensité des attaques des plants de *C. lanatus* (I) par *D. hyalinata* est calculée selon la formule suivante [23, 24]:

$$I = ((P1 \times 25\%) + (P2 \times 50\%) + (P3 \times 75\%) + (P4 \times 100\%))/([Ps + P1 + P2 + P3 + P4]) \quad (2)$$

Avec: **Ps** = nombre de plants sains, **P1** = nombre de plants ayant de faibles attaques, **P2**= nombre de plants ayant des attaques moyennes, **P3** = nombre de plants présentant de fortes attaques, **P4** = nombre de plants présentant de très fortes attaques.

Les intensités des attaques sont ensuite regroupées en 4 classes, classe 1: 0 % < I ≤ 10 %, l'intensité des dégâts est faible (DT1); classe 2: 10 % < I ≤ 30 %, l'intensité des dégâts est moyenne (DT2); classe 3: 30 % < I ≤ 50 %, l'intensité des dégâts est forte (DT3); classe 4: 50 % < I ≤ 100 %, l'intensité des dégâts est très forte (DT4) [23, 24].

Le pourcentage de réduction des fruits attaqués par les traitements a été calculé à partir de la formule suivante:

$$PR (\%) = \frac{(C-T)*100}{T} \quad (3)$$

Avec :

PR= Pourcentage de réduction des fruits de pastèque attaqués par les traitements;

C= Nombre de fruits attaqués sur les parcelles témoins;

T= Nombre de fruits attaqués sur les parcelles avec traitement.

Les pertes de rendements ont été calculés à partir du poids des fruits des pastèques saines et du poids total des fruits de pastèques échantillonnés selon la formule suivante:

$$"PRe (\%)" = ("Wt - Ws") * 100 / "Wt" \quad (4)$$

Avec:

PRe = perte de rendement;

Wt = poids total des fruits collectés;

Ws = Poids total des fruits sains.

2.4 TRAITEMENTS STATISTIQUES

Le nombre de larves *D. hyalinata* collectés, les taux d'attaque et les pertes de rendements ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA effets principaux) et les moyennes obtenues ont été discriminées avec le test de Fisher (LSD) au seuil de 5% à l'aide du logiciel XLSTAT 2016.

3 RESULTATS

3.1 IMPACT DES CULTURES DE *A. SATIVUM*, *C. CITRATUS* EN QUINCONCE AVEC LA CULTURE DE *C. LANATUS* SUR LA POPULATION DES LARVES DE *D. HYALINATA*

Le nombre de larves de *D. hyalinata* collectées sur la parcelle témoin (15 larves /12 plants) est plus élevé que ceux collectés sur les parcelles de *C. lanatus* en quinconce avec les plants d'ail (1,5 larves/ 12 plants) ou avec les plants de la citronnelle (1,75 larves/ 12 plants) et sur la parcelle traitée avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (2,25 larves/12 plants) ($F = 19,577$; $p = 0,0001$). Par ailleurs, le nombre de larves collectés au niveau des parcelles de *C. lanatus* avec les plants de citronnelle ou d'ail est faible mais statistiquement identique que ceux collectés sur la parcelle traitée avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (Figure 1).

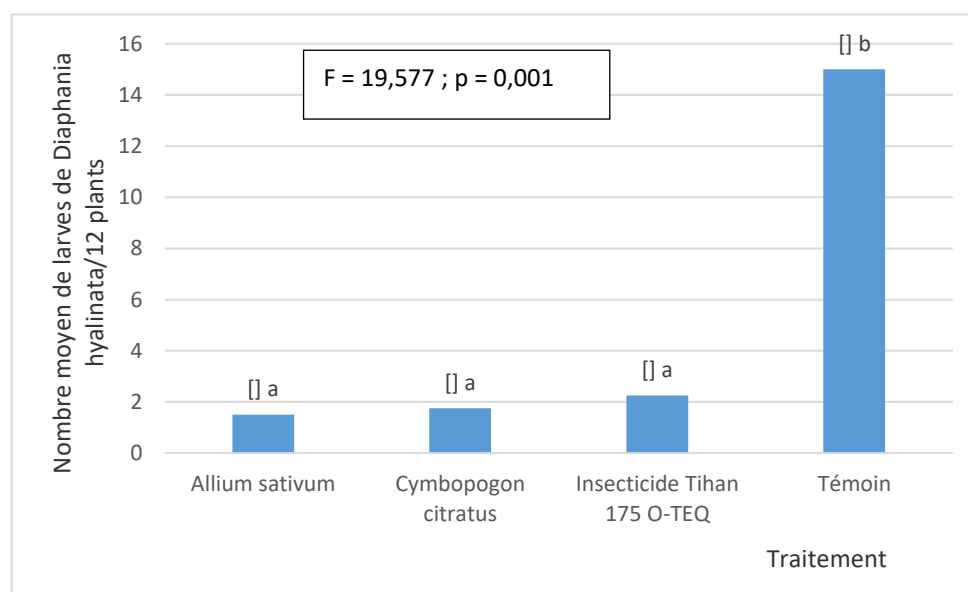


Fig. 1. Nombre moyen des larves de *D. hyalinata* collectées sur les différentes parcelles de *C. lanatus* en culture intercalaire avec *A. sativum*, *C. citratus* et sur la parcelle traitée et témoin

3.2 ATTAQUES DE *C. LANATUS* PAR LES LARVES DE *D. HYALINATA*

Les larves de *D. hyalinata* performent les feuilles de *C. lanatus* et y déposent leurs excréments (Figure 2 a, b), consomment l'épiderme et creusent des galeries dans les fruits de la pastèque (Figure 2 c, d). Le nombre de plants attaqués, le taux d'attaque et l'intensité d'attaque sont plus élevés sur les parcelles témoins que sur celles traitées avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ ou

à celles associées avec l'ail ou la citronnelle. Sur la parcelle témoin, le nombre de plants atteints, le taux d'attaque et l'intensité d'attaque des plants de *C. lanatus* sont respectivement 11,5 plants atteints/12 plants, 95,83% et 35,42%. Les parcelles de *C. lanatus* associées à la citronnelle présentent un nombre de plants atteints (8,25 plants atteints/12 plants) et un taux d'attaque (68,75%) significativement plus faibles que celles associées à l'ail (10,50 plants atteints/12 plants et 87,50%) ou traitées avec Tihan 175 O-TEQ (10 plants atteints/12 plants et 83,33%) ($F = 32,273$; $p = 0,001$). L'intensité des attaques est de type II sur les parcelles traitées avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (26,04%), sur celles associées à la citronnelle (27,08%) et à l'ail (25%). En revanche, sur la parcelle témoin, l'intensité d'attaque des plants de *C. lanatus* est de type III, avec une valeur de $I = 35,42\%$ ($F = 4,922$; $p = 0,019$) (Tableau 1).

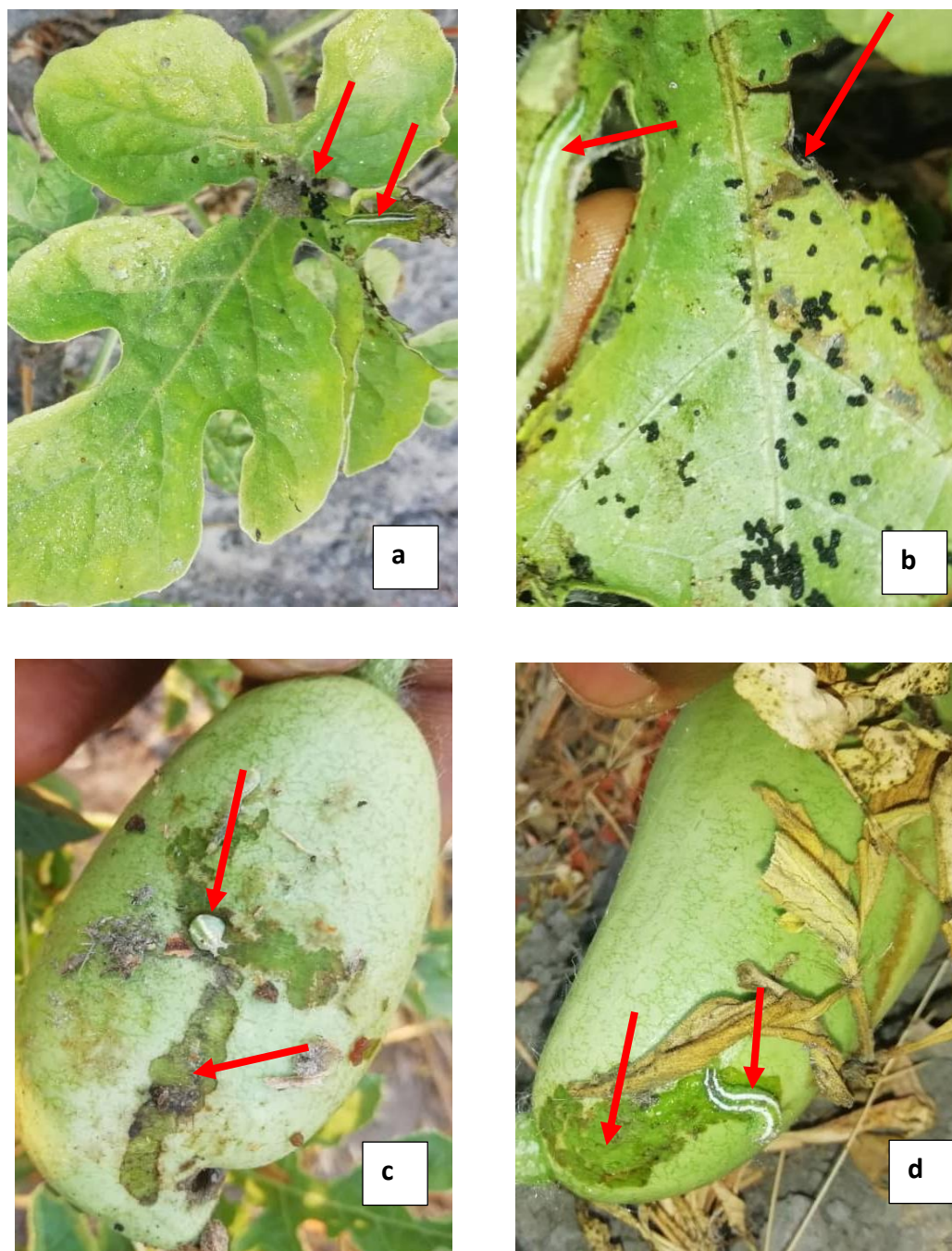


Fig. 2. Dégâts de *D. hyalinata* sur *C. lanatus* (a et b: Feuilles consommées avec excréments de *D. hyalinata*; c: fruit perforé; c et d: épiderme du fruit de *C. lanatus* consommé)

Tableau 1. Taux d'attaque des plants de *C. lanatus* par *D. hyalinata*

Traitement	Nombre de plants atteints \pm SE	Taux d'attaque des plants	I (%)
T0	11,5 ^c \pm 0,58	95,83 ^c	35,42 ^b
T1	8,25 ^a \pm 0,50	68,75 ^a	27,08 ^a
T2	10,50 ^b \pm 0,58	87,50 ^b	25 ^a
T3	10 ^b \pm 00	83,33 ^b	26,04 ^a
F	32,273	32,273	4,922
p	0,001	0,001	0,019

T0: témoin; T1: *C. citratus* en association avec *C. lanatus*; T2: *A. sativum* en association avec *C. lanatus*, T3: Tihan 175 O-TEQ, SE: Erreur standard.

Les moyennes affectées d'une même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne diffèrent pas statistiquement entre elles (test de Fisher, $p < 0,05$).

Le nombre total de fruit collectés par parcelle élémentaire (12 plants de *C. lanatus*) est plus élevé sur les parcelles de *C. lanatus* associées à la citronnelle (19 fruits), à l'ail (18 fruits) et sur celles traitées avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (18 fruits). La parcelle témoin enregistre le plus faible nombre de fruits (11,50 fruits) collectés ($F = 38,067$; $p = 0,001$). Le nombre de fruits atteints ($F = 26,81$; $p = 0,001$) et le taux d'attaque ($F = 98,651$; $p = 0,001$) observés sur les parcelles associées à la citronnelle (4,50 fruits atteints, soit 23,79%), à l'ail (4,25 fruits atteints, soit 23,73%) et sur celles traitées avec Tihan 175 O-TEQ (4,25 fruits atteints, soit 23,87%) sont statistiquement similaires. En revanche, le nombre de fruits atteints et le taux d'attaque sont significativement plus élevés sur les parcelles témoins que sur les parcelles traitées ou associées à l'ail ou à la citronnelle (Tableau 2).

Tableau 2. Taux d'attaque des fruits de *C. lanatus* des fruits par *D. hyalinata*

Traitement	Nombre total de fruits \pm SE	Fruits sains \pm SE	Fruits atteints \pm SE	Taux d'attaque (%)
T0	11,50 ^b \pm 0,58	3,75 ^b \pm 0,50	7,75 ^b \pm 0,96	67,23 ^b
T1	19 ^a \pm 0,82	14,50 ^a \pm 1,29	4,50 ^a \pm 0,58	23,79 ^a
T2	18 ^a \pm 0,82	14 ^a \pm 1,41	4,25 ^a \pm 0,50	23,73 ^a
T3	18 ^a \pm 1,83	13,75 ^a \pm 2,06	4,25 ^a \pm 0,5	23,87 ^a
F	38,067	52,49	26,81	98,651
p	0,001	0,001	0,001	0,001

T0: témoin; T1: *C. citratus* en association avec *C. lanatus*; T2: *A. sativum* en association avec *C. lanatus*, T3: Tihan 175 O-TEQ, SE: Erreur standard.

Les moyennes affectées d'une même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne diffèrent pas statistiquement entre elles (test de Fisher, $p < 0,05$).

3.3 IMPACT DES CULTURES DE *A. SATIVUM*, *C. CITRATUS* EN QUINCONCE AVEC LA CULTURE DE *C. LANATUS* SUR LE RENDEMENT

Le poids total des fruits de *C. lanatus* et le poids des fruits sains sont plus faibles sur la parcelle non traitée (T0). Par ailleurs, le poids des fruits atteints de la parcelle non traitée est le plus élevé. Le poids total des fruits collectés est de 36 kg sur la parcelle témoin, 61 kg sur la parcelle de *C. lanatus* avec plants de la citronnelle, 57,75a kg sur la parcelle de *C. lanatus* avec plants de la citronnelle et de 57 kg sur la parcelle traitée avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ ($F = 38,026$; $p = 0,001$). Le poids des fruits sains sont respectivement 12 kg, 46,50 kg, 45 kg et 43,75 kg sur les parcelles T0, T1, T2 et T3 ($F = 54,580$; $p = 0,001$). Les poids des fruits atteints ($F = 19,693$; $p = 0,001$) et les pertes de rendement ($F = 90,599$; $p = 0,001$) causées par *D. hyalinata* sont plus élevées sur la parcelle témoin (24 kg et 66,49%) par rapport à ceux des parcelles de *C. lanatus* avec plants de la citronnelle (14,50 kg et 23,86%), à ceux des parcelles de *C. lanatus* avec plants d'ail (12,75 kg et 22,17%) et par rapport à ceux des parcelles de *C. lanatus* traitées avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (13,25 kg et 23,50%). Le pourcentage de réduction des fruits atteints par rapport au non traité est de 75% sur les parcelles de *C. lanatus* avec plants de la citronnelle, 85% sur les parcelles de *C. lanatus* avec plants d'ail et de 85% sur les parcelles de *C. lanatus* traitée avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (Tableau 3).

Tableau 3. Pourcentage de réduction des fruits attaqués (PR) et perte de rendement (PRe) causés par *D. hyalinata*

Traitement	Poids total des fruits (kg)	Poids des fruits sains (kg)	Poids des fruits attaqués (kg)	PR (%)	PRe (%)
T0	36 ^b ± 2,45	12 ^b ± 1,41	24 ^b ± 3,16	-	66,49 ^b
T1	61 ^a ± 2,45	46,50 ^a ± 3,87	14,50 ^a ± 1,73	75	23,86 ^a
T2	57,75 ^a ± 2,50	45 ^a ± 4,24	12,75 ^a ± 2,50	85	22,17 ^a
T3	57 ^a ± 6,06	43,75 ^a ± 6,75	13,25 ^a ± 1,89	85	23,50 ^a
F	38,026	54,580	19,693	0,101	90,599
p	0,001	0,001	0,001	0,905	0,001

T0: témoin; T1: *C. citratus* en association avec *C. lanatus*; T2: *A. sativum* en association avec *C. lanatus*, T3: Tihan 175 O-TEQ
 PR = pourcentage de réduction des fruits attaqués, PRe = perte de rendement, SE: Erreur standard.

Les moyennes affectées d'une même lettre à l'intérieur d'une même colonne ne diffèrent pas statistiquement entre elles (test de Fisher, $p < 0,05$).

4 DISCUSSION

Les larves de *D. hyalinata* attaquent les feuilles et les fruits de *C. lanatus*. Elles perforent les feuilles de *C. lanatus*, ce qui réduit l'activité photosynthétique des plants, la production de matières organiques et par conséquent le rendement. De plus, les larves de *D. hyalinata* consomment la peau et creusent des galeries dans les fruits de *C. lanatus* entraînant la pourriture de ceux-ci. Les intensités des attaques des plants sur les parcelles traitées avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (26,04%), sur les parcelles de *C. lanatus* associées à la citronnelle (27,08%) et à l'ail (25%) sont de type II. L'intensité d'attaque des plants de *C. lanatus* sont de type III sur la parcelle témoin avec une valeur de I = 35,42%. Ainsi, *D. hyalinata* cause des pertes de rendement importante au niveau de la culture de *C. lanatus*. Des résultats similaires ont été reportés par Lourido *et al.* [5] et Diabaté *et al.* [7] au niveau du concombre et par Nadrawati *et al.* [6] au niveau du melon. Le nombre de larves de *D. hyalinata* collectées sur les parcelles avec traitement est compris entre 1,5 larves et 2,25 larves pour 12 plants de *C. lanatus* avec un effectif de 2,25 larves pour l'insecticide Tihan 175 O-TEQ. Selon Nadrawati *et al.* [6], la densité de *D. hyalinata* au niveau des plants de melon se situe entre 1 et 2.2. Les taux d'attaque des plants de *C. lanatus* par *D. hyalinata* se situent entre 68 et 96% au niveau des plants de *C. lanatus*. Ces taux sont supérieurs à ceux obtenus par Nadrawati *et al.* [6] et Diabaté *et al.* [7] qui ont obtenus taux d'attaque compris entre 12 et 47% au niveau des plants du concombre. Par ailleurs, les plants de la citronnelle et de l'ail protègent les plants de *C. lanatus* contre les attaques de *D. hyalinata* au même titre que l'insecticide Tihan 175 O-TEQ. En effet, le nombre de plants attaqués, le taux d'attaque et l'intensité d'attaque des plants de *C. lanatus* sont similaires au niveau des parcelles traitées avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ, au niveau de celles associées à l'ail et à la citronnelle en quinconce. Cette efficacité de ces deux plantes en association avec la culture de *C. lanatus* est attribuable à leurs effets répulsifs vis-à-vis des insectes ravageurs notamment, *D. hyalinata* [25, 26]. En effet, la citronnelle (*C. citratus*) est riche en citral et géraniol qui sont des composés connus pour leurs effets répulsifs et leurs capacités à perturber le système olfactif des insectes [25]. En outre, l'ail (*A. sativum*), grâce à ses composés organosoufrés tels que l'allylcine agit comme répulsif et interfère avec le système nerveux des insectes [26]. Par ailleurs, l'efficacité de l'ail et de la citronnelle pourrait être liée à leur faible toxicité sur les insectes auxiliaires, favorisant ainsi la lutte biologique [11, 27, 28]. Ainsi, les insectes auxiliaires protègent *C. lanatus* contre les attaques des insectes ravageurs, amplifient l'action de ces plantes à effet insecticides et facilitent la pollinisation des fleurs de *C. lanatus*. Ces résultats sont similaires à ceux de Ohoueu *et al.* [8] et de Franzèn *et al.* [10] qui ont montré que l'usage des insecticides fait diminuer considérablement la population des abeilles utiles pour la pollinisation des fleurs.

5 CONCLUSION

Les larves de *D. hyalinata* perforent les feuilles et creusent des galeries dans les fruits de *C. lanatus*, entraînant une réduction du rendement. Le nombre de plants attaqués, le taux d'attaque et l'intensité des attaques sont significativement plus élevés sur les parcelles témoins que sur celles traitées avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ ou associées à l'ail et à la citronnelle. Sur la parcelle témoin, le nombre de plants attaqués, le taux d'attaque et l'intensité d'attaque des plants de *C. lanatus* sont respectivement 11,5 plants attaqués/12 plants, 95,83% et 35,42%. Le nombre de plants attaqués (8,25 plants attaqués/12 plants) ainsi que le taux d'attaque (68,75%) sont plus faibles sur les parcelles de *C. lanatus* possédant les plants de la citronnelle en quinconce par rapport aux parcelles de *C. lanatus* avec les plants d'ail (10,50 plants attaqués/12 plants et

87,50%) et aux parcelles traitées avec l'insecticide Tihan 175 O-TEQ (10 plants attaqués/12 plants et 83,33%). L'intensité des attaques est de type II sur les parcelles traitées ou associées, contre un type III sur la parcelle témoin (I = 35,42 %). Le taux d'attaque des fruits est similaire entre les parcelles associées à la citronnelle (23,79 %), à l'ail (23,73 %) et celles traitées (23,87 %), mais reste nettement plus élevé sur le témoin. Les pertes de rendement dues à *D. hyalinata* atteignent 66,49 % sur la parcelle témoin, contre 23,86 % (citronnelle), 22,17 % (ail) et 23,50 % (Tihan 175 O-TEQ). Le pourcentage de réduction des fruits attaqués par rapport au témoin est de 75 % (citronnelle), 85 % (ail) et 75 % (Tihan 175 O-TEQ). Ainsi, l'utilisation de plantes à effet insecticide comme l'ail et la citronnelle réduit efficacement les populations larvaires et les dégâts de *D. hyalinata* sur *C. lanatus*, avec une efficacité comparable à celle de l'insecticide Tihan 175 O-TEQ. Ces plantes offrent une alternative respectueuse de l'environnement et peuvent constituer une solution de substitution durable aux insecticides chimiques dans la lutte contre les ravageurs.

REFERENCES

- [1] M. Achour, N. Khaled, Importance économique des Cucurbitacées dans les régions sèches, *Journal d'Agronomie et d'Environnement*, 45 (2), 112-125, 2019.
- [2] A. A. Kader, Postharvest technology of horticultural crops (3rd edition). University of California, Agriculture and Natural Resources, Publication 3311, 2002.
- [3] H. H. Musa, B. Zhou, H. Liu, Nutritional value and health benefits of watermelon: A review, *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 11 (3), 212-225, 2020.
- [4] D. Burdulis, A. Kasëtaïtë, S. Trumbeckait, R. Benetis, J. Dauksienë, K. Burdulienë, L. Raudenë, Cultivation of watermelon (*Citrullus lanatus* (Tunb.)) in a temperature climate: Agronomic strategies and phytochemical composition, *Agronomy*, 15 (933), 25 p, 2025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040933>.
- [5] G. M. Lourido, T. Mahlmann, A. Soumavila, K. F. G. Guerra, Social wasps a biological control agents against *Diaphania hyalinata* (Linnaeus, 1767) (Lepidoptera, Crambidae), a cucumber pest in Amazonas, Brazil, *Sociobiology*, 66 (4), 610-613, 2019. DOI: 10.13102/sociobiology.v66i4.3576.
- [6] N. Nadrawati, A. Zarkani, P. Priyatningsih, A. Pitoyo, Incidence of leaf and fruit eater, *Diaphania indica* (Saunders) in melon at Sri Kuncoro village, Pondok Kelapa Sub District, Benbuku Tengah Regency, *Indonesian Journal of Agriculture Sciences*, 25 (1), 40-44, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31186/jipi.25.1.40-44>.
- [7] D. Diabaté, P. W. E. Koné, E. A. E. B. Kadio, A. A. M. Akpesse, Y. Tano, Efficacy of insecticides on *Diaphania hyalinata* (Lepidoptera: Crambidae) on cucumber crop in Tonkpi region (Man, Côte d'Ivoire), *Journal of Entomological Research*, 48 (1), 18-22, 2024a. DOI: 10.5958/0974-4576.2024.00004.5.
- [8] E.J. B. Ohoueu, E. N. Wandan, D. Kone, B. A. Assielou, Impact de l'utilisation des produits phytosanitaires en production cotonnière et cacaoyère sur la production apicole en Côte d'Ivoire, *European Scientific Journal*, 13, 42-55, 2017.
- [9] D. Diabaté, E. N. M. N'Guessan, T. Coulibaly, Y. Tano, Diversity of Coleoptera on cucumber in the Tonkpi region of Man, Côte d'Ivoire, *Indian Journal of Entomology*, 86 (2), 351-355, 2024b. Doi: 10.55446/IJE.2024.1692.
- [10] M. Franzén, M. Stenmark, Exploring biodiversity through the lens of *Knautia arvensis* pollinators Walks as a monitoring method, *Insects*, 15, 563, 2024. <https://doi.org/10.3390/insects15080563>.
- [11] J. A. Lutinski, C. J. Lutinski, A. Ortiz, F. S. Zembruski, M. O. Ripke, F. R. M. Garcia, Biological control using ants: current status. Opportunities and limitations, *Agronomy*, 14 (1558), 25 p, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071558>.
- [12] M. Ali, M. M. Rahman, M. Hasan, Impact of insect pests and diseases on watermelon production: A global perspective, *International Journal of Agricultural Research*, 12 (3), 203-215, 2017.
- [13] D. Saha, P. Dutta, A. Roy, Pest and disease management in watermelon production: A review, *International Journal of Horticultural Science*, 15 (4), 245-260, 2020.
- [14] U. Bajwa, K. S. Sandhu, Effect of pesticide residues on human health: A review, *Journal of Food Science and Technology*, 56 (4), 1312-1326, 2019.
- [15] A. M. Shi, A. Lougarre, C. Alies, I. Fremaux, Z. H. Tang, J. Stojan, Acetylcholinesterase alterations reveal the fitness cost of mutations conferring insecticide resistance, *BMC Evolutionary Biology*, 4 (5), 1-8, 2004.
- [16] O. Koul, S. Walia, G. S. Dhaliwal, Essential oils as green pesticides: Potential and constraints, *Biopesticides International*, 4 (1), 63-84, 2008.
- [17] D. Diabaté, Impact et mode d'action de quelques biopesticides et insecticides classiques en culture maraîchère dans la région du Moronou (Bongouanou, Côte d'Ivoire), Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, 148 p, 2016.
- [18] M. B. Isman, Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world, *Annual Review of Entomology*, 51, 45-66, 2006.

- [19] D. Diabaté, A. J. Gnago, K. Koffi, Y. Tano, The effect of pesticides and aqueous extracts of *Azadirachta indica* (A. Juss) and *Jatropha curcas* L. on *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrididae) and *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) found in tomato plants in Côte d'Ivoire, *Journal of Applied Biosciences*, 80, 7132-7143, 2014.
- [20] S. Yasmin, S. Banik, M T. Islam, Plant-derived bioinsecticides: A sustainable approach for insect pest management in agriculture, *Journal of Applied Agricultural Sciences*, 25 (3), 198-214, 2020.
- [21] B. A. C. Tiessé, Apport de la télédétection et des SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et la cartographie de la sensibilité à l'érosion hydrique dans la région montagneuse du Tonkpi (Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse Unique de Doctorat, Institut National Polytechnique Felix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 171p, 2020.
- [22] M. Roth, Initiation à la morphologie, la systématique et la biologie des insectes. Editions de l'office de la recherche scientifique outre-mer, Paris, France, 212 p, 1974.
- [23] D. C. Aléné, J. Messi, S. Quilici, Influence de l'ombrage sur la sensibilité des *Ricinodendron heudelotii* (Baill.) aux attaques de *Diclidophle biauxuani* en milieu naturel au Cameroun, *Fruits*, 61: 273-280, 2006.
- [24] D. Diabate, G. T. T. Tah, Y. C. Ble, Y. Tano, Evaluation of the resistance of three maize varieties to *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) and *Ostrinia nubilalis* Hübner in the Tonkpi region (Man, Côte d'Ivoire), *Bulletin of the National Research Centre*, 47, 157, 2023. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01116-8>.
- [25] H. T. Nguyen, K. D. Pham, Q. L. Tran, Chemical composition and insecticidal properties of *Cymbopogon citratus* essential oil, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (10), 4253-4260, 2020.
- [26] P. Singh, G. Kaur, S. Verma, Garlic-based bioinsecticides: Efficacy and mechanisms of action, *International Journal of Pest Management*, 22 (1), 85-97, 2019.
- [27] S. Kumar, A. Gupta, R. Sharma, Antifungal and antibacterial properties of garlic-derived allicin: A review, *Journal of Natural Products*, 17 (2), 102-118, 2021.
- [28] S. Martinez, J. L. Pereira, F. Rocha, Sustainable pest management using botanical insecticides: A review on their application in agriculture, *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (8), 11234-11245, 2022.

Détermination de l'activité des enzymes hépatiques chez les consommateurs des bières, dans la ville de Gemena de 2022 - 2023, Province de Sud Ubangi, RDC

[Determination of liver enzyme activity among beer consumers in the city of Gemena from 2022 - 2023, Sud Ubangi Province, DRC]

Zachée Kombo Tebopole, Martin Mambesa Bainamboka, Daniel Mademogo, Cherubin Sangi Kelamose, Luc Boekoli Likonga, Justin Ngawi, and Richard Tanakula

ISTM Gemena, Province du Sud Ubangi, RD Congo

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study concerns the determination of hepatic enzyme activity in beer consumers. It was carried out in the city of Gemena, with the overall objective of determining hepatic enzyme activity in beer consumers, evaluating the liver function of beer consumers, and detecting possible hepatic dysfunctions.

The study involved a total of 60 confirmed beer-consuming subjects recruited mainly from students of ISTM Gemena in a purposive sampling because the characteristics of the respondents were well known and determined in advance to participate in the study. Laboratory analysis of ALT (GPT/ALAT), AST (GOT/ASAT) and GGT performed on whole blood collected in plain tubes and centrifuged to obtain serum revealed abnormally elevated enzymatic activity with estimated values approximating: 40.39 ± 3.2 U/l, 55.44 ± 9 U/l and 48.11 ± 5.8 U/l respectively for GPT, GOT and GGT compared with 37.9 ± 3.3 U/l, 35.36 ± 3.2 and 40.96 ± 3.3 . It should be noted that there were more male consumers than female consumers (73.3% versus 16 female cases, i.e. 26.7%). The mean age of the respondents was between 20 and 30 years. The beer most consumed by the respondents was Castel (a beer imported from West Africa).

KEYWORDS: determination, activity, enzymes, hepatic, consumers, beer.

RESUME: La présente étude porte sur la détermination de l'activité des enzymes hépatiques chez les consommateurs des bières. Elle a été réalisée dans la ville de Gemena, avec comme objectif global de déterminer l'activité des enzymes hépatique chez les consommateurs des bières envie évaluer la fonction hépatique des consommateurs des bières et de déceler d'éventuels dysfonctionnements hépatiques.

L'étude a porté sur un total de 60 sujets consommateurs avérés de la bière recrutés essentiellement parmi les étudiants de l'ISTM Gemena dans un échantillonnage raisonné car les caractéristiques des enquêtés ont été bien connues et déterminées à l'avance pour être participant à l'étude. Une analyse au laboratoire de GPT/ALAT, GOT/ASAT et GGT à partir du sang total prélevé dans des tubes secs, centrifugé pour obtenir le sérum a permis de déceler une activité enzymatique anormalement élevée avec une estimation voisinant: $40,39 \pm 3,2$ U/l, de $55,44 \pm 9$ U/l et de $48,11 \pm 5,8$ U/l respectivement pour GPT, GOT et GGT contre $37,9 \pm 3,3$ U/l, $35,36 \pm 3,2$ et $40,96 \pm 3,3$. Il faut noter qu'il y a eu plus des consommateurs masculins que les consommateurs féminins (73,3% contre 16 cas de celles de sexe féminin, soit 26,7%). L'âge moyen des enquêtés se situant entre 20 et 30 ans. La bière la plus consommée par les enquêtés étant le Castel (une bière importée de l'Afrique de l'Ouest).

MOTS-CLEFS: détermination, activités, enzymes, hépatiques, consommateurs, bière.

1 INTRODUCTION

Le foie assure plusieurs fonctions vitales pour l'organisme. L'altération des fonctions hépatiques n'apparaît qu'après destructions, ou exérèse chirurgicale de plus de trois quarts de l'organe normal. Une maladie du foie se révèle, pour la même raison, à un stade très tardif, quand plus de 75% des cellules sont atteintes. Une des causes de loin la plus courante des maladies hépatiques dans les pays développés et dans les pays en voie de développement, reste la consommation excessive d'alcool. Ces troubles sont 5 fois plus nombreux, en comptant l'hépatite alcoolique et la cirrhose, que toutes les autres atteintes du foie (Mario d'Er, 2000).

La littérature nous renseigne que par l'alcool, le travail du foie est considérablement perturbé (Domagk Gf., 1999).

En effet, la forte concentration de l'alcool dans cet organe conduit à sa destruction. Il augmente de volume avec comme corollaire des maux parfois difficiles à diagnostiquer. Effectivement, ceux qui ont l'habitude de boire supportent plus facilement les boissons alcooliques et deviennent moins rapidement ivres (COURTE JOIE et all., 2003).

Les effets de l'alcool sur la santé constituent aujourd'hui encore un lourd problème de santé publique. (SANGI C., 2019).

Le Comité français d'éducation pour la santé (CFES) estime à 5 millions le nombre de personnes ayant en France des problèmes médicaux, psychologiques ou sociaux en relation avec une consommation excessive d'alcool. L'intoxication alcoolique chronique est responsable d'un excès de morbidité et de mortalité par cancer, hépatopathie, atteinte du système nerveux central ou périphérique, maladie cardiovasculaire ou anomalies du développement, chez l'enfant exposé *in utero*. Les conséquences de l'usage de boissons alcooliques sur la santé dépendent toutefois de la susceptibilité du consommateur, ainsi que de son mode et surtout de son niveau de consommation (Boirie Y, Wqlrand S, Beaufrère B., 2004).

L'éthanol est une petite molécule absorbée par simple diffusion. Cette diffusion est lente au niveau gastrique et la majeure partie (70 % à 80 %) est absorbée au niveau de l'intestin grêle (duodénum et jéjunum). Quand l'alcool est ingéré à jeûn, la concentration maximale est atteinte rapidement, environ une demi-heure après l'ingestion. L'ingestion de nourriture ralentit la vidange gastrique en entraînant la fermeture du verrou pylorique et en réduisant la motricité gastrique, en particulier au niveau central. En conséquence, l'ingestion de nourriture, en prolongeant le temps de séjour de l'éthanol dans l'estomac, va modifier la cinétique de l'absorption de l'éthanol. On observe un écrêtement du pic de concentration plasmatique (Cmax), ce pic étant plus tardif et moins élevé. L'absorption excessive de boissons alcoolisées finit par léser les tissus et le foie est le principal organe qui dégrade l'alcool du sang et les excès de boisson l'affectent: hépatite, dégénérescence graisseuse, cirrhose et cancer (Boirie Y, Wqlrand S, Beaufrère B., Op.cit.).

De très nombreuses études ont montré que les principaux facteurs responsables des désordres métaboliques et de la toxicité de l'éthanol étaient l'augmentation du NADH, la production d'acétaldéhyde, la génération de radicaux libres et l'induction du CYP2E1.

Des progrès considérables ont été effectués dans la compréhension du métabolisme de l'éthanol et de l'acétaldéhyde par l'ADH et l'ALDH, même si les étapes limitantes de ces réactions demandent encore à être étudiées. L'importance des isoenzymes hépatiques sur la consommation d'alcool et sa toxicité doit être soulignée, le meilleur exemple étant l'ALDH. En effet, si une activité ALDH très basse a un effet dissuasif pour la consommation d'alcool et constitue donc un facteur protecteur contre une consommation excessive, elle est à l'inverse un facteur de risque pour la toxicité en cas de consommation d'alcool. Ces dernières années ont vu également s'intensifier les recherches sur une autre enzyme du métabolisme de l'éthanol, le CYP2E1, dont on essaie de préciser le rôle dans la toxicité de l'éthanol et le stress oxydant. Si la connaissance des mécanismes progresse grâce à différents modèles expérimentaux, l'expression et la régulation de cette enzyme chez l'homme sont encore mal connues. Le métabolisme non hépatique de l'éthanol (cerveau, estomac) demande également à être mieux connu; même si ces tissus contribuent de façon peu significative à l'élimination de l'alcool, une meilleure connaissance de ce métabolisme devrait aider à la compréhension de la toxicité de l'alcool dans ces tissus (Frenot M, Veilling F, 1997).

Des cordons fibreux mutilent la structure normale du foie et les cellules survivantes se multiplient en formant des nodules de régénération (îlots de cellules viables séparées par du tissu cicatriciel) provoquant notamment la cirrhose, une maladie du foie provoquée par une altération chronique de ses cellules.

La vascularisation inappropriée de ces îlots aboutit à l'altération progressive des fonctions hépatiques, telles que la détoxification de substances véhiculées par le sang ou l'élaboration des facteurs indispensables comme ceux de la coagulation.

Les maladies du foie tuent annuellement, au monde plusieurs milliers de personnes. La cause la plus courante de cirrhose du foie est l'excès d'alcool et le risque est lié à la quantité d'alcool ingérée plus qu'au type d'alcool. Une hépatite peut évoluer

vers une cirrhose. Ainsi, l'hépatite virale chronique (en particulier celle qui est due au virus de l'hépatite B) est la cause la plus fréquente de cirrhose dans les pays du Moyen-Orient, d'Extrême-Orient et d'Afrique (Frenot M, Veilling F, 1997).

La RDC n'est pas épargnée par la nocivité de l'alcool. Depuis les années

1960, l'engouement de la population pour les boissons alcoolisées manufacturées contribue à une augmentation vertigineuse des nombres de brasseries et des distilleries. A cette avidité, vient s'ajouter une forte consommation des boissons traditionnelles (Agene, Zododo, Lotoko...). C'est ainsi que la consommation par individu a augmenté sensiblement et cela est à l'origine de plusieurs désastres et d'énormes problèmes sanitaires imputés aux consommations excessives d'alcool (KAPENGA J.J, 2020).

Aujourd'hui, dans toutes les grandes villes de la RDC ou presque, ils s'érigent des buvettes, des bars et des boites de nuit. La bière y est consommée devient de plus en plus concurrentielle entre amis et écuries. La moyenne de la consommation journalière est estimée selon Mademogo Daniel (2021) entre 2 à 3 bouteilles par individu malgré les coûts (prix élevé) et les méfaits incommensurables entraînés par une consommation excessive de l'alcool sur la santé et sur la communauté.

Dans la ville de Gemena, la police de circulation routière (PCR) note des dizaines d'accidents de circulation chaque mois. Les échecs scolaires sont décriés notamment parmi les jeunes. Le Kuluna s'invite dans la ville comme un phénomène nouveau. Le commerce de la bière se porte de plus en plus à merveille dans tous les quartiers de la ville. Cela tient, aussi pour les boissons produites localement. Tout ceci, sans compter sur l'accélération de l'activité des enzymes hépatiques qui entraîne d'énormes désastres sur la santé mentale, physique et communautaire.

2 METHODOLOGIE

2.1 POPULATION CIBLE ET ECHANTIOLLON

2.1.1 POPULATION D'ÉTUDE

La population échantillonnée de cette étude est constituée essentiellement des Consommateurs de bières. Nous avons pris comme cible, les étudiants de l'ISTM Gemena à cause notamment de la proximité du campus de cette institution avec le laboratoire où les analyses ont dues être effectuées mais aussi, du fait de la portée et caractère très sensible de cette étude qui a eu le mérite d'être bien expliquée et comprises par les participants à ladite étude.

2.1.2 ECHANTILLONNAGE

Nous avons opté pour un échantillonnage non probabiliste par choix raisonné qui nous a permis de sélectionner parmi les étudiants de l'ISTM Gemena, les consommateurs ayant accepté volontairement de participer à l'étude.

2.1.3 TAILLE DE L'ÉCHANTILLON

En misant sur le principe de saturation des données, la taille de l'échantillon de cette étude a été reconnue à posteriori, composée des consommateurs de bières de l'ISTM Gemena; la taille définitive de l'échantillon de notre étude s'élève à 60 individus dont: quarante-quatre (44) de sexe masculin et seize (16) de sexe féminin.

2.2 TYPE D'ETUDE

En vue d'aboutir aux résultats, nous avons mené une étude prospective, quasi-expérimentale et analytique dans une approche quantitative.

2.3 METHODE DE RECHERCHE

Pour cette étude nous avons utilisé la méthode d'analyse dans un plan quasi-expérimental où les échantillons prélevés ont été acheminés pour être observés à travers le spectrophotomètre de marque RAYTO 9200.

A) PERIODE DE L'ETUDE

Cette étude a été réalisée du mois d'avril au mois d'août 2023 soit une durée totale de 5 mois. Elle a eu lieu dans la ville de Gemena, Province de Sud-Ubangi, RDC. Il sied de mentionner que les échantillons de sang ont été prélevés chez les étudiants de l'ISTM Gemena, une institution d'enseignement supérieur et universitaire de notoriété publique dont le siège se trouve à Gemena. Les analyses quant à elles ont été faites au laboratoire provincial de santé publique du Sud Ubangi installé dans l'enceinte de l'HGR de Gemena.

B) MATÉRIEL BIOLOGIQUE

Le sérum obtenu par centrifugation du sang veineux prélevé sans anticoagulant chez les consommateurs de bières

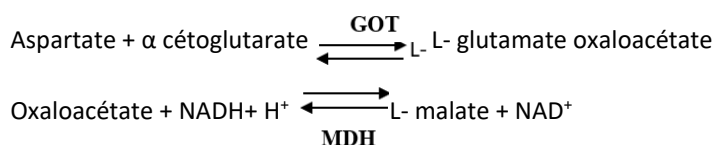
C) MATÉRIELS DE LABORATOIRE

- Centrifugeuse (DUAB)
- Spectrophotomètre: marque Rayto-9200
- Micropipettes (Digipipette)
- Pipette pasteur
- Vortex
- Tube sec
- Tube à essais
- Embouts (jaune et bleu)
- Portoirs
- Gants
- Garrots
- Corps vacutainer
- Aiguilles vacutainer
- Ouate
- Désinfectant
- chronomètre

2.4 ANALYSES BIOMÉDICALES RÉALISÉES

2.4.1 DOSAGE DE GOT (GLUTAMATE-OXALOACÉTATE-TRANSFERASE)

2.4.1.1 PRINCIPE



2.4.1.2 MODE OPÉRATOIRE

Pipette dans de cuves	37°C
Solution du travail	1000µl
Echantillon	100µl

Mélanger et lire l'absorbance après 1 minute et déclencher en même temps le chronomètre. Refaire les lectures après exactement 1, 2 et 3 minutes.

2.4.1.3 VALEURS USUELLES: À 37°C

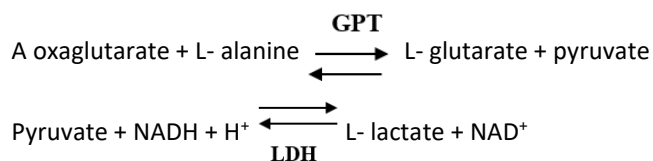
- Homme: jusqu'à 37 U/l
- Femme: jusqu'à 31 U/l.

Pour faire la solution du travail on pipette 2 ml du réactif **SUB** qu'on met dans le flacon **BUF** et mélanger

2.4.1.4 FORMULE: $\Delta A/\text{MIN} \times F = \text{UI/L}$

2.4.2 DOSAGE GPT (GLUTAMATE- PYRUVATE-TRANSFERASE)

2.4.2.1 PRINCIPE



2.4.2.2 MODE OPÉRATOIRE

Pipette dans de cuves	37°C
Solution du travail	1000µl
Echantillon	100µl

Mélanger et lire l'absorbance après 1 minute et déclencher en même temps le chronomètre. Refaire les lectures après exactement 1, 2 et 3 minutes.

Pour faire la solution du travail on pipette 2 ml du réactif **SUB** qu'on met dans le flacon **BUF** et mélanger

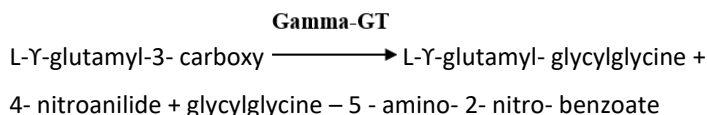
2.4.2.3 VALEURS USUELLES: À 37°C

- Homme: jusqu'à 42 U/l
- Femme: jusqu'à 32 U/l.

2.4.2.4 FORMULE: $\Delta A/\text{MIN} \times F = \text{UI/L}$

2.4.3 DOSAGE GGT (GAMMA-GLUTAMYL-TRANSFERASE)

2.4.3.1 PRINCIPE



2.4.3.2 MODE OPÉRATOIRE

Pipette dans de cuves	37°C
Solution du travail	1000µl
Echantillon	100µl

Mélanger et lire l'absorbance après 1 minute et déclencher en même temps le chronomètre. Refaire les lectures après exactement 1, 2 et 3 minutes.

Pour faire la solution du travail au REF 12013, pipeter 2ml du flacon **SUB** respectivement et bien mélanger dans un flacon **BUF**.

2.4.3.3 VALEURS USUELLES: À 30°C

- Homme: 8-46 U/l
- Femme: 7-29 U/l

2.4.3.4 FORMULE: $\Delta A / \text{MIN} \times F = \text{UI/L}$

3 RESULTATS

Tableau 1. Répartition des enquêtés selon le sexe

SEXE	EFFECTIF	%
Masculin	44	73,3
Féminin	16	26,7
Total	60	100

Ce tableau montre que 73,3 % des enquêtés sont du sexe Masculin et 26,7 % du sexe Féminin.

Tableau 2. Présentation des échantillons enquêtés selon les tranches d'âge et les sexes

Tranche d'âge	Sexes		Total
	Masculin	Féminin	
21 - 30	14(26,9)	6(11,5)	20(38,5)
31 - 40	12(20)	4(6,7)	16(26,9)
41 - 50	10(19,2)	4(6,7)	14(23,1)
51 - 60	8(13,3)	2(3,3)	10(16,7)
Total	44(73,3)	16(26,7)	60(100)

Il ressort de ce tableau que l'échantillon d'étude était dominé par les sujets de sexe masculin avec 44 cas, soit 73,3% contre 16 cas de ceux de sexe féminin, soit 26,7%. Les sujets âgés de 21-30 ans étaient majoritaires avec 20 cas, soit 38,5% alors que ceux âgés de 51-60 ans étaient minoritaires avec 10 cas, soit 16,7%.

Tableau 3. Valeurs moyennes des paramètres étudiés chez les consommateurs journaliers de Bière en fonction des tranches d'âge et des sexes

Tranche d'âge	Effectif (%)	Valeurs moyennes des paramètres d'étude					
		GPT		GOT		GGT	
		Masculin	Féminin	Masculin	Féminin	Masculin	Féminin
21-30	14 (23,3)	25,39	23,22	29,40	25,65	18,60	26,07
31-40	16 (26,7)	38,01	36,7	37,25	28,20	54,58	30,62
41-50	10 (16,7)	47,97	44,15	50,32	34,2	54,05	44,67
51-60	8(13,3)	50,22	47,6	104,79	53,4	65,23	62,5
Moyenne		40,39±3,2	37,9±3,3	55,44±9	35,36±3,2	48,11±5,8	40,96±3,3
Ecart-type		8,87	9,33	23,92	8,85	16,29	9,26

Il s'observe dans ce tableau que les valeurs moyennes des enzymes hépatiques dosées chez les consommateurs journaliers des bières sont plus élevées chez les hommes que chez les femmes, soit de 40,39±3,2 U/l, de 55,44±9 U/l et de 48,11±5,8 U/l respectivement pour GPT, GOT et GGT contre 37,9±3,3U/l, 35,36±3,2 et 40,96±3,3.

4 DISCUSSION

La toxicité de l'alcool sur le foie peut s'exprimer à partir de doses habituellement considérées comme « modérément excessives »; cette toxicité ainsi que ses conséquences dans les champs de la Santé publique et de l'économie de la Santé sont trop peu reconnues et prises en compte en raison, entre autres, de l'insuffisance des connaissances épidémiologiques et physiopathologiques, et du manque d'outils diagnostiques et de moyens thérapeutiques.

Les résultats des analyses de notre étude réalisée dans le laboratoire de la santé publique de Gemena sur 60 consommateurs réguliers de la bière ont démontré une accélération de l'activité des enzymes hépatiques. Cette accélération ne peut être sans danger pour la santé des consommateurs. INSERM, a décrit certaines maladies généralement rencontrées chez les consommateurs de la bière avec une concentration élevée de l'alcool dans le sang en trois types:

- Stéatose : accumulation, à un degré varié, de triglycérides sous forme de macrovésicules, préférentiellement dans les hépatocytes de la zone centrale du lobule hépatique;
- Hépatite alcoolique (HA): association de nécrose hépatocytaire, d'inflammation à polynucléaires et de fibrose initialement périsinusoïdale. L'hépatite alcoolique est habituellement qualifiée d'aiguë car le tableau clinique, au moment du diagnostic, correspond le plus souvent à une forme sévère, ictérique qui s'atténue avec le sevrage d'alcool et le traitement. On ne dispose pas d'éléments permettant d'exclure formellement l'existence d'une hépatite alcoolique chronique, forme qui pourrait exister, ne serait-ce qu'à bas bruit, en cas d'alcoolisation excessive chronique;
- Cirrhose alcoolique (CA): nodules de régénération de petite taille (micronodules) entourés par de la fibrose.

Aux lésions histologiques de base, stéatose, nécrose, inflammation, fibrose, peuvent être associées d'autres lésions élémentaires: corps de Mallory (agrégats de filaments d'actine, fréquents au cours de l'HA, non spécifiques mais évocateurs de l'étiologie); mitochondries géantes (volumineuses mitochondries visibles au microscope optique); fibrose périverneulaire (fibrose autour de la veine centrolobulaire); ballonnisation cellulaire (hépatocytes de grande taille, considérés comme en voie de destruction).

D'un point de vue clinique, la stéatose peut exister seule ou en association avec une HA ou une cirrhose. La cirrhose peut être associée à une HA, et les HA sévères sont habituellement observées chez les patients cirrhotiques.

Pour les anatomopathologistes, l'HA peut être classée en trois degrés de sévérité histologique: mineure, modérée, majeure (Anonyme, 1981). En pratique clinique, et surtout aux États-Unis, seule la forme sévère, ictérique, est qualifiée d'hépatite alcoolique, sans doute en raison des insuffisances diagnostiques qui seront évoquées plus bas.

Ce groupe des symptômes sont de plus en plus présents à Gemena malgré les moyens diagnostics limités, la plupart des ceux-ci sont assimilés aux hépatites B et C. Ces paramètres sont mal connus pour deux motifs essentiels. Premièrement, le diagnostic de maladie alcoolique du foie n'est souvent pas posé pour des raisons diverses: maladies souvent asymptomatiques ou avec des perturbations mineures n'engageant pas à la poursuite des investigations; lieux de prise en charge des malades de l'alcool insuffisamment médicalisés; raisonnement médical circulaire estimant qu'il est inutile de procéder à des investigations complémentaires étant donné que tout s'améliorera avec le sevrage. En second, on dispose de très peu de données sur le plan histologique, en raison de l'absence de suivi à long terme de ces patients et, là encore, de la réticence à pratiquer un examen histologique dont l'intérêt n'apparaît pas évident.

Chez les consommateurs excessifs hospitalisés, une des études prospectives les plus complètes a été effectuée en Île-de-France dans un service d'hépatogastroentérologie. Entre 1982 et 1995, la réalisation d'une biopsie hépatique a été proposée à tous les sujets hospitalisés, consommateurs excessifs (définis par une consommation supérieure à 50 g/j) ou ayant une cirrhose alcoolique sur des arguments clinicobiologiques (Naveau et coll., 1999b). Sur les 3 346 inclus, 2 108 ont eu une biopsie hépatique: 34 % avaient une cirrhose alcoolique, 45 % une stéatose associée ou non à de la fibrose, 9 % une hépatite alcoolique aiguë et 11 % un foie normal, alors qu'il existait des anomalies biologiques; parmi les 1 238 patients n'ayant pas eu de biopsie, 44 % avaient probablement une cirrhose, 51 % n'en avaient probablement pas et 5 % n'avaient pas d'anomalies biologiques. Cette série présente évidemment un certain nombre de biais, le premier étant lié à la nature du service, hépatogastroentérologique, qui conduit à augmenter le recrutement pour cirrhose dont le taux est ici particulièrement élevé: 34 % chez les patients biopsiés et 44 % chez ceux ne l'ayant pas été. Toutefois, si l'analyse est restreinte aux patients dont le motif principal de consultation était l'alcoolisme (n = 1 501), le pourcentage de cirrhose était égal à 16,3 %, chiffre « moyen » par rapport à ceux disponibles. Moins poussée, notre étude s'est consacrée à ressortir les valeurs de GPT, GOT et GGT dans le serum en vue de se rendre compte des perturbations de l'activité des enzymes hépatiques. Les résultats très éloquentes de

cette étude, doivent pousser à approfondir davantage les analyses auprès de ce groupe ciblé ou encore incorporés les autres cibles dans cette analyse.

Des estimations ont été effectuées à partir de séries autopsiques, séries anciennes et d'intérêt limité car la définition de l'alcoolisme était très imprécise. La prévalence de la cirrhose chez les consommateurs excessifs variait 1,2 % à 27,9 % (Leibach, 1975). Toutefois, l'analyse des séries montre que la fréquence de cirrhose est au moins 7 fois plus élevée chez les consommateurs excessifs. Ces données sont non présentes dans le contexte des pays en voie de développement, le cas de la RDC et de la ville de Gemena en particulier.

A défaut d'un bilan biologique (aspartate aminotransférase (ASAT), alanine aminotransférase (ALAT), VGM, GGT, plaquettes, marqueurs du virus B et du virus C) et un interrogatoire détaillé sur l'alimentation et la consommation d'alcool. La prévalence d'une atteinte hépatique dans le contexte de notre étude reste non estimée. Par contre, le risque de présenter une maladie hépatique (sans précision) reste significativement élevé dès la tranche de consommation d'alcool allant de 30 à 60 g/j ce qui correspondrait à une consommation de 3 à 5 bouteilles de Castel par jour.

Dans une autre étude réalisée au Danemark (Thulstrup et coll., 1999) où il a été analysé la prévalence des anomalies enzymatiques hépatiques (ASAT, ALAT, GGT) en fonction de l'âge, du sexe, de la consommation déclarée d'alcool et de tabac, de l'indice de masse corporelle (IMC: poids/taille²), et l'évolution de ces anomalies sur une année dans une cohorte représentative constituée de 822 personnes âgées de 30 à 50 ans. La prévalence cumulée d'anomalies d'une des trois enzymes était de 11,1 %, sans que soit précisée la consommation d'alcool de ce sous-groupe. Au bout d'une année de surveillance, 34 % de ceux ayant initialement un bilan perturbé avaient normalisé ce dernier, sans qu'il soit possible à la lecture de l'article de déterminer la consommation d'alcool de ce sous-groupe; à l'inverse, 5 % de ceux n'ayant pas initialement d'anomalies avaient un bilan perturbé en fin d'étude. Au total, le nombre absolu de sujets ayant des anomalies était à peu près le même en début et en fin d'étude, mais un tiers de l'effectif avait été renouvelé. La consommation médiane d'alcool de ceux qui gardaient un bilan perturbé tout au long de l'étude était de 13 verres/semaine contre 6 chez ceux qui avaient constamment un bilan normal. Le risque de survenue d'anomalies enzymatiques (chez ceux ayant un bilan initial normal) était multiplié par 4 chez les hommes et par 8 chez les femmes lorsque la consommation initiale rapportée était supérieure à 21 verres/semaine.

Au total, l'adage qui a longtemps été enseigné, c'est-à-dire que la répétition des hépatites alcooliques conduit à la cirrhose par nécroses successives et remplacement des tissus nécrotiques par de la fibrose, est remis en question par les quelques travaux prospectifs disponibles, qui suggèrent que des lésions de stéatose peuvent revêtir un caractère pronostique péjoratif lorsqu'elles sont sévères. Il pourra certes toujours être argué qu'une hépatite alcoolique *a minima* a été méconnue, mais cela ne changera rien aux constats: à l'échelon du groupe, et à un stade relativement précoce de l'hépatopathie, on peut disposer d'éléments pronostiques d'évolution à l'examen anatomopathologique. Cela renforce la nécessité de pratiquer une évaluation histologique hépatique chez les consommateurs excessifs d'alcool.

On dispose sur ce sujet d'enquêtes cas-témoins ou d'analyses de cohortes, études se heurtant à des difficultés méthodologiques limitant la fiabilité des conclusions. Quatre obstacles sont délicats à résoudre:

- La reconstitution de la consommation d'alcool au cours de la vie; en effet, se borner à obtenir une consommation au cours des mois précédents l'enquête n'a guère d'intérêt dans la mesure où l'expérience clinique montre qu'une fois la cirrhose constituée, la consommation d'alcool est spontanément réduite, même si elle reste excessive. De plus, le type de boisson, les niveaux et le mode de consommation peuvent varier au cours du temps et il n'est pas exclu que ces paramètres puissent intervenir dans le risque de survenue de la cirrhose. Cela impose de mener des interviews en tête-à-tête: il existe à cet effet des procédures validées qui sont toutefois de diffusion confidentielle, en raison non de leur complexité mais du temps qu'il faut y consacrer (la reconstitution de la consommation d'alcool sur la vie demande au moins 30 à 40 minutes);
- la sélection des cas: une critique qui peut être formulée à l'égard de plusieurs travaux anciens ou récents est que les « cas » sélectionnés sont des patients ayant une cirrhose compliquée d'ascite et d'œdème, situation qui n'est probablement pas représentative de l'ensemble des cirrhoses;
- Le choix du groupe témoin, qui doit être constitué de consommateurs excessifs appariés sur l'âge, le sexe, la consommation { et sans cirrhose: cependant, comment s'assurer de l'absence de cirrhose ou de fibrose extensive sans réalisation d'une biopsie hépatique, examen dont la justification diagnostique est discutée en l'absence de signes d'appel ?
- Dans le cas de cohortes, le relevé de la consommation d'alcool est effectué par questionnaire, en général adressé par voie postale, ne tenant compte que de la consommation actuelle; d'autre part, la consommation n'est évaluée qu'en début d'enquête et on ne peut exclure qu'elle varie au cours du temps étant donné la durée de la période d'observation (jusqu'à 10 ans).

S'il convient donc d'aborder les enquêtes disponibles avec une certaine prudence, elles permettent néanmoins de dégager certaines tendances.

Dans un autre travail rétrospectif mené aux États-Unis et portant sur 1 % des décès survenus au cours d'une année, il était observé que 40 % des patients décédés de cirrhose, quelle qu'en soit l'étiologie, consommaient plus de 5 verres/j (60 % en cas de cirrhose alcoolique), alors que seuls 10 % des sujets décédés d'autre cause avaient le même profil de consommation (Parrish et coll., 1993).

Dans une étude cas-témoins (stéatose ou cirrhose histologiquement confirmée, $n = 151$ versus sujets bien portants non hospitalisés, $n = 619$) menée au Canada, le risque de stéatose ne devenait significatif qu'à partir de 80 g d'alcool/j chez les hommes (OR = 50,5) et 20 g/j chez les femmes (OR = 2,82); le risque de cirrhose devenait significatif à partir de 60 g/j chez les hommes et 20 g/j chez les femmes (Coates et coll., 1986).

Une étude cas-témoins (sujets présentant une cirrhose décompensée versus patients hospitalisés pour une pathologie aiguë sans rapport avec une consommation excessive d'alcool) a été menée en Italie sur 702 patients (Corrao et Arico, 1998). La consommation d'alcool était évaluée sur la vie entière, par tranche de dix ans. L'*odds ratio* de cirrhose décompensée n'était pas augmenté pour les consommations inférieures à 50 g/j, en revanche, il était égal à 4, 5 pour une dose comprise entre 75 et 100 g/j et continuait d'augmenter au-delà; les auteurs ne fournissent pas de résultats pour la tranche 50-75 g/j. Dans un travail similaire mené par le même groupe, l'OR de cirrhose décompensée devenait significatif à partir de 125 g d'alcool/j (Arico et coll., 1995).

Un travail s'est intéressé au risque de développer une atteinte hépatique non cirrhotique en fonction de la consommation d'alcool. Le risque augmentait dans chaque tranche de consommation (25-50, 75-100, 125-150, = 175 g/j) en fonction de la durée de consommation tant que cette dernière n'était pas supérieure à 30 ans, puis diminuait (Corrao et coll., 1991); un biais expliquant cette curieuse diminution du risque pourrait être que, dans le groupe ayant une durée de consommation longue, les cas « non cirrhotiques » sont rarissimes.

Quant à la durée de consommation d'alcool, la cirrhose alcoolique est une maladie de constitution progressive, Leibach, en 1975 avait estimé que le temps nécessaire pour le développement d'une cirrhose est estimé à 20-25 ans; cette évaluation repose sur des arguments bien sûr indirects, étant donné qu'il faudrait disposer d'une cohorte dans laquelle une évaluation histologique du foie aurait été régulièrement effectuée, pour avoir des données précises. L'estimation repose sur la durée moyenne de consommation d'alcool avant que le diagnostic de cirrhose ne soit porté, comprise entre 20 à 25 ans; l'âge moyen des patients, 50-60 ans, au moment où le diagnostic de cirrhose est porté pour la première fois (Naveau et coll., 1999b; Tuyns et coll., 1984; Rotily et coll., 1990); l'augmentation du taux de cirrhose en fonction de la durée de consommation excessive: 0 % pour une durée < 5 ans, environ 10 % pour une durée de 5 à 10 ans, 50 % pour une durée > 15 ans (Leibach, 1975); la mortalité par cirrhose alcoolique qui est maximale pour la tranche d'âge 55-74 ans (Michel et coll., 1997). Au total, le foie offre une résistance à la toxicité de l'éthanol pendant de nombreuses années: ceci est un atout pour mener des actions de prévention secondaire, mais également un inconvénient dans la mesure où l'absence de complications organiques symptomatiques freine l'entrée des consommateurs excessifs dans le système de soins.

Concernant le Type de boisson consommée, la toxicité hépatique de l'éthanol est la même quel que soit son mode de présentation (vin, bière, whisky {}); la véracité de ce dogme énoncé il y a une quinzaine d'années (Tuyns et coll., 1984) a été récemment mise en question par deux études épidémiologiques suggérant que le risque de cirrhose pourrait être diminué chez les consommateurs de vin. Une enquête prospective danoise menée sur une cohorte de plusieurs milliers de personnes a montré que, à quantité d'alcool pur absorbée égale, les buveurs consommant 30 % à 50 % de la dose sous forme de vin avaient un risque relatif de cirrhose significativement diminué (Becker, 1998); une tendance similaire, quoique non significative, a été récemment rapportée aux États-Unis dans une étude transversale portant sur plus de 40 000 sujets (Chou et coll., 1998).

Ces travaux épidémiologiques présentent un certain nombre d'imperfections concernant les moyens mis en œuvre pour porter le diagnostic de maladie alcoolique du foie, la définition d'une consommation excessive d'alcool et la prise en compte des moments de consommation dans la journée par rapport aux repas. Néanmoins, on ne peut négliger ces résultats. En effet, le vin contient en quantité variable des polyphénols, composés ayant un pouvoir antioxydant. Parmi ceux-ci est le resvératrol (3,5,4'-trihydroxystilbène), formé à la suite d'une infection par un champignon (*Bothrytis cinerea*), d'une irradiation par les ultraviolets ou de l'exposition à l'ozone. Le trans-resvératrol a des propriétés antioxydantes, antiprolifératives et antifibrosantes (Delmas et coll., 2000) et est capable *in vitro* de diminuer l'état d'activation des myofibroblastes hépatiques, donc potentiellement la fibrogenèse (Godichaud, 1998). Par ailleurs, comme cela a été dit plus haut, la mortalité par cirrhose est moindre dans les régions du sud de la France, réputées consommer plutôt du vin, contrairement au nord du pays où la consommation de bière prévaudrait.

Deux résultats vont toutefois à l'encontre de ces arguments. Dans l'étude de Bellentani et coll. (1997) portant sur les habitudes de consommation au cours de la journée, le type de boissons était détaillé: il n'était pas noté par les auteurs de risque moindre de MAF chez les buveurs de vin, en revanche, ceux qui mélangeaient les différents types de boissons avaient un risque accru par rapport aux buveurs monotypes. Enfin, chez le rat alcoolisé, la supplémentation en polyphénols issus du raisin

Pour ce qui est du sexe, les femmes sont plus sensibles à l'hépatotoxicité de l'alcool que les hommes. Elles développent une cirrhose pour une quantité d'alcool consommée (Mezey et coll., 1988) et une durée d'alcoolisation moindres; leur risque relatif de cirrhose est multiplié par 2 (Corrao et coll., 1997) par rapport aux hommes. Cette constatation est également faite chez les animaux (Iimuro et coll., 1997a). Les mécanismes à l'origine de cette sensibilité accrue ne sont pas encore connus avec précision, bien que certaines différences liées au sexe aient été identifiées: moindre activité de l'alcool déshydrogénase gastrique chez la femme (Frezza et coll., 1990); augmentation du taux d'endotoxine d'origine intestinale après absorption d'alcool chez le rat femelle par rapport au rat mâle (Kono et coll., 2000).

Quant à l'Âge, l'influence de l'âge sur la survenue d'une MAF ou d'une cirrhose alcoolique est mal connue. Chez le rat, on observe, en fonction de l'âge, une diminution progressive des capacités métaboliques de l'alcool (Fernandez et coll., 1988), cette dernière s'accompagnant d'une réduction globale du potentiel oxydant comme l'atteste la baisse de la peroxydation lipidique engendrée par l'alcool (Videla et coll., 1987). Cela suggère au premier abord que la toxicité hépatique directe de l'alcool pourrait s'atténuer avec l'âge; toutefois, d'autres mécanismes viennent contrebalancer ce possible effet: le contenu hépatique en glutathion est diminué et les animaux âgés sont extrêmement sensibles aux endotoxines. En effet, l'injection de ces dernières à des rats âgés entraîne le décès dans 100 % des cas alors qu'il est peu fréquent chez les plus jeunes; à l'histologie, on note une nécrose hépatocellulaire étendue ainsi qu'une nécrose tubulaire rénale (Horan et coll., 1991). Chez l'être humain, on ne dispose guère de données cliniques. Par analogie avec les hépatopathies chroniques virales dans lesquelles la rapidité de progression augmente avec l'âge (Pol et coll., 1998), on peut faire l'hypothèse raisonnable qu'il en est de même avec l'alcool.

En termes de traitement, le traitement le plus pertinent est préventif et consiste à promouvoir la modération de la consommation dans les limites préconisées par l'OMS. C'est l'objectif des campagnes de prévention dont l'efficacité est difficile à évaluer. Un autre objectif pourrait être d'inciter les consommateurs excessifs d'alcool à consulter plus tôt, à un stade où les lésions organiques sont encore réversibles. Entre 1982 et 1995, la fréquence des cirrhoses et des HA chez les patients consommateurs excessifs d'alcool hospitalisés dans un service d'Île-de-France a eu tendance à augmenter (Naveau et coll., 1999b).

Les consommateurs excessifs échappent pendant longtemps au système de soins pour de multiples raisons, dont la première est l'absence de symptômes et de conséquences apparentes de leur alcoolisation: dans les centres de prise en charge spécialisés (CCAA), la moyenne d'âge des « nouveaux » arrivants se situe autour de 40-45 ans (Association nationale de prévention de l'alcoolisme) et leur durée moyenne d'alcoolisation excessive est d'environ 10 à 15 ans. À défaut de repérage et d'interventions précoces sur la variable « consommation », il est licite de s'interroger sur les moyens existants qui pourraient « protéger » le foie contre l'hépatotoxicité de l'éthanol dans l'attente de la concrétisation d'une prise en charge alcoolologique. Cette approche, *a priori* provocatrice, est à l'alcool ce que le programme d'échanges des seringues (ou le Stéribox) est à la toxicomanie intraveineuse: puisqu'on ne peut durablement modifier le comportement d'un individu contre sa volonté, cherchons à diminuer les conséquences des prises de risque.

Les informations disponibles en ce domaine proviennent de l'expérimentation animale car, pour des raisons éthiques bien évidentes, on n'imagine guère un investigateur proposer chez l'homme un protocole impliquant une alcoolisation excessive prolongée sur plusieurs années ! Deux pistes méritent de s'y attarder.

La consommation de bières est un phénomène croissant en RD Congo notamment à Gemena, dans la Province du Sud-Ubangi.

Nous suggérons que des études ultérieures prospectives plus larges comme des études cohortes et randomisées utilisant de grands échantillons et intégrant plusieurs variables soient menées.

REFERENCES

- [1] Alamowitch C, Pelletien X, boryx-JM, effets de la consommation de bière sur le poids et la prise alimentaire des jeunes femmes en bonne santé.
- [2] ANONYME. Les Inégalités sociales de santé. LECLERC A, FASSIN D, GRANDJEAN H, KAMINSKI M, LANG T, eds. INSERM, La Découverte, 2000.

- [3] ATTALI P, PROD'HOMME S, PELLETIER G, PAPOZ L, BUFFET C, ETIENNE JP. Carcinomes hépato-cellulaires en France. Aspects cliniques, biologiques et virologiques chez 197 malades. *Gastroenterol Clin Biol* 1985, 9: 396-402.
- [4] Basosila LN, 2007, cours de chimie analytique destiné aux étudiants de G2 labo. Inédit. ISTM/KIN, Kinshasa.
- [5] BECKER U. Liver disease. Importance of gender and type of alcohol. *Alcoholism Clin Exp Res* 1998, 22 (S): 139A (abstract).
- [6] Bernard M, 1961, chimie minérale, 2 éd. Paris, P.406
- [7] Blastien O, la douceur B et laniel h, 1969, chimie générale, éd. Revue et corrigée, Montréal, P.544
- [8] Boirie Y, Wqlrand S, Beaufrère B.: Control of amino acid metabolism by lipids, ketone bodies, and glucose substrates. In *Metabolic and therapeutic aspects of amino acids in Clinical Nutrition*, LA Cynober éd, CRC Press, Boca Raton 2004, 241252.
- [9] Buddecke E. Grundrig der Biochimie, Berlin, 9^{ème} édition, 1994.
- [10] Bulow, J. (1982). Subcutaneous adipose tissue blood flow and triacylglycerol mobilization during prolonged exercise in dogs. *P. flugers Arch*, 230-234.
- [11] Couinaud C, Le foie, Etude anatomiques et Chirurgicales. Masson et Cie, édit, paris 1957.
- [12] Delannoy P. Cours de biochimie: Métabolisme des glucides. <https://spiralconnect.univlyon.id=387325/>.
- [13] Domagk Gf. GK1 Biochimie, Stuttgart, 13^{ème} édition, 1999.
- [14] EASTIN CE, MCCLAIN CJ, LEE EY, BAGBY GJ, CHAWLA RK. Choline deficiency augments and antibody to tumor necrosis factor-alpha attenuates endotoxin-induced hepatic injury. *Alcohol Clin Exp Res* 1997, 21: 1037-1041.
- [15] FERNANDEZ V, KRIZ A, VIDELA LA. Age-dependent changes in in vivo ethanol metabolism and in the activity of hepatic enzymes involved in ethanol oxidation and microsomal functions. *Cell Biochem Funct* 1988, 6: 7-12.
- [16] FONG TL, KANEL GC, CONRAD A, VALINLUCK B, CHARBONEAU F, ADKINS RH. Clinical significance of concomitant hepatitis C infection in patients with alcoholic liver disease. *Hepatology* 1994, 19: 554-557.
- [17] Frenot M, Veilling F, 1997, biochimie des éléments diététiques du sujet bienportant éd. Dom, bordeaux, p.25.
- [18] James WPT. ---Alcohol: its metabolism and effets. In: Garrow JS and James WPT (eds) *Human Nutrition and Dietetics*, 9th edn. Churchill Livingstone, Edinburgh, 1993, 103-118.
- [19] Labbe D et al, 1993, annals du controle de qualités biochimiques, éd. Bio 93, paris, p 13, 35-47.
- [20] Mario d'Er, 2000. Epocesailles bière et fromages, guide d'accords et de dégustation, autrement, éd. Trécarré, p. 256.
- [21] OMANYONDO OHAMBE, cours de la Méthodologie de Recherche Scientifique, L1 santé communautaire, ISTM GNA, 2021.
- [22] Paquet N, DeFlines J, Scheen AJ. ---L'alcoolisme, un modèle d'addiction aux complications somatiques multiples. *Rév Med Liege*, 2013, 68, 272280.
- [23] Pierre J.Courtejoie Nzangu Maringa, Rapport Technique n° 650 d'un comité d'expert de l'OMS. Problèmes liés à la consommation d'alcool « alcoolisme » BEPERS Kangumayumbe 2003.

