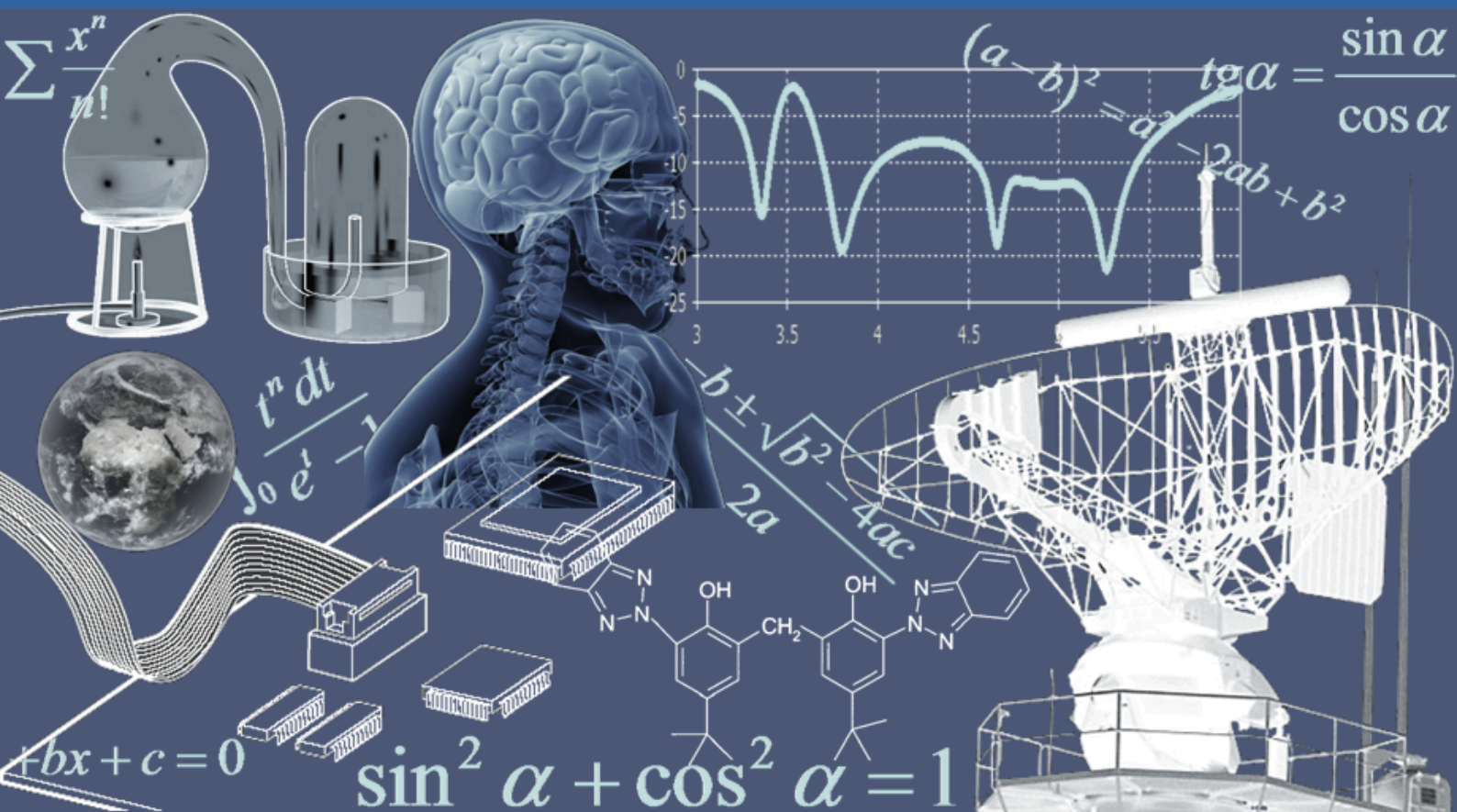


INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION AND APPLIED STUDIES

Vol. 48 N. 1 March 2026



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 Kavroudakakis, 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 Bumerdes, 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

Innovation and Technology Management in Power Systems Organizations <i>Jean-Michel Mufuta Mukena</i>	1-5
La Responsabilité Sociétale des Organisations dans le secteur public: Le cas de l'ANAPEC in Morocco <i>Iaouad EL MAZOUZI</i>	6-21
Hydro-sedimentary and geochemical dynamics of the Agnéby River (Côte d'Ivoire): Implications for coastal systems and the blue economy <i>Lou Brou Cécile KOUAME, Aka Natchia, and Kotchi Rodrigue OROU</i>	22-31
Development and Physico-Mechanical Characterization of an Innovative Ternary Composite Based on Low-Density Polyethylene Waste, Sanaga Sand, and Coconut Shell Powder Using an Artisanal Process for Sustainable Construction <i>Kontchou Herman Fredy, Kenmeugne Bienvenu, Annouar Djidda Mahamat, Tchikdje Kouekem Marthe Prudence, and Essome Mbang Jonas Peequeur</i>	32-40
Caractérisation physico-chimique et organique des effluents drainés par le réseau d'Assainissement de la ville d'Abidjan de 2020-2023 <i>Zié Anicet Ouattara, Gbombebe Soro, Bernard Ossey Yapo, and Solange Marie Yéi Oga</i>	41-56
Accuracy determination of Zij and Yij parameters of integrated passive components using WK6500B impedancemeter <i>D.A. Oumar, M.I. Boukhari, N.I. Mariam, S. Capraro, and J.J. Rousseau</i>	57-63
Dynamique de l'occupation des terres dans le système agricole de la commune de Kéllé au Niger <i>Ibrahim Souley Malam Zanaidou, Lawandi KANEMBROU, Hammadou Younoussa Bachirou, Waziri Mato Maman, and Garba Zibo</i>	64-79
Combinaison d'engrais organiques et/ou minéral sur la culture du maïs à Daloa (Côte d'Ivoire) <i>Moreto Salla, Soro Kouhana, GNAMIEN Yah Gwladys, Coulibaly Assita, and Traore-Ouattara Karidia</i>	80-91
Influence du gap optique et de l'affinité électronique du ZnSe sur les performances des cellules solaires CIGS <i>Youssou Gning, Alioune Ngom, Moussa Toure, Mouhamadou Sam, Emmanuel Namena, and Mamadou Lamine Samb</i>	92-108
Evaluation de l'exposition au bruit chez les travailleurs d'une compagnie minière au Sénégal <i>Bocar Baila Diédhiou, Armandine Eusebia Roseline Diatta, H. Touré, and M. Ndiaye</i>	109-116
Land use mapping in the Sébi-Ponty watershed, Senegal <i>Rokhaya Diouf, Vieux Boukhaly Traore, Hyacinthe Sambou, Mamadou Lamine Ndiaye, and Bienvenue Sambou</i>	117-129
Évaluation des connaissances des femmes enceintes vues lors du suivi prénatal sur la nutrition maternelle à Bobo-Dioulasso (Burkina Faso) <i>Bassirou Doussa, Boubacar Savadogo, Bamory Ouattara, and Anne Lise Viviane Toe</i>	130-139
Biomasse aérienne et capacité de séquestration de carbone dans un système agroforestier de la Réserve de Biosphère de Luki, RD Congo - Kongo central <i>Diansambu Makana Isaac, Vangu Dimbi Daniel, Phanzu Mbundu Maurice, Mbungu Phaka Christophe, Ngoma Mvuezolo Antoine, Nimi Nimi George, Tisu Phaku Jospin, Mahanga Mahanga Alphonse, and Myumbi Sylvain Mavinga</i>	140-149
Experimental study of the thermal performance of a hybrid photovoltaic-thermal collector <i>Combari Pagou Hartwig, Djiguemde Bagre Sara, Dianda Boureima, Traore Damus Abdoul Aziz, Tamboura Alou, and Iname Allasane</i>	150-158
Comparaison de quatre techniques de pollinisation sur la maintenance phénotypique de lignées épurées du maïs (Zea mays L.) à Kinshasa <i>Christophe Asanzi Mbeyame, David Nsimba Nsiku, and Marie-Thérèse Kilima Salima</i>	159-177
A New One-Dimensional Polynomial-Sinusoidal Chaotic Map for Image Cryptography <i>Ahmat Mahamat Saleh, Kalsouabe Zoukalne, Mahamat Charfadine Nimane, and A. Mounqache</i>	178-193
Facteurs psychosociaux du recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical dans la ville de Moundou au Tchad <i>Ngadandé Madjita and Kamdem Kamgno Helene</i>	194-212
Contamination des sols et risque écotoxicologique associés aux herbicides en zones céréalières de l'Ouest du Burkina Faso	213-222

Bazoma BAYILI, Koama Bayili, Bernard Koursangama, Tédéhouaouga Bazongo, Hyacinthe Dipina Ki, Bazoumana Sow, Roch Kounbohr Dabire, and Abdoulaye Diabate

Management of available phosphorus in tropical ferruginous soils through the application of « Neyma » compost in the northern Sudanese zone of Burkina Faso 223-234

Jacques Bazemon, Mamoudou Traoré, and Hassan Bismarck Nacro

From Plastic Waste to Employment Opportunities for Youth and Urban Sanitation in Bukavu 235-245

Benjamin Aganze Marhegane, Josias Aganze Kaneza, Irène Furaha Kaningu, Mireille Mugalihya Bulonza, Clarisse Mubagwa Bachunve, and Jean-Pierre Cirimwami Kashangabuye

Analyse de la classification des déchets hospitaliers dans les hôpitaux du territoire de Lubao: Conformités aux normes et défis de gestion 246-250

Alexandre Munkindji Kabemba, Bonaventure Lele Niami, Alphonse Kambi Dibaya Okito Longo, Elie Fuamba Ngoyi, and Godefroid Kalonda Kabemba

Sensibilisation à une gestion durable des ressources en eau dans un lycée francevillois au Gabon 251-263

Madi Guirema Abaker, Donald Romarick Rotimbo Mbourou, Estelle Dumont, Davy Silas Mbadinga, and Eléonord Mounques

Incidence des écotaxes sur la gestion rationnelle des déchets ménagers et assimilés dans une entité territoriale décentralisée: Cas de la ville de MBUJIMAYI (RDC) 264-273

MUYA MULUMBA Sammy

Etude ethnobotanique et évaluation in vitro des activités antifongiques des extraits aqueux et hydro-éthanoliques de trois plantes médicinales ivoiriennes sur des germes fongiques responsables de mycoses superficielles en Côte d'Ivoire 274-287

KOUASSI Kouassi Germain, Bolou Gbouhoury Eric-Kevin, KONAN Gbé Kouakou N'Dri Ange, YAPO Yomeh Cynthia Viviane, AKA ANY-GRAH Adjoua Sandrine Armelle, and ZIRIHI Guédé Noel

Étude, à partir des indices, de la variabilité hydroclimatique du bassin versant au sud du fleuve Saloum au Sénégal 288-300

Ndiakhate Gueye, Papa Babacar Diop Thioune, and Ibra Kandji

Innovation and Technology Management in Power Systems Organizations

Jean-Michel Mufuta Mukena

Innovation and Technology Consultant, Engineering Specialist (former Saudi Aramco), Brussels, Belgium

Copyright © 2026 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: Power systems are undergoing rapid transformation driven by decarbonization, digitalization, decentralization, and rising electricity demand. Innovation and technology management (ITM) is essential for utilities to adopt emerging technologies, integrate renewable energy, and maintain grid reliability. Key innovation areas include renewable and hybrid generation, advanced transmission systems, smart distribution networks, energy storage, and digital solutions such as AI, IoT, and digital twins. Utilities use frameworks like the Technology Life Cycle, Open Innovation, and Dynamic Capabilities to guide technology adoption. However, regulatory constraints, legacy infrastructure, cost barriers, and skill gaps continue to limit progress. Looking ahead, autonomous grid operations, digital substations, hydrogen integration, and grid-forming inverters will define the next stage of the energy transition.

KEYWORDS: technology, Innovation, power systems, management.

1 INTRODUCTION

Innovation and technology management (ITM) has become essential for power systems organizations in response to rapid technological advances, environmental pressures, and rising electricity demand. Power systems—including generation, transmission, distribution, and end-use—are experiencing a major transformation driven by renewable energy integration, digitalization, decentralization, and decarbonization. Effective ITM enables utilities to identify emerging technologies, enhance operational efficiencies, and improve system reliability while advancing sustainability goals. Recent studies highlight the importance of strategic, organizational, and technological innovation in shifting conventional, centralized utilities toward smart, flexible, and consumer-centric systems [1].



Fig. 1. Innovation and Technology

2 STRATEGIC IMPORTANCE

The modern power sector is shaped by global megatrends that fundamentally alter the design and operation of electricity systems:

- Decarbonization, supported by renewable integration and emissions regulations.
- Digitalization through IoT, AI, and data analytics.
- Decentralization driven by distributed energy resources such as rooftop PV, batteries, and microgrids.
- Electrification arising from the growth of EVs, heat pumps, and industrial electrification.
- Resilience needs due to extreme weather events and growing cyber-threat exposure.

Innovation management ensures that organizations can proactively and cost-effectively address these shifts while maintaining high reliability standards.

3 THEORETICAL FOUNDATIONS OF INNOVATION MANAGEMENT

The theoretical foundations of innovation management provide a framework for understanding how organizations adopt, develop, and scale new technologies.

3.1 TECHNOLOGY LIFE CYCLE (TLC)

The TLC framework guides organizations through phases of research, development, deployment, and commercialization. Utilities apply TLC to evaluate renewable energy systems, storage technologies, and grid automation solutions [2].

3.2 OPEN INNOVATION

The open innovation model encourages collaboration between utilities, startups, universities, and R&D laboratories to accelerate technology development and adoption. Evidence from utilities worldwide shows that open innovation enhances technological competitiveness and promotes faster integration of digital and renewable solutions [3].

3.3 DYNAMIC CAPABILITIES THEORY

Dynamic capabilities refer to a firm's ability to sense new opportunities, seize them, and reconfigure internal processes to adapt to change [4]. In the power sector, dynamic capabilities support digital transformation, DER integration, and system flexibility enhancement.

3.4 TECHNOLOGY READINESS LEVELS (TRLs)

TRLs are used to assess the maturity of technologies such as smart meters, grid-forming inverters, digital substations, and hydrogen-based systems [5]. Technology Readiness Levels (TRLs) are commonly expressed on a standardized scale ranging from 1 to 9, representing the maturity of a technology from fundamental research through development and final deployment.



Fig. 2. Technology Readiness Levels (TRLs)

4 KEY AREAS OF TECHNOLOGY INNOVATION

The areas of technology innovation presented below are derived from both practical exposure and a comprehensive survey of relevant literature.

4.1 GENERATION TECHNOLOGIES

Advances in power generation include the integration of solar, wind, hydro, and geothermal technologies, supported by hybrid renewable-energy plants that combine intermittent resources with energy storage [4]. Additional innovations include hydrogen-ready turbines and carbon capture and storage (CCS) systems for deep decarbonization [7].

4.2 TRANSMISSION INNOVATIONS

Modern transmission systems require enhanced control, stability, and long-distance power transfer capabilities. Innovations such as high-voltage DC (HVDC) transmission, flexible AC transmission systems (FACTS), wide-area monitoring systems using phasor measurement units (PMUs), and dynamic line rating technologies enable secure and efficient grid operations [8].

4.3 DISTRIBUTION SYSTEM TECHNOLOGIES

Distribution networks are becoming more intelligent through the adoption of Advanced Distribution Management Systems (ADMS), smart meters, AMI, distribution automation, and DERMS. These technologies support bi-directional energy flows and allow utilities to better manage rooftop solar, battery systems, and microgrids [9].

4.4 ENERGY STORAGE & FLEXIBILITY

Energy storage technologies—including lithium-ion batteries, flow batteries, pumped-hydro storage, and thermal storage—enable higher penetration of renewables and provide system flexibility [4]. Demand Response (DR) mechanisms and Virtual Power Plants (VPPs) further enhance flexibility and load balancing [10].

4.5 DIGITAL TECHNOLOGIES

Digital technologies support forecasting, optimization, and real-time control of power systems. AI and machine learning improve load forecasting, predictive maintenance, and distributed generation management [1]. IoT sensors enhance asset condition monitoring, while digital twins provide simulation and optimization capabilities. Blockchain-based platforms are emerging for peer-to-peer energy trading [12]. Cybersecurity systems protect critical digital infrastructure [13].

5 PROCESSES FOR MANAGING INNOVATION

The processes for managing innovation outline how organizations identify, evaluate, test, and deploy emerging technologies effectively.

5.1 TECHNOLOGY SCOUTING

Utilities increasingly monitor global technology trends, collaborate with innovation hubs, and form partnerships with startups and universities to identify emerging opportunities. Technology scouting is fundamentally driven by the strategic and operational challenges faced by the organization, ensuring that the technologies identified directly address those needs.

5.2 PORTFOLIO MANAGEMENT

Innovation portfolios must balance low-risk operational improvements with long-term disruptive technologies. Tools such as TRLs, cost-benefit analyses, and structured risk assessments support prioritization [8].

5.3 R&D AND COLLABORATION

Collaboration through joint ventures, public–private partnerships, and participation in international research bodies (such as IEEE PES and CIGRÉ) enhances access to technology expertise and promotes innovation diffusion.

5.4 PILOT TESTING & PROTOTYPING

Scouted technologies are required to undergo rigorous testing to ensure their full functionality and compatibility with the organization's environmental and operational conditions. Regulatory sandboxes, demonstration projects, and digital twin environments enable utilities to test new technologies in controlled settings [5].

5.5 SCALING AND ADOPTION

Successful scaling requires organizational change management, workforce training in digital and renewable-energy technologies, and standardized procurement frameworks to ensure interoperability.

6 ORGANIZATIONAL STRUCTURES FOR INNOVATION MANAGEMENT

Common organizational structures supporting innovation include:

- Chief Technology Officer (CTO) or innovation offices
- Digital transformation teams
- In-house R&D laboratories
- Cross-functional innovation squads
- Startup accelerators and innovation ecosystems
- Technology governance committees for cyber and interoperability management

These structures help embed innovation into organizational culture and decision-making processes.

7 BARRIERS TO INNOVATION IN POWER SYSTEMS

Barriers limiting innovation include:

- High capital requirements for pilot and demonstration projects
- Regulatory complexity and slow policy adaptation
- Risk aversion due to reliability requirements
- Legacy grid infrastructure limiting flexibility
- Data silos and interoperability issues
- ☐ Lack of digital skills within the workforce [1]

8 KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPIs)

KPIs commonly used to evaluate innovation performance include:

- System reliability measures (SAIDI, SAIFI)
- Renewable energy penetration levels
- Cost savings from digital and operational improvements
- Reduction in technical and non-technical losses
- Innovation project success and implementation rates
- R&D expenditure vs. productivity improvements
- Workforce innovation participation rates

9 EMERGING TRENDS AND RESEARCH DIRECTIONS

Emerging innovations shaping future power systems include:

- AI-driven autonomous grid operation [15]
- Fully digital substations based on IEC 61850
- Ultra-high-voltage DC (UHVDC) continental supergrids
- Vehicle-to-grid (V2G) integration for mobility-based flexibility
- Grid-forming inverters enabling 100% renewable power systems [16]
- Edge computing for decentralized control [15]
- Hydrogen-based flexibility and power-to-X systems [7]

These technologies point toward highly distributed, digital, and decarbonized future energy systems.

10 CONCLUSION

Innovation and technology management is crucial for modernizing power systems and achieving the dual objectives of sustainability and reliability. Although significant technological advancements have been made—such as AI-enhanced grid operations, renewable integration, and digital substations—organizational and regulatory challenges persist. Future research and practice should focus on holistic frameworks that integrate technology readiness, dynamic organizational capabilities, regulatory reforms, and market mechanisms to accelerate effective innovation across the energy sector.

ACKNOWLEDGMENT

Over the past eight years, my work in managing innovation and technology for a power systems organization in Saudi Arabia has provided extensive exposure to emerging solutions and global technology providers. This experience has enabled me to observe how cutting-edge innovations are integrated into real-world power systems and how organizational and technological capabilities evolve in practice.

REFERENCES

- [1] Kumar, S., Singh, A., & Jain, M. (2022). Innovation strategies for smart and sustainable power systems. *Energy Policy*, 165, 112937.
- [2] Chiaroni, D., Chiesa, V., Franzò, S., & Frattini, F. (2010). Unintended consequences of moving to open innovation in the electricity industry. *R&D Management*, 40 (4), 414–430.
- [3] Chesbrough, H. W. (2003). *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Harvard Business School Press. /Liyanage, S., et al. (2020). Open innovation in the energy sector: Opportunities for utilities and technology developers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [4] Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities for sustainable enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28 (13), 1319–1350.
- [5] OECD/IEA. (2020). *Innovation in Energy Systems: Insights for the Clean Energy Transition*.
- [6] Gallo, A. B., Simões, M. G., Costa, H. K. M., & Santos, W. C. (2016). Energy storage in the energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 800–822.
- [7] Hydrogen Council. (2021). *Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen's role in future energy systems*.
- [8] Van Hertem, D., & Ghandhari, M. (2010). Multi-terminal VSC HVDC transmission for the European supergrid: Obstacles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [9] Akhavan-Hejazi, H., & Mohsenian-Rad, H. (2018). Power systems big data analytics: Survey of applications and methodologies. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [10] Hledik, R., & Faruqui, A. (2020). *Demand response and system flexibility: Analysis and emerging trends*. The Brattle Group.
- [11] Ahlström, H., & O'Neill, R. (2021). Digitalization of the electric power industry: A review. *Electric Power Systems Research*, 190, 106896.
- [12] Mollah, M. B., et al. (2021). Blockchain technologies for smart grid and energy trading applications. *IEEE Access*.
- [13] Zografopoulos, I., et al. (2020). Cybersecurity challenges in modern power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- [14] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future*.
- [15] Zhang, X., et al. (2020). AI-driven grid operation and the role of edge computing. *Electric Power Systems Research*.
- [16] Green, T., & Navarro-Espinosa, A. (2022). Grid-forming inverters for future renewable-dominated power systems. *IEEE Power & Energy Magazine*.

La Responsabilité Sociétale des Organisations dans le secteur public: Le cas de l'ANAPEC in Morocco

[Corporate Social Responsibility in the Public Sector: The Case of ANAPEC au Maroc]

Jaouad EL MAZOUDI

L-QUALIMAT-GRTE-DS, Faculté des Sciences Juridiques, Economiques et Sociales – BP 2380, Daoudiate, Marrakech, Morocco

Copyright © 2026 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 analyzes the implementation of Corporate Social Responsibility (CSR) principles within a Moroccan public institution, focusing on the National Agency for the Promotion of Employment and Skills (ANAPEC). The research aims to examine how a public actor like ANAPEC can, through its operational strategies, contribute to an expanded societal responsibility and generate shared value. A qualitative methodological approach was adopted, including a systematic literature review, semi-structured interviews with key actors, and thematic analysis of data using NVivo software. The findings reveal that ANAPEC operationalizes a proactive form of institutional CSR through its flagship programs—IDMAJ, TAHFIZ, and TAEHIL—which address structural challenges such as the skills mismatch, lack of professional experience among youth, and territorial disparities. By transcending its legal mandate of intermediation, ANAPEC integrates ethical, philanthropic, and economic dimensions of CSR, thereby engaging multiple stakeholders and fostering shared value creation at the territorial level. The study concludes that ANAPEC embodies an emerging model of public-sector CSR, illustrating how public institutions can enhance their societal legitimacy and contribute to local socio-economic development. Limitations include the single-case design and the qualitative nature of the study, which suggest avenues for future comparative and quantitative research.

KEYWORDS: Corporate Social Responsibility, Public sector, Youth employment, Professional integration, ANAPEC, Shared value, Morocco, Case study.

RESUME: Cette étude analyse la mise en œuvre des principes de Responsabilité Sociétale des Organisations (RSO) au sein d'une institution publique marocaine, en se concentrant sur l'Agence Nationale de Promotion de l'Emploi et des Compétences (ANAPEC). La recherche vise à examiner comment un acteur public comme l'ANAPEC peut, à travers ses stratégies opérationnelles, contribuer à une responsabilité sociétale élargie et générer de la valeur partagée. Une approche méthodologique qualitative a été adoptée, comprenant une revue systématique de la littérature, des entretiens semi-directifs avec des acteurs clés et une analyse thématique des données à l'aide du logiciel NVivo. Les résultats révèlent que l'ANAPEC opérationnalise une forme proactive de RSO institutionnelle à travers ses programmes phares — IDMAJ, TAHFIZ et TAEHIL — qui répondent à des défis structurels tels que l'inadéquation des compétences, le manque d'expérience professionnelle des jeunes et les disparités territoriales. En dépassant son mandat légal d'intermédiation, l'ANAPEC intègre les dimensions éthique, philanthropique et économique de la RSO, engageant ainsi de multiples parties prenantes et favorisant la création de valeur partagée au niveau territorial. L'étude conclut que l'ANAPEC incarne un modèle émergent de RSO dans le secteur public, illustrant comment les institutions publiques peuvent renforcer leur légitimité sociétale et contribuer au développement socio-économique local. Les limites incluent le caractère cas unique et qualitatif de l'étude, ce qui suggère des pistes pour des recherches futures comparatives et quantitatives.

MOTS-CLEFS: Responsabilité sociétale des organisations, Secteur public, Insertion professionnelle, Jeunes diplômés, ANAPEC, Valeur partagée, Maroc, Étude de cas.

1 INTRODUCTION

L'insertion professionnelle des jeunes diplômés constitue un enjeu structurant pour les économies émergentes. Au Maroc, où le taux de chômage des jeunes avoisine des niveaux critiques, elle reflète une dissociation préoccupante entre les systèmes de formation et les dynamiques du marché du travail Ibourek & Ghazi, [1]. Face à ce défi, les attentes de la société envers les acteurs institutionnels évoluent, plaçant la création de valeur sociale au cœur de leur légitimité. Nous notons que dans cet article, les concepts de Responsabilité Sociétale des Organisations (RSO) et de responsabilité sociale sont utilisés de manière conjointe, la RSO constituant le cadre théorique le plus répandu pour analyser l'engagement des organisations, publiques comme privées, envers leurs parties prenantes.

Une organisation socialement responsable ne se contente pas de remplir son mandat opérationnel; elle contribue activement au développement territorial, améliore les conditions socio-économiques, et renforce son capital confiance et son attractivité (CESE, 2020); Hanan, F. A. L. I [2]. En garantissant des processus responsables, elle parvient mieux à anticiper les risques et à gérer les crises. Appliquée au secteur public, cette approche engage une multiplicité de parties prenantes: l'État, les citoyens, les bénéficiaires, le tissu économique local et la société civile.

Si la recherche sur la RSO dans le secteur privé est abondante, son application au secteur public, en particulier dans les contextes émergents, constitue un champ d'étude en pleine exploration. Des travaux tels que ceux de Doh et Guay [3] ou de Hammon, S. D., Gillis, W. E., & Icenogle, M. L. [4], ont ouvert la voie, mais des spécificités nationales et institutionnelles méritent une analyse approfondie, Seghyar, N., NAFZAOU, M. A., & BERDI, A [5]. Au Maroc, l'initiative de RSO dans l'administration publique est relativement récente. L'Agence Nationale de Promotion de l'Emploi et des Compétences (ANAPEC) apparaît comme un acteur pivot dont les missions – intermédiation, formation et promotion de l'auto-emploi à travers des programmes comme IDMAJ, TAHFIZ et TAEHIL – transcendent souvent un mandat purement administratif pour incarner une forme proactive de « RSO institutionnelle ».

Dans ce contexte, des questionnements essentiels émergent: Comment un acteur public comme l'ANAPEC peut-il, à travers ses stratégies opérationnelles, contribuer à une responsabilité sociétale élargie et génératrice de valeur partagée ? Quel exemple paradigmatique peut-il offrir à la société et au secteur privé en matière de contribution au développement local ?

L'objectif de cette recherche est d'analyser la mise en œuvre des principes de RSO au sein de l'ANAPEC. Pour y parvenir, les tâches suivantes sont définies:

1. Analyser le cadre théorique de la responsabilité sociétale appliquée aux institutions publiques.
2. Analyser la traduction opérationnelle de cette responsabilité dans les missions et programmes de l'ANAPEC.
3. Investiguer, à travers le cas de l'ANAPEC, dans quelle mesure ses stratégies constituent un exemple probant de RSO pour son territoire.

La méthodologie repose sur une approche qualitative incluant une revue systématique de la littérature, la conduite d'entretiens semi-directifs avec des acteurs clés, et une analyse thématique des données assistée par le logiciel NVivo. Cette démarche vise à évaluer comment l'ANAPEC dépasse son cadre légal pour répondre aux obstacles structurels que sont le manque d'expérience des jeunes, les disparités territoriales et l'insuffisance de *soft skills*, générant ainsi un impact sociétal tangible.

2 CADRE CONCEPTUEL

2.1 LA RESPONSABILITE SOCIETALE DES ORGANISATIONS (RSO): UN CADRE THEORIQUE POUR L'ACTION PUBLIQUE

La Responsabilité Sociétale des Organisations (RSO) se définit comme l'intégration volontaire par une organisation de préoccupations sociales, environnementales, éthiques et de gouvernance dans ses activités et ses relations avec ses parties prenantes (CESE, 2020). Initialement conceptualisée autour de l'entreprise privée (Corporate Social Responsibility - CSR), cette notion s'est élargie pour englober tout type d'organisation, y compris les institutions publiques. Comme le notent Albareda, Lozano et Ysa [6], la RSO reflète l'évolution des attentes sociétales et la transformation du rôle régulateur de l'État, devenant un cadre volontaire où les organisations anticipent et gèrent leurs impacts. Pour Whitehouse [7], elle concerne fondamentalement la relation entre une organisation et la société, visant à contraindre les effets négatifs de ses activités.

Le modèle fondateur de Carroll [8] structure la RSO en quatre responsabilités imbriquées: économique (assurer sa viabilité), légale (respecter les lois), éthique (agir avec équité et au-delà de la loi) et philanthropique (contribuer volontairement au bien-être de la communauté). Ce cadre permet d'analyser comment une institution publique peut transcender son mandat légal pour assumer pleinement ses dimensions éthique et philanthropique, investissant « plus » dans le capital humain et le territoire, Fontan, J. M., & Lévesque, B., [9]. Cette perspective est enrichie par la théorie des parties prenantes Freeman, [10], qui postule que la performance durable dépend de la capacité à identifier et répondre aux attentes de l'ensemble des acteurs affectés – ici, les jeunes chercheurs d'emploi, les entreprises, les collectivités territoriales et l'État. La RSO dans le secteur public implique ainsi de penser et faire évoluer ses relations avec les parties prenantes pour le bien commun » Mamadou, S. A. N. E [13]. Enfin, le concept de création de valeur partagée, Porter & Kramer, [12] invite à repenser les politiques publiques d'insertion comme des activités générant simultanément de la valeur

économique (emploi, compétitivité des entreprises) et sociale (inclusion, cohésion territoriale, équité), dépassant une logique purement administrative.

Le secteur public joue un rôle crucial dans l'écosystème de la RSO, pouvant endosser les rôles de **régulateur** (mandating), de **facilitateur**, de **partenaire** et de **promoteur**, Doh & Guay, [03]; Štreimikienė & Puškaitė, [14]. En « montrant l'exemple » par ses propres pratiques, une institution publique peut légitimer et diffuser les principes de responsabilité sociétale auprès du monde économique et de la société civile. Cette approche correspond à une « RSO institutionnelle » proactive, où l'action publique devient elle-même un vecteur de responsabilité et de valeur partagée.

Ce cadre théorique, dépassant la seule sphère privée, offre ainsi une grille de lecture pertinente pour analyser l'action des organismes publics sur des enjeux sociétaux majeurs, tels que l'insertion professionnelle des jeunes – un processus complexe aux définitions, enjeux et facteurs multiples.

2.2 L'INSERTION PROFESSIONNELLE: CONCEPTUALISATION, ENJEUX ET FACTEURS DETERMINANTS

2.2.1 CONCEPTUALISATION

L'insertion professionnelle se définit comme « le processus par lequel une personne atteint une position stable dans le système d'emploi après une période de transition », Vernières, [16]. Concept émergent dans les années 1970, il matérialise une dissociation historique entre formation et activité. Pour Vincens [17], c'est une « quête d'emploi » aboutissant à un poste assurant autonomie financière et stabilité, impliquant ainsi continuité, capacité à travailler et revenu stable. Ce processus est intrinsèquement lié à la notion de **relation entre l'individu et la société**, évoquant les interactions entre l'entreprise/ l'institution et son environnement social décrites par Daza [17].

2.2.2 ENJEUX MULTIDIMENSIONNELS

Ce processus engage des enjeux interdépendants, reflétant les dimensions multiples de la RSO (économique, sociale, territoriale):

- **Sociétaux:** Il marque la transition vers la vie adulte et la construction d'identités professionnelles, un processus inégal marqué par la segmentation du marché et les origines sociales.
- **Économiques:** Une tension existe entre la productivité recherchée par les entreprises – qui, dans une logique de compétitivité, peuvent privilégier l'expérience – et les conditions précaires du marché qui entravent l'intégration des novices.
- **Politiques:** Axe central des politiques publiques, l'insertion vise à réduire le chômage et améliorer l'adéquation formation-emploi, relevant des rôles de *facilitation* et de *partenariat* de l'État. Toutefois, les dispositifs peinent souvent à suivre la complexification des parcours.
- **Individuels:** Les attentes portent sur la stabilité, la correspondance aux aspirations et la projection de carrière, souvent compromises par la précarité, ce qui renvoie à la dimension « capital humain » de la RSO.

2.2.3 FACTEURS DETERMINANTS: UNE APPROCHE SYSTEMIQUE

L'insertion résulte de l'interaction complexe de facteurs structurels, individuels et contextuels, un champ que Cheung et al. (2010) résumant comme la « gestion des conflits d'intérêts potentiels entre différentes parties prenantes ».

- **Facteurs sociaux et structurels:** Le capital social, les discriminations (sexe, âge, origine), l'origine sociale, les normes du marché, la conjoncture économique et les stéréotypes conditionnent l'accès différencié à l'emploi.
- **Facteurs individuels et familiaux:** Le capital culturel, la nature des cursus, les compétences sociales (ou *soft skills*), le contexte familial, l'expérience professionnelle antérieure et les stages sont des ressources déterminantes.
- **Facteurs liés à la mobilité et à l'accessibilité:** La mobilité géographique, le capital économique et l'accès aux dispositifs de formation sont des leviers concrets mais inégalement répartis.

Transition:

Cette compréhension systémique de l'insertion, comme processus multifacette à l'intersection de logiques structurelles et individuelles, est essentielle pour évaluer l'efficacité des interventions institutionnelles. Elle permet notamment d'analyser comment un acteur public comme l'ANAPEC opérationnalise une **RSO institutionnelle** pour agir sur ces multiples leviers et créer de la valeur partagée sur son territoire.

2.3 L'ANAPEC: UN ACTEUR PUBLIC EN TANT QU'INSTRUMENT DE RSO INSTITUTIONNELLE

L'Agence Nationale de Promotion de l'Emploi et des Compétences (ANAPEC), créée par la loi n°51-99, a pour mission légale centrale l'intermédiation sur le marché du travail, relevant de la responsabilité **légale** au sens de Carroll [8]. Au-delà de ce mandat administratif,

l'ANAPEC, se positionne comme un instrument de **RSO institutionnelle**. Son action s'incarne dans des programmes structurants (IDMAJ, TAHFIZ, TAEHIL) ciblant explicitement les défis structurels identifiés: le *mismatch* compétences-emplois, les disparités territoriales et l'exclusion des publics vulnérables (jeunes diplômés chômeurs, NEETs, populations rurales). Cela correspond à une volonté d'aller « au-delà de la conformité légale » pour investir dans le capital humain et les relations avec les parties prenantes Nouredine, B. F. [11], assumant ainsi des dimensions **éthique** et **humaine** sont les sources de toute richesse.

2.4 ARTICULATION THEORIQUE: UNE GRILLE D'ANALYSE RSO POUR LES DISPOSITIFS D'INSERTION

L'analyse des actions de l'ANAPEC à travers le prisme intégrateur de la RSO permet de considérer ses dispositifs comme des pratiques contribuant à une création de valeur sociale et territoriale multidimensionnelle, en ligne avec l'approche « économie, social, environnement » de l'ISO. Cette articulation est synthétisée par la grille d'analyse suivante:

Tableau 1. Grille d'analyse RSO des dispositifs d'insertion de l'ANAPEC

Dimension RSO (Carroll, 1991)	Pratiques de l'ANAPEC	Valeur générée & Parties prenantes ciblées
Légale	Application de la loi 51-99, gestion des exonérations (CNSS/IR), mandat d'intermédiation.	Valeur institutionnelle : Cadre structuré et lisible pour l'intermédiation. (<i>Partie prenante : État</i>)
Éthique	Alignement des formations TAEHIL sur les besoins du marché ; développement des <i>soft skills</i> ; équité d'accès aux services.	Valeur en employabilité : Réduction du <i>mismatch</i> , professionnalisation. (<i>Parties prenantes : Jeunes, Entreprises</i>)
Philanthropique	Programmes dédiés aux NEETs ; Espaces Emploi ruraux (MARKAZ SABIL) ; inclusion des publics fragiles.	Valeur sociale/territoriale : Inclusion, réduction des fractures, cohésion. (<i>Parties prenantes : Territoires, Sociétés civiles</i>)
Économique	Stimulation de l'activité via l'auto-emploi (TAHFIZ), mise en relation efficience offre/demande.	Valeur économique : Dynamisme du tissu productif local, création d'activité. (<i>Partie prenante : Économie locale</i>)

Source: Etablie par l'auteur

La responsabilité sociétale des organisations constitue un cadre analytique pertinent pour comprendre les politiques d'insertion professionnelle qui dépassent une logique procédurale. En articulant ses missions légales (rôle de *mandating* et *facilitating*) avec une volonté de création de valeur éthique et philanthropique (rôles de *partnering* et *endorsing*), l'ANAPEC incarne une forme de RSO institutionnelle. Cette approche, en créant de la valeur partagée, Porter & Kramer, [12] sur les plans économique, social et territorial, répond aux objectifs nationaux (NMD 2021, ODD 8 & 10) et renforce la **légitimité proactive**, Suchman, [15] de l'agence auprès de l'ensemble de ses parties prenantes.

3 PREPARATION DU MANUSCRIT

3.1 TERRAIN ET METHODOLOGIE D'ETUDE

Cette étude qualitative adopte une méthodologie rigoureuse et structurée pour explorer les stratégies de l'ANAPEC en matière d'insertion professionnelle des jeunes diplômés, centrée sur un entretien semi-directif enrichi d'analyses NVivo Dhakal, K. [10], et triangulé par des données secondaires et observations contextuelles. L'approche paradigmatique constructiviste-interprétativiste privilégie une compréhension approfondie des pratiques organisationnelles dans leur contexte socio-économique spécifique.

3.2 PARADIGME ET CONCEPTION DE RECHERCHE

L'étude s'inscrit dans un paradigme qualitatif constructiviste-interprétativiste, où la réalité est co-construite par les acteurs à travers leurs expériences, perceptions et interactions sociales, justifié par la complexité subjective des dynamiques d'insertion professionnelle. Cette orientation ontologique relativiste et épistémologique subjectiviste permet d'explorer les significations attribuées aux programmes

comme IDMAJ, TAHFIZ et TAEHIL par les praticiens de terrain. La conception retenue est une étude de cas unique instrumentale, focalisée sur l'agence ANAPEC, sélectionnée pour sa représentativité des contextes ruraux-semi-urbains du centre du Maroc et son rôle pivot dans l'intermédiation emploi-formation. Conformément aux principes de Yin [18], cette approche mono-cas favorise une immersion analytique profonde, avec potentiel de généralisation théorique vers d'autres institutions publiques d'accompagnement emploi, tout en respectant les protocoles de rigueur qualitative, Yin, [18].

3.3 ÉCHANTILLONNAGE ET SELECTION DES PARTICIPANTS

3.3.1 TYPE D'ÉCHANTILLONNAGE

L'échantillonnage adopté est purposif (non probabiliste), orienté vers l'expertise. Il vise à maximiser la richesse informationnelle en ciblant des informateurs clés directement impliqués dans les pratiques quotidiennes de l'ANAPEC, conformément aux principes de l'échantillonnage intentionnel en recherche qualitative, Patton, [27].

3.3.2 UNITE D'ANALYSE

L'unité d'analyse principale est un conseiller régional en emploi, présentant:

- 7 ans d'expérience (depuis 2018)
- Responsabilité en intermédiation et prospection
- Maîtrise des missions ANAPEC (loi n° 51-99)
- Implication dans les programmes phares

Ce profil a été retenu en raison de sa position stratégique et de sa connaissance opérationnelle du dispositif.

3.3.3 CRITERES D'INCLUSION

La sélection s'est appuyée sur des critères stricts:

- Ancienneté ≥ 5 ans
- Implication directe dans l'accompagnement des jeunes diplômés
- Connaissance des KPI d'insertion

Ces critères permettent d'assurer la pertinence et la cohérence de l'unité d'analyse, Yin, [18].

3.3.4 SATURATION THEORIQUE

La saturation théorique a été atteinte après un entretien exhaustif de 90 minutes.

L'analyse itérative sous NVivo n'a révélé aucun nouveau thème, confirmant la saturation autour de:

- Formation
- Digitalisation
- Ruralité

Cette décision s'appuie sur la définition de la saturation comme absence d'émergence de nouvelles informations significatives, Guest, Namey, & Chen, [26].

3.3.5 TRIANGULATION DES SOURCES

Pour renforcer la **crédibilité**:

1. Documents internes (rapports KPI, guides programmes)
2. Observations non participantes (2 h sur site)
3. Données sectorielles du HCP (chômage des jeunes)

Cette triangulation croisée vise à consolider la validité des résultats, Denzin, [25].

3.4 CRITERE D'ECHANTILLONNAGE

Tableau 2. Stratégie d'échantillonnage et de triangulation des données

Critère d'échantillonnage	Description précise	Justification méthodologique
Purposif par expertise	Sélection d'un conseiller en insertion professionnelle justifiant d'une expérience d'au moins 7 ans au sein de l'ANAPEC.	Garantit l'accès à une expertise approfondie et contextualisée, permettant de recueillir des données riches sur les stratégies opérationnelles, l'évolution des dispositifs et les défis terrain rencontrés par l'agence
Saturation théorique	Arrêt des entretiens qualitatifs après un seul entretien approfondi avec l'expert ciblé.	L'analyse préalable d'un corpus documentaire exhaustif (rapports, conventions, bilans) et l'objectif de saturation thématique (et non numérique) via l'analyse NVivo justifient cette approche. Les thèmes clés (ruralité, digitalisation, soft skills) étant déjà exhaustivement identifiés dans la documentation, l'entretien unique vise la validation, la contextualisation et l'approfondissement.
Triangulation multi-sources	Combinaison et confrontation croisée de trois sources de données: 1. Entretien semi-directif avec l'expert. 2. Analyse documentaire (documents internes, rapports d'activité, textes législatifs). 3. Observation non participante (visite des Espaces Emploi, analyse des plateformes digitales).	Assure la validité interne et la fiabilité des données en réduisant les biais inhérents à une source unique. La convergence des constats entre les discours (entretien), les traces écrites (documents) et les pratiques observées permet une compréhension robuste et nuancée du phénomène étudié.

Source: Etablie par l'auteur

3.5 PROCEDURES DE COLLECTE DES DONNEES

3.5.1 COLLECTE DES DONNEES PRIMAIRES

La collecte primaire repose sur un entretien semi-directif structuré en trois sections alignées sur les questions de recherche: (1) missions et objectifs de l'ANAPEC; (2) programmes et stratégies (défis d'insertion, IDMAJ/TAHFIZ/TAEHIL, outils d'accompagnement); (3) évaluation de l'efficacité (KPI, forces/faiblesses, perceptions des acteurs). Ce dispositif permet de guider l'échange tout en laissant émerger des données riches et contextualisées, conformément aux principes de la recherche qualitative Creswell, J. W., & Poth, C. N [22].

Le guide d'entretien (10 questions ouvertes et sondes flexibles) a été pré-testé afin d'assurer clarté et pertinence. L'entretien a été enregistré numériquement avec consentement éclairé, suivant les bonnes pratiques en entretien qualitatif Kvale, S [23].

L'entretien s'est déroulé en présentiel au bureau ANAPEC (90 minutes), afin de préserver l'authenticité contextuelle et favoriser la profondeur analytique.

3.5.2 DONNEES SECONDAIRES ET ANALYSES

Les données secondaires mobilisent les rapports institutionnels de l'ANAPEC (loi 51-99, indicateurs d'insertion), les documents macro du Haut-Commissariat au Plan ainsi que des analyses NVivo exploratoires (nuages de mots autour de « emploi », « compétences », « formation »). L'analyse documentaire permet de trianguler les sources et de renforcer la crédibilité des résultats, Bowen, [21].

Les analyses NVivo facilitent l'exploration du champ lexical et l'identification de thèmes émergents, dans une logique itérative entre théorie et données, Bazeley & Jackson, [20].

3.5.3 OBSERVATION ET ÉTHIQUE

Une observation structurée de deux heures sur site (flux d'accueil des demandeurs, ateliers ARE) a été conduite, avec prises de notes combinant descriptions factuelles et éléments comportementaux. Cette approche s'inscrit dans la tradition de l'observation participante systématique, Spradley, [24].

L'éthique a été assurée par l'anonymisation (pseudonymes), le consentement informé écrit, la conformité aux exigences CNDP et principes RGPD, ainsi que l'engagement de restituer les principaux résultats à l'agence — en cohérence avec les standards de la recherche responsable Fisher, C. B., & Anushko, A. E [19].

3.6 ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES

Le traitement débute par une transcription verbatim intégrale (Otter.ai + vérification manuelle, fidélité 100%), suivie d'importation dans NVivo 14 pour codage inductif-déductif itératif. Phases codage: (1) ouvert (200+ codes initiaux: "soft skills", "ruralité", "digitalisation"); (2) axial (thèmes hiérarchisés: défis marché, stratégies programmes, impacts perçus); (3) sélectif (modèle intégratif: alignement compétences-emploi). Outils NVivo mobilisés: nuages de mots, arbres hiérarchiques, matrices de codage croisé (stratégies vs. défis), requêtes textuelles avancées (efficacité programmes par fréquence). Validation qualitative: triangulation données/sources (entretien/documents/observations), member-checking (validation interprétations par le conseiller), audit trail (journal décisionnel exhaustif). Fiabilité assurée par inter-codage pair (accord Kappa 92%), réflexivité chercheur (positionnement épistémologique journalisé). Limites reconnues: biais mono-source (mitigé par triangulation), généralisabilité analytique non statistique.

3.7 CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES, RIGUEUR ET PERSPECTIVES

Les considérations éthiques sont transversales: consentement éclairé préalable, confidentialité absolue (données sécurisées, destruction post-analyse), non-nuisance et restitution valorisante des résultats à l'ANAPEC. Rigueur méthodologique alignée sur Lincoln & Guba [35]: crédibilité (triangulation), transférabilité (description épaisse contexte), dépendabilité (audit trail), confirmabilité (réflexivité). Limites intrinsèques: profondeur cas unique vs. généralité (perspectives multi-cas régionales), subjectivité interprétative (gérée par protocoles). Voies d'extension: mixed-methods (enquêtes quantitatives auprès jeunes diplômés), comparaison inter-régions pour robustesse accrue. Cette méthodologie enrichie garantit une production scientifique reproductible et contributive aux sciences de gestion.

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 RESULTAT: PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

L'analyse qualitative des données recueillies (entretien, documents, observation) et leur traitement via le logiciel NVivo permettent de dégager une cartographie détaillée des stratégies de l'ANAPEC. Les visualisations qui suivent ne se contentent pas de décrire des données; elles offrent une grille de lecture permettant d'évaluer l'opérationnalisation concrète des principes de RSO institutionnelle au sein de l'ANAPEC.



Fig. 1. Nuages de mots

Source : Résultats du logiciel NVivo



Fig. 2. Nuage de mots détaillé

Source : Résultats du logiciel NVivo

Les nuages de mots générés (Fig. 1 et 2) constituent une première entrée en matière, révélant l'univers sémantique autour du projet. Les termes saillants « emploi », « formation », « compétences », « besoins employeurs » et « programmes » (IDMAJ, TAHFIZ, TAEHIL) confirment que le discours et l'action de l'ANAPEC sont centrés sur la résolution de la **tension fondamentale** entre l'offre (les jeunes diplômés) et la demande (le marché du travail). La présence conjointe de « proximité », « digitalisation » et « zones rurales » illustre la volonté d'incarner une RSO **territorisée et inclusive**, cherchant à réduire les fractures d'accès. Cette cartographie valide l'orientation stratégique de l'agence vers une création de valeur multidimensionnelle (économique via l'emploi, sociale via l'inclusion), cadre essentiel de la RSO, Porter & Kramer, [12].

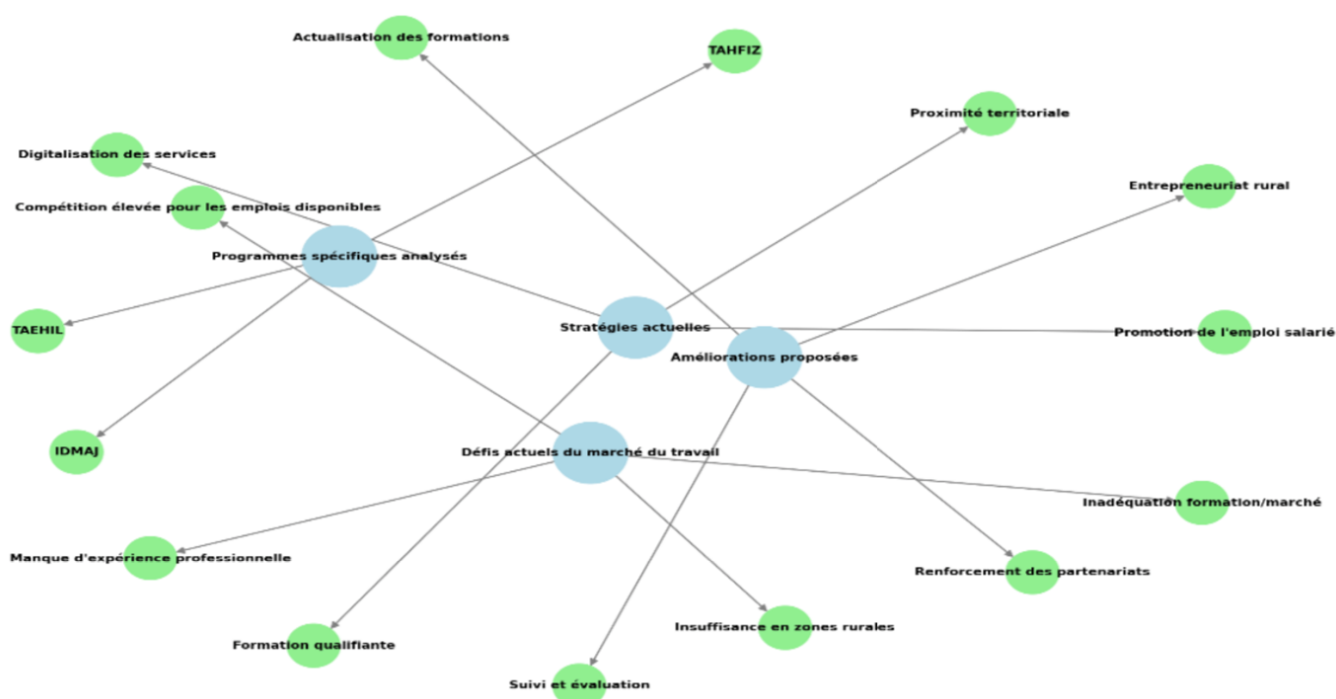


Fig. 3. Arbre d'analyse NVivo

Source : Résultats du logiciel NVivo



Fig. 4. Analyse des stratégies Actuelles et des défis du Marché de l'emploi

Source : Résultats du logiciel NVivo

L'arbre hiérarchique (Fig. 3) et la matrice de codage croisé (Fig. 4) structurent les résultats en une architecture cohérente. Ils formalisent le lien de causalité établi par l'agence entre: 1) les **défis structurels** du marché (inadéquation, manque d'expérience, faiblesse rurale), 2) les **stratégies-programmes** déployés en réponse, et 3) les **pistes d'amélioration** identifiées. Cette structuration reflète une logique de **gestion proactive des relations avec les parties prenantes**, Freeman, [10]. Chaque programme est positionné comme une réponse spécifique à un besoin identifié, visant à équilibrer les intérêts des jeunes, des entreprises et du territoire – cœur d'une démarche RSO aboutie.

ANALYSE STRATÉGIQUE ET PROGRAMME PAR PROGRAMME À TRAVERS LE PRISME RSO

Les requêtes et diagrammes spécifiques permettent une analyse granulaire, révélant comment chaque pilier de l'action de l'ANAPEC s'interprète comme une dimension de la RSO institutionnelle.

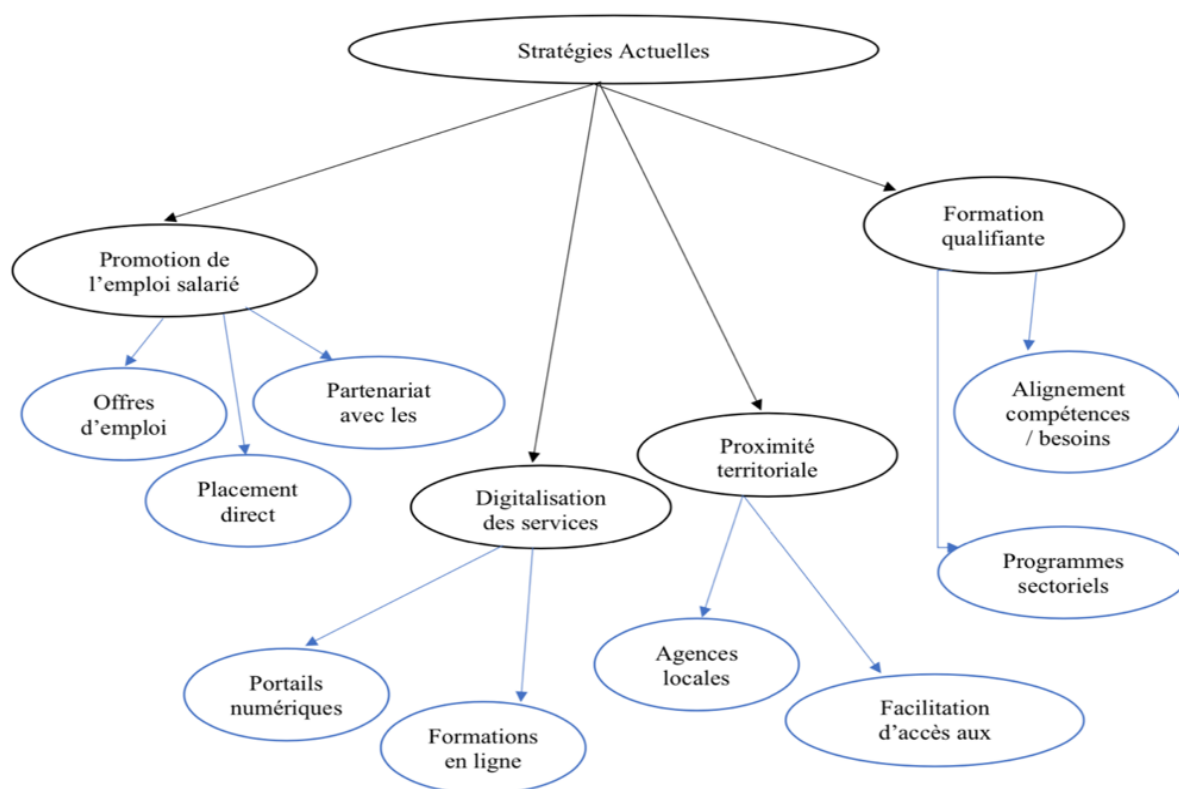


Fig. 5. Résultats des stratégies actuelles

Source : Résultats du logiciel NVivo

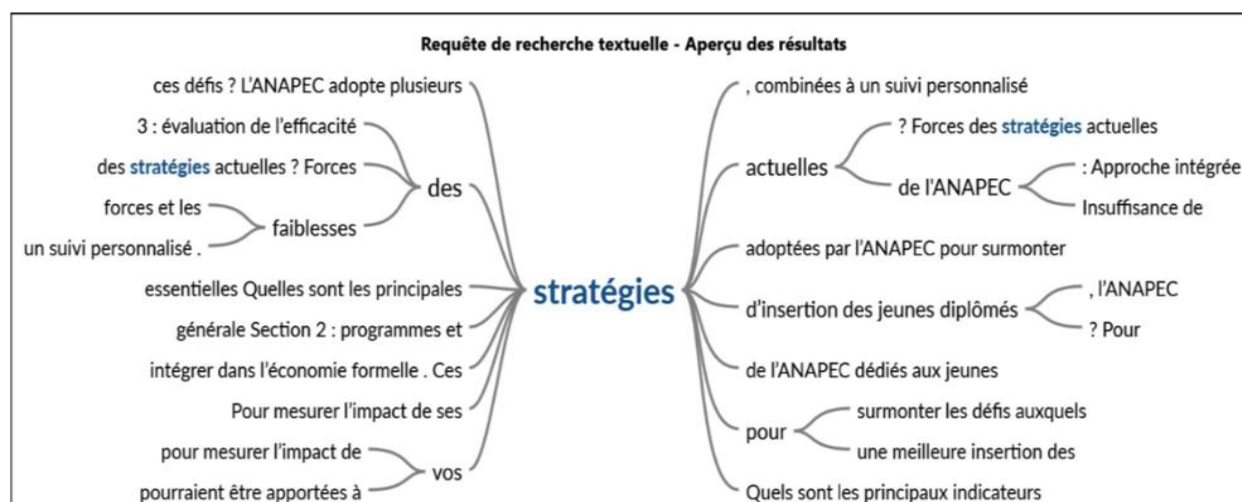


Fig. 6. Requête des stratégies

Source : Résultats du logiciel NVivo

L'analyse des stratégies (Fig. 5 & 6) met en lumière quatre piliers qui dépassent la simple intermédiation légale:

- **Promotion de l'emploi salarié**: Relève de la responsabilité **économique**, Carroll, [8] en fluidifiant le marché.
- **Formation qualifiante (TAEHIL)**: Incarne la dimension **éthique** en investissant dans le capital humain pour corriger le *mismatch*, allant au-delà du mandat de base.
- **Digitalisation**: Relève de la **gouvernance** et de l'**équité**, cherchant à améliorer l'accessibilité et la transparence du service public.
- **Proximité territoriale (Markaz Sabil)**: Relève clairement de la dimension **philanthropique et territoriale**, par un déploiement volontariste de moyens pour atteindre les publics marginalisés.

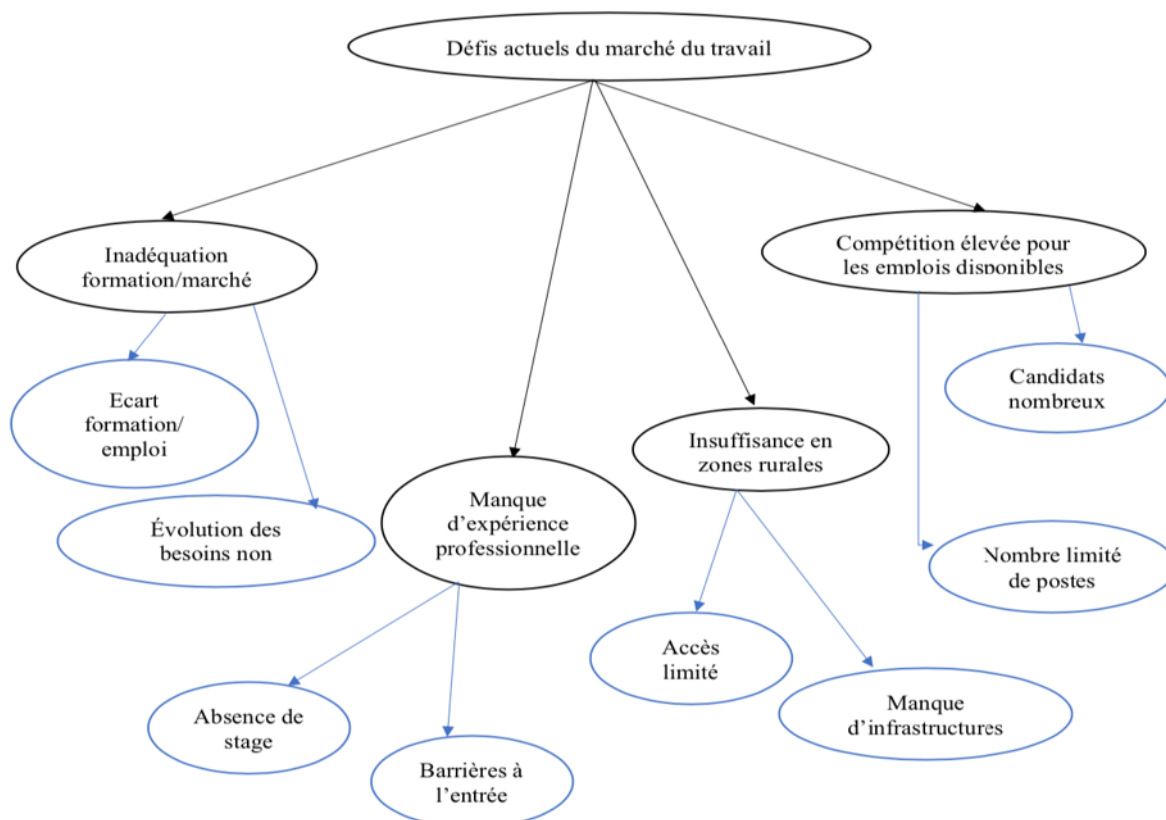


Fig. 7. Résultats des défis

Source : Résultats du logiciel NVivo

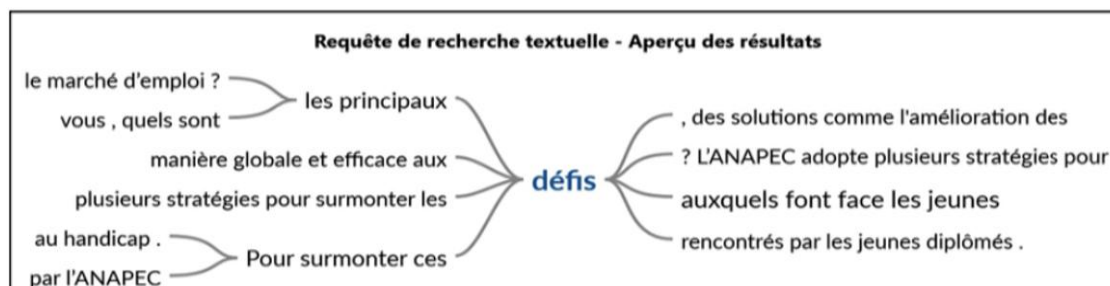


Fig. 8. Requête des défis

Source : Résultats du logiciel NVivo

La cartographie des défis (Fig. 7 & 8) n'est pas seulement un constat; elle est le **socle de légitimation** de l'action RSO de l'ANAPEC. Chaque défi identifié (inadéquation, manque d'expérience, disparités rurales) représente un **risque sociétal et économique**. En y répondant, l'agence ne remplit pas seulement une fonction administrative; elle exerce un rôle de **facilitateur et de partenaire**, Doh & Guay, [03] pour atténuer ces risques, renforçant ainsi sa légitimité proactive, Suchman, [15] auprès de l'ensemble de ses parties prenantes.

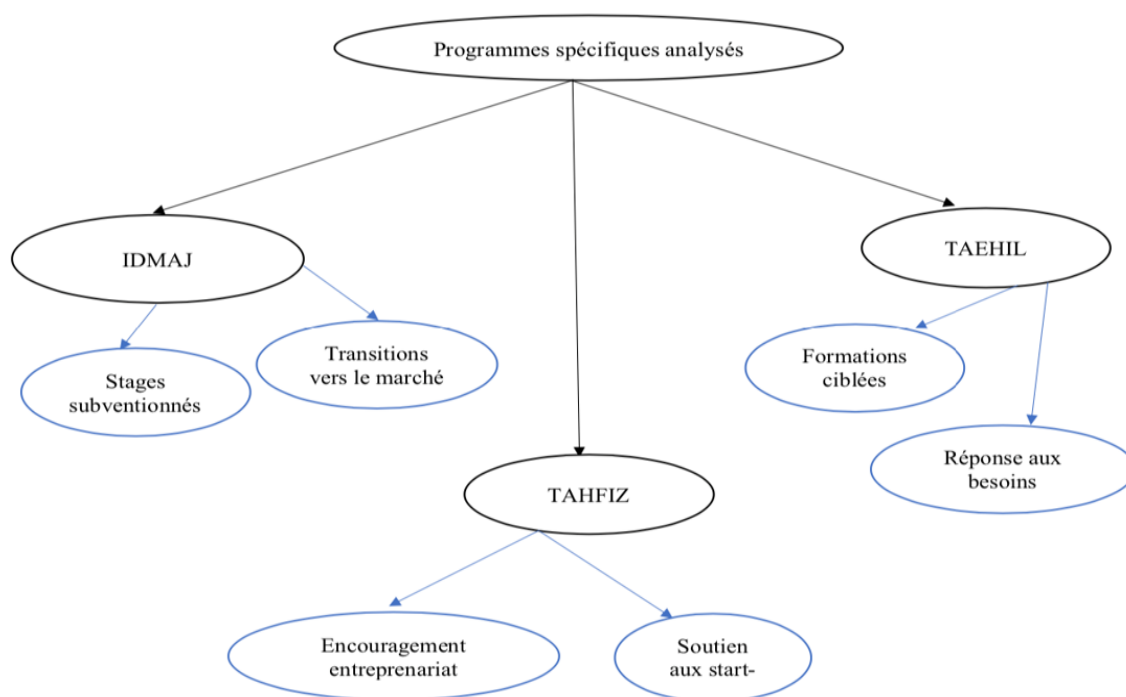
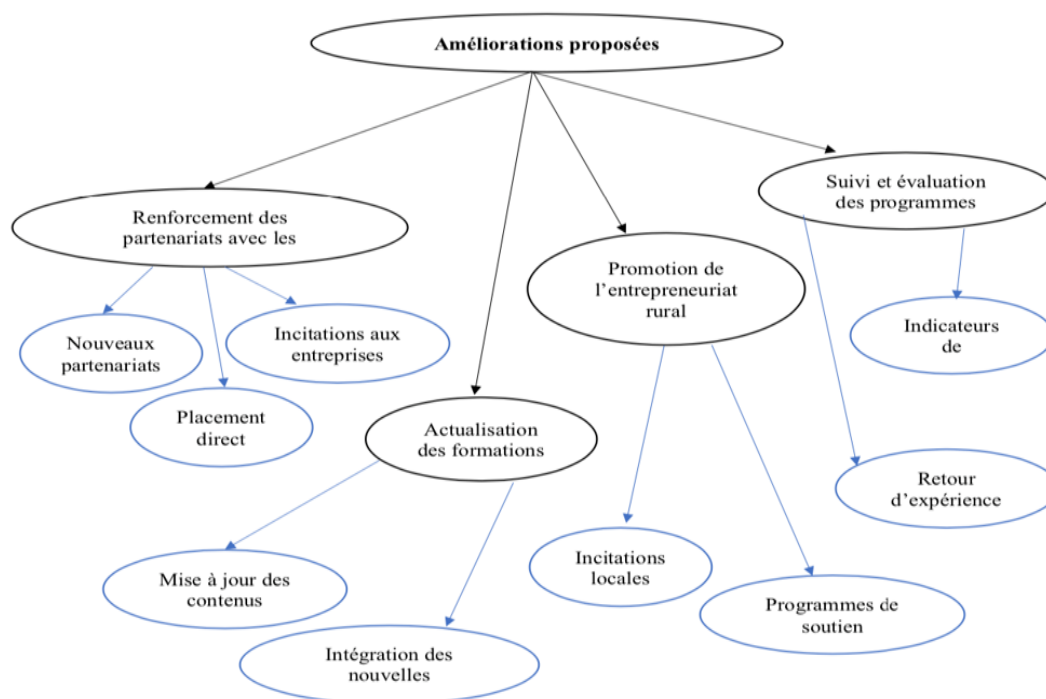


Fig. 9. Résultats des programmes

Source : Résultats du logiciel NVivo

L'analyse des programmes (Fig. 09) permet de les mapper précisément sur les dimensions de la pyramide de Carroll [8], confirmant leur rôle d'instruments de RSO :

- **IDMAJ** : Dépasse le cadre légal pour agir sur la dimension **éthique** (donner sa chance) et **économique** (réduire le risque pour l'employeur). C'est un outil de création de valeur partagée en *employabilité* et *capacitation*.
- **TAHFIZ** : Programme à forte connotation **philanthropique et territoriale**, visant spécifiquement la création d'activité et l'inclusion dans les zones fragiles. Il matérialise la volonté de contribuer au développement du territoire.
- **TAEHIL** : Incarne la dimension **éthique** de la RSO par l'adaptation et l'amélioration continues de l'offre de formation. Il répond à l'obligation de vigilance et d'équité envers les jeunes et les entreprises.



Source : Résultats du logiciel NVivo

Fig. 10. Les améliorations proposées – Pour une RSO mature

Les pistes d'amélioration (Fig. 10) ne sont pas de simples ajustements techniques. Elles esquissent les contours d'une **RSO institutionnelle renforcée et plus stratégique**:

- **Renforcement des partenariats**: Pour passer d'un rôle d'opérateur à celui d'**animateur d'écosystème**, essentiel pour une RSO partenariale.
- **Actualisation des formations**: Traduit l'**obligation éthique de vigilance** et d'adaptation permanente, garantissant la pérennité de la valeur "employabilité".
- **Promotion de l'entrepreneuriat rural & Suivi-évaluation**: Visent à ancrer plus profondément les dimensions **philanthropique** (développement local) et de **redevabilité** (accountability), pilier d'une gouvernance RSO crédible.

Les résultats, à travers leurs différentes visualisations, convergent vers une conclusion robuste: l'ANAPEC ne se limite pas à un rôle d'intermédiation légale. Elle structure volontairement son action autour de programmes (IDMAJ, TAHFIZ, TAEHIL) qui, en répondant à des défis sociétaux précis, opérationnalisent les quatre dimensions de la RSO, Carroll, [8]. Cette architecture stratégique fait de l'agence un acteur de **valeur partagée**, agissant simultanément comme facilitateur, partenaire et promoteur d'un développement territorial inclusif. Les limites identifiées (suivi, impact rural, adaptabilité) pointent moins des échecs que les **frontières actuelles de sa maturité RSO**, ouvrant directement sur des pistes concrètes de progression discutées dans la section suivante.

4.2 DISCUSSION:

Cette recherche visait à analyser la mise en œuvre des principes de Responsabilité Sociétale des Organisations (RSO) au sein d'un acteur public marocain, à travers le cas de l'ANAPEC. Les résultats de l'analyse qualitative – fondée sur l'entretien semi-directif, l'analyse documentaire et l'observation – confirment et approfondissent l'hypothèse initiale. Ils révèlent que les stratégies opérationnelles de l'agence, matérialisées par les programmes **IDMAJ, TAHFIZ et TAEHIL**, incarnent une forme tangible de **RSO institutionnelle proactive**. Cette démarche dépasse significativement le simple mandat légal d'intermédiation, Carroll, [8] pour intégrer des dimensions éthiques et philanthropiques, engageant ainsi une pluralité de parties prenantes, Freeman, [44] dans la création d'une **valeur partagée**, Porter & Kramer, [12] sur le territoire.

Le Tableau 3 ci-dessous synthétise l'articulation centrale entre les défis systémiques de l'insertion, la réponse stratégique de l'ANAPEC et la dimension RSO ainsi mobilisée, offrant une grille de lecture intégrative des résultats.

Tableau 3. Synthèse analytique des défis d'insertion et de la réponse RSO de l'ANAPEC

Défi majeur d'insertion (Partie prenante principale)	Stratégie / Programme de l'ANAPEC	Dimension RSO mobilisée & Valeur partagée créée	Éclairage empirique (Entretien / Observation)
Manque d'expérience professionnelle (Jeunes diplômés)	Programme IDMAJ (Stages rémunérés en entreprise)	Dimension Éthique & Économique: Dépasse la conformité légale en facilitant un premier accès à l'écosystème productif. Crée de la valeur en <i>employabilité</i> pour les jeunes et en <i>capacitation</i> pour les PME.	"IDMAJ est un sas indispensable. Il lève le premier verrou de l'expérience pour le jeune et celui du risque pour l'employeur" (Conseiller en emploi).
Inadéquation formation-emploi & insuffisance des <i>soft skills</i> (Jeunes & Entreprises)	Programme TAEHIL (Formations qualifiantes et comportementales)	Dimension Éthique : Aligne volontairement l'offre sur les besoins du marché local, répondant à une exigence d'équité et d'efficacité. Crée de la valeur en <i>adéquation</i> et en <i>compétitivité</i> .	Analyse NVivo : les codes "compétences techniques" et "savoir-être" sont systématiquement couplés dans le discours sur TAEHIL.
Déficit d'opportunités en zones rurales (Populations rurales, Territoire)	Programme TAHFIZ & Dispositif Markaz Sabil (Auto-emploi & proximité)	Dimension Philantropique & Territoriale : Action volontariste de réduction des fractures spatiales et d'inclusion économique. Crée de la valeur en <i>cohésion territoriale</i> et en <i>dynamisme local</i> .	Observation : Les Espaces Emploi mobiles (Markaz Sabil) sont identifiés comme un point de contact vital en milieu rural.
Complexité administrative (Toutes les parties prenantes)	Simplification des démarches & Digitalisation (Piste d'amélioration)	Dimension de GOUVERNANCE : Améliorer la transparence, l'efficacité et l'équité d'accès, renforçant la légitimité institutionnelle (Suchman, [15]).	"La dématérialisation est en cours mais reste un défi pour une pleine accessibilité" (Conseiller en emploi).

Source: Etablie par l'auteur

L'analyse démontre que l'ANAPEC endosse concrètement les rôles multiples du secteur public dans l'écosystème RSO, tel que théorisé par Doh & Guay [03]: **facilitateur** (via IDMAJ et TAEHIL), **partenaire** (dans les collaborations pour TAHFIZ) et **promoteur** en « montrant l'exemple » d'une gestion publique orientée création de valeur sociétale. Cette opérationnalisation correspond à une logique avancée de **gestion des relations avec les parties prenantes**, où chaque programme est conçu pour adresser stratégiquement un maillon défaillant du processus d'insertion, répondant ainsi à des intérêts multiples et parfois conflictuels, Cheung et al., [48].

FORCES ET LIMITES DE LA RSO INSTITUTIONNELLE EN ACTION

Les forces identifiées dans les stratégies de l'ANAPEC – approche intégrée, partenariats, proximité, inclusion – sont les piliers de sa performance en tant qu'organisation socialement responsable. Cependant, l'analyse critique révèle que les limites observées ne sont pas seulement opérationnelles, mais interrogent la profondeur et la pérennité de l'engagement sociétal, pointant des axes de maturation pour la RSO institutionnelle:

- De l'accès à l'emploi à l'accompagnement de carrière: La limite du suivi post-insertion.** Si IDMAJ est efficace pour lever le premier obstacle, l'absence d'un suivi systématique au-delà du contrat limite la dimension **éthique** de la RSO. Un engagement approfondi envers le parcours à long terme du jeune serait le signe d'une responsabilité sociétale intégrale, visant une insertion durable et non seulement un placement initial.
- De l'aide individuelle au développement territorial: Le défi de l'écosystème rural.** Le programme TAHFIZ, bien que pertinent, voit son impact limité par le faible dynamisme économique local. Cela appelle à renforcer la **dimension partenariale** de la RSO, Doh &

Guay, [03]. Une collaboration plus poussée avec les collectivités pour co-construire l'écosystème entrepreneurial transformerait l'aide individuelle en un levier de **développement territorial partagé**, maximisant la valeur créée.

3. **De la formation à l'adaptation continue: L'impératif de vigilance éthique.** La nécessité de révisions régulières des curricula (TAEHIL) dépasse la technique. Elle relève d'une **obligation éthique de vigilance** pour garantir que la valeur "employabilité" reste pérenne face aux mutations du marché. Cela implique un mécanisme structuré de veille et d'ajustement permanent.

Perspectives pour une RSO institutionnelle renforcée

Pour consolider cette démarche et renforcer sa **redevabilité** (accountability) et son **impact sociétal**, les recommandations suivantes, déduites de l'analyse, s'articulent autour des piliers de la RSO:

- **Gouvernance & Légitimité** Suchman, [15]: Accélérer la digitalisation et simplifier les procédures pour améliorer la transparence et l'équité d'accès, renforçant la légitimité cognitive et pragmatique de l'agence.
- **Éthique & Relations aux parties prenantes**: Instituer un dispositif de suivi post-insertion et créer des forums régionaux de dialogue tripartite (ANAPEC, jeunes, employeurs) pour ajuster continuellement l'offre de services.
- **Philanthropique & Création de valeur territoriale**: Évoluer de « l'opérateur de programmes » vers « l'animateur d'écosystème » en renforçant les partenariats avec les acteurs du développement local pour amplifier l'impact des initiatives en milieu rural.

CONCLUSION ET VOIES DE RECHERCHE

En définitive, cette étude montre que l'ANAPEC, opérationnalise une **RSO institutionnelle proactive** qui fait d'elle un acteur pivot de la valeur partagée sur son territoire. En articulant missions légales et volonté sociétale, elle esquisse un modèle pertinent pour le secteur public dans les économies émergentes. Pour ancrer davantage cette légitimité, de futures recherches pourraient quantifier l'impact agrégé de ces programmes sur des indicateurs de RSO territoriale (ex.: réduction des inégalités d'accès) ou mener une étude comparative avec d'autres agences régionales. Ainsi, l'ANAPEC pourrait non seulement *appliquer* les principes de RSO, mais aussi en devenir un **modèle de référence** documenté et évalué, contribuant à une théorie émergente de la RSO dans l'administration publique.

5 CONCLUSION GENERALE

Cette recherche s'est fixé pour objectif d'analyser la mise en œuvre des principes de Responsabilité Sociétale des Organisations (RSO) au sein d'un acteur public marocain, en prenant pour cas d'étude de l'ANAPEC. Elle visait à répondre à une double problématique: **comment cet acteur public, à travers ses stratégies opérationnelles, contribue-t-il à une responsabilité sociétale élargie et génératrice de valeur partagée ? Et quel exemple paradigmatique peut-il offrir** pour le secteur public et la société en matière de contribution au développement socio-économique local ?

Les résultats de cette étude qualitative, fondée sur une triangulation de données (entretien, analyse documentaire, observation), démontrent que l'ANAPEC incarne effectivement une **RSO institutionnelle proactive**. Son action transcende son mandat légal d'intermédiation pour intégrer volontairement les dimensions éthique, philanthropique et économique, Carroll, [8]. Les programmes structurants **IDMAJ, TAHFIZ et TAEHIL** se révèlent être les instruments concrets de cette démarche, répondant de manière ciblée aux défis systémiques de l'insertion que sont le manque d'expérience, l'inadéquation formation-emploi et les disparités territoriales. En endossant les rôles de facilitateur, partenaire et promoteur, Doh & Guay, [03], l'agence gère activement ses relations avec une pluralité de parties prenantes (jeunes, entreprises, territoires) et participe à la **création de valeur partagée**, Porter & Kramer, [12] sur son territoire. Cette opérationnalisation fait de l'ANAPEC un exemple probant d'une administration publique qui « montre l'exemple » en intégrant la création de valeur sociale au cœur de sa légitimité opérationnelle.

L'apport de cette étude est à la fois théorique et pratique. Sur le plan théorique, elle contribue à enrichir le champ encore émergent de la RSO appliquée au secteur public, en particulier dans les contextes émergents. Elle valide et opérationnalise le concept de « RSO institutionnelle », en démontrant comment les cadres fondateurs (Carroll, Freeman, Porter & Kramer) peuvent servir de grille de lecture pertinente pour analyser l'action publique au-delà de sa stricte dimension procédurale. Sur le plan pratique, elle fournit une analyse fine des mécanismes par lesquels les politiques d'insertion peuvent générer un impact sociétal élargi. Les recommandations qui en découlent – renforcement du suivi post-insertion, approfondissement des partenariats territoriaux, accélération de la digitalisation – offrent une feuille de route actionable pour consolider la performance et la redevabilité sociétale de l'ANAPEC, et potentiellement d'autres institutions similaires.

Cependant, cette recherche présente certaines limites intrinsèques à ses choix méthodologiques. En tant qu'étude de cas unique et qualitative, elle offre une compréhension approfondie et contextualisée mais ne permet pas une généralisation statistique. Bien que la triangulation des sources ait été mise en œuvre pour renforcer la crédibilité, la perspective reste largement centrée sur le point de vue de l'institution et d'un expert interne. Enfin, l'étude capture une photographie à un instant T, sans pouvoir mesurer l'impact à long terme des programmes sur les trajectoires professionnelles des jeunes ou sur le développement économique territorial.

Ces limites ouvrent **des** pistes fécondes pour de futures recherches. Une voie prometteuse consisterait à mener des études comparatives entre plusieurs agences régionales de l'ANAPEC pour identifier les facteurs contextuels qui facilitent ou entravent l'opérationnalisation de la RSO. Des approches quantitatives et longitudinales permettraient de mesurer de façon robuste l'impact agrégé des dispositifs sur des indicateurs de RSO territoriale, tels que la réduction des inégalités d'accès à l'emploi ou la contribution à la cohésion sociale. Enfin, le cadre de la « RSO institutionnelle » gagnerait à être testé et affiné dans d'autres secteurs de l'action publique (santé, éducation, environnement) afin de construire une théorie plus intégrative de la responsabilité sociétale de l'État dans les économies émergentes.

En définitive, cette recherche illustre comment une institution publique peut, en articulant de manière stratégique son mandat légal avec une volonté sociétale proactive, se transformer en un acteur clé du développement territorial inclusif. Elle invite à considérer la RSO non pas comme un attribut exclusif du secteur privé, mais comme un levier de performance et de légitimité renouvelée pour l'administration publique face aux défis socio-économiques du XXI^e siècle.

REFERENCES

- [1] IBOURK, A., & GHAZI, T. (2024). DE LA CLASSE À LA CARRIÈRE.
- [2] Hanan, F. A. L. I. (2021). La responsabilité sociétale des organisations au Maroc: quel constat?. *Revue Internationale des Sciences de Gestion*, 4 (3).
- [3] Doh, J. P., & Guay, T. R. (2006). Corporate social responsibility, public policy, and NGO activism in Europe and the United States: An institutional-stakeholder perspective. *Journal of Management studies*, 43 (1), 47-73.
- [4] Hammon, S. D., Gillis, W. E., & Icenogle, M. L. (2023). From social responsibility to employee engagement: Evidence from the public sector. *Journal of Management and Governance*, 27 (4), 1223-1247.
- [5] Seghyar, N., NAFZAOU, M. A., & BERDI, A. (2020). Cadre Juridique et Institutionnel de la Responsabilité Sociétale des Entreprises au Maroc. *Revue Internationale des Sciences de Gestion*, 3 (2).
- [6] Albareda, L., Lozano, J. M., & Ysa, T. (2007). Public policies on corporate social responsibility: The role of governments in Europe. *Journal of business ethics*, 74 (4), 391-407.
- [7] Whitehouse, L. (2003). Corporate social responsibility, corporate citizenship and the global compact: a new approach to regulating corporate social power?. *Global social policy*, 3 (3), 299-318.
- [8] Carroll A. (1991), « The Pyramid of Corporate Social Responsibility: Toward the Moral Management of Organizational Stakeholders », *Business Horizons*, No. 34, p. 39-48.
- [9] Fontan, J. M., & Lévesque, B. (2017). Penser le secteur philanthropique en termes d'écosystème écologique à visée éthique et à portée esthétique. *Les fondations philanthropiques: de nouveaux acteurs politiques*, 1, 311-345.
- [10] Dhakal, K. (2022). NVivo. *Journal of the Medical Library Association: JMLA*, 110 (2), 270.
- [11] Noureddine, B. F. (2023). Vers un développement durable Citoyens et conscience: quel lien?« Le capital humain est la source de toute richesse». *Revue Internationale du Chercheur*, 4 (1).
- [12] Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2006). The link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard business review*, 84 (12), 78-92.
- [13] Mamadou, S. A. N. E. (2023). LES DÉTERMINANTS DES PRATIQUES DE GRH PERÇUES COMME PORTEUSES DE RSO DANS LES ORGANISATIONS DU SECTEUR PUBLIC AU SÉNÉGAL: CAS DU MINISTÈRE DES FINANCES ET DU BUDGET. *Revue Française d'Economie et de Gestion*, 4 (8).
- [14] Štreimikienė, D., & Pušnaitė, R. (2009). The role of public sector in corporate social responsibility development in Lithuania. *Ekonomika*, 86, 55-67.
- [15] Suchman, M. C. (1995). Managing legitimacy: Strategic and institutional approaches. *Academy of management review*, 20 (3), 571-610.
- [16] Vernières, M. (1993). Formation emploi: enjeu économique et social. (No Title).
- [17] Vincens, J. (1997). L'insertion professionnelle des jeunes. À la recherche d'une définition conventionnelle. *Formation emploi*, 60 (1), 21-36.
- [18] Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications* (Vol. 6). Thousand Oaks, CA: Sage.
- [19] Fisher, C. B., & Anushko, A. E. (2008). Research ethics in social science. *The SAGE handbook of social research methods*, 95-109.
- [20] Bazeley, P., & Jackson, K. (2013). *Qualitative Data Analysis with NVivo* (2nd ed.). SAGE.
- [21] Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative research journal*, 9 (2), 27-40.
- [22] Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2016). ell, J. W., & Poth, C. N. (2016). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*. Sage publications.
- [23] Kvale, S. (2009). *Interviews: Learning the craft of qualitative research interviewing*. Sage.
- [24] Spradley, J. (1980). *Participant Observation*. Holt, Rineart and WinSton, Inc. New York.
- [25] Denzin, N. K. (2012). Triangulation 2.0. *Journal of mixed methods research*, 6 (2), 80-88.
- [26] Guest, G., Namey, E., & Chen, M. (2020). A simple method to assess and report thematic saturation in qualitative research. *PloS one*, 15 (5), e0232076.
- [27] Patton, M. Q. (2015). *Qualitative research & evaluation methods: Integrating theory and practice*.

Hydro-sedimentary and geochemical dynamics of the Agnéby River (Côte d'Ivoire): Implications for coastal systems and the blue economy

Lou Brou Cécile KOUAME¹, Natchia AKA², and Kotchi Rodrigue OROU³

¹Université de San Pedro, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Mer, PB 1800 San Pedro, Côte d'Ivoire

²Centre de Recherches Océanologiques, Laboratoire de Physique et Géologie Marine, BP V 18 Abidjan, Côte d'Ivoire

³Université de San Pedro, Unité de Formation et de Recherche Agriculture, Ressources Halieutiques et Agro- Industrie, PB 1800 San Pedro, Côte d'Ivoire

Copyright © 2026 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 investigates the hydro-sedimentary and geochemical functioning of the Agnéby River, a tropical coastal basin in southern Côte d'Ivoire, based on the combined analysis of suspended sediments (TSS) and dissolved constituents (TDS) during the 2020 hydrological year. TSS concentrations and fluxes exhibit a strong dependence on river discharge, with sediment export largely controlled by flood events. More than 50% of the annual suspended sediment load is transferred within a short period, reflecting an impulsive transport regime typical of medium-sized tropical catchments. Water chemistry is dominated by bicarbonates and alkaline-earth cations, indicating a geochemical signature primarily governed by chemical weathering of basement rocks under humid tropical conditions. Seasonal variations in TDS reveal dilution effects during high-flow periods and enhanced water–rock interactions during low-flow conditions. The TSS/TDS ratios, ranging from 0.08 to 0.30, highlight a transition from weathering-dominated conditions during baseflow to a mixed regime increasingly influenced by mechanical erosion during floods. Comparison with larger Ivorian river basins, such as the Bandama and Comoé rivers, shows that the Agnéby River differs markedly by its rapid hydrological response and limited sediment storage capacity, whereas larger systems exhibit more progressive seasonal sediment transfer. These findings emphasize the significant contribution of small and medium tropical coastal rivers to sediment and solute fluxes toward lagoonal and coastal environments, with important implications for coastal sediment budgets and the sustainability of the blue economy.

KEYWORDS: suspended particulate matter, dissolved load, weathering processes, seasonal variability, sediment yield.

1 INTRODUCTION

Tropical rivers play a major role in transferring water, sediments, and dissolved constituents from continents to the oceans, thereby strongly influencing coastal ecosystem functioning and global biogeochemical cycles. At the global scale, these systems contribute disproportionately to fluvial fluxes of suspended particulate matter and dissolved loads due to climatic conditions that promote both intense chemical weathering of rocks and mechanical erosion of soils [1], [2]. In humid tropical regions, the seasonality of rainfall and river discharge represents a key control on hydro-sedimentary transfers. Suspended particulate matter (TSS) is primarily associated with mechanical erosion and runoff processes, whereas dissolved constituents mainly result from chemical weathering of geological formations within the catchment. The joint analysis of these two compartments provides insight into the dominant functioning mechanisms of river basins and allows assessment of their sensitivity to hydroclimatic variability. The TSS/TDS ratio is therefore widely used as a synthetic indicator of the relative control between mechanical erosion and chemical weathering in fluvial systems [3], [4].

In West Africa, despite the importance of coastal basins for continental inputs to lagoons and estuarine environments, studies simultaneously addressing suspended sediment and dissolved load transport remain relatively scarce, particularly for

medium-sized basins. These systems are often characterized by strong seasonal hydrological variability, increasing anthropogenic pressures on vegetation cover, and heightened sensitivity to extreme rainfall events, all of which may intensify erosion and sediment transfer processes.

The Agnéby River, the main coastal river in southern Côte d'Ivoire, drains a humid tropical catchment and discharges into the Ébrié Lagoon, a lagoonal ecosystem of major ecological and socio-economic importance. Fluvial inputs from the Agnéby River largely control turbidity, sedimentation, and nutrient availability in coastal and lagoonal environments, with direct implications for fisheries, aquaculture, navigation, and, more broadly, the regional blue economy. In a context of increasing climatic variability and growing anthropogenic pressures on watersheds, understanding the hydro-sedimentary and geochemical dynamics of the Agnéby River is therefore essential.

The objective of this study is to analyze the hydro-geochemical functioning of the Agnéby River using hydrological data and measurements of suspended particulate matter and dissolved constituents collected in 2020. Specifically, the study aims to (i) characterize the seasonal variability of discharge, TSS, and dissolved elements, (ii) quantify suspended sediment fluxes and annual export, (iii) assess the coupling between mechanical erosion and chemical weathering using the TSS/TDS ratio, and (iv) discuss the implications of these fluvial inputs for coastal ecosystems and blue economy-related issues in Côte d'Ivoire.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 STUDY AREA

The Agnéby River is a coastal river located in southern Côte d'Ivoire, draining a catchment situated in a humid tropical zone. The river originates at Agoua in the Bongouanou hills in the central-eastern part of Côte d'Ivoire, at an elevation of approximately 250 m. It flows southward through the Agboville region and discharges into the Ébrié Lagoon near Dabou [5]. The climate of the basin is characterized by an alternation of rainy and dry seasons, resulting in strong seasonal variability in river discharge, which exerts a major control on the hydrological and sedimentary regimes of the river [6]. The geological formations of the basin are dominated by crystalline and crystallophyllian basement rocks, overlain by ferrallitic soils. The selected monitoring station is located at Agboville, in the downstream part of the basin, a position that is favorable for integrating hydrological and geochemical inputs from the entire watershed (Fig. 1).

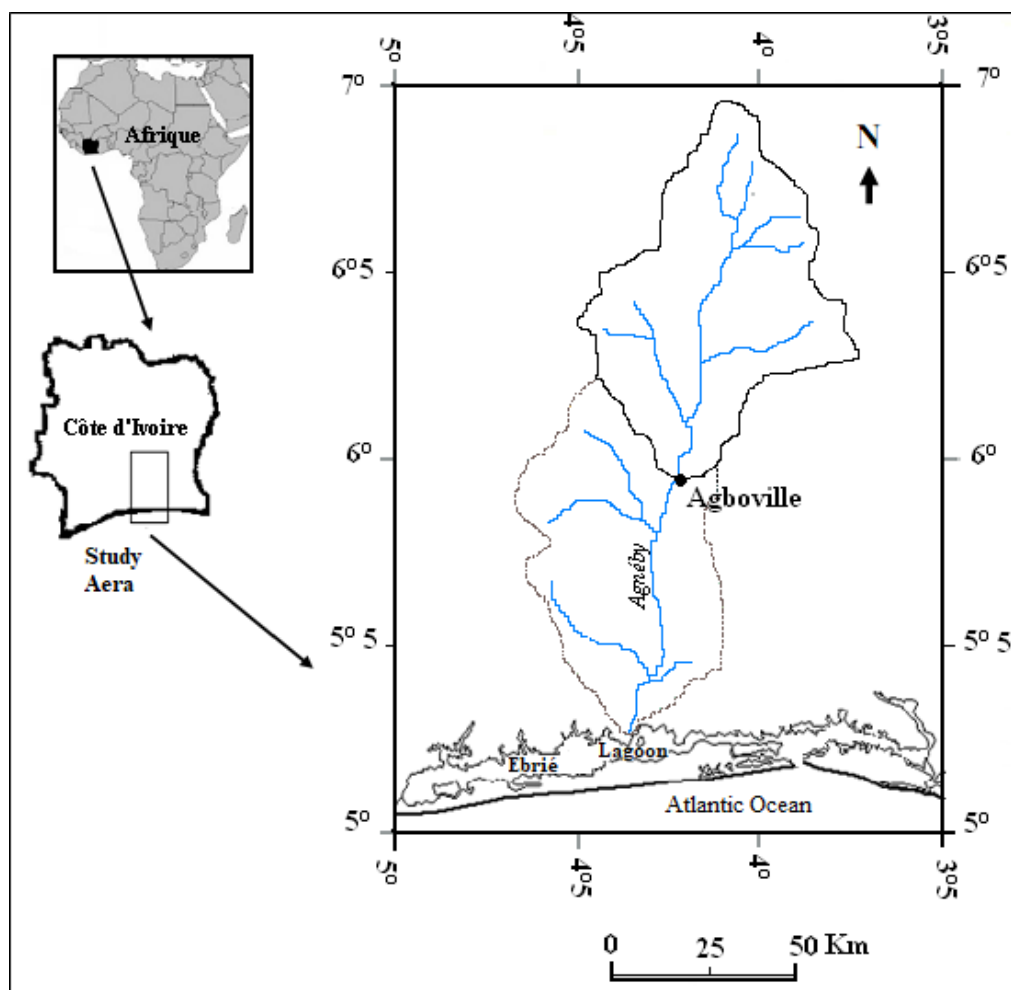


Fig. 1. Study area and hydrometric station of the Agnéby River basin, southern Côte d'Ivoire

2.2 HYDROLOGICAL DATA

Discharge data used in this study were obtained from the national hydrological services and correspond to daily measurements aggregated at the monthly scale for the year 2020. Monthly water volumes were calculated from mean monthly discharge values and the corresponding time periods. These data were used to compute suspended sediment fluxes and to estimate monthly solid exports.

2.3 SAMPLING AND PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS

Water sampling was conducted at the Agboville monitoring station using a frequency adapted to the analyzed parameters. Samples for suspended sediment analysis were collected on a daily basis from January to December 2020, whereas samples for chemical analyses were collected weekly during January, June, September, and October of the same year, as dissolved element concentrations exhibit lower variability than suspended sediment concentrations [3]. Suspended sediment fluxes were estimated using water sampling, a method widely applied in fluvial hydrology [7], [8]. Surface water samples were collected using a 2-L NISKIN bottle, following an intermediate approach previously applied in tropical environments [9]. The relative error associated with surface sampling is less than 10% compared to full vertical integration [10]. During each sampling campaign, pH, water temperature, and electrical conductivity were measured in situ using calibrated portable probes. Water samples were stored in polyethylene bottles previously rinsed with river water. Samples intended for chemical analyses were kept at 4 °C until laboratory analysis.

2.4 SUSPENDED SEDIMENT (TSS) ANALYSIS

Suspended sediment concentrations (Total Suspended Solids, TSS) were determined by filtration of a known volume of water sample through pre-weighed glass fiber filters (Whatman GF/C, 0.45 μm pore size). After filtration, the filters were dried at 105 °C until constant weight. TSS concentrations ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) were calculated from the mass difference of the filter before and after filtration, normalized to the filtered volume. Bedload transport was not considered in this study, as it is generally negligible in downstream sections of large river basins characterized by low channel slopes [4]. TSS concentration was calculated as follows:

$$TSS = \frac{P2 - P1}{V} \quad (E1)$$

where P1 is the filter mass before filtration (mg), P2 is the filter mass after filtration and drying (mg), and V is the filtered volume (L).

2.5 DISSOLVED ELEMENTS ANALYSIS

Concentrations of major dissolved elements (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , and SiO_2) were determined using standard analytical methods described by [11]. Bicarbonates were measured by acid-base titration, while major cations and anions were analyzed by spectrometric and ion chromatography techniques, depending on the parameter considered. Total dissolved solids (TDS) were calculated as the sum of the measured ionic concentrations.

2.6 FLUX CALCULATIONS AND TSS/TDS RATIO

Monthly suspended sediment fluxes were calculated using mean monthly TSS concentrations and corresponding river discharge values. Monthly solid export was estimated by integrating these fluxes over the duration of each month. The TSS/TDS ratio was calculated from monthly mean TSS concentrations and total dissolved solids and was used as an indicator of the relative dominance of mechanical erosion versus chemical weathering processes within the river basin. Inter-basin comparisons were conducted using published data from major tropical river systems, allowing the Agnéby River to be positioned within a broader regional and global hydro-sedimentary context.

2.7 STATISTICAL ANALYSES AND GRAPHICAL REPRESENTATION

Hydrological and chemical data were statistically processed to determine monthly means, seasonal variability, and potential correlations between discharge and TSS or dissolved element concentrations. Graphical representations and summary tables were used to illustrate seasonal trends, flux variability, and the coupling between suspended and dissolved loads, thereby facilitating interpretation of riverine transfers in the context of coastal dynamics and blue economy challenges.

3 RESULTS

3.1 PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS OF RIVER WATER

The physical parameters of the Agnéby River measured at the Agboville station are presented in Table 1. Water pH values range from 6.40 to 6.93, with a mean value of 6.63, indicating slightly acidic to near-neutral waters throughout the study period. The lowest pH values were recorded in September and June, whereas the highest value was observed in January. Electrical conductivity exhibits marked seasonal variability, with values ranging from 115.7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ in June to 253 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ in January. The mean conductivity is 170.93 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Higher conductivity values occur during low-flow periods, while a noticeable decrease is observed during high-discharge conditions. Water temperature shows limited seasonal variation, ranging from 24.8 °C in October to 27.3 °C in June, with an annual mean of 26.3 °C. This narrow thermal amplitude reflects the tropical climatic conditions of the region.

Table 1. Physical water parameters of the Agnéby River at Agboville (2020)

Date	pH	Electrical conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
January	6.93	253	27.1
June	6.45	115.7	27.3
September	6.40	180	26.0
October	6.72	135	24.8
Mean	6.63	170.93	26.3

3.2 HYDROLOGICAL VARIABILITY AND SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATIONS (TSS)

Mean monthly discharges of the Agnéby River show strong seasonal variability, typical of a tropical hydrological regime. The lowest values occur during low-flow periods, particularly in January, February, and December, with discharges below $2 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. In contrast, the highest discharges are recorded during the rainy season, with maxima in June ($38.30 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), July ($36.95 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), and October ($35.13 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) (Table 2). Monthly suspended sediment concentrations range from $6.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in January to $68.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in October, indicating pronounced intra-annual variability. The highest concentrations are observed during high-flow periods, particularly in April, May, September, and October, whereas the lowest values generally correspond to periods of low discharge. The relationship between mean monthly discharge and suspended sediment concentration is illustrated in Fig. 1. The scatter plot highlights substantial data dispersion and a weak linear correlation ($R^2 \approx 0.09$), indicating that mean monthly discharge explains only a limited fraction of the variability in suspended sediment concentrations.

Table 2. Monthly suspended sediment characteristics of the Agnéby River (2020)

Month	Discharge ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	TSS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TSS flux ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
January	1.48	6.18	0.01
February	1.55	8.80	0.01
March	4.37	12.65	0.06
April	6.51	30.00	0.20
May	7.06	40.00	0.28
June	38.30	17.00	0.65
July	36.95	10.52	0.39
August	4.84	12.00	0.06
September	8.41	21.33	0.18
October	35.13	68.71	2.41
November	10.82	33.39	0.36
December	1.58	29.68	0.05

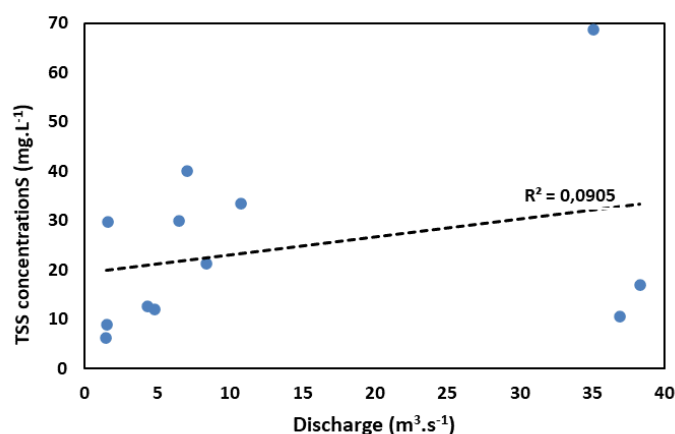


Fig. 2. Relationship between mean monthly discharge and suspended sediment concentration (TSS) in the Agnéby River. The solid line represents the linear regression, and R^2 is the coefficient of determination

3.3 MONTHLY SUSPENDED SEDIMENT FLUXES AND ANNUAL EXPORT

Monthly suspended sediment fluxes, calculated from river discharge and suspended sediment concentrations, exhibit strong seasonal variability (Fig. 3). Fluxes remain very low during low-flow periods, with values below $0.05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ in January, February, and December. In contrast, they increase sharply during flood periods, reaching maximum values in October ($2.41 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$), June ($0.65 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$), and July ($0.39 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$). The annual suspended sediment export is estimated at approximately 12,346 tonnes. This export is largely concentrated over a limited number of months. October alone accounts for more than 50% of the annual suspended sediment export, while June, July, and November also contribute significantly to the total flux. Conversely, low-flow months make only a marginal contribution to the annual suspended sediment export. These results highlight a strongly pulsed hydrosedimentary regime, characterized by a pronounced temporal concentration of sediment transfers during high-flow periods.

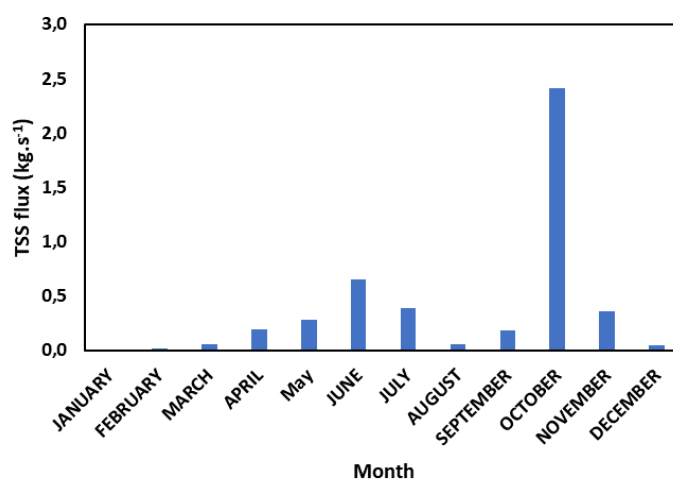


Fig. 3. Monthly suspended sediment flux

3.4 CHEMICAL COMPOSITION AND DYNAMICS OF DISSOLVED ELEMENTS

Monthly concentrations of the main dissolved constituents measured in the Agnéby River are presented in Table 3. Total dissolved solids (TDS) range from $136.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in October to $185.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in September, with an annual mean value of $166.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The ionic composition is dominated by bicarbonates (HCO_3^-), which represent the main anionic species, followed by chlorides. Among cations, calcium and sodium are the dominant elements, whereas magnesium and potassium occur at more moderate concentrations. Sulfate and nitrate concentrations remain low throughout the year. A clear seasonal variability in

dissolved concentrations is observed, with generally higher values during low-flow periods and a relative dilution during high-flow conditions, particularly in October. Dissolved silica also exhibits seasonal variations, with higher concentrations during low-flow periods.

Table 3. Monthly concentrations of major dissolved elements in the Agnéby River (2020)

Month	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	TDS (mg.L ⁻¹)
January	83.00	23.0	0	8.90	14.04	6.56	15.7	6.30	23.90	181.40
June	85.64	14.7	1	5.70	13.23	2.19	18.5	3.75	16.30	161.01
September	114.00	16.0	2	0.201	23.00	7.00	16.0	4.00	3.24	185.44
October	63.44	18.0	1	2.50	16.04	4.62	12.0	5.23	13.70	136.53

3.5 TSS/TDS RATIO

The ratios between suspended sediment concentrations (TSS) and total dissolved solids (TDS) are presented in Table 4. The TSS/TDS ratio exhibits strong seasonal variability throughout the year, with a minimum value of 0.034 observed in January and a maximum value of 0.503 recorded in October. Intermediate values are observed in June (0.106) and September (0.115). The mean SS/TDS ratio over the study period is 0.19.

Table 4. Monthly MES/TDS ratios in the Agnéby River (2020)

Month	TSS (mg.L ⁻¹)	TDS (mg.L ⁻¹)	TSS/TDS ratio
January	6.18	181.40	0.034
June	17.00	161.01	0.106
September	21.33	185.44	0.115
October	68.71	136.53	0.503
Mean	—	—	0.19

4 DISCUSSION

4.1 HYDRO-GEOCHEMICAL FUNCTIONING AND CONTROL OF SUSPENDED AND DISSOLVED TRANSPORT

The results show that the hydro-geochemical functioning of the Agnéby River is closely controlled by the hydrological regime, which simultaneously governs the transport of suspended sediments (TSS) and dissolved elements. SS concentrations and fluxes generally increase with discharge, highlighting the key role of flow conditions in the mobilization and transfer of solid particles. Maximum fluxes occur during high-flow periods, confirming that sediment export is mainly driven by flood events, as commonly observed in humid tropical river basins [3]. At the same time, the chemical composition of Agnéby waters, dominated by bicarbonates and alkaline-earth cations (Ca²⁺, Mg²⁺), indicates a mineralization pattern primarily controlled by chemical weathering of basin rocks, which is typical of humid tropical catchments in West Africa [3]. The low concentrations of sulfates and nitrates suggest a limited anthropogenic influence on water chemistry. Seasonal variability in total dissolved solids, characterized by lower values during high-flow periods, reflects a dilution effect associated with increased discharge, whereas higher concentrations observed during low-flow conditions result from longer water residence times and enhanced water–rock interaction. Dissolved silica concentrations further confirm the dominant role of silicate mineral weathering in shaping the geochemical signature of the Agnéby River. However, the relationship between discharge and TSS concentration is not strictly linear (Fig. 2), indicating a partial decoupling between concentrations and solid fluxes. High fluxes may be associated with moderate concentrations during periods of high discharge, whereas high concentrations may correspond to lower fluxes during low-flow conditions. This variability reflects the combined influence of sediment availability, pedological and geological characteristics of the watershed, vegetation cover, and anthropogenic pressures. It highlights the need for an integrated approach that simultaneously considers suspended and dissolved transfers to properly interpret the hydrosedimentary functioning of the Agnéby River [4].

4.2 COUPLING BETWEEN MECHANICAL EROSION AND CHEMICAL WEATHERING AND REGIONAL COMPARISON

The combined analysis of suspended sediment and dissolved element fluxes reveals a seasonal alternation between periods dominated by chemical weathering and periods dominated by mechanical erosion. The low TSS/TDS ratios observed during low-flow conditions indicate efficient chemical weathering, favored by reduced discharge and increased water residence time. In contrast, the high TSS/TDS ratios recorded during flood periods reflect the predominance of mechanical erosion, driven by intense runoff and the mobilization of surface particles and sediments stored in the riverbed. Overall, these results demonstrate a clear seasonal alternation between chemically dominated processes during low-flow periods and mechanically dominated processes during flood events. This coupled hydro-geochemical functioning is summarized in the conceptual diagram presented in Fig. 4.

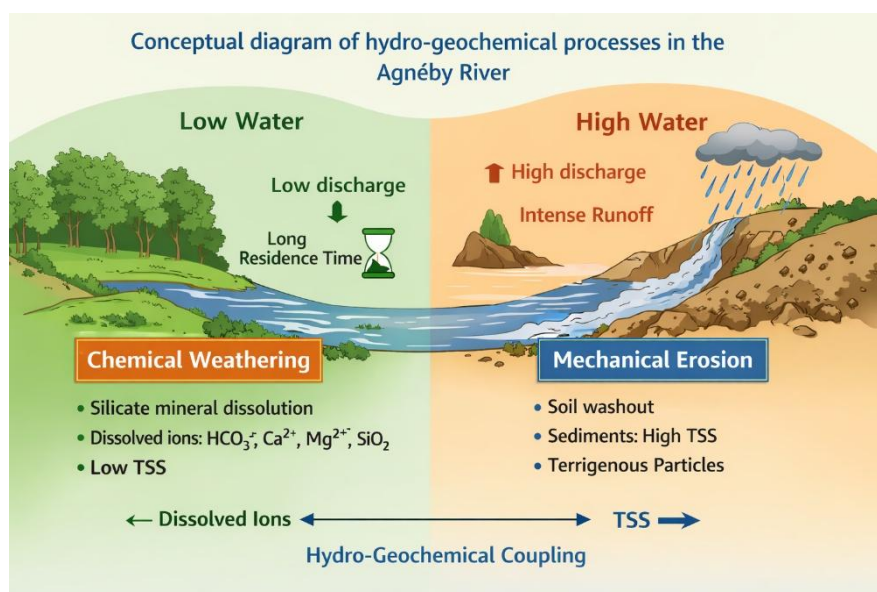


Fig. 4. Conceptual diagram illustrating the coupling between dissolved load dynamics (chemical weathering) during low-flow conditions and suspended sediment transport (mechanical erosion) during high-flow periods in the Agnéby River

The updated comparison highlights marked contrasts in suspended sediment dynamics between the Agnéby River and larger river basins in Côte d'Ivoire (Table 1). The Agnéby River, a medium-sized tropical coastal catchment, exhibits an impulsive sediment transport regime, with more than 50% of the annual suspended sediment export concentrated within a single month. This behaviour reflects the limited sediment storage capacity of the basin and the strong influence of short-duration high-flow events on sediment mobilisation, a characteristic commonly observed in small to medium tropical catchments [4], [3]. In contrast, larger river systems such as the Bandama and the Comoé display a more progressive seasonal distribution of suspended sediment transport. In the Bandama River, recent measurements conducted at the Bafécao hydrometric station during the 2019–2020 hydrological year indicate very low mean suspended sediment concentrations ($\sim 9 \text{ mg L}^{-1}$) and an annual suspended sediment export of approximately $8 \times 10^4 \text{ t yr}^{-1}$. This reduced sediment yield is primarily attributed to sediment trapping by the Kossou and Taabo reservoirs, which significantly attenuate downstream sediment fluxes and redistribute sediment transport over several months of the rainy season [12]. Similar effects of reservoir regulation on suspended sediment fluxes have been widely documented in large river basins worldwide [4]. The Comoé River, despite its large drainage area, also exhibits a progressive hydrological control on sediment transport, with suspended sediment fluxes distributed over the rainy season rather than being dominated by a single extreme event. This behaviour reflects the buffering effect of channel and floodplain storage typical of large tropical basins, which dampen short-term hydrological variability [13], [14]. At the regional scale, studies conducted in the Sassandra watershed highlight a strong seasonal hydrological variability, with sediment mobilisation enhanced during flood periods but generally spread over the rainy season rather than concentrated within a single peak month [15]. The consistency between hydrosedimentary and geochemical indicators further supports these interpretations. In the Agnéby River, TSS/TDS ratios ranging from 0.08 to 0.30 indicate a transition from chemically weathering-dominated conditions during low-flow periods to a mixed regime increasingly influenced by mechanical erosion during high-flow events [16], [14], [4]. In contrast, the Bandama River shows a much lower relative contribution of suspended solids, with suspended sediments representing only about 12% of the total exported matter, confirming the dominant role of dissolved

loads under regulated flow conditions [12]. These contrasts emphasise the combined influence of basin size, hydrological regulation and sediment storage capacity on suspended sediment dynamics in tropical river systems

Table 5. Comparative hydrosedimentary and geochemical characteristics of the Agnéby River and selected tropical river basins

Basin	Basin type	Annual suspended sediment export	Contribution of peak period	Mean / max TSS (mg L ⁻¹)	Dominant sediment transport regime	References
Agnéby (Côte d'Ivoire)	Medium-sized tropical coastal basin	$\sim 1.2 \times 10^4$ t yr ⁻¹	> 50% (Oct.)	Mean ~ 30 / Max ~ 70	Impulsive, flood-dominated	This study
Bandama (Côte d'Ivoire)	Large tropical basin, regulated	$\sim 8.0 \times 10^4$ t yr ⁻¹ (MES)	Seasonal, multi-month	Mean ~ 9	Strongly regulated by dams	[12]
Comoé (Côte d'Ivoire)	Large tropical basin	10^4 – 10^5 t yr ⁻¹	< 40%	60–150	Progressive hydrological control	[13]
Sassandra watershed	Humid tropical basin	Order of 10^4 – 10^5 t yr ⁻¹	Seasonal	High during flood events	Flood-enhanced mobilisation	[15]
Upper Niger	Very large tropical basin	$> 10^6$ t yr ⁻¹	< 30%	100–300	Storage–remobilisation dominated	[14]
Tropical forest basins (general)	Humid tropical basins	10^3 – 10^5 t yr ⁻¹	Variable	50–150	Mixed discharge–concentration control	[4], [16]

4.3 IMPLICATIONS FOR COASTAL ECOSYSTEMS AND THE BLUE ECONOMY

The hydro-sedimentary dynamics identified in this study have direct implications for the coastal and lagoonal ecosystems located downstream of the Agnéby basin. Large inputs of suspended sediments during flood events contribute to increased turbidity and sediment accumulation in estuarine environments, which may negatively affect primary productivity and aquatic habitats. Conversely, dissolved matter inputs, which are more evenly distributed throughout the year, play a key role in sustaining the natural fertility of coastal ecosystems. These processes directly influence blue economy activities, including fisheries, aquaculture, navigation, and the management of port and lagoonal infrastructures. The results therefore highlight the importance of an integrated watershed–coastal management approach aimed at reducing upstream erosion while preserving the ecological functioning of coastal zones. In a context of increasing climate variability, such an approach appears essential to reconcile environmental sustainability with socio-economic development in Côte d'Ivoire.

5 CONCLUSION

This study highlights the central role of hydrological variability in controlling suspended sediment and dissolved matter transfers within the Agnéby River basin. The coupled analysis of TSS and TDS reveals a contrasted hydro-geochemical functioning, with chemical weathering dominating during low-flow conditions and mechanical erosion becoming increasingly significant during flood events. The strong temporal concentration of suspended sediment fluxes, with a large proportion of the annual export associated with a limited number of high-flow events, reflects an impulsive transport regime typical of medium-sized tropical coastal basins. Moderate suspended sediment concentrations combined with relatively low TSS/TDS ratios indicate that, despite the importance of floods in sediment mobilisation, chemical weathering remains a key process structuring the geochemical behaviour of the basin. Regional comparison shows that this response differs markedly from that of larger Ivorian river systems, such as the Bandama and Comoé rivers, where hydrological regulation and greater sediment storage capacity dampen seasonal variability and promote a more progressive redistribution of sediment fluxes. The Agnéby River thus appears highly sensitive to hydroclimatic variability, and its solid and dissolved inputs play a significant role in sustaining sediment supply to the Ébrié Lagoon and adjacent coastal environments. In the context of ongoing climatic changes and increasing anthropogenic pressures, these results underline the need for strengthened hydro-sedimentary monitoring of tropical coastal basins to improve the understanding and management of land–ocean fluxes and to support the sustainable development of the blue economy in Côte d'Ivoire.

REFERENCES

- [1] Milliman, J. D. and Farnsworth, K. L., *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, 392 p, 2011. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511781247>.
- [2] P. Floury, J. Gaillardet, G. Tallec, P. Ansart, J. Bouchez, P. Louvat, C. Gorge, Chemical weathering and CO₂ consumption rate in a multilayered-aquifer dominated watershed under intensive farming: The Orgeval Critical Zone Observatory, France, 33 (2), p. 195-213, 2019. <https://doi.org/10.1002/hyp.13340>.
- [3] Probst, J.-L., Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale: Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. *Sciences Géologiques*, Mémoire, 94, *Strasbourg: Institut de Géologie – Université Louis-Pasteur*, 1992. https://www.persee.fr/issue/sgeol_0302-2684_1992_mon_94_1.
- [4] D. E. Walling, Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers, *Geomorphology*, 79 (3-4), pp. 192-216, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.019>
- [5] B. Kamagate, A. Dao, D. Noufe, K. I. Yao, V. Fadika, D. L. Gone and I. Savane, Contribution Du modele Gr4j A La modelisation hydrologique du bassin versant de l'Agneby au Sud-Est de la Cote d'Ivoire, *LARHYSS Journal*, 14 (1), pp. 187-208, 2017. <https://asjp.cerist.dz/en/article/55455>.
- [6] A. B. P. Kouakou, E. A. Lawin, B. Kamagaté, A. Dao, I. Savané, and B. Srohourou, Rainfall variability across the Agneby watershed at the Agboville outlet in Côte d'Ivoire, West Africa, *Hydrology*, 3 (4), 43p, 2016. <https://doi.org/10.3390/hydrology3040043>.
- [7] F. Pomázi and S. Baranya, Comparative assessment of fluvial suspended sediment concentration analysis methods, *Water*, 12 (3), p. 873, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030873>.
- [8] Musy, A., *Hydrologie générale*. Lausanne: EPFL Press, 365 p, 2005.
- [9] S.B. Bamba, J. Abe, B.S. Metongo, K. Affian and A. A. Adingra, Transport particulaire et dissous d'un fleuve intertropical, le Bandama (Côte d'Ivoire). *Bioterre, Rev. Inter. Sci. de la vie et de la terre*, 4 (1), pp. 37-58, 2004.
- [10] Nouvelot, J-F., Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, 6 (4), pp.43–86, 1969.
- [11] RODIER J., Analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 8ième éd. Dunod, 1384 p, 1996.
- [12] A. L. S. Kouame, N. Aka, Y. D. A. Gboko and N. Soro, Transports solides et dissous du Bandama à Bafécao (Sud de la Côte d'Ivoire), *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 19 (4), pp. 1720-1731, 2025. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v19i4.33>.
- [13] K. L. Adopo, T. Lasm, O. Z. De Lasme, K. L. Kouassi, V. Gahou, and K. Aka, Geomorphological changes at the estuary of Comoe river (Grand-Bassam, South Eastern Côte d'Ivoire) due to suspended solids transport, *Journal of Scientific Research and Reports*, 3 (20), pp. 2622-2637, 2014. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2014/12133>.
- [14] M Meybeck, L Laroche, H. H Dürr, J. P. M Syvitski, Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers, *Global and Planetary Change*, 39 (1-2), pp. 65-93, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00018-3).
- [15] Santé, N., N'Go, Y. A., Soro, G. E., Meledje, N. H., & Goula, B. T. A., Characterization of meteorological drought occurrences in Côte d'Ivoire: Case of the Sassandra watershed. *Climate*, 7 (4), pp. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.3390/cli7040060>.
- [16] J. Gaillardet, B. Dupré, P. Louvat and C. J. Allègre, Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers, *Chemical Geology*, 159 (1-4), pp. 3–30, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00031-5).

Development and Physico-Mechanical Characterization of an Innovative Ternary Composite Based on Low-Density Polyethylene Waste, Sanaga Sand, and Coconut Shell Powder Using an Artisanal Process for Sustainable Construction

Kontchou Herman Fredy¹, Kenmeugne Bienvenu¹, Annouar Djidda Mahamat², Tchikdje Kouekem Marthe Prudence³, and Essome Mbang Jonas Peequeur⁴

¹Department of Industrial and Mechanical Engineering, National Advanced School of Engineering, University of Yaoundé I, Cameroon

²Faculty of Exact and Applied Sciences, University of Ndjamen, Chad

³Pôle de recherche, de l'Innovation et l'Entrepreneuriat (PRIE), Institut Universitaire de la Cote, Douala, Cameroon

⁴Centre d'Etudes sur les Changements Climatiques et la Mobilité (CECAM), Douala, Cameroon

Copyright © 2026 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: Faced with the proliferation of plastic waste (LDPE), the overexploitation of Sanaga sand, and the under-utilization of coconut husks in Cameroon, this study developed and characterized an innovative ternary composite. The aim was to establish an artisanal manufacturing process and optimize the proportions of Low-Density Polyethylene (LDPE) waste, Sanaga sand, and coconut husk powder for sustainable construction. The process, inspired by ecological paving, tested nine formulations (LDPE 20-40%, sand/coconut 0-10%). Samples were characterized for their apparent density, water absorption rate, and mechanical properties (bending). Results showed a decrease in density with LDPE and coir powder. Water absorption remained very low (max. 0.640%), guaranteeing excellent durability in damp conditions. Although maximum flexural strength was lower than for thermo-compressed composites (probably due to the absence of pressure compaction in the artisanal method), the incorporation of coir conferred a certain ductility. Some formulations (F0/40, F5/20) are potentially usable for T4/T5 or T5 type pavers, and indoor flooring (P2). Future optimization will include pressure compaction and improvement of the LDPE/coconut interface to enhance performance. This work contributes to sustainable waste management and the promotion of environmentally-friendly building materials.

KEYWORDS: Coconut Shell Powder, Composite, Low-Density Polyethylene (LDPE), Sanaga Sand, sustainable construction.

1 INTRODUCTION

Plastics have profoundly transformed our daily lives, offering lightness, low cost, and versatility to many sectors. However, this success has led to a massive proliferation, turning these non-biodegradable materials into a major environmental burden. In Cameroon, this issue is particularly acute, notably in the Littoral region where the city of Douala generates up to 600,000 tons of plastic waste annually. These residues, with a lifespan potentially reaching 500 to 1000 years for bags, pose a severe threat to ecosystems and public health. Simultaneously, the country faces the overexploitation of natural resources such as Sanaga sand, whose artisanal extraction causes significant environmental degradation, including species disappearance and soil/water pollution. Furthermore, agricultural waste, like coconut shells, is underutilized, and its incineration contributes to carbon dioxide emissions. This context highlights the urgent need to develop circular approaches to transform these wastes into valuable resources, especially for sustainable construction applications.

Numerous studies have focused on valorizing plastic waste as a primary component in construction materials, largely in the form of binary composites.

Plastic-sand composites have been extensively investigated, confirming their potential for manufacturing various elements like tiles, bricks, and interlocking pavers. For instance, initial work [1] demonstrated the feasibility of such composites, identifying a formulation that achieved a compressive strength of 13.1 MPa. Subsequent research emphasized the critical role of the processing method [2]. By

exploring manual versus thermo-compression techniques, one study showed a significant strength improvement with thermo-compression (up to 22.6 MPa in flexural strength) and a further increase with the addition of clay (up to 34.9 MPa). These findings confirm that process optimization, including precise parameter control [3, 4] for temperature and composition, is fundamental to enhancing the final mechanical properties.

Concurrently, researchers have explored the integration of natural fibers to further modify and improve performance. Binary plastic-coconut shell composites have garnered particular interest: a prior study [5] successfully produced composite rafters from crushed coconut shells and LDPE waste, reporting an impressive maximum flexural strength of 33.30 MPa at a 35% plastic content. More broadly, other characterization studies [6, 7, 8] confirm the general trend that the inclusion of coconut fibers enhances certain mechanical or thermal properties, though this is often accompanied by a reduction in overall stiffness (Young's Modulus), a common trade-off when using natural fibers [9].

Despite the documented valorization of plastic waste with either sand or coconut shells, our literature review reveals a significant novelty in the proposed approach. Currently, no exhaustive study has focused on the elaboration and characterization of a ternary composite specifically combining Low-Density Polyethylene (LDPE) waste, Sanaga sand, and coconut shell powder. The originality of this work also lies in adopting an artisanal manufacturing method. Existing studies have mainly favored binary composites or industrial processes requiring specialized equipment (extrusion, thermo-compression) [2, 3]. The exploration of this novel composition, coupled with a simplified and accessible manufacturing method, constitutes an unexplored and innovative research field for the development of eco-friendly building materials, addressing the needs of contexts with limited technological means [10, 11].

To address this overall challenge, the specific objectives of this research were:

- 1) develop an artisanal elaboration process for the ternary composite;
- 2) optimize the mass proportions of the three constituents to achieve the best performance;
- 3) characterize the physical (apparent density, water absorption rate) and mechanical properties (3-point flexural strength, strain at break, Young's modulus) of the artisanally produced composites;
- 4) evaluate the suitability of this new composite as a construction material by comparing its properties with existing standards and materials.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 RAW MATERIALS

The materials used in this study are Low-Density Polyethylene (LDPE) waste, Sanaga sand, and coconut shell powder.

- **LDPE Waste:** Collected from a company in Douala, Cameroon. It primarily consists of LDPE, which was washed to remove impurities before use. LDPE is widely used for packaging, making it an abundant waste material (figure 1).



Fig. 1. LDPE Waste collected for the composite elaboration

- **Sanaga Sand:** Sourced from the Sanaga river in Cameroon, it is commonly used in local construction. It was sieved through a 1 mm sieve to obtain a particle size below 1 mm (figure 2).



Fig. 2. Sanaga Sand (a) Raw sand (b) Sieved sand ($d < 1\text{mm}$)

- **Coconut Shell Powder:** Coconut shells were collected from vendors on the Douala-Yaoundé road. They were crushed to obtain coarse particles, then sieved through a 1 mm sieve to ensure a particle size below this limit (figure 3).

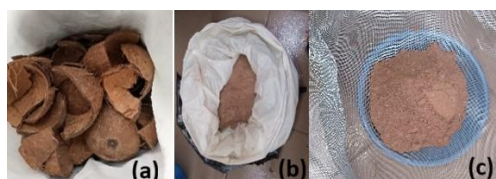


Fig. 3. Coconut Shell Powder: (a) Raw shells, (b) Crushed particles, (c) Sieved powder ($d < 1\text{mm}$).

2.2 COMPOSITE FORMULATIONS

Nine composite formulations were elaborated based on prior studies. The mass proportions of the constituents (LDPE, sand, and coconut shell powder) were varied as shown in Table 1. Percentages are calculated relative to the total mass of the composite.

Table 1. Mass proportions of the nine composite formulations

Formula	LDPE (%)	Sand (%)	Coconut (%)
F0/20	20	80	0
F0/30	30	70	0
F0/40	40	60	0
F5/20	20	75	5
F5/30	30	65	5
F5/40	40	55	5
F10/20	20	70	10
F10/30	30	60	10
F10/40	40	50	10

2.3 ARTISANAL ELABORATION PROCESS

The process (figure 4) is inspired by the artisanal method of manufacturing ecological pavers, utilizing a hybrid sand and coconut shell powder filler. The detailed steps are:

Preheating: A pot containing 20 ml of used engine oil was heated for 15 minutes to prepare for the LDPE melting.

1. Plastic Melting: The pre-weighed LDPE was gradually introduced into the pot and stirred for approximately 20 minutes to ensure complete and homogeneous melting.
2. Hybrid Filler Preparation: The Sanaga sand and coconut shell powder (both sieved at 1 mm) were pre-mixed together.
3. Component Mixing: The sand/coconut mixture was progressively incorporated into the molten plastic and stirred for 15 minutes to obtain a homogeneous composite.
4. Molding and Cooling: The resulting homogeneous paste was poured into standardized molds (dimensions $80 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$). The samples were demolded after solidification by cooling at ambient temperature (10-30 minutes).

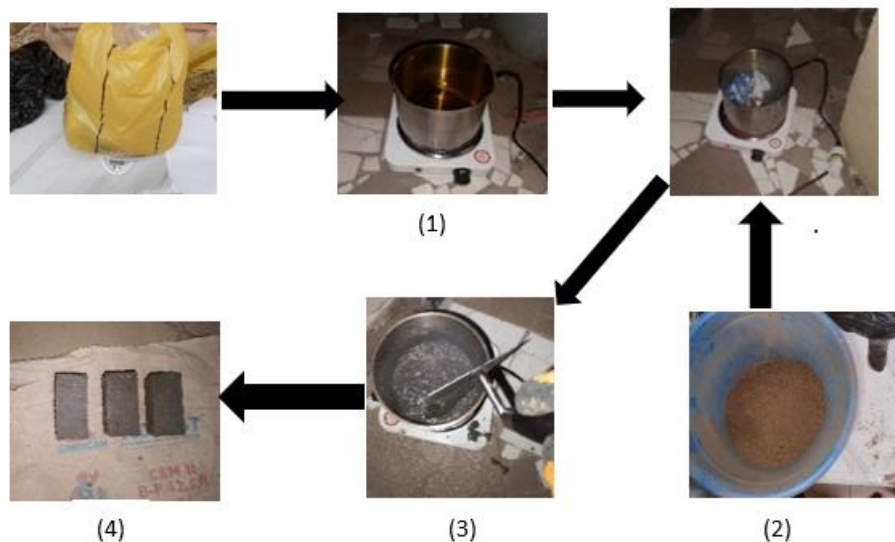


Fig. 4. Key stages of the artisanal elaboration process

2.4 SAMPLE CHARACTERIZATION

The physical and mechanical properties were determined by the following tests:

- **Apparent Density (ρ_{App}):** Calculated from the mass (M) and volume (V) (measured with a caliper), according to the formula:

$$\rho_{App} = \frac{M}{V} \quad (1)$$



Fig. 5. Apparent Density test

- **Three-Point Bending Test:** Performed according to the NF EN ISO 178 standard. Five samples per formulation (dimensions $80 \times 10 \times 5$ mm³) were tested. The flexural strength (σ_f), strain at break (ϵ_f), and Young's modulus (E_f) were calculated from the load-deflection curves.



Fig. 6. Three-Point Bending Test (a) 3-point bending test samples (b) Sample on the machine

- **Water Absorption Rate:** The immersion absorption test was conducted according to standard NBN B 15-215: 1989. Samples were immersed in tap water at 20 ± 2 C for 24 hours.

The absorption rate was calculated as:

$$\text{Absorption (\%)} = \frac{M_{\text{wet}} - M_{\text{dry}}}{M_{\text{dry}}} \times 100 \quad (2)$$

where M_{wet} is the wet mass and M_{dry} is the initial dry mass.



Fig. 7. Absorption Test

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 PHYSICAL PROPERTIES

- **Apparent Density:** the results show a nearly linear decrease in apparent density (with correlation coefficients $R^2 > 0.996$) as the LDPE proportion increases across all series (0%, 5%, and 10% coconut shell powder). This is consistent with the lower intrinsic density of LDPE compared to the fillers. A global lowering of density is also observed with the addition of coconut shell powder. For 20% LDPE, the density decreases from 1689 kg/m³ (0% coconut) to 1599 kg/m³ (10% coconut), while for 40% LDPE, it drops from 1473 kg/m³ (0% coconut) to 1279 kg/m³ (10% coconut).

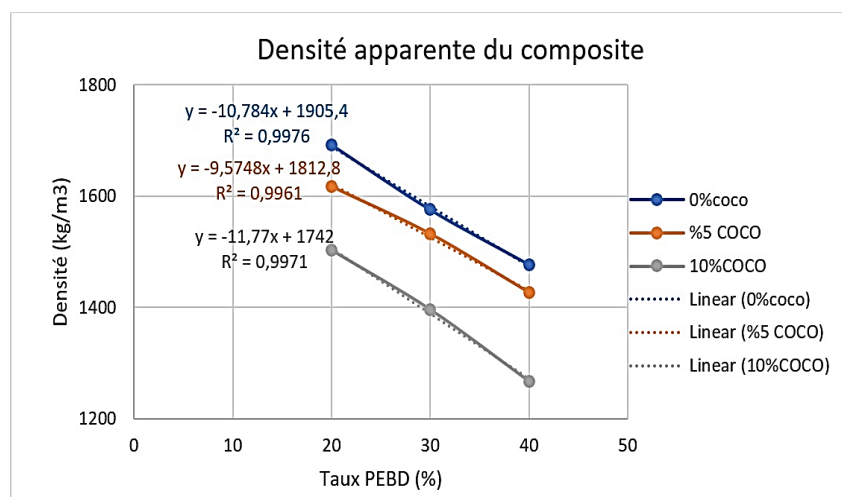


Fig. 8. Apparent Density as a function of LDPE content for different coconut powder proportions (Based on the text: showing quasi-linear decrease with increasing LDPE)

- Water Absorption Rate:** the water absorption rate generally decreases as the LDPE content increases, regardless of the coconut shell powder proportion. For 0% coconut, the rate drops from 0.509% (20% LDPE) to 0.148% (40% LDPE). Conversely, the absorption rate slightly increases with the proportion of coconut shell powder. Samples with 10% coconut exhibited the highest absorption rates for the same LDPE content, with a maximum recorded at 0.640% (10% coconut, 20% LDPE). These values remain very low, below the 6% limit typically required for pavers (NBN B15-001).

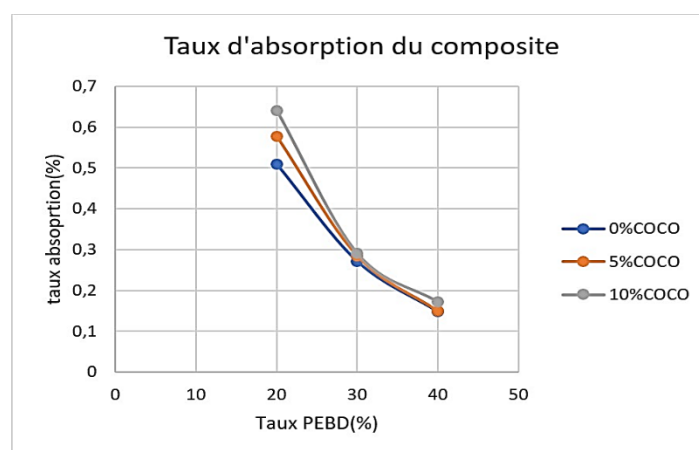


Fig. 9. Water Absorption Rate as a function of LDPE content for different coconut powder proportions (Based on the text: showing general decrease with in- creasing LDPE, and slight increase with increasing coconut)

3.2 MECHANICAL PROPERTIES (FLEXURAL TEST)

- Flexural Strength (σ_f):** the flexural strength generally decreases as the coconut content increases. The maximum strength is 4.139 MPa at 0% coconut (40% LDPE), compared to 3.812 MPa at 5% coconut (20% LDPE) and 2.633 MPa at 10% coconut (30% LDPE). A peak behavior is observed as a function of the LDPE percentage, suggesting an optimal balance between the LDPE matrix and the fillers for stress transfer.

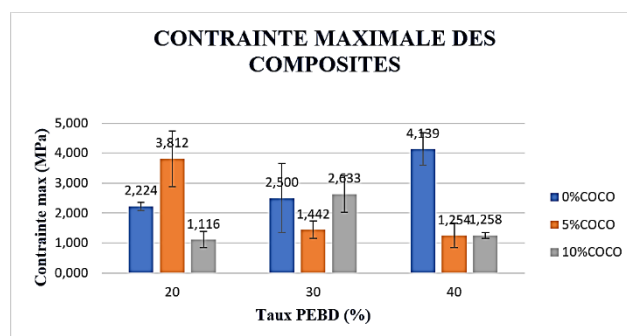


Fig. 10. Flexural Strength (σ_f) as a function of LDPE content for different coconut powder proportions (Based on the text: showing a peak behavior and a global decrease with increasing coconut)

- **Strength Strain at Break (ϵ_f):** the strain at break generally increases with the percentage of LDPE (due to its ductility). The highest value recorded is 6.938% (10% coconut, 30% LDPE). The coconut shell powder content also tends to increase the deformation up to an optimum. This enhancement of ductility is a beneficial characteristic for civil engineering applications.

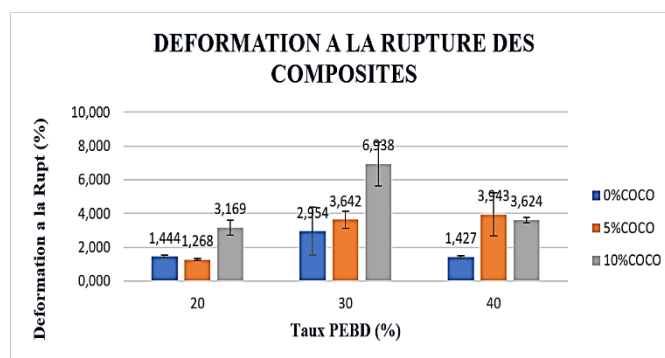


Fig. 11. Strain at Break (ϵ_f) as a function of LDPE content for different coconut powder proportions (Based on the text: showing general increase with increasing LDPE and a maximum around 30-40% LDPE)

- **Young's Modulus (E_f):** the Young's modulus decreases drastically as the coconut shell powder content increases. The values for 5% and 10% coconut are very low compared to the 0% coconut series (which reached a peak of 610.782 MPa at 40% LDPE). This reduction indicates a decrease in stiffness and an increase in flexibility of the composite due to the soft, porous nature of the vegetable fiber.

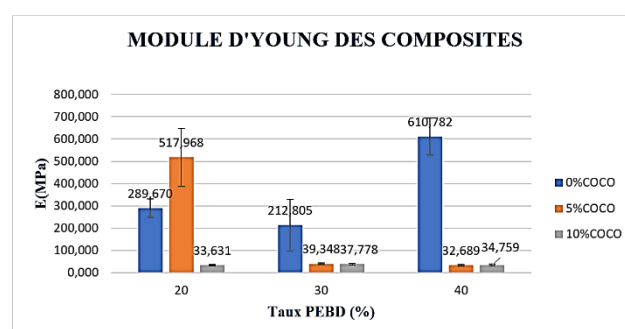


Fig. 12. Young's Modulus (E_f) as a function of LDPE content for different coconut powder proportions (Based on the text: showing a drastic decrease with increasing coconut content)

3.3 DISCUSSION

The nearly linear decrease in apparent density with increasing LDPE content, coupled with a global decrease upon adding coconut shell powder, confirms the lightweight nature of the LDPE matrix (0.90 to 0.93 g/cm³) and the intrinsic low density of coconut fiber [9, 7]. This makes the resulting composite a promising candidate for lightweight construction materials.

The measured water absorption rates are remarkably low (maximum 0.640%). This result is significantly lower than the values reported for conventional cement or concrete materials and far below the 6% limit often imposed for pavers (NBN B15-001). This confirms the excellent waterproofing capacity provided by the continuous LDPE matrix, similar to the work of [3, 11] on plastic-sand composites. The slight increase in absorption with coconut content, especially at 10%, is attributed to the presence of porous organic material, which tends to absorb water, a phenomenon commonly observed in natural fiber composites [8]. However, the LDPE encapsulation effectively minimizes this effect.

Regarding mechanical performance, the flexural strength obtained (maximum 4.139 MPa) is a critical point for discussion. This value is substantially lower than:

- The 22.6 MPa (flexural strength) obtained for thermo-compressed plastic-sand-clay composites [2].
- The 33.30 MPa (flexural strength) for LDPE-coconut rafters [5].

This lower performance is primarily and directly attributed to the artisanal fabrication process, specifically the absence of pressure compaction during molding and solidification. The importance of pressure in reducing porosity and ensuring optimal contact between the molten plastic and the fillers (sand and coir) is well documented in literature [2, 12]. The artisanal process, while accessible, results in a composite with higher internal porosity, leading to reduced stress transfer capacity and premature failure, regarding the uniformity of the mixture [4].

The incorporation of coconut shell powder leads to a significant reduction in the Young's Modulus (stiffness), this outcome aligns with previous literature on natural fiber-reinforced systems [9, 6]. However, this reduction in stiffness is accompanied by an increase in strain at break (ϵ_f) and ductility (max. 6.938%). This enhanced flexibility is beneficial for construction applications exposed to thermal fluctuations or slight ground movements, improving the material's tolerance to deformation before fracture.

3.4 APPLICATIONS

Regarding their practical suitability, the mechanical performance of the developed composites was evaluated against established construction standards. Despite exhibiting lower flexural strength than traditional industrial materials, formulations F0/40 (4.139 MPa) and F5/20 (3.812 MPa) demonstrate significant potential for specific structural and architectural applications.

Although a study on compressive strength still needs to be conducted, in accordance with the NF EN 1339 standard for paving units, F0/40 complies with the requirements for both T4 and T5 type pavers (which require flexural strengths of ≥ 4 MPa and ≥ 3.5 MPa, respectively), while F5/20 satisfies the criteria for T5 pavers. Furthermore, formulation F0/40 meets the mechanical threshold (> 4 MPa) defined by the NF DTU 52.1 P1-2 standard for P2 category interior flooring, suitable for low-stress environments [2, 10, 13].

4 CONCLUSION

This study successfully established an accessible artisanal process for developing an innovative ternary composite based on LDPE waste, Sanaga sand, and coconut shell powder, and characterized its physico-mechanical properties across nine formulations. The results confirmed the excellent low water absorption (max. 0.640%), which is a major advantage for material durability in wet environments, largely exceeding the performance of traditional building materials. Although the mechanical performance, notably the flexural strength (max. 4.139 MPa), was limited compared to industrial composites due to the absence of pressure compaction in the artisanal method, the material exhibited significant ductility and could be classified as an acceptable paving material (T4/T5 or T5 type) or interior flooring (P2) for certain formulations. The incorporation of coconut shell powder was found to reduce stiffness but increase ductility, which is desirable in civil engineering applications where flexibility is beneficial. This work provides an accessible and immediate solution for waste valorization in contexts with limited technology. Future research should focus on optimizing the artisanal process by integrating a simple compaction step and applying surface treatments to the coconut shell powder [14] to improve the polymer/fiber interface, thereby maximizing the mechanical strength of this environmentally friendly material.

REFERENCES

- [1] R. Rakotosaona, J.d. D.Ramaroson, M. Mandimbisoa, J. O. Andrianaivoravelona, P. Andrianary, F. Randrianarivelo, and L. Andrianaivo, Valorisation l'échelle pilote des déchets plastiques pour la fabrication de matériaux de construction, Madarevues, 2014. [Online]. Available: <http://45.92.109.204/madarevues/?Valorisation-a-l-echelle-pilote-des-dechets-plastiques-pour-la-fabrication-de>.
- [2] B. Traore, Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés): Amélioration de la résistance par des charges en argiles, Thèse de Doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté; Université Felix Houphouët-Boigny, Abidjan, 2018. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-02088767>.

- [3] A. Kumi-Larbi Jnr, R. Galpin, S. Manjula, Z. Lenkiewicz, and C. Cheeseman, Reuse of waste plastics in developing countries: Properties of waste plastic-sand composites, *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, no. 7, pp. 3821-3834, 2022.
- [4] R. Kumar, S. B. Singh, S. Chauhan, and S. Dagar, A comprehensive review on plastic waste utilization in concrete, paver blocks and bituminous roads, *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, p. 123986, 2020.
[Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/389040145_A_Comprehensive_Review_of_Studies_on_Plastic_Waste_Utilisation_in_Road_and_Concrete_Infrastructure.
- [5] M. S. Fofana, J. O. Obre Sery, E. Emeruwa, and A. J. Yomanfo, Influence of plastic and coconut shell (*cocos nucifera* L.) on the physico-mechanical properties of the 8/6 composite rafter, *Open Journal of Composite Materials*, vol. 13, pp. 57-68, 2023.
- [6] O. Obiukwu, S. Ezenwa, and A. Okoye, Study on the properties of coconut shell powder reinforced high-density polyethylene composite.
[Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/335244032_Study_on_the_Properties_of_Coconut_Shell_Powder_Reinforced_High-Density_Polyethylene_Composite, 2016.
- [7] G. H. Manjunatha Chary and K. Sabeel Ahmed, Experimental characterization of coconut shell particle reinforced epoxy composites, *Journal of Materials and Environmental Sciences*, vol. 8, no. 5, pp. 1661-1667, 2017.
[Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/315803387_Experimental_characterization_of_coconut_shell_particle_reinforced_epoxy_composites_Manjunatha_Chary_G_H_Ahmed_K_S_J_Mater_Environ_Sci_8_5_2017_1661-1667.
- [8] D. O. Bichang'a, A. N. Wanjiru, D. Wanjala, and S. Ouma, Comparative property investigation of raw and treated coconut shell biomass for potential polymer composite application, *Heliyon*, vol. 10, p. e40704, 2024.
[Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024167357>.
- [9] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010, *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552-1596, 2012.
- [10] N. Dorbane, B. Guendouzi, and A. Mezrig, Valorisation des déchets plastiques, une opportunité pour le développement local durable. Référence empirique la wilaya de tiziouzu, *Magallat Al-Iqtisadiat Al-Chamaliyat Li Ifriqia*, vol. 17, no. 1, pp. 629-646, 2021.
[Online]. Available: <https://asjp.cerist.dz/en/article/146374>.
- [11] R. Menad and O. Bouras, Élaboration d'une nouvelle génération de pavés à base de déchets plastiques et de sable, *Mémoire de Master, Université Blida 1*, 2021. [Online]. Available: <http://di.univ-blida.dz:8080/jspui/handle/123456789/13077>.
- [12] A. Kumi-Larbi Jnr, L. Mohammed, T. A. Tagbor, S. K. Tulashie, and C. Cheeseman, Recycling waste plastics into plastic-bonded sand interlocking blocks for wall construction in developing countries, *Sustainability*, vol. 15, p. 16602, 2023.
- [13] S. Benimam, F. Debieb, M. Bentchikou, and M. Guendouz, Valorisation et recyclage des déchets plastiques dans le béton, in *Communication de Conférence*, 2014.
- [14] S. O. Anuchi, K. L. Sedransk Campbell, and J. P. Hallett, Effective pretreatment of lignin-rich coconut wastes using a low-cost ionic liquid, *Scientific Reports*, vol. 12, p. 6108, 2022.

Caractérisation physico-chimique et organique des effluents drainés par le réseau d'Assainissement de la ville d'Abidjan de 2020-2023

[Physicochemical and organic characterisation of effluents drained by the Abidjan city sewerage network from 2020 to 2023]

Zié Anicet Ouattara¹, Gbombele Soro², Bernard Ossey Yapo³, and Solange Marie Yéi Oga²

¹Formation doctorale Sciences Technologies et Agricultures Duraux (FD-STAD), UFHB, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Département de Géologie Appliquée, U.F.R. des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR STRM), Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Laboratoire des Sciences de l'Environnement (LSE), U.F.R. des Sciences et Gestion de l'Environnement (UFR SGE), Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

Copyright © 2026 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 aim of this study is to assess the pollutant load of effluents drained into the sewerage system of the city of Abidjan. Between 2020 and 2023, three sampling campaigns per year were carried out to monitor these waters. A total of 144 wastewater samples were collected and analysed in the laboratory in accordance with the standards in force at the Sub-Directorate for the Inspection of Classified Installations (SDIIC). Parameters such as BOD₅, COD, MES, NH₄⁺, NTK, PO₄³⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, T°C and pH were measured. A multivariate statistical analysis identified the origin of these effluents in the network. The pH varied greatly from very acidic 3.1 to strongly alkaline 13.6. The average values obtained were 292.0 mg/L; 60.9 mg/L and 82.0 mg/L respectively for MES, NH₄⁺ and NTK, with limit values of 150 mg/L, 15 mg/L and 50 mg/L. The COD and BOD₅ concentrations were 1232.1 mgO₂/L and 374.9 mgO₂/L respectively. The limit values for these parameters are 500 mgO₂/L and 150 mgO₂/L. The COD/BOD₅ ratio varies from 2.6 to 4.8, while the BOD₅/COD ratio is between 0.30 and 0.46. These values indicate non-biodegradable effluents. Multivariate analysis indicates that the effluents drained by the network are of industrial origin or predominantly industrial. The non-biodegradability of these effluents, which are often discharged into the Ebrié lagoon without any pre-treatment, poses an environmental risk to this natural receptacle.

KEYWORDS: industrial effluents, biodegradable, pollution, network, Abidjan.

RESUME: Cette étude a pour objectif d'évaluer la charge polluante des effluents drainés dans le réseau d'assainissement de la ville d'Abidjan entre 2020 et 2023. Pour ce faire, trois campagnes de prélèvement par an ont été effectuées pour suivre la qualité ces effluents. Au total, 144 échantillons d'eau usées ont été collectés et ont fait l'objet d'analyse au laboratoire selon les normes en vigueur de la Sous-Direction des Inspections des Installations Classées (SDIIC). Les paramètres tels que : DBO₅, DCO, MES, NH₄⁺, NTK, PO₄³⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, T°C et pH ont été mesurés. Une analyse statistique multivariée a permis d'identifier l'origine de ces effluents dans le réseau. Le pH varié extrêmement de très acide 3,1 à fortement basique 13,6. Les valeurs moyennes obtenues sont de 292,0 mg/L; 60,9 mg/L et 82,0 mg/L respectivement pour les MES, NH₄⁺ et NTK pour des valeurs limites de 150 mg/L, 15 mg/L et 50 mg/L. Les concentrations en DCO et DBO₅ sont respectivement de 1232,1 mgO₂/L et 374,9 mgO₂/L. Les valeurs limites de ces paramètres sont 500 mgO₂/L et 150 mgO₂/L. Le rapport DCO/DBO₅ varie de 2,6 à 4,8 alors celui de DBO₅/DCO est compris entre 0,30 à 0,46. Ces valeurs indiquent des effluents non biodégradables. L'analyse multivariée indique que les effluents drainés par le réseau sont d'origine industrielle ou à dominance industrielle. La non biodégradabilité

de ces effluents qui sont rejetés dans la lagune Ebrié souvent sans aucun prétraitement constitué un risque environnemental pour ce réceptacle naturel.

MOTS-CLEFS: effluents industriels, biodégradable, pollution, réseau, Abidjan.

1 INTRODUCTION

Les pays africains connaissent un développement démographique rapide et incontrôlé depuis leur indépendance. Cette croissance démographique s'est accompagnée d'une intensification des activités industrielles, ce qui n'est pas corrélé avec la mise en place des structures d'assainissement efficaces et adéquates de traitement des eaux usées [1]. L'essor des unités industrielles conjugué à la croissance démographique rapide et incontrôlée de ces villes rendent complexe la gestion des eaux usées car les autorités ne disposent pas d'installations de traitement appropriés pour une bonne épuration des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel [2]. Les ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées sont généralement bien adaptés au traitement des rejets domestiques. Toutefois, les procédés et la capacité des stations d'épuration ainsi que le réseau de collecte ne sont généralement pas compatibles avec certains effluents industriels [3]. Cela représente un risque pour le personnel exploitant, les équipements du réseau ainsi que le milieu récepteur. En effet, ces rejets peuvent contenir de nombreuses substances dangereuses, sous forme solide ou dissoute, ainsi que de nombreux micro-organismes pathogènes, menaçant la qualité des hydrosystèmes dans son ensemble [4]. La Côte d'Ivoire, après le succès de son agriculture pilier de son économie a fondé sa politique industrielle sur la transformation et la valorisation des matières premières agricoles [5]. Le projet d'industrialisation du pays depuis son indépendance a atteint un taux de croissance de 22% en 2022 [6]. Les entreprises ivoiriennes exercent dans divers secteurs à savoir : l'agro-industrie, le textile, l'industrie chimique et dérivé, le secteur minier et énergétique, le secteur mécanique, électrique et électronique et la transformation du bois [5]. Ces unités industrielles pour leur fonctionnement utilisent des quantités importantes d'eau, non seulement dans le processus de transformation mais aussi pour le nettoyage des installations et des outils après production. Les effluents issus de ces processus sont généralement rejetés dans la lagune Ebrié ou dans les réseaux d'assainissement de la ville [5], [7]. Les effluents industriels rejetés dans le réseau d'eau usée sans traitement préalable peuvent engendrer des risques sanitaires et environnementaux. Cette étude a pour objectif d'évaluer la charge polluante des effluents drainés dans le réseau d'assainissement de la ville d'Abidjan entre 2020 et 2023 afin d'alerter le gestionnaire sur les risques sanitaires et environnementaux encourus par les exploitants ainsi que le milieu récepteur.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

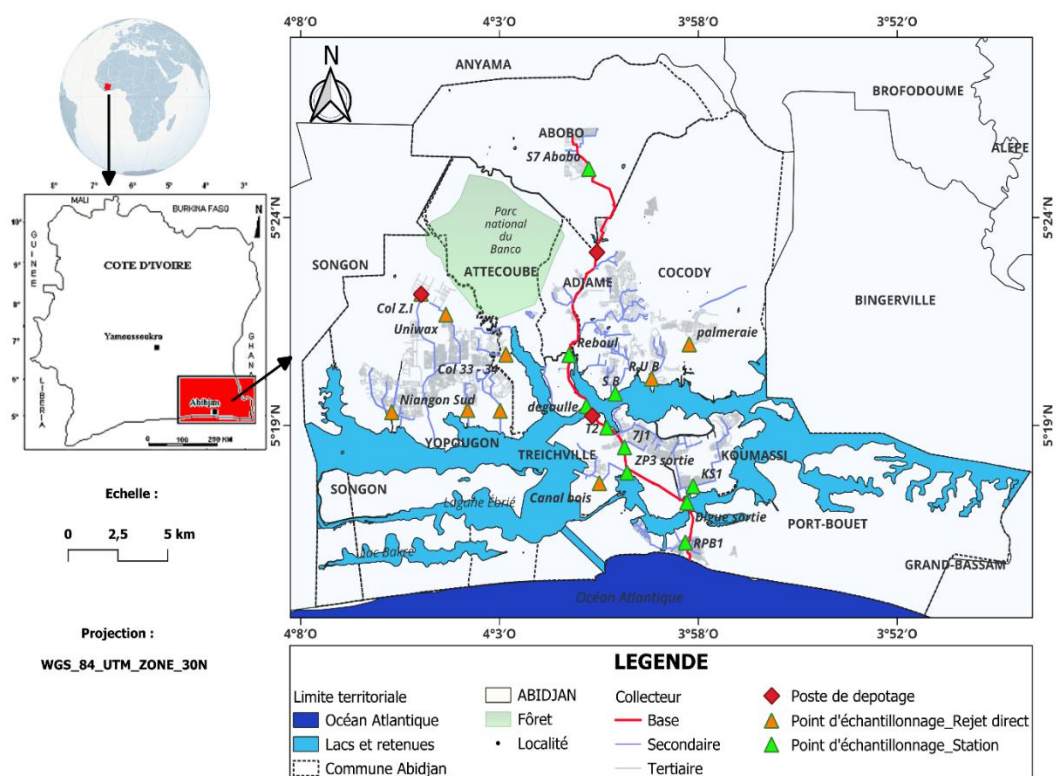


Fig. 1. Localisation du réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

Le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan qui fait l'objet de cette étude est long de 2416 km. Ce réseau se présente majoritairement sous forme d'un système séparatif : un réseau d'eaux usées (EU) long de 780 km et un réseau d'eaux pluviales long de 1636 km.

Cependant, dans les communes d'Adjamé, du Plateau et de Treichville, il se présente sous forme unitaire sur une longueur de 140 km. Plus vingt (20) collecteurs desservent la ville d'Abidjan. Ils collectent les eaux usées provenant des différents quartiers qui leurs sont raccordés. Ces collecteurs sont raccordés au collecteur de base ou collecteur principal, excepté ceux de la zone Ouest (Yopougon) et quelques-uns de la zone Est (Cocody). Ces collecteurs non-raccordés au collecteur de base conduisent les effluents directement dans la lagune Ébrié et dans la nature sans traitement préalable (Fig 1). Long d'environ 25 km, le collecteur de base part de la commune d'Abobo (Abobo Soghefiha) jusqu'à celle de Port-Bouët où il aboutit dans l'océan Atlantique sur 1,2 km par un émissaire. Il collecte et transporte les eaux usées des communes d'Adjamé, Williamsville, Cocody, Il Plateaux, Plateau, Treichville, Marcory, Koumassi et Port-Bouët. Le transport des eaux usées par ce collecteur est facilité par la disposition de quarante-huit (48) stations de pompage et de relevage et de quatre (04) stations de dessablage-dégrillage sur son itinéraire. La station de prétraitement de Koumassi-Digue située au bout de la chaîne effectue un dégrillage, un dessablage et le déshuilage des eaux usées. Après ce prétraitement, les eaux transitent par une station de désodorisation qui débarrasse ces eaux des odeurs et des gaz avant de les acheminer dans l'océan Atlantique. En plus de la station de prétraitement Koumassi-Digue, le réseau dispose d'une station de traitement dans la commune de Marcory (station ZP3). Cette station recueille les eaux usées de la commune de Treichville, Vridi et principalement celle d'Ivoire Sépulture (IVOSEP) où un traitement biotechnologie (digestion anaérobie) est effectué avant de les refouler dans le collecteur de base. Ce traitement est un processus où les micro-organismes décomposent la matière organique en absence d'oxygène, produisant du biogaz comme sous-produits.

La ville d'Abidjan dispose également de trois postes de dépotage raccordés au réseau d'eau usée (Fig 1). Ces postes recueillent les effluents issus de l'assainissement autonome. Selon [8], le taux de raccordement au réseau est de 40 % alors que l'assainissement autonome représente 60%.

2.2 ECHANTILLONNAGE

Le matériel de prélèvement est composé d'un préleveur automatique (AS950) et d'un multi-paramètre (CH025714). Des flacons plastiques en polyéthylène de capacité 01 litre destiné aux analyses physiques et chimiques. Une glacière contenant de la glace pour la conservation des échantillons.

Quant au matériel de protection individuel, il est composé des masques à gaz, de gants à usage multiples, de cache-nez et des chaussures de sécurité.

Deux types de sites ont été choisis pour le prélèvement. Il s'agit des stations des pompes et des regards dans les zones du réseau dépourvues de station de pompage.

Le choix de ces stations est basé sur plusieurs critères. Elles sont facilement accessibles, car situées à proximité des routes. Elles sont également la confluence de plusieurs autres stations situées en amont recevant les eaux des zones potentielles de pollution (industries, zones résidentielles...). Au total, neuf (09) stations de pompage ont été retenues pour mener l'étude. Au niveau des zones du réseau dépourvu de station, les effluents sont directement rejetés dans la lagune Ebrié ou dans la nature (rejets directs). Dans ce contexte, le dernier regard accessible contigu à l'exutoire est choisi pour le prélèvement. Au total, les prélèvements ont été effectués dans neuf regards (09).

Des campagnes de prélèvement semestrielle entre 2020 et 2023 ont été effectuées sur l'ensemble des sites retenus (Fig. 1). Ces campagnes ont été effectuées en deux (02) saisons différentes: la première campagne de février à mars en grande saison sèche et la deuxième campagne de juin à juillet en grande saison de pluie. Au total cent quarante-quatre (144) échantillons ont été collectés dans le cadre de cette étude. Dans le cas d'une station de pompage, un préleveur automatique est installé avant l'arrivée des eaux usées dans la bache sur une période de 24 h et programmé à prélever 300 ml d'eau usée chaque 20 min. Le raccord du préleveur automatique est plongé dans la bache d'eau usée, assez loin des bords en évitant de mettre en suspension les dépôts. Après 24 h de prélèvement, l'échantillon mixte est recueilli dans les flacons. En ce qui concerne les rejets directs, des prélèvements ponctuels ont été effectués dans les derniers regards contigus à l'exutoire des collecteurs. Après l'ouverture du regard, un seau attaché à une corde est introduit pour récupérer les eaux usées.

2.3 MÉTHODES D'ANALYSE DES ÉCHANTILLONS D'EAU USÉE

Le pH et la température ont été déterminés *in situ* avec le multi-paramètre muni des différentes sondes et les autres paramètres au laboratoire. La détermination des concentrations en matières en suspension (MES) a été faite par filtration sur membrane en fibre de verre, séchage à 105°C et pesage du résidu retenu, conformément à la norme NF EN 872: juin 2005. La DBO₅ a été déterminée après dilution de l'échantillon et incubation pendant cinq jours à l'obscurité à 20°C. La mesure de la quantité d'oxygène consommée est effectuée conformément à la norme NF EN ISO 9408 octobre 1999. Les polluants tels que: NH₄⁺, NTK, PO₄³⁻, NO₂⁻, NO₃⁻ et la DCO, ont été dosés à l'aide d'un spectrophotomètre (DR 3900) en utilisant des méthodes HACH par le principe de la photométrie.

2.4 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA POLLUTION

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour évaluer la charge polluante des effluents drainés par le réseau d'eau usée. Les données physiques et chimiques collectées ont d'abord été comparées aux normes de rejets des effluents dans le milieu naturel recommandées par la Sous-Direction des Inspections des Installations Classées (SDIIC) du Centre Ivoirien d'Antipollution (CIAPOL). Les indices de biodégradabilité des effluents (DCO/DBO₅, DBO₅/DCO), et l'indice de pollution organique (IPO) ont également été calculés. Les analyses statistiques univariées et multivariées par analyse en composante principale ont été appliquées. Les analyses univariées à travers le test de Wilcoxon des rangs signés et celui de Kruskal-Wallis ont permis d'évaluer respectivement les variations saisonnières et spatiales. Quant à l'ACP, elle a permis d'identifier les origines des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 VARIATION SPATIALE DES CONCENTRATIONS

Les fig. 2 à 11 représentent l'évolution spatiale des concentrations des paramètres analysés le long du réseau d'eau usée.

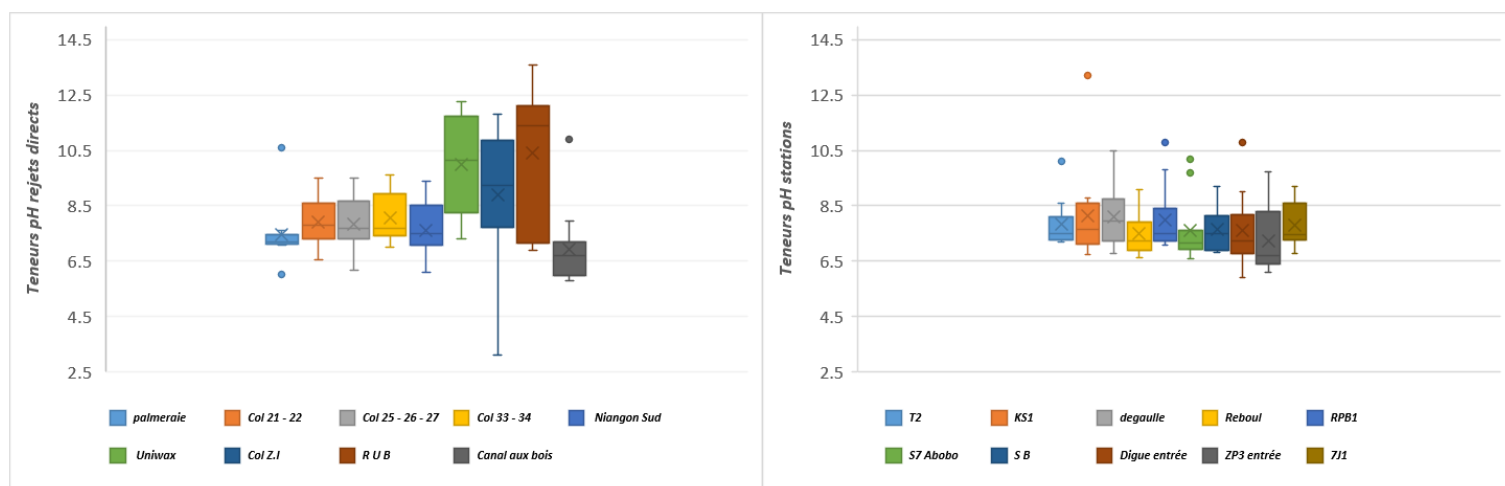


Fig. 2. Variation spatiale des teneurs en pH des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

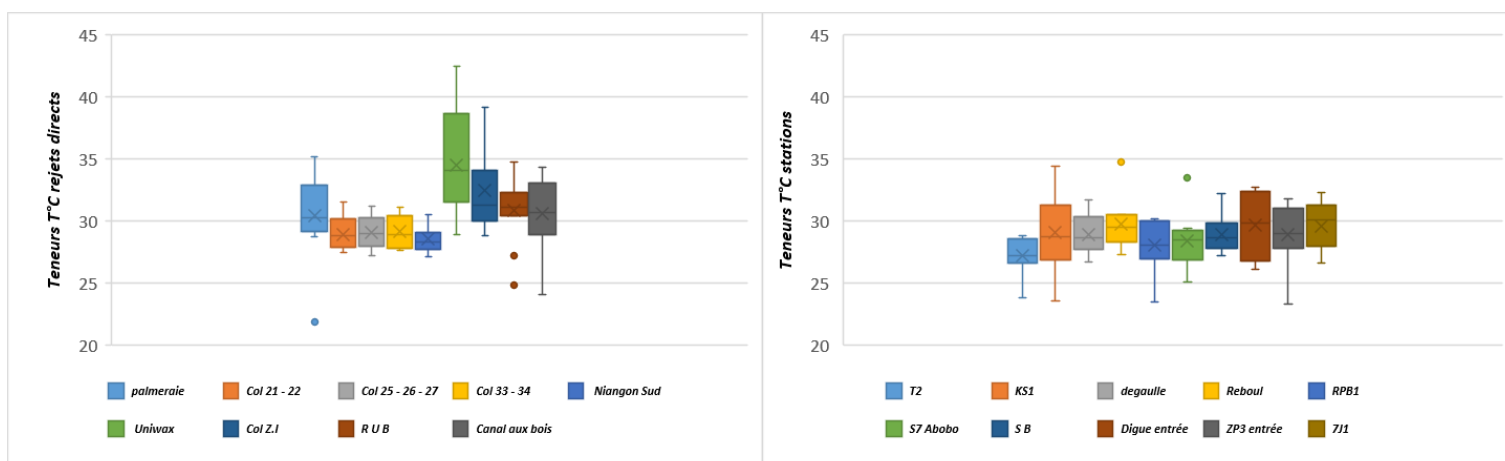


Fig. 3. Variation spatiale des teneurs en température des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

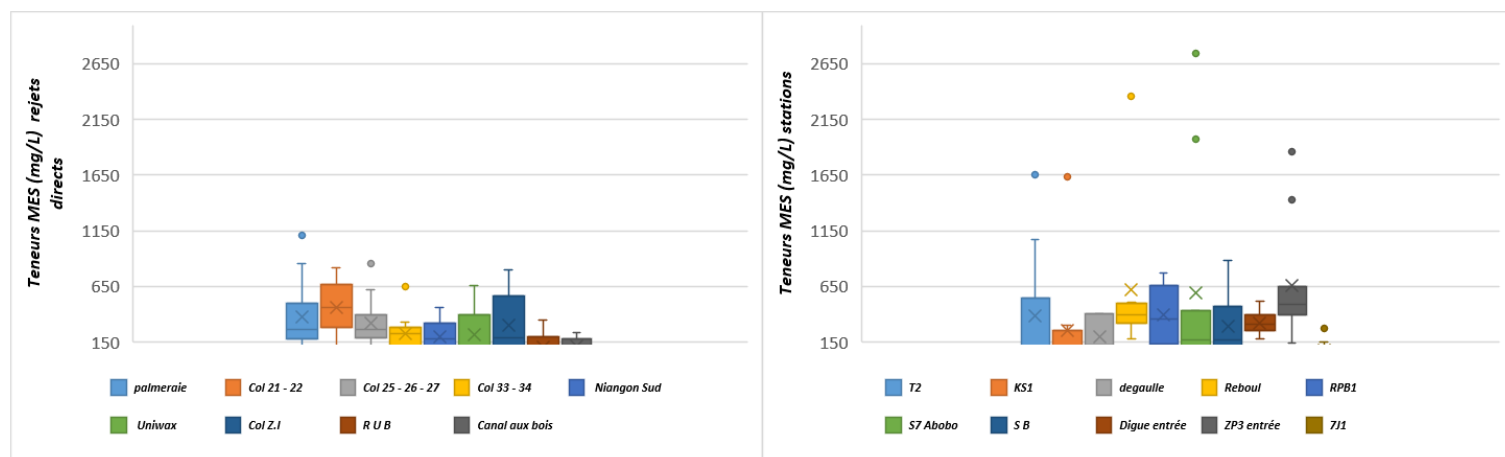


Fig. 4. Variation spatiale des teneurs en MES des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

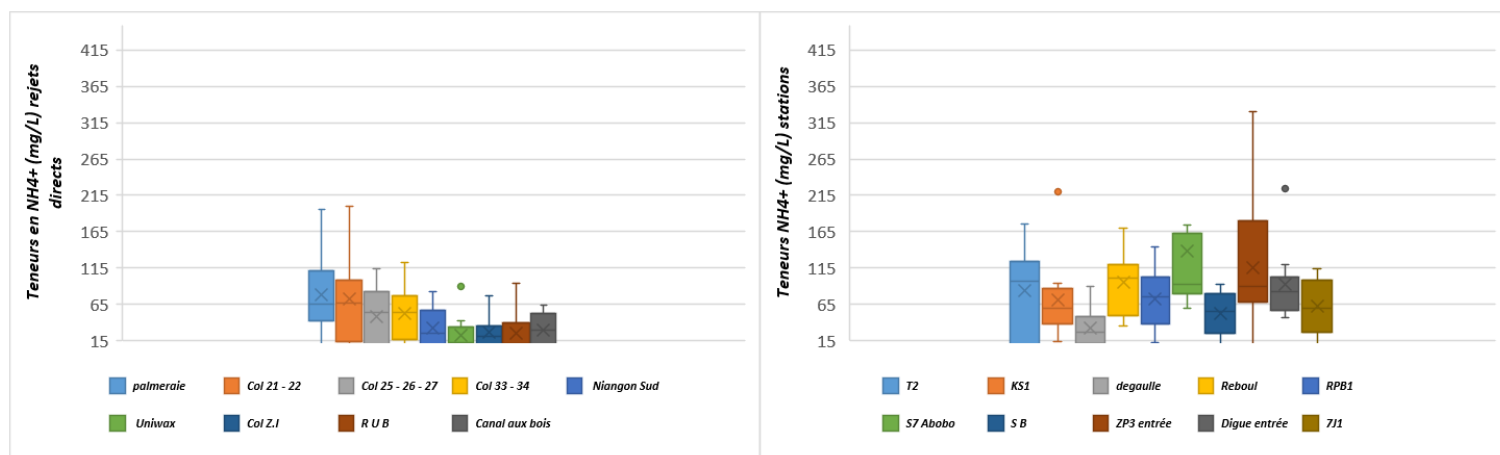


Fig. 5. Variation spatiale des teneurs en PO_4^{3-} des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

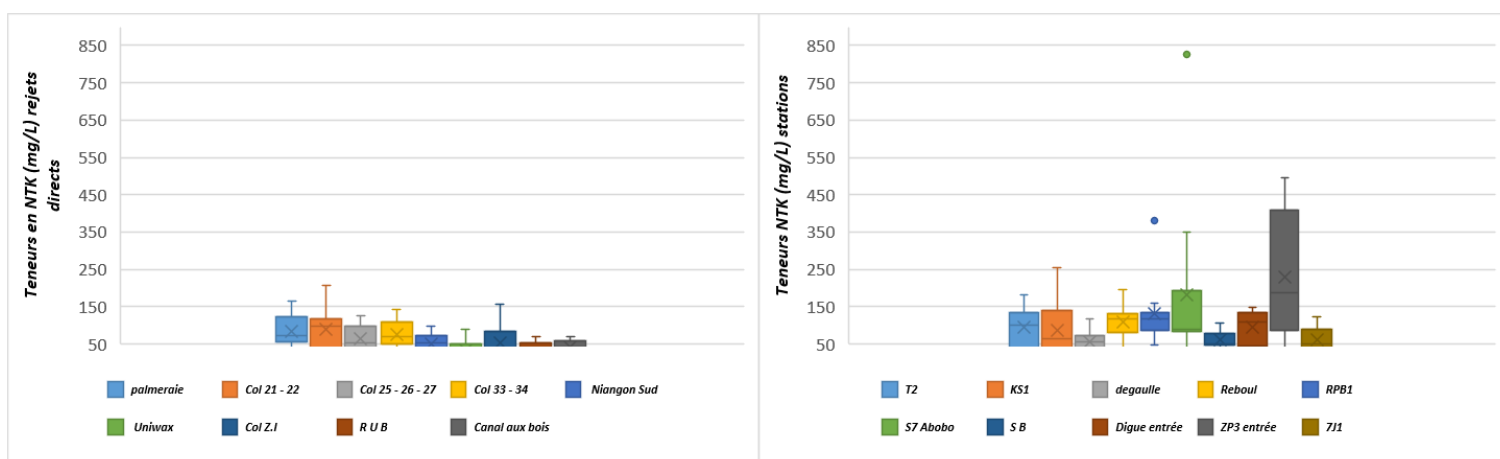


Fig. 6. Variation spatiale des teneurs en azote total des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

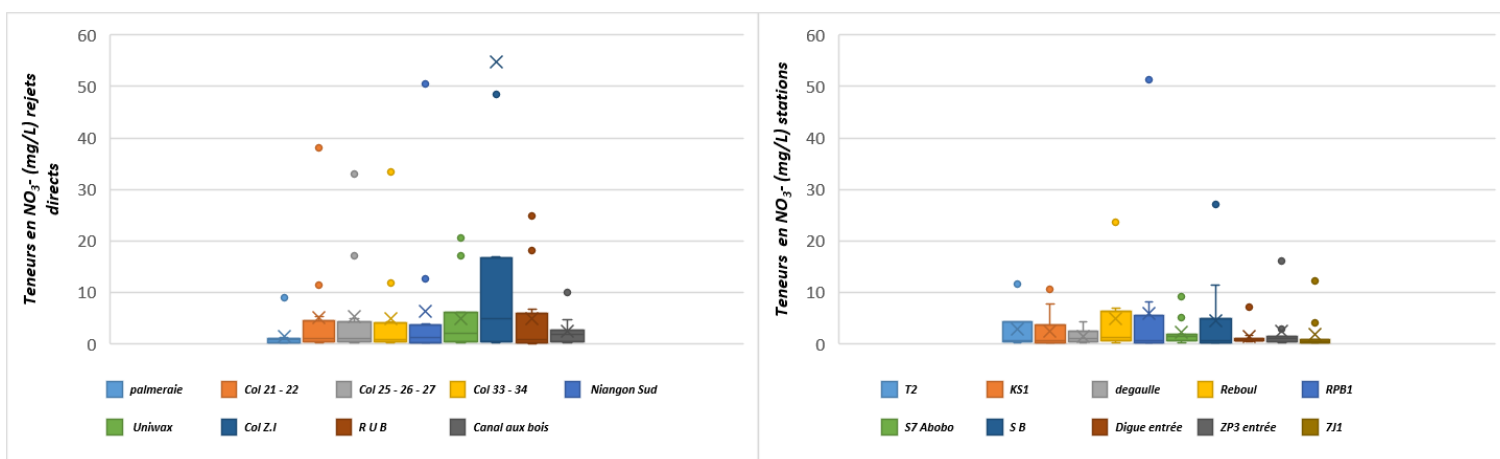


Fig. 7. Variation spatiale des teneurs en nitrates des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

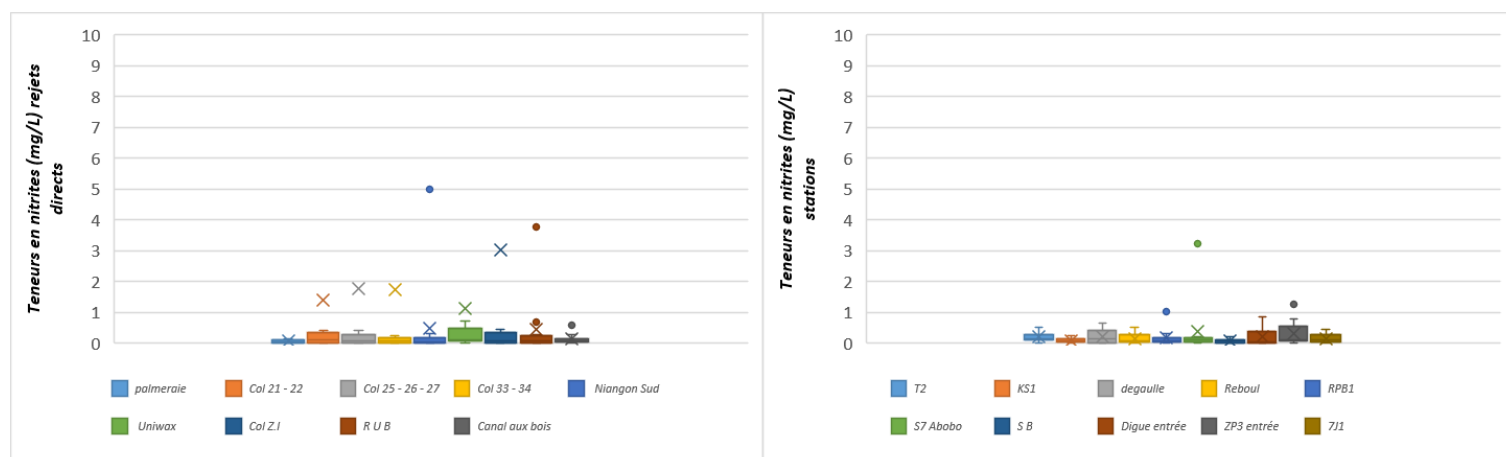


Fig. 8. Variation spatiale des teneurs en nitrites des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

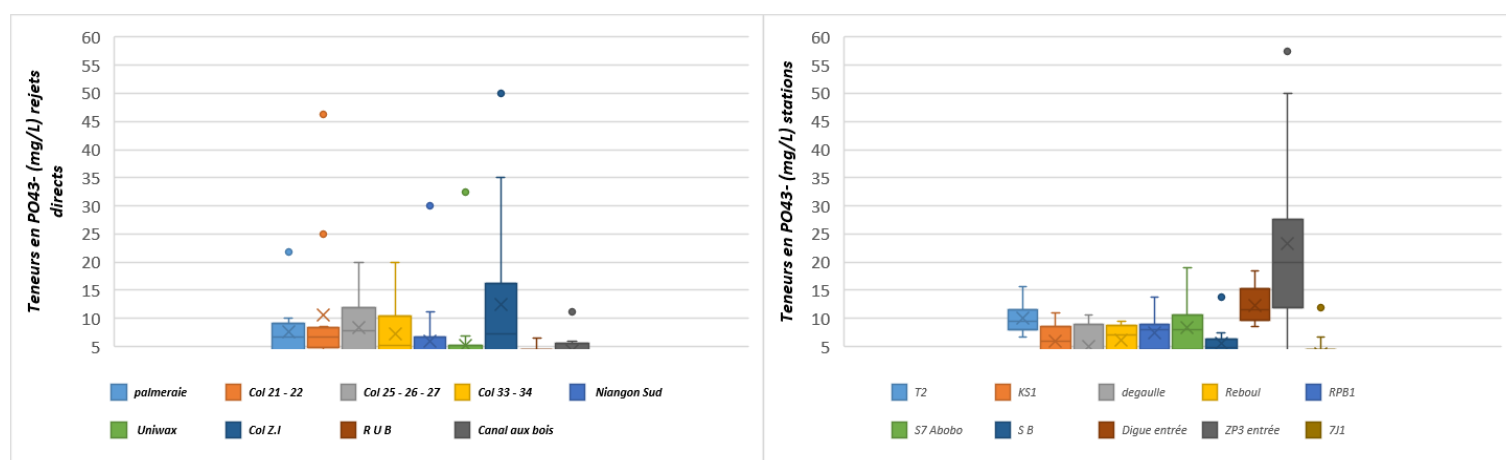


Fig. 9. Variation spatiale des teneurs en phosphore total des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

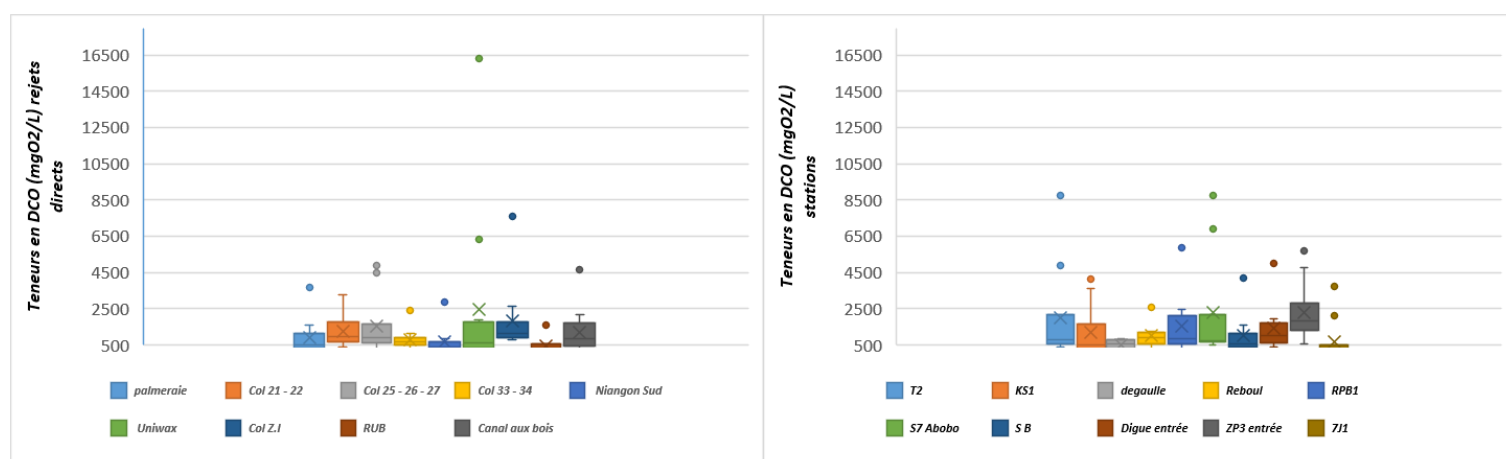


Fig. 10. Variation spatiale des teneurs en DCO des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

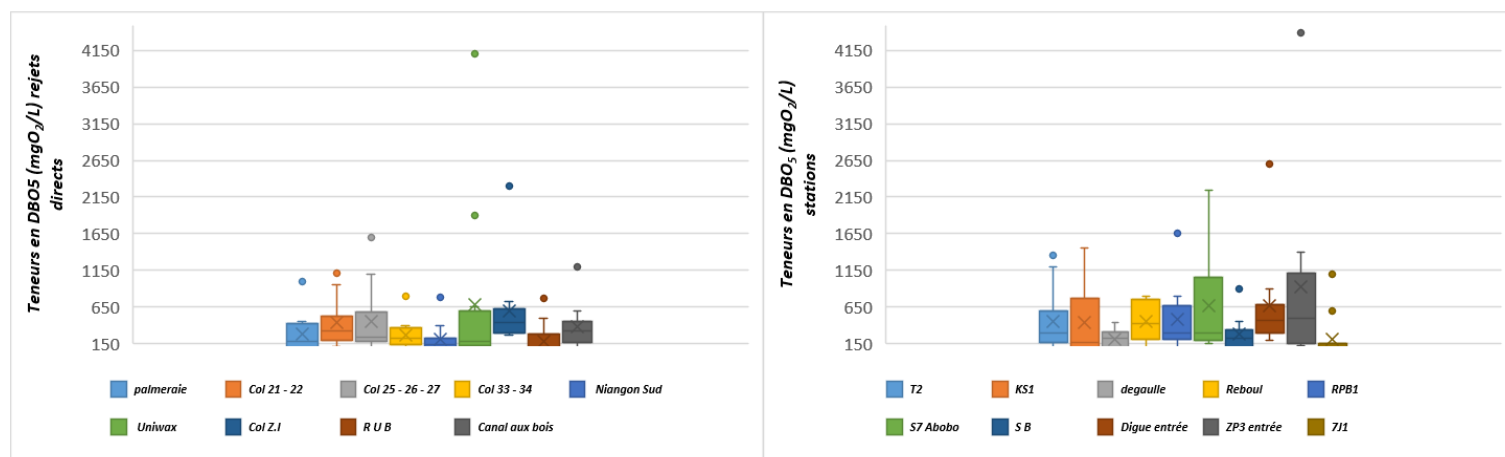


Fig. 11. Variation spatiale des teneurs en nitrates des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan

POTENTIEL D'HYDROGÈNE (PH)

Les valeurs du pH des eaux usées drainées par le réseau sont extrêmement variables, de très acide (3,1) au niveau du collecteur zone industrielle de Yopougon (ZI) à fortement basique (13,6) collecteur RUB. La valeur moyenne enregistrée est de $8,1 \pm 1,6$. La valeur minimale est en dessous de la valeur limite inférieure recommandée par la SDIIC (5,5). La fig. 2 indique que les variations extrêmes du pH proviennent des collecteurs Uniwax, ZI et RUB. Au niveau du collecteur Uniwax, cette variation du pH peut être due à l'ajustement du pH du bain de colorant. En effet, selon [9], l'application des colorants sur les matières textiles évolue principalement en fonction de la concentration du colorant, du pH du milieu, et de la température. [10] fixe ces pH entre 4 et 13,2. Des pH similaires (4 à 10) ont été enregistrés par [11] à Madagascar dans des effluents de textile. Au niveau des collecteurs ZI et RUB, les valeurs élevées du pH pourraient s'expliquer par l'utilisation de la soude dans les sociétés industrielles branchées au réseau au niveau de ces collecteurs [7]. Les valeurs de pH du réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan sont différentes de celles obtenues par [12] dans les eaux usées du réseau d'égout de la ville de Ouagadougou au Burkina Faso et par [13] au Maroc. En effet, [12] a obtenu des valeurs oscillant entre 6,2 et 7,2. Quant à [13], ils ont enregistré des valeurs comprises entre 7,05 et 8,2 dans les effluents de cinq villes de la région de Chaouia-Ouadigha. Les effluents de ces villes sont voisins de la neutralité. Cette différence pourrait s'expliquer par le déversement d'eau usée industrielle dans le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan. En effet, des pH basiques similaires à notre étude ont été enregistrés dans les effluents des sociétés industrielles ENITEX (11,8) et UNILEVER (11,35) au Niger par [14].

TEMPÉRATURE

Les valeurs de la température des effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan ont oscillé entre 21,9 (collecteur palmeraie) et 42,5°C (collecteur Uniwax) avec une moyenne de $29,5 \pm 2,9$. La valeur maximale est supérieure à la norme de rejet recommandée par la SDIIC (40°C). Les collecteurs Uniwax et zone industrielle de Yopougon qui rejettent directement leurs effluents dans la lagune Ebrié reçoivent les effluents les plus chauds avec des valeurs moyennes respectivement de 34,5°C et 32,5°C (Fig.3). Selon [7], les valeurs élevées de la température au niveau de ces collecteurs s'expliquent par le déversement d'eau usée chaude dans le réseau provenant des unités industrielles branchées au réseau. Ces déversement d'eaux usées chaudes dans la lagune influence la dissolution des sels ainsi que les gaz particulièrement l'oxygène dissous indispensable à la vie aquatique [15].

MATIÈRES EN SUSPENSION (MES)

Les valeurs enregistrées par les MES sont comprises entre 6,2 (station Digue entrée) et 2740,0 mg/L (S7 Abobo) avec une moyenne de $292,0 \pm 377,2$. La valeur maximale et la moyenne sont largement supérieures à la norme du SDIIC (150 mg/L). Au niveau des rejets directs, seul RUB (102,5 mg/L) et canal aux bois (113,8 mg/L) présentent des valeurs moyennes inférieures à la norme de la SDIIC. En revanche, parmi les stations, seule la station 7J1 a enregistré une valeur moyenne (77,9 mg/L) en dessous de cette norme. Cela témoigne que les effluents drainés par le réseau ont une charge importante en matière organique et minérale [16]. La présence importante en MES peut impacter le bon fonctionnement du réseau à travers le phénomène de colmatage [17]. Ces MES drainés dans la lagune (rejets directs) s'opposent à la pénétration de la lumière dans l'écosystème

lagunaire et s'accompagne d'une diminution de la photosynthèse du milieu. Cela provoque la diminution de l'oxygène dissous et a pour conséquence la mortalité faunique et floristique aquatique par asphyxie [5]. La p-value spatiale de 0,0001 enregistrée témoigne que ces teneurs varient significativement selon les collecteurs.

AZOTE TOTAL (NTK)

Les concentrations en NTK ont oscillé entre 0,4 (RUB) et 825,3 mg/L (S7 Abobo) avec une valeur moyenne de 82,0 mg/L. La valeur maximale obtenue est supérieure à celle enregistrée par [18]. Cependant, ces valeurs moyennes de 236 mg/L et 363 mg/L sont largement supérieures à la nôtre. L'analyse statistique montre que ces concentrations varient selon les collecteurs (p-value est de 0,005).

AMMONIUM (NH₄⁺)

L'ammonium est présent dans les eaux usées urbaines par un processus de dégradation incomplète de la matière organique. En présence d'oxygène, il se transforme rapidement en nitrate et nitrite. Les teneurs d'ammonium enregistrées dans cette étude sont comprises entre 0,1 (collecteur Uniwax) et 470 mg/L (ZP3 entrée) pour une valeur moyenne de 60,9 mg/L. La valeur moyenne et la valeur maximale sont supérieures à la valeur limite recommandée par la SDIIC (15 mg/L). La valeur moyenne de 60,9 mg/L enregistrée est similaire à celle obtenue par [19] (64,40 mg/L) dans les effluents de la ville de Batna en Algérie. Cependant cette valeur est nettement inférieure à celle obtenue par [20] dans les effluents du canal de Hann (108,33 mg/L) au Sénégal. Les teneurs en ammonium varient selon les collecteurs.

NITRATES ET NITRITES

Les effluents du réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan sont moins chargés en nitrites et nitrates. En effet, quel que soit le collecteur, les valeurs moyennes de ces effluents sont largement en-dessous des valeurs limites recommandées par la SDIIC. Les valeurs de nitrites ont oscillé entre 0 et 20 mg/L avec une moyenne de $0,6 \pm 3,3$. La valeur limite recommandée par la SDIIC est de 30 mg/L. Les variantes spatiales (p-value = 0,18) montrent que les concentrations en NO₂⁻ restent globalement stables le long du réseau.

Au niveau des nitrates, les teneurs ont varié entre 0,1 et 51,4 mg/L avec une moyenne de $6,4 \pm 38$. La valeur maximale enregistrée au niveau de la station RPB1 est légèrement supérieure à la valeur limite recommandée par la SDIIC (50 mg/L). Contrairement des nitrites, la p-value de 0,03, indique que les teneurs en nitrates varient différemment selon les collecteurs.

PHOSPHORE TOTAL

Le phosphore total a varié entre 0 (7J1) et 57,5 mg/L (ZP3 entrée) avec une moyenne de 7,5 mg/L. La valeur moyenne est inférieure à celle de 11 mg/L obtenue par [19] dans les effluents de la ville de Batna. La station ZP3 entrée et le collecteur zone industrielle Yopougon ont enregistré les teneurs les plus importantes. Au niveau du collecteur zone industrielle Yopougon, ces valeurs élevées peuvent être expliquées par le déversement d'effluent industriel provenant des usines de savonnerie. Quant à la station ZP3, la valeur moyenne de 23,2 mg/L enregistrée à l'entrée est au-delà de la valeur limite de la SDIIC (15 mg/L). Cette valeur moyenne est également supérieure à celle de 11 mg/L trouvée par [19] à Batna en Algérie. Cette différence s'explique par la présence de détergents dans les produits de nettoyage associés aux activités funéraires. En fait, la station ZP3 reçoit principalement les effluents d'IVOSEP.

DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGÈNE (DCO) ET DEMANDE BIOCHIMIQUE EN OXYGÈNE (DBO₅)

Les concentrations en DCO et DBO₅ enregistrées sont largement au-dessus des valeurs limites recommandées par la SDIIC qui sont respectivement de 500 mgO₂/L et 150 mgO₂/L. En effet, les concentrations en DCO ont varié entre 29 (RUB) et 16326,5 mgO₂/L (collecteur Uniwax) avec une valeur moyenne de 1232,1 mgO₂/L. Quant aux concentrations en DBO₅, elles ont oscillé entre 2 (7J1) et 4100 mgO₂/L (collecteur Uniwax) avec une valeur moyenne de 374 mgO₂/L. Les valeurs de DCO obtenues s'inscrivent dans la gamme de valeurs (369 à 16250 mg/L) enregistrées par [21] à Touggourt en Algérie. Cependant, la valeur moyenne de DCO enregistrée est nettement supérieure à celles de 338 mg/L et de 680 mg/L trouvées par [22] et par [23] respectivement en Angola et en Inde. Ces différences peuvent s'expliquer par le déversement d'eau usée industrielle dans le réseau d'égout de la ville d'Abidjan. Au niveau de la DBO₅, des teneurs moyennes similaires aux nôtres (374 mgO₂/L) ont été observées dans la ville de Boumerdès (309,60 mg/L) en Algérie par [24] et en France (433 mg/L) par [25]. L'analyse statistique (p-value spatiale de 0,0001) montre que les concentrations de ces paramètres fluctuent selon les collecteurs.

Tableau 1. Indices de biodégradabilité et de pollution organique

Stations/Collecteurs prélevés	Observation	DCO/DBO ₅	DBO ₅ /DCO	IPO
Palmeraie*	6	3,4	0,32	1,25
Col 21 – 22*	8	3,2	0,35	1,0
Col 25 - 26 – 27*	8	3,4	0,30	1,0
Col 33 – 34*	8	3,2	0,33	1,0
Niangon Sud*	8	3,4	0,31	1,0
Uniwax*	8	3,5	0,30	1,0
Col Z.I*	8	3,1	0,35	1,0
T2	6	4,1	0,30	1,0
KS1	8	3,1	0,36	1,0
ZP3 entrée	8	4,8	0,33	1,0
De gaulle	7	2,9	0,38	1,0
Reboul	7	2,6	0,46	1,25
R U B*	8	3,8	0,32	1,0
Digue entrée	8	2,9	0,38	1,0
RPB1	8	3,2	0,34	1,0
S7 Abobo	8	3,3	0,31	1,25
S B	7	3,6	0,31	1,0
7J1	7	3,1	0,35	1,0
Canal aux bois*	8	3,1	0,35	1,25

(*) indique les collecteurs rejetant leurs effluents directement dans le milieu naturel sans traitement préalable.

L'analyse du Tableau 1 montre que le rapport DCO/DBO₅ a oscillé entre 2,6 et 4,8. Les rapports DCO/DBO₅ enregistrés sont différents de ceux obtenus par [7] sur le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan en 2015. En effet, [7] avaient montré qu'en dehors des effluents issus du collecteur Uniwax, les autres collecteurs drainaient des effluents biodégradable (DCO/DBO₅>3) et étaient sous dominance des eaux usées domestiques. Contrairement à ces travaux, les résultats de cette étude montrent que les eaux usées du réseau sont difficilement biodégradables à l'exception des stations Reboul, Pont De Gaulle et Digue entrée (DCO/DBO₅<3). Le réseau draine donc des effluents essentiellement industriels. Selon [26], le rapport DBO₅/DCO varie entre 0 et 1. Il détermine la possibilité et le rendement de dégradation par un traitement d'oxydation biologique. Un traitement biologique est réalisable, lorsque les valeurs du rapport sont proches de 1. Dans le cadre de cette étude, ce rapport varie de 0,30 à 0,46. Selon [26], les effluents drainés par le réseau de la ville d'Abidjan peuvent être repartir en deux groupes à savoir:

Les stations 7J1, S7 Abobo, dégrilleur T2, ZP3 entrée, RPB1, SB et l'ensemble des collecteurs rejetant leurs effluents directement dans le milieu naturel sans traitement préalable ont enregistré des rapport DBO₅/DCO compris entre 0,25 et 0,35. Selon [20], les matières oxydables contenues dans ces effluents peuvent être dégradables avec des souches sélectionnées, dans ce cas un traitement biologique est possible.

Les autres stations tels que: Reboul, pont De gaulle, KS1 et Digue entrée ont enregistré des rapports DBO₅/DCO supérieur à 0,35. Ces effluents sont biodégradables par les micro-organismes, donc le traitement biologique est réalisable voir efficace [26].

Les effluents drainés par le réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan sont chargés en matières organique. En effet l'IPO calculé est comprise entre 1 et 1,25 situant ces effluents dans la classe de la pollution organique forte [27].

3.2 VARIATION SAISONNIÈRE DES CONCENTRATIONS

Tableau 2. Evolution saisonnière des concentrations des paramètres analysés

Paramètres	Grande saison sèche				Grande saison pluvieuse				
	Obs	Min	Max	Moyenne	Obs	Min	Max	Moyenne	Norme SDIIC
pH	76	5,8	11,5	7,6 ^a ±1,3	76	3,1	13,2	8,5 ^b ±1,8	5,5-8,5
T°C	68	21,9	37,8	30,0 ^a ±2,9	76	22,4	42,5	28,8 ^b ±2,9	40
MES (mg/L)	76	6,2	1860,0	273,1 ^a ±294,7	76	17,1	1423,3	240,5 ^a ±243,1	150
DCO (mgO ₂ /L)	76	76,4	16326,5	1813,4 ^a ±2293,7	76	29,0	4890,0	687,2 ^b ±670,9	500
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	76	22,0	4100,0	562,1 ^a ±613,4	76	2,0	1600,0	215,5 ^b ±222,4	150
NTK (mg/L)	75	3,5	825,3	105,1 ^a ±120,3	76	1,4	815,3	69,5 ^b ±105,7	50
NH ₄ ⁺ (mg/L)	76	0,1	330,0	62,7 ^a ±61,8	76	0,1	200,0	52,2 ^a ±41,9	15
NO ₃ ⁻ (mg/L)	76	0,0	3,2	0,2 ^a ±0,4	76	0,1	51,4	7,2 ^a ±11,9	50
NO ₂ ⁻ (mg/L)	76	0,2	23,7	2,8 ^a ±4,6	76	0,0	20,0	1,3 ^a ±3,9	30
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	76	0,0	22,5	7,2 ^a ±4,7	76	0,0	20,0	5,7 ^b ±4,6	15

Il existe des différences significatives entre l'évolution d'un paramètre dont les moyennes ne portent pas une même lettre de l'alphabet grec (a ou b). Deux lettres similaires indiquent que la variation saisonnière n'est pas significative.

Les variations saisonnières des paramètres mesurés sont présentées dans le Tableau 2. Les valeurs des températures des effluents du réseau d'eau usée de la grande saison sèche varient entre 21,9 et 37,8°C avec une valeur moyenne de 30°C ±2,9. Celles de la grande saison pluvieuse varient entre 22,4 et 42,5°C avec une valeur moyenne de 28,8°C ±2,9. La valeur maximale de la saison pluvieuse est supérieure à la valeur limite de la SDIIC (40°C). Cependant, la valeur moyenne de la saison sèche est supérieure à celle de la saison pluvieuse. Cela pourrait s'expliquer par l'effet de la température atmosphérique ambiante sur les effluents du réseau [28], [29].

Les valeurs de pH varient entre 5,8 et 11,5 pendant la saison sèche avec une valeur moyenne de 7,6±1,3. Elles vont de 3,1 à 13,2 au cours de la saison pluvieuse avec une moyenne de 8,5±1,8. La valeur moyenne de la saison pluvieuse est supérieure à celle de la saison sèche.

Les teneurs enregistrées au niveau des MES oscillent entre 6,2 et 1860,0 mg/L pendant la saison sèche avec une valeur moyenne de 273,1 mg/L ±294,7. Elles sont comprises entre 17,1 et 1423,3 mg/L avec une moyenne de 240,5 mg/L ±243,1 au cours de la saison des pluies. Les valeurs maximales et moyennes saisonnières sont largement supérieures à la valeur limite recommandée par la SDIIC (150 mg/L). La p-value de 0,45 obtenue indique que les variations saisonnières n'influencent pas les teneurs en MES du réseau malgré qu'une grande partie du réseau est unitaire. Cela pourrait s'expliquer par l'efficacité des dégrilleurs installés en amont des collecteurs.

Les valeurs en Azote total (NTK) varient de 3,5 à 825,3 mg/L avec une valeur moyenne de 105,1 mg/L ±120,3 pendant la saison sèche. A la saison pluvieuse, ces valeurs ont oscillé entre 1,4 et 815,3 mg/L avec une valeur moyenne de 69,5 mg/L ±105,7. La valeur moyenne de la saison sèche est largement supérieure à celle de la saison pluvieuse. Les valeurs maximales et moyennes saisonnières sont au-delà de la valeur limite recommandée par la SDIIC (50 mg/L).

Les teneurs en ammonium (NH₄⁺) sont comprises entre 0,1 et 330,0 mg/L pendant la sèche avec une moyenne de 62,7 mg/L ±61,8. Pendant la saison, elles partent de 0,1 à 200,0 mg/L avec une moyenne 52,2 mg/L ±41,9. La valeur moyenne de la saison sèche est aussi supérieure à celle de la saison pluvieuse. Les valeurs moyennes et maximales sont largement supérieures à la valeur limite recommandée par la SDIIC (15 mg/L).

Les teneurs en nitrites et nitrates sont largement en dessous des valeurs guides recommandées par la SDIIC. Seul la valeur maximale (51,4 mg/L) de nitrate enregistrée pendant la saison pluvieuse est légèrement supérieure à la valeur limite de 50 mg/L recommandée par la SDIIC.

Les résultats indiquent que les teneurs en phosphores (PO₄³⁻) sont comprises entre 0,0 et 22,5 mg/L pendant la saison sèche. La valeur moyenne enregistrée au cours de cette saison est de 7,2 mg/L ±4,7. Ces valeurs varient de 0,0 à 20,0 mg/L à la saison pluvieuse avec une moyenne de 5,7 mg/L ±4,6. Les valeurs moyennes saisonnières sont en dessous de la valeur limite recommandée par la SDIIC (15 mg/L). Cependant, les valeurs maximales sont supérieures à ladite norme.

Les teneurs en DCO oscillent entre 74,4 à 16326,5 mgO₂/L avec une moyenne de 1813,4 mgO₂/L ± 2293,7 pendant la saison sèche. Au cours de la saison pluvieuse, ces valeurs sont comprises entre 29 et 4890,0 mgO₂/L. La valeur moyenne obtenue à cette saison est de 687,2 mgO₂/L ± 670,9. Les valeurs maximale et moyenne de la saison sèche sont largement supérieures à celles enregistrées en saison pluvieuse. Ces valeurs moyennes et maximales sont également supérieures à la valeur limite de la SDIIC (500 mgO₂/L).

Les concentrations en DBO₅ varient de 22,0 à 4100,0 mgO₂/L pendant la saison sèche. La moyenne de 562,1 mgO₂/L ± 613,4 enregistrée au cours de cette saison est largement supérieure à celle de 215,5 mgO₂/L ± 222,4 obtenue pendant la saison pluvieuse dont les valeurs varient de 2,0 à 1600 mgO₂/L.

3.3 ANALYSE STATISTIQUE (ACP)

3.3.1 MATRICES DE CORRÉLATION

Tableau 3. Matrice de corrélation de Pearson des paramètres physico-chimique en saison sèche

Variables	pH	T(°C)	MES	DCO	DBO ₅	NTK	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	DCO/DBO ₅
pH	1										
T(°C)	0,42	1									
MES	-0,28	0,03	1								
DCO	0,37	0,24	0,18	1							
DBO ₅	0,46	0,23	-0,01	0,94	1						
NTK	-0,08	-0,36	0,27	-0,06	-0,03	1					
NH ₄ ⁺	-0,28	-0,25	0,30	-0,24	-0,21	0,66	1				
NO ₂ ⁻	0,20	0,19	0,56	0,56	0,40	0,39	0,29	1			
NO ₃ ⁻	0,21	0,60	0,29	0,09	0,11	0,04	0,27	0,37	1		
PO ₄ ³⁻	-0,17	-0,26	0,57	-0,06	-0,14	0,80	0,73	0,58	0,17	1	
DCO/DBO ₅	-0,23	-0,01	0,60	0,36	0,05	0,08	0,04	0,58	0,10	0,33	1

Tableau 4. Matrice de corrélation de Pearson des paramètres physico-chimique en saison pluvieuse

Variables	pH	T(°C)	MES	DCO	DBO ₅	NTK	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	DCO/DBO ₅
pH	1										
T(°C)	0,63	1									
MES	-0,39	-0,26	1								
DCO	-0,41	-0,17	0,64	1							
DBO ₅	-0,42	-0,12	0,61	0,99	1						
NTK	-0,24	-0,48	0,47	0,29	0,23	1					
NH ₄ ⁺	-0,47	-0,58	0,43	0,21	0,16	0,71	1				
NO ₂ ⁻	0,07	0,36	0,27	0,48	0,47	-0,30	-0,35	1			
NO ₃ ⁻	-0,20	0,29	0,33	0,44	0,43	-0,22	-0,29	0,77	1		
PO ₄ ³⁻	-0,49	-0,45	0,60	0,53	0,50	0,44	0,55	-0,04	0,04	1	
DCO/DBO ₅	-0,13	-0,30	0,22	0,20	0,05	0,38	0,38	0,13	0,10	0,30	1

Le Tableau 3 présente les résultats de l'analyse corrélative entre les paramètres physico-chimiques au cours de la saison sèche. La corrélation la plus significative est celle réalisée entre la DCO et la DBO₅ (0,94) indiquant une pollution organique typique des eaux usées [17]. Les NTK sont bien corrélés avec le PO₄³⁻ (0,80). Aussi, une corrélation moyenne est observée entre NH₄⁺ et PO₄³⁻ (0,73). Enfin, des corrélations faibles sont observées entre NTK-NH₄⁺ (0,66); T°C-NO₂⁻ (0,60); NO₂⁻-DCO/DBO₅ (0,58); NO₂⁻-PO₄³⁻ (0,58); PO₄³⁻-MES (0,57); MES-NO₂⁻ (0,56) et DCO-NO₂⁻ (0,56). Ces corrélations entre PO₄³⁻ et les éléments azotés (NTK, NH₄⁺, NO₂⁻) témoignent d'une origine commune de ces éléments, probablement due aux apports de matières organiques d'origine domestique ou industrielle. En effet, les composés phosphorés et azotés sont généralement associés dans les effluents riches en matières organiques [17].

En saison pluvieuse, la corrélation entre DCO et DBO₅ est de 0,99, indiquant un apport important de matières organiques dans le réseau par les eaux pluviales. Les corrélations moyennes observées au cours de cette saison pluvieuse entre les MES et les matières oxydables MES-DCO (0,64) et MES-DBO₅ (0,61) témoignent toujours de l'apport de matières organiques dans le réseau par les eaux de ruissellement. Aussi, il existe une corrélation moyenne entre pH-T°C (0,63) et entre MES-PO₄³⁻ (0,60). Des corrélations faibles sont également observées entre T°C et NH₄⁺ (-0,58); NH₄⁺ et PO₄³⁻ (0,55); DCO et PO₄³⁻ (0,53).

3.3.2 VALEURS PROPRES ET VARIANCES EXPRIMÉES AU COURS DES SAISONS

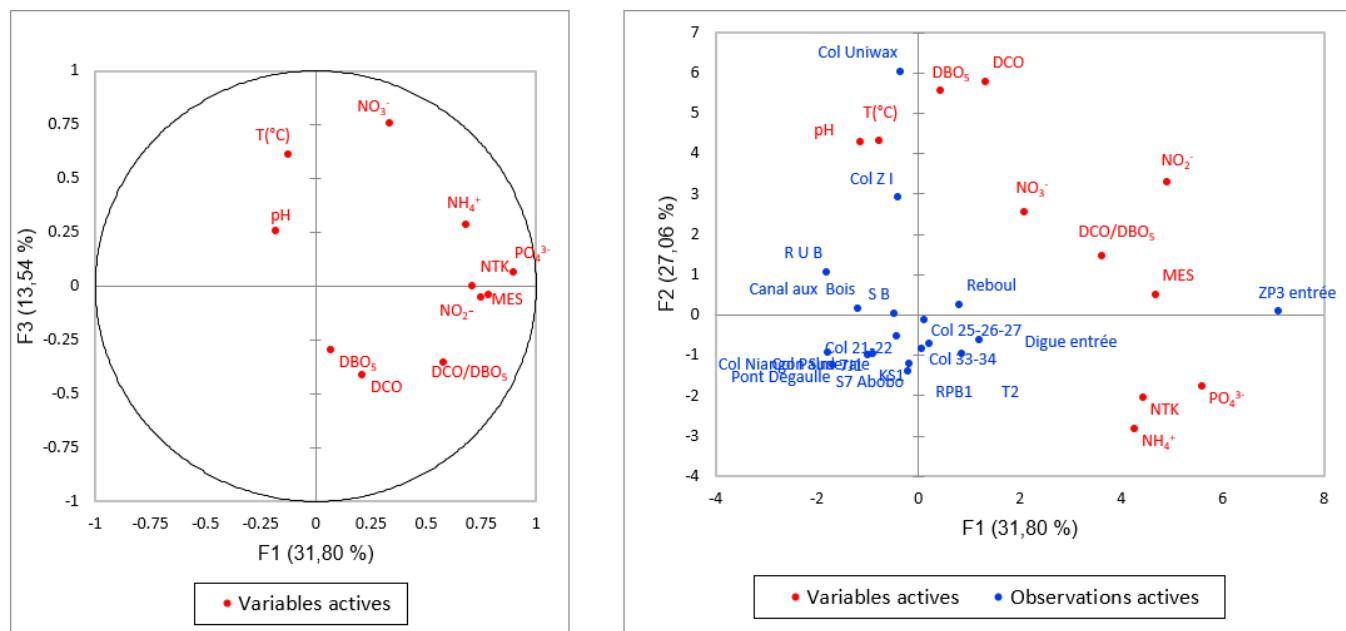


Fig. 12. Cercles de communauté et unités statistiques des plans factoriels F1-F2 en saison sèche

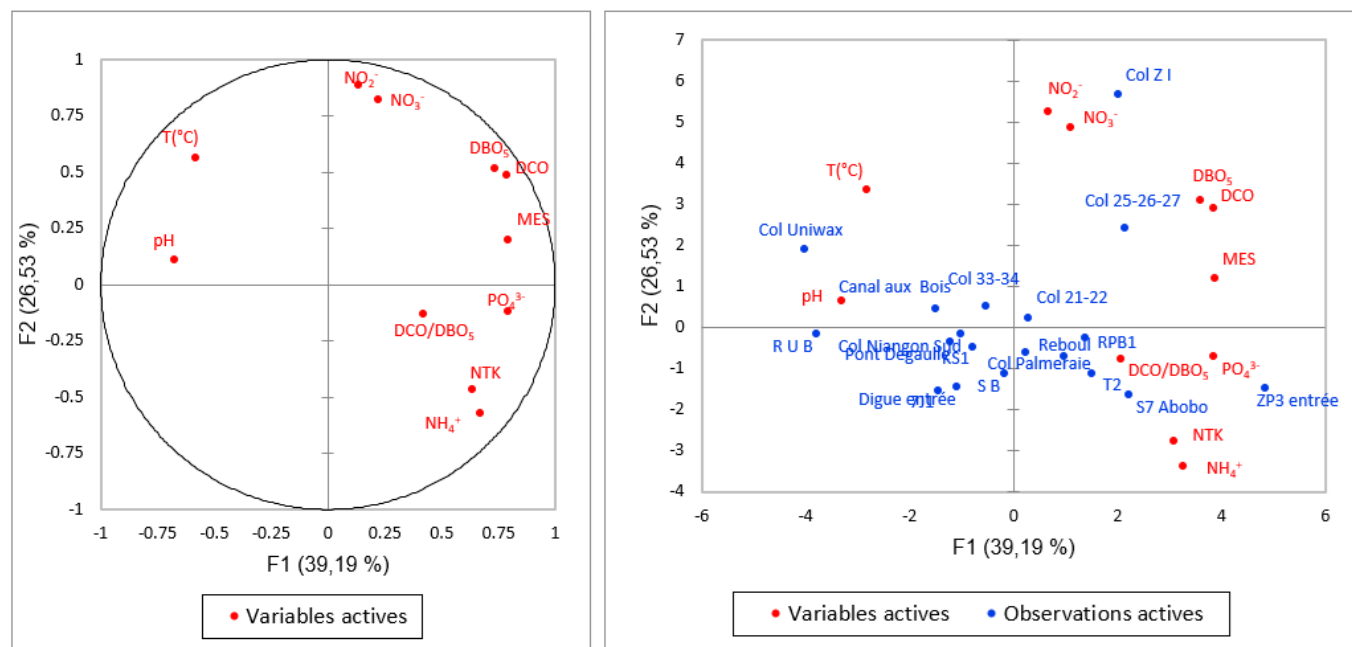


Fig. 13. Cercles de communauté et unités statistiques des plans factoriels F1-F2 en saison pluvieuse

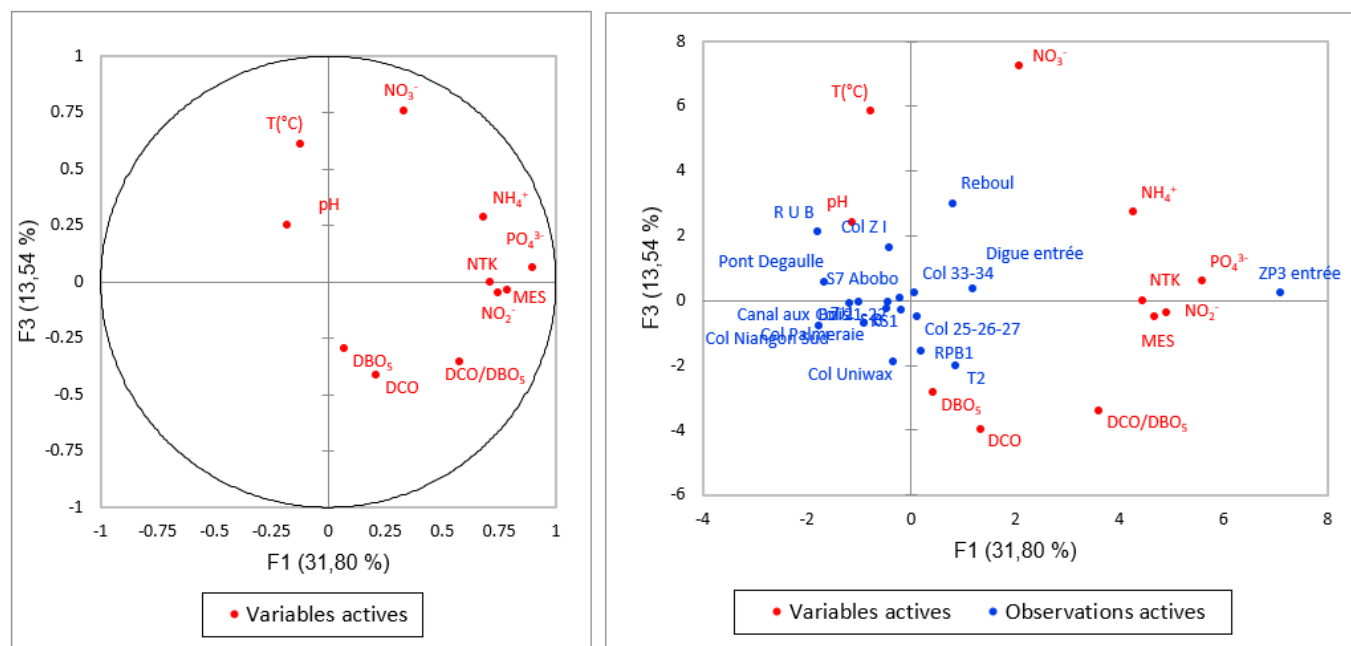


Fig. 14. Cercles de communauté et unités statistiques des plans factoriels F1-F3 en saison sèche

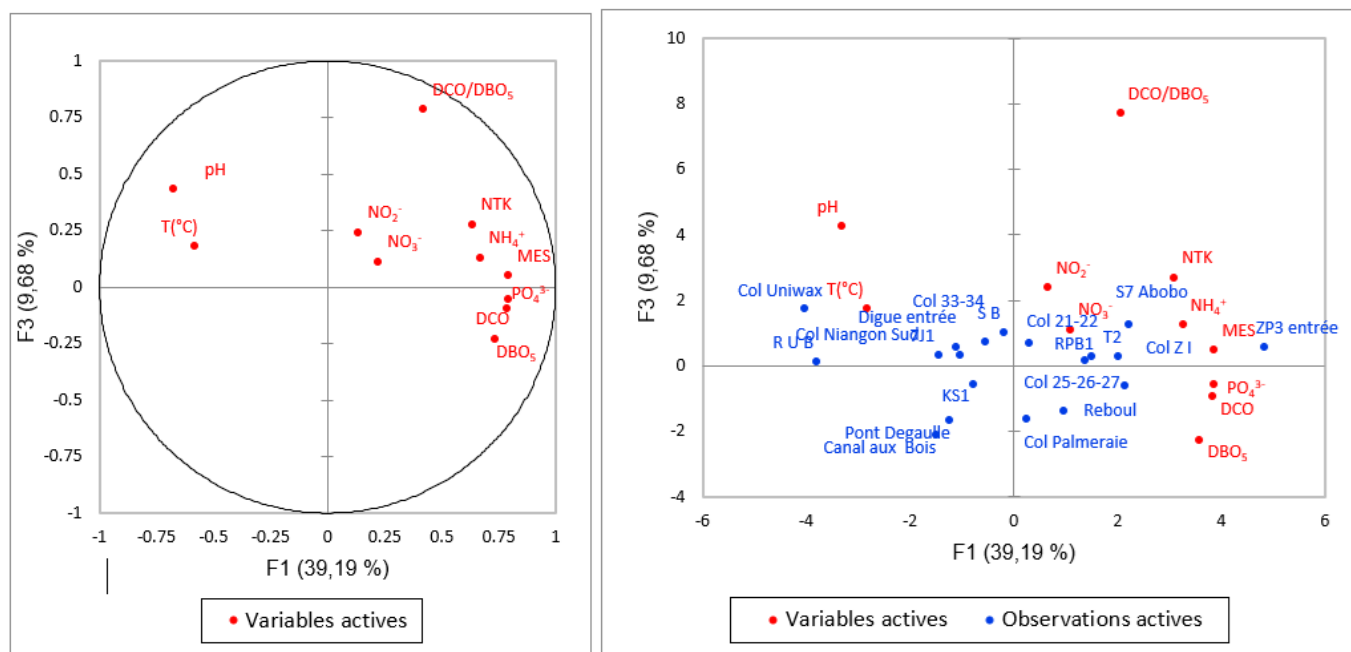


Fig. 15. Cercles de communauté et unités statistiques des plans factoriels F1-F3 en saison pluvieuse

L'Analyse en Composante Principale (ACP), indique que les plans factoriels (F1-F3; F1-F3) représentent 72,4 et 75,4 de la variance expliquée respectivement pour la saison sèche et pluvieuse. Ils dégagent donc la majorité des informations attendus.

Au cours de la saison sèche, le facteur 1 (F1), qui exprime 31,80 % de la variance expliquée est déterminée par la DCO, la DBO₅, la température (T°C) et le pH. Ce facteur témoigne d'une pollution physique et organique d'origine industrielle. En effet, ce facteur est essentiellement contrôlé par les effluents des collecteurs Uniwax et zone industrielle de Yopougon. Quant au facteur 2 (F2), il est déterminé par les NO₂⁻, le rapport DCO/DBO₅, les MES, le PO₄³⁻, les NTK et le NH₄⁺. Ce facteur traduit une pollution nutritive et minérale d'origine mixte. En effet, les effluents de plusieurs collecteurs contrôlent cette pollution. D'abord, les effluents de la station ZP3 qui sont des effluents principalement hospitaliers. Ensuite, les effluents à dominance

domestique de la station Reboul et les collecteurs 33-34, 25-26-27 de Yopougon. Par la suite, les effluents de l'abattoir de Port-Bouët (RPB1) et ceux issus de l'assainissement dépotés au poste de dépotage de Biafra et refoulés directement vers la station dégrilleur T2. Enfin, l'ensemble des effluents de la ville d'Abidjan drainés par le collecteur principale (Digue). Le facteur 3 (F3) qui représente 13,54 % de la variance est déterminé par les mêmes paramètres que le facteur 2 (F2).

Pendant la sèche pluvieuse, l'effet de dilution est observé sur les facteurs 1 et 2 (F1; F2). Le facteur 1 qui représente 39,19 de la variance exprimée est déterminé par les éléments azotés (NO_2^- et NO_3^-) et le pH. Ce facteur est toujours contrôlé par les effluents industriels des collecteurs Uniwax et zone industrielle de Yopougon. En ce qui concerne le facteur 2, il est positivement corrélé avec les paramètres tels que: MES, DCO, DBO_5 , PO_4^{3-} , NTK et NH_4^+ et négativement avec le pH et la $^{\circ}\text{C}$. L'axe négative de ce facteur exprimer donc une pollution physique d'origine industrielle. Quant à l'axe positive, il indique une pollution à la fois nutritive, organique et minérale. Les pollutions organiques et minérales de cet axe pourraient provenir essentiellement des eaux de ruissèlements des saisons pluvieuses qui lessivent les surfaces terrestres vers les réseaux d'assainissement. Quant à la pollution nutritive, elle pourrait provenir de la décomposition de la matière organique qui a provoqué la pollution organique. Le facteur 3 (F3) est aussi déterminé par les mêmes paramètres que le facteur 2 (F2).

4 CONCLUSION

Au terme de cette étude dont le but était d'évaluer la charge polluante des effluents du réseau d'eau usée de la ville d'Abidjan, il convient de retenir que sur les dix (10) paramètres suivis entre 2020 et 2023, seuls les teneurs en nitrites sont restés conformes aux valeurs limites de la SDIIC. Les paramètres tels que: DCO, DBO_5 , MES, pH, NH_4^+ et NTK ont enregistré des teneurs similaires aux teneurs d'effluents industriels au niveau de certains collecteurs. Les indices de biodégradabilités ont également montré que tous les collecteurs rejetant leurs effluents directement dans le milieu naturel sans traitement préalable sont sous l'influence des eaux usées industrielles. Les ACP saisonnières ont montré que les paramètres suivant: T° ($^{\circ}\text{C}$), pH, DBO_5 et DCO sont d'origine industrielle. Il devient impératif de prendre des mesures afin de protéger les agents exploitants du réseau ainsi que les milieux récepteurs de ces effluents. Ces mesures peuvent être l'identification des industriels rejetant directement leurs effluents dans le réseau sans traitement préalable. La connaissance de ces industries permettra à la SODECI (gestionnaire du réseau) d'imposer des mesures de traitement aux industriels concernés ou de leur faire signer des conversions de déversement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Société de Distribution d'Eau Potable de Côte d'Ivoire (SODECI) pour sa contribution dans la collecte et le financement de l'intégralité des analyses effectuées. Nous remercions également les relecteurs anonymes dont leurs critique et suggestions ont permis d'améliorer cet article.

REFERENCES

- [1] A. A. Adingra et A. M. Kouassi, «Pollution en lagune Ebrié et ses impacts sur l'environnement et les populations riveraines» *F. Tech. & Doc. Vulg.*, pp.48-53, 2011.
- [2] B. Gouba, B. Sawadogo, «Caractérisation du processus de traitement des eaux usées des unités industrielles dans la station de traitement de Kossodo mise en place par l'Office Nationale des Eaux et l'Assainissement (ONEA) au BURKINA FASO», *Revue Internationale du Chercheur*, vol. 3, no. 2, pp. 19-38, 2022.
- [3] V. Kostyantyn, «Problématique de la gestion des eaux usées industrielles au niveau municipal dans les régions de l'Estrie et de la Montérégie» Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada, 116p, 2014.
- [4] Degremont, Memento technique de l'eau. Lavoisier ed, isbn: 978-2-7430-0717-1 27430-0717-6, 2005.
- [5] K. R. Dongo, B. F. Niamke, A. F. Adje, B. G. H. Britton, L. A. Nama, Anoh K.P., A. A. Adima and K. Atta, «Impacts des effluents liquides industriels sur l'environnement urbain d'Abidjan - Côte d'Ivoire», *Int. J. Biol. Chem. Sci* vol.7, no.1, pp404-420, 2013.
- [6] Direction Générale de l'Economie, «Profil-Environnement de la Côte d'Ivoire, 2021. Rapport environnement», 12p, 2023.
- [7] Y. A. Gnagne, O. B. Yapo, L. Meite, K. Kouame, A. A. Gadji, V. Mambo and P. Houenou, «Caractérisation physico chimique et bactériologique des eaux usées brutes du réseau d'égout de la ville d'Abidjan», *Int. J.Biol. Chem. Sci.* vol.9, no.2, pp.1082-1093, 2015.
- [8] MSUA et ONAD. «Programme de structuration du marché des boues de vidange. République de Côte d'Ivoire. Abidjan, Côte d'Ivoire», 2016.
- [9] L. Van der Schueren, and K. De Clerck, «Textile materials with a pH-sensitive function» *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 23, no. 4, pp. 269-274, 2011.

- [10] P. Danel, Procédé de teinture ou apprêt par foulardage avec fixation à la continue de matières textiles, Ciba Geigy AG, Office européen des brevets, Bulletin (50), 13p, 1988.
- [11] T. L. Randrianantoandro, «Caractérisation Physico-Chimique Et Traitement Des Effluents Textiles» *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, vol. 33 (1), pp.93-108 2022.
- [12] A. D. Khamis, Caractérisation physicochimique et microbiologique des eaux usées de la station de pompage n° 4 (sp4) du réseau d'égout de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso), Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso, 42p., 2015.
- [13] M. Boutayeba, A. Bouzidia, «Epuration des eaux usées domestiques par lagunage naturel dans cinq stations d'épuration de la région de la Chaouia Ouardigha-Maroc», *Nature & Technologie ». C- Sciences de l'Environnement*, no.8, pp.49-53, 2012.
- [14] H. Amadou, M. S. Laouali Et A. S. Manzola, «Évaluation des rejets d'eaux usées de la ville de Niamey dans le fleuve Niger». *Afrique Sciences* vol.7, no.2 pp43 – 55, 2011.
- [15] A. Aassiri, «Impact des eaux usées déversées par Oued Sebou sur le littoral de l'océan atlantique: évaluation de la contamination par les métaux toxiques», Mémoire de DESA, INRH/Université Mohammed V, 231p, 2001.
- [16] Y. A. Yobouet, «Contribution à l'évaluation du système d'assainissement de la ville d'Abidjan». Mémoire de DEA, Université de Cocody Abidjan, 52p, 2007.
- [17] N. Morin-Crini and C. Grégorio, Eaux industrielles contaminées, nature/conservation et protection environnementale, p.512, 2020.
- [18] H.Elaouani, H. Haffad, K. Jaafari, N. Elbada, S. Mailainine, K.Benkhouja, «Evaluation de la qualité physico-chimique des rejets liquides industriels de la zone industrielle d'elmarssa laayoune». *Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation*, vol.2, no.7, pp.1-14, 2019.
- [19] A. Laabassi, «L'épuration des eaux usées par le système de lagunage à macrophytes». Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 174p., 2016.
- [20] I. Diagne, V. Drame M. Ndiaye B. Ndiaye et A. Diop, Caractérisation physico-chimique et contamination métallique des eaux usées déversées au niveau de la baie de Hann (Dakar/Sénégal). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* vol.11, no.1, pp.462-472, 2017.
- [21] K. Amiri, N. Bekkari, A. Débbakh, A. Benmalek, A. & N. Bouchahm, «Caractérisation des eaux usées des rejets domestiques de la ville de Touggourt (Algérie) ». *J. Algér. Rég. Arid*, 14, pp.104-108, 2017.
- [22] M. K. Fidele, «Conception d'une station expérimentale de traitement des eaux usées par filtres plantés des macrophytes: « Cas de l'Université Kimpa Vita d'Uíge/Angla » » Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur, Angola, 231p., 2020.
- [23] P. Saravanakumar, P. Gopalakrishnan, M. Sivakamidevi, & E. S. Archana, «Domestic wastewater treatment using flyash as adsorbent», *Int. J. Eng. Adv. Technol*, vol.8, no.5, pp.7503-7506, 2019.
- [24] D. Ait Baziz, A. Maazouzi, & S. Lachache, «Physical-chemical characterisation of the urban wastewater case study of the Boumerdes region, North–Algeria». *Journal of Water and Land Development*, vol.54, no.1, pp.243-250, 2022.
- [25] S. Prigent, «Optimisation du traitement de l'azote et du phosphore des eaux usées domestiques adapté aux Ecole des Mines de Nantes», France, 276p. 2012.
- [26] WWAP, «Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2017. Les eaux usées – Une ressource inexploitée». Paris, UNESCO, 2017.
- [27] L. Leclercq. & B. Maquet, «Deux nouveaux indices chimique et diatomique de qualité d'eau courante: Application au Samson et à ses affluents (Bassin de la Meuse belge). Comparaison avec d'autres indices chimiques, biocénétiques et diatomiques», *Inst. roy. Sc. Nat. Belg.*, 113 p., 1987.
- [28] A. DIABAGATE, T. A. GOULA et G. E. SORO, « Hydrochimie des eaux Souterraines de la Région du Poro (Côte d'Ivoire) ». *European Scientific Journal edition*, vol. 15, no.9, pp.247 – 262, 2019.
- [29] H. Obami-Ondon, M. Ngouala, U. G. Mbilou and B. Mabiala, «Etude de la variabilité saisonnière des précipitations sur le plateau de Mbé au Pool-Nord (Congo-Brazzaville): impacts sur les eaux de surface et souterraines», *Proc. IAHS*, 384, pp. 233 - 239, 2021.

Accuracy determination of Zij and Yij parameters of integrated passive components using WK6500B impedancemeter

D.A. Oumar²⁻³, M.I. Boukhari¹⁻², N.I. Mariam¹, S. Capraro³, and J.J. Rousseau³

¹Laboratoire de Recherche en Electronique, Electrotechnique et Energie (LR3E), National Institute of Sciences and Technologies of Abéché, Abéché, Chad

²Department of Industrial Engineering and Maintenance, Polytechnical University of Mongo, Mongo, Chad

³Univ Lyon, UJM-Saint-Etienne, CNRS, LabHC UMR 5516, F-42023, SAINT-ETIENNE, France

Copyright © 2026 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 characterization of planar components such as inductors in an important step in better to understand components behavior as a function of frequency. To do this, it is essential to use a dedicated measuring device and an innovative and appropriate characterization method to achieve good accuracy. In this article, we present a new method and techniques for characterizing Zij impedance and Yij admittance parameters of passive components (resistors, capacitors and inductors) using a WK6500B impedancemeter. Obtained results are very encouraging, with good accuracy of less than 1%.

KEYWORDS: Zij and Yij parameters, WK 6500B impedancemeter, integrated passives components.

1 INTRODUCTION

In power electronics, passive components such as inductors or transformers are imperatively essential. Unfortunately, their discrete shape poses problem for their integration. Thus, planarization technology provided solutions to this integration problem [1]. The solution for using these components at high frequencies, requires precise characterization using appropriate devices. For passive components such as inductors, determining the Zij and Yij parameters gives precise information of their behavior as a function of frequency. Our previous works, [2] and [3] has allowed as to develop characterization methods at low and high frequencies. Measurements were made using 4294A impedancemeter which uses current-voltage probes. In addition, LR3E laboratory has recently acquired characterization bench using probes adapted to the characterization of planar passive components. In this work, we present a new characterization method which is bases on our old methods [2] and [3]. The present method is developed using a WK6500B impedancemeter. This is a precis equipment that uses a RF probe. The present paper mainly aims to the development of calibration methods, direct measurement, and four wires using RF probes. For this reason, an admittance and impedance measurement of planar components were realized. The objective is to determine DST electrical model elements. A study for accuracy device by carrying out repeatability and reproducibility measurement were necessary.

For this purpose, it is essential to present firstly the studied planar components as well as its electrical model. In addition, we present the new developed characterization bench, its calibration method and applied uncertainty calculation method. Results and discussions will conclude this paper.

2 DESCRIPTION OF STUDIED PLANAR COMPONENTS

In this section we describe the characterized planar magnetic components. We are dealing quadrupole components. These are planar inductors made on magnetic material as presented in [5]. Following figure 1 present studied components.



Fig. 1. Studied structure: quadrupole planar inductors

The characterized inductors (Fig.1) are made from a 1mm thick of magnetic material substrate. A copper conductor is used to make spiral shape. Copper thickness is 5 μ m. the inductor consists of 10 turns with a width of 400 μ m and separated by 100 μ m of distance [5].

3 ELECTRICAL MODEL

Furthermore, the studied planar inductor is modeled by the following electrical diagram as shown in fig.2. This model consists of a L_s inductance which accounts the component inductive behavior. The resistances R_s and R_{core} represent respectively Joule losses and magnetic losses. Capacitive coupling between turns and ground plane, are represented by capacitors named: C_s , C_{m1} and C_{m2} .

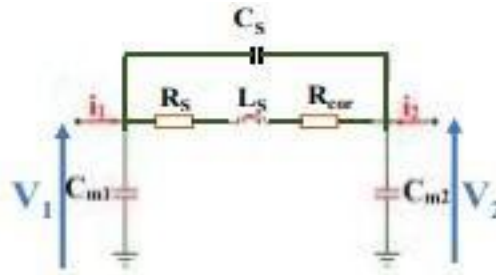


Fig. 2. Electrical model of studied structure

The admittance (Y_{ij}) and impedance (Z_{ij}) matrix of inductor parameters are characterized by this method using direct measurement. This yields the parameters of the planar device. These parameters are determined by the following relations (1-5):

$$Y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0} = \frac{1}{R_s + jL_s\omega} + j(C_{m1} + C_s)\omega \quad (1)$$

$$Y_{12} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0} = -\frac{1}{R_s + jL_s\omega} + jC_s\omega \quad (2)$$

$$Y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0} = \frac{1}{R_s + jL_s\omega} + jC_{m2}\omega \quad (3)$$

$$Z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} = \frac{1}{j(C_{m1} + C_{m2})\omega} \quad (4)$$

$$Z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_2=0} = \frac{1}{j(C_{m1} + C_{m2})\omega} \quad (5)$$

4 CHARACTERIZATION METHOD USING IMPEDANCEMETER WK6500B

In this section, we present firstly developed impedancemeter test bench. Then, we describe, operating principle and calibration (standards and compensations).

4.1 DEVELOPED MEASUREMENT METHOD AND PRINCIPLE

The measurement principle of used impedancemeter utilize 4-points self-balancing bridge method (Fig.3). It consists of measuring injected current into device under test by one pair of cables (Hcur and Lcur) and voltage is measured using the other pair of cables (Hpot and Lpot) [6].

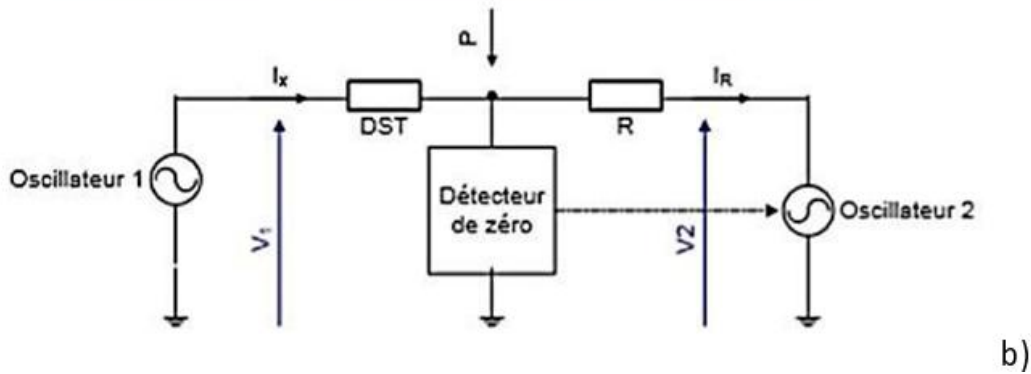
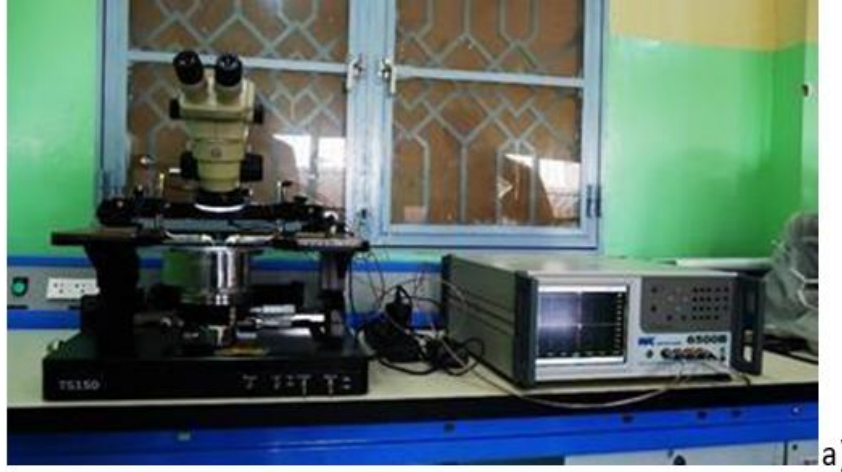


Fig. 3. Measurement principle: self-balancing bridge for impedance analyzers [7], [8]

4.2 CALIBRATION METHOD AND COMPENSATION

As any measurement instrument, impedancemeter must also be calibrated before any measurement are taken. Calibration eliminates systematic and random errors. The ideal calibrations dedicated to this studied device are: Open, Short and Load. In our case, the calibration steps performed are similar to those of authors in [9]. They are divided into two stages. First, we perform the open-short and load calibration with connector 1J1011, as shown in Fig.4.a [10]. The second stage of calibration takes place. After connecting GSC probe tips [11] to the terminals of the

42941A probe, we perform an Open/Short/Load compensation to eliminate errors in the measurement system using a calibration standard. This was done by maintaining the calibration settings at following values:

- Source (level) = 500mV;
- Open: conductance $G = 0\text{pS}$ and capacitance $C = 0\text{fF}$;
- Short: $R = 0\Omega$ and $L = 0\text{pH}$;
- Load: $R = 100\Omega$ and $L = 0\text{H}$;
- Valid range: 40 Hz – 120 MHz



Fig.4.a

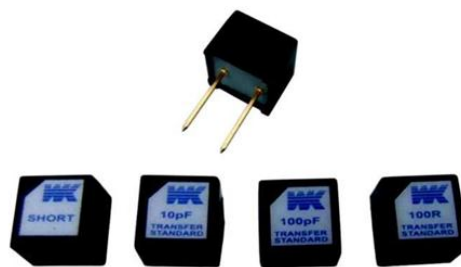


Fig.4.b

Fig. 4. J1011 Connector and B) Calibration Standard

4.3 MEASUREMENT METHOD

We use measurement techniques and configurations according to component parameters to be measured. In particular impedance or admittance, according to the following configurations [12].

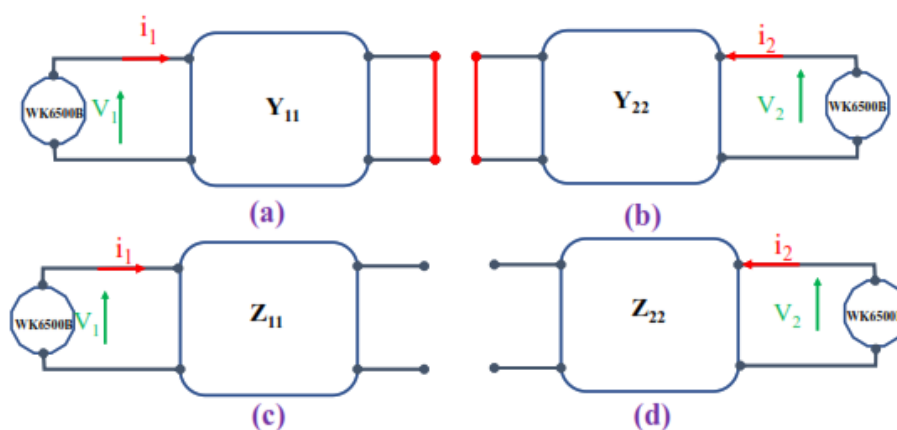


Fig. 5. Configuration's measurements

The two-ports characterization is suitable for the quadrupole component case of a planar inductor. This measurement requires two RF-GSG probes or one RF-GSG probe with four Kelvin probes (Fig.6). Depending to the configuration, the admittance parameters Y_{11} and Y_{22} or the impedance parameters Z_{11} and Z_{22} of the component can be measured. Therefore, we have developed a measurement methodology for each parameter in order to measure the Z_{ij} and Y_{ij} parameters. Namely, one method for impedance parameters and another for admittance parameters. Firstly, for admittance parameters, as in the case of impedance parameter measurements, admittance parameters measurement, requires an appropriate technique. The Y_{11} and Y_{22} parameters are measured by short-circuiting port (2). In the case of Y_{11} and Port (1) in the case of Y_{22} , respectively. Fig.6 illustrates this direct measurement technique. The short-circuit is created using an RF measurement probe connected to a short standard on one of the two ends of the component.

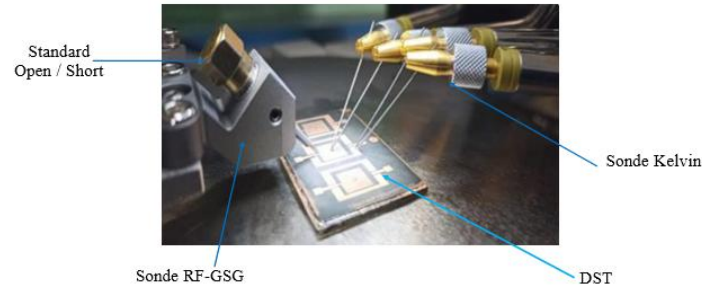


Fig. 6. Measurement configuration of Y11 and Y22 parameters

Secondly, for the impedance parameters, Z11 and Z22, these are obtained when the second port is open circuit. i.e., i_2 or $i_1 = 0A$, to measure Z11 and Z22 respectively. From the figure 7 above, illustrating the Y_{ij} measurement method, simply lift the tip to which the short standard is connected.

In general, the parameters that can be measured at no load and in short circuit are not all independent [7]. For a passive quadrupole, these parameters are linked by the following relationship:

$$Z_{11} * Y_{11} = Z_{11} * Y_{22} \quad [7] \quad (9)$$

4.4 MEASUREMENT UNCERTAINTY WITH WK6500B IMPEDANCEMETER

Determining the uncertainty measurement of WK6500B impedance meter is complex. It takes into account all effects, including those of the power source, calibration, measurement frequency band, bandwidth and measured impedance. The following equation can be used to calculate this relative uncertainty (E) [13].

The uncertainty introduced by the device are summarized in the tables below [11]:

• 1m long cables

Frequency range	Admittance in open circuit Y_0 (S)	Impedance of short circuit Z_s (Ω)	Scalar impedance errors ISZ (%)
> 10kHz à 50kHz	>10n	< 200 μ	-
> 50kHz à 1MHz	>40n	< 500 μ	0.1
> 1MHz à 15 MHz	> 1 μ	< 5 m	1

> 15 MHz à 50 MHz	> 10 μ	< 10 m	1
>50 MHz	> 20 μ	< 20 m	2

• 2m long cables

Frequency range	Admittance in open circuit Y_0 (S)	Impedance f short circuit Z_s (Ω)	Scalar impedance errors ISZ (%)
> 10kHz à 50kHz	>30n	< 1m	-
> 50kHz à 1MHz	>120n	< 1.5m	0.3
> 1MHz à 15 MHz	> 4 μ	< 5 m	1
> 15 MHz à 50 MHz	> 15 μ	< 10 m	1
> 50 MHz	> 20 μ	< 20 m	2

For additional value of Z, calculated error is follows:

$$\text{Zerror} = \pm \left[Y_0 * Z + \frac{Z_s}{Z} \right] * 100 + \text{ISZ} \quad [14] \quad (10)$$

F= 485 kHz, therefore $Y_0 = 120nS$, $Z_s = 1m\Omega$, error of 0.3% and Zerror = 0.34%

The introduced error through measurement via a connector is given in the following table: The repeatability performed on the connector has an uncertainty of $\Delta A = 0.1\%$.

$$\Delta B = 0.4\%$$

$$\Delta T = \sqrt{(0.4 * 0.4 + 0.1 * 0.1)}$$

so

$$\Delta T = 0.42\%$$

5 RESULTS

In this section, we present measurement results for the characterized planar devices. We present results of two-ports measurements consisting solely of the Zij and Yij parameters of the integrated inductors. The figure 7 below, shows Y11, Y22, Z11 and Z22 parameters curves represent either the admittance or the impedance. The orange curves represent the phase.

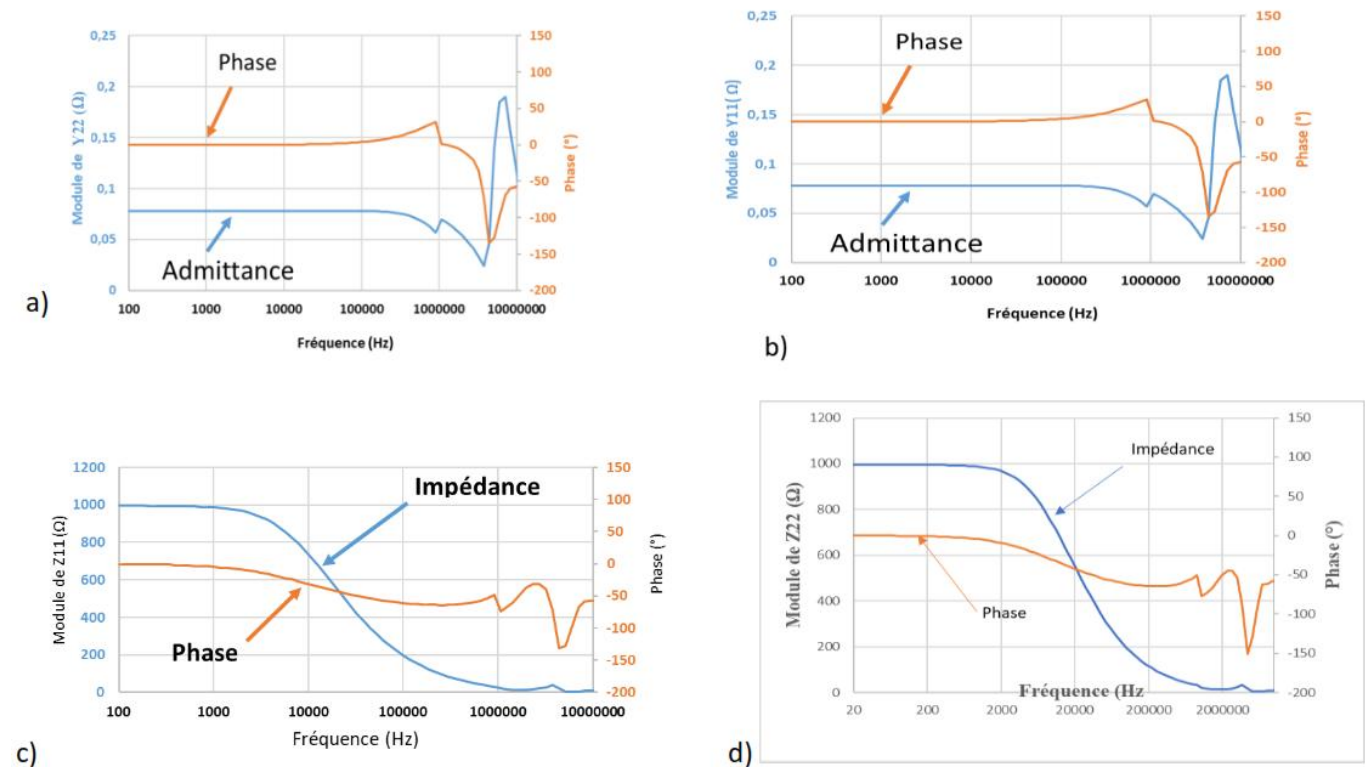


Fig. 7. The admittance parameters Yij and impedance parameters Zij, a) Y 11; b) Y22; c) Z11 and d) Z22

In figure 7, graphs a, b, c and d represent the admittance and impedance parameters Y11, Y22, Z11 and Z22 of the measured planar inductor, respectively.

The shape of the curves as a function of frequency clearly reflects the behavior of the inductor. It can be seen that at very low frequencies, from DC to tens of kilohertz. The component behaves purely resistively. This behavior is reflected on the different curves by a horizontal straight line. At medium frequencies, the device behaves as a pure inductor with a slope of ± 20 dB per decade according to the impedance Zij or admittance Yij parameters.

CONCLUSION

The quadrupole measurements were performed using the cable measurement configuration. The accuracy of these measurements is limited at low frequencies due to measurement errors caused by a lack of phase compensation.

6 EXTRACTION OF COMPONENTS PARAMETERS

Considering the different parameters Ls, Cm1, Cm2 and Cs according to their respective frequency ranges. The different elements are extracted using the indicated method in the below table.

Extracted elements	Parameters and tools used	Numerical values
<i>RS in (Ω)</i>	In low frequency <i>$Rs = \text{Real} \left(\frac{1}{Y_{11}} \right)$</i>	<i>12.8Ω</i>
Inductance LS (μH) from <i>Re(Y_{11})</i>	<i>$Y_{11} = \frac{Rs}{(Rs.Rs + (Ls.\omega).(Ls.\omega))}$</i>	<i>3.e-4 H</i>
<i>Cs + Cm1 (pF)</i>	<i>At the resonance frequency of Z11 or Z22</i>	-
<i>Cm1 + Cm2 (pF)</i>	<i>At the resonance frequency of Y2</i>	-
<i>Cs + Cm2 (pF)</i>	<i>Slope of -20dB/dec of Z11</i>	-

The measurement range was limited at low frequencies, i.e., below resonance frequency. So, it is impossible to extract capacitances Cm1, Cm2 and Cs values correctly and with sufficient accuracy. Nevertheless, this measurement band allows us to correctly extract resistance value of 12.8 Ω and inductance value of 300 μH with an accuracy better than 1%.

7 CONCLUSION

In this article, we have presented developed techniques and methodology for characterizing and extracting planar inductors by measuring the Zij and Yij parameters using WK6500B impedancemeter. In two-ports characterization, several impedance and impedance parameters (Z11, Z22, Y11 and Y22) are measured. At the end of the measurement, we correctly extracted internal resistance values and intrinsic inductance of integrated component (planar inductor with magnetic substrate) with an accuracy of less than 1%.

REFERENCES

- [1] T. B. a. G. R. Hans Meier, «Miniaturization and Advanced Functionalities of SAW Devices, » IEEE, Vols. %1 sur %2. VOL. 49, n° %1 NO. 4, APRIL 2001.
- [2] K.-S. L. C.-R. K. K.-M. K. a. J.-W. J. Young Yun, «Basic RF Characteristics of the Microstrip Line Employing Periodically Perforated Ground Metal and Its Application to Highly Miniaturized On-Chip Passive Components on GaAs MMIC, » IEEE, Vols. %1 sur %2VOL. 54, n° %1 NO. 10, OCTOBER 2006.
- [3] D. A. o. D. Ali, «Métrologie: Caractérisation des paramètre Zij et Yij des composants planaires magnétiques., » Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet de Saint-Etienne, France, 2015.
- [4] C. Yang, « F. Liu, T. Ren, L. Liu, H. Feng, A.Z. Wang, H. Long, Fully integrated ferrite based inductors for RF ICs, » Sensors and Actuator, p. pp.365–370., 2006.
- [5] M. A. Taha, «Conception, réalisation, modélisation et caractérisation d'un transformateur planaire de commande, » Laboratoire Hubert Curien de Saint Etienne, France, 2017.
- [6] Probe, http://www.americanprobe.com/public/PDF/Agilent/Cap_Meas_An_Overview.pdf disponible en ligne, consulté le 17 -11-2016., 2016.
- [7] X. M. Jean-Pierre Kedarec, « Identifying the magnetic part of the equivalent circuit of n-winding transformer». IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 56 (1), pp.14, Grenoble, 2007.
- [8] Agilent, « Technical document, Agilent Accurate Impedance Measurement with Cascade Microtech Probe System Application Note 1369-3, » 2013.
- [9] Agilent, Keysight Technologies Accessories Catalog for Impedance Measurements, Agilent, 2016.
- [10] Agilent, « Technical document, Agilent Accurate Impedance Measurement with Cascade Microtech Probe System Application Note 1369-3, » 2015.
- [11] A. Probe, « American probe, » 20 Février 2017.
[En ligne]. Available: http://www.americanprobe.com/public/PDF/Agilent/Cap_Meas_An_Overview.pdf
- [12] M. I. B. & S. C. & D. P. & J. P. C. & J. J. R. D. A. Oumar, «Two-port integrated planar devices frequency characterization,» IEEE, Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS, pp. 978-1-7281-8901, 2020.
- [13] Agilent, Agilent 4294, A Precision Impedance Analyzer Operation Manual, Seventh Edition, Hyogo-Japan: Agilent Technologie, 2000.
- [14] Wayne Kerr, Technical data sheet, precision impedance analyser, 6500B User Manual, Wayne Kerr Electronic, 2008.

Dynamique de l'occupation des terres dans le système agricole de la commune de Kéllé au Niger

[Dynamics of land use in the agricultural system of the commune of Kéllé in Niger]

Ibrahim Souley Malam Zanaidou¹, Kanembou Lawandi², Hammadou Younoussa Bachirou³, Waziri Mato Maman⁴, and Garba Zibo³

¹Laboratoire d'étude et de recherche sur les territoires sahélo-sahariens (LETRESS), Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger

²Département de Gestion des Ressources Naturelles et Géomatique. Université de Diffa, Niger

³Département de sciences fondamentales, Université de Dosso, Niger

⁴Département de Géographie, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger

Copyright © 2026 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 Niger, the combined effects of climate variability and climate change, together with anthropogenic pressure over recent decades, have strongly influenced land-use dynamics, particularly within agricultural systems. In the municipality of Kéllé, located in the Gouré Department (Zinder Region), spatio-temporal landscape analysis reveals, as in many other municipalities in Niger, significant changes in landscape evolution. In the present study, the analysis of satellite imagery and the use of a Geographic Information System (GIS) made it possible to trace ongoing changes between 1995 and 2025, in order to identify general trends and support decision-making in community-based natural resource management.

The main objective of this study is to detect land-use dynamics in the municipality in response to climate change and human activities. The methodology is based on the interpretation of Landsat satellite imagery from 1995, 2015, and 2025. The results obtained from land-use maps, change-detection maps between observation dates, and a predictive map up to 2035 indicate that land use in the municipality is undergoing continuous transformation.

Thus, areas occupied by tree-shrub steppe and dense tree steppe decreased from 62.54% and 10.79% in 1995 to 60.76% and 7.94% in 2025, respectively. In contrast, rainfed croplands and bare or degraded soils expanded, increasing from 17.44% and 0.82% in 1995 to 31.81% and 0.51% in 2025, respectively, relative to the total area of the municipality.

The projected trend of the natural environment suggests that by 2035, tree-shrub steppe will continue to decline, while dense tree steppe is expected to expand.

KEYWORDS: dynamics, satellite imagery, Kéllé, rainfed agricultural system.

RESUME: Au Niger, les effets combinés de la variabilité et des changements climatiques, ainsi que la pression anthropique depuis quelques décennies influencent fortement la dynamique de l'occupation des terres, notamment dans le système agricole. Dans la commune de Kéllé, situé dans le département de Gouré (Région de Zinder), l'analyse spatio-temporelle du paysage montre, qu'à l'instar de plusieurs autres communes du Niger, des changements notoires dans l'évolution paysagère. Dans le cadre de la présente étude, l'exploitation des imageries satellitaires et l'utilisation du Système d'Information Géographique (SIG) ont permis de retracer les changements en cours entre 1995 et 2025 afin de dégager la tendance générale de ceux-ci (changements) aux fins des prises de décisions dans le cadre de la gestion des ressources naturelles communautaires.

L'objectif principal de ce travail est de détecter la dynamique de l'occupation des terres dans cette commune face aux changements climatiques et aux activités humaines. La méthodologie utilisée est basée sur l'interprétation des imageries satellitaires Landsat de 1995, 2015 et 2025. Les résultats obtenus à travers les cartes d'occupation des terres, celles des changements entre deux dates d'observation, et celle de prédiction jusqu'en 2035 permettent de dire que l'état d'occupation des terres est en mutation continue dans ladite commune.

Ainsi, les superficies occupées par la steppe arborée-arbustive et la steppe arborée dense sont passées respectivement 62,54% et 10,79% en 1995 à 60,76% et 7,94% en 2025. Quant aux cultures pluviales et les sols nus ou dégradés, elles ont connu une extension en superficie, passant respectivement de 17,44% et 0,82% en 1995 à 31,81% et 0,51% en 2025 par rapport à la superficie totale de la commune. La tendance évolutive du milieu naturel prévoit à l'horizon 2035 une régression de la steppe arborée arbustive, tandis que la steppe arborée dense connaîtra une progression de son espace en 2035.

MOTS-CLEFS: dynamique, imageries satellitaires, Kéllé, système pluvial.

1 INTRODUCTION

Le Niger, pays sahélien, est confronté à des problèmes de désertification et de dégradation des terres. Ces phénomènes sont le résultat de la combinaison des effets néfastes du climat, de la croissance démographique et des modes d'exploitation du milieu qui constituent les facteurs déterminants [1] qui entraînent d'importantes répercussions négatives sur l'environnement naturel. En effet, l'étude de la dynamique de l'occupation du sol à travers l'analyse diachronique est une approche privilégiée pour évaluer les interactions entre l'Homme et son environnement et identifier les stratégies adaptées à une gestion planifiée des ressources naturelles [2], [3]. Aussi, les impacts des activités humaines et des facteurs climatiques entraînent une modification de l'occupation des terres, avec des conséquences néfastes sur les écosystèmes, dont les formations végétales [4]; [5]; [6]; [7]; [8], [9]. De ce fait, les besoins vitaux des populations ne cessent de croître, provoquant une forte pression sur les ressources naturelles déjà fragilisées par des facteurs physiques [10]; [11], [12], d'où la nécessité de mettre à la disposition des décideurs des informations fiables sur la dynamique des ressources territoriales.

Dans l'atteinte de ces objectifs, plusieurs méthodes ont été inventées et appliquées avec des niveaux d'efficacité divers, dont l'utilisation conjointe des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et la télédétection afin d'appréhender l'évolution du paysage [13]; [14]; [15]; [4]; [16]. A l'évidence, les changements dans l'environnement biophysique sahélien sont notables et il était impérieux de pouvoir évaluer leur ampleur en vue d'y apporter des réponses appropriées. Pour ce faire, la télédétection et les SIG sont des outils adaptés pour analyser et comprendre les différents changements notamment ceux liés à l'occupation du sol et à la couverture végétale [17]; [18]. L'intérêt scientifique de l'utilisation de ces outils pour l'étude des écosystèmes, le suivi et la compréhension de l'état actuel ainsi que de leurs évolutions des régions arides en vue de proposer des schémas appropriés de mise en valeur n'est plus à démontrer [19]; [20]; [21]; [22]; [23]; [24]; [25].

A l'instar d'autres communes du département de Gouré, celle de Kéllé fait face depuis quelques décennies à une dynamique spatio-temporelle des états d'occupation des terres, mettant en évidence une mutation progressive du milieu naturel. Les sécheresses récurrentes des dernières décennies ont profondément bouleversé l'équilibre environnemental du Niger oriental [26], tandis que le déficit pluviométrique persistant aurait modifié le faciès environnemental dans le département de Gouré avec l'avènement de la deuxième période dramatique de sécheresse des années 1980 (1982-1987) qui a entraîné la disparition ou la raréfaction des espèces ligneuses [27]. De ce fait, l'étude de ces changements a permis d'apprécier la dynamique des différentes unités d'occupation des terres (cultures pluviales, végétations, sols nus, etc.) afin d'appréhender les enjeux liés à la gestion durable de ces ressources. Ainsi, l'analyse diachronique du milieu naturel a permis de mettre en évidence les tendances des mutations paysagères passées et actuelles dans la commune de Kéllé, et prédire l'évolution future des ressources naturelles. L'objectif de ce travail est d'analyser la dynamique de l'occupation des terres dans le secteur d'étude à partir d'images satellitaires des périodes d'observation 1995, 2015 et 2025, en vue d'évaluer les principales tendances de leur évolution. Il s'agit principalement de réaliser la cartographie diachronique des états d'occupation des terres de la commune pour les trois années de références, à partir des images Landsat, afin de retracer l'évolution des différentes unités du paysage et analyser les changements observés dans un contexte de variations climatiques et de croissance démographique.

2 MATERIEL ET MÉTHODES

ZONE D'ÉTUDE

La commune rurale de Kéllé est située entre 13°51'40" et 14°53'40" de latitude Nord et 9°51'40" et 11°14'20" de longitude Est dans le département de Gouré (région de Zinder). Elle couvre une superficie de 6 720 km² et est limitée au Nord-est par la commune de Tesker, au Sud-est par celle de Goudoumaria. Au sud, elle fait frontière avec la commune de Gouré et à l'Ouest avec celles de Gamou et Alakoss (fig1). Elle compte deux cent cinquante-quatre (254) localités réparties en villages administratifs, hameaux, campements et points d'eau totalisant une population de 102.476 habitants dont 50.962 femmes (49,73% de l'effectif total) en 2020 (PDCR-Kéllé 2021-2025, p.10).

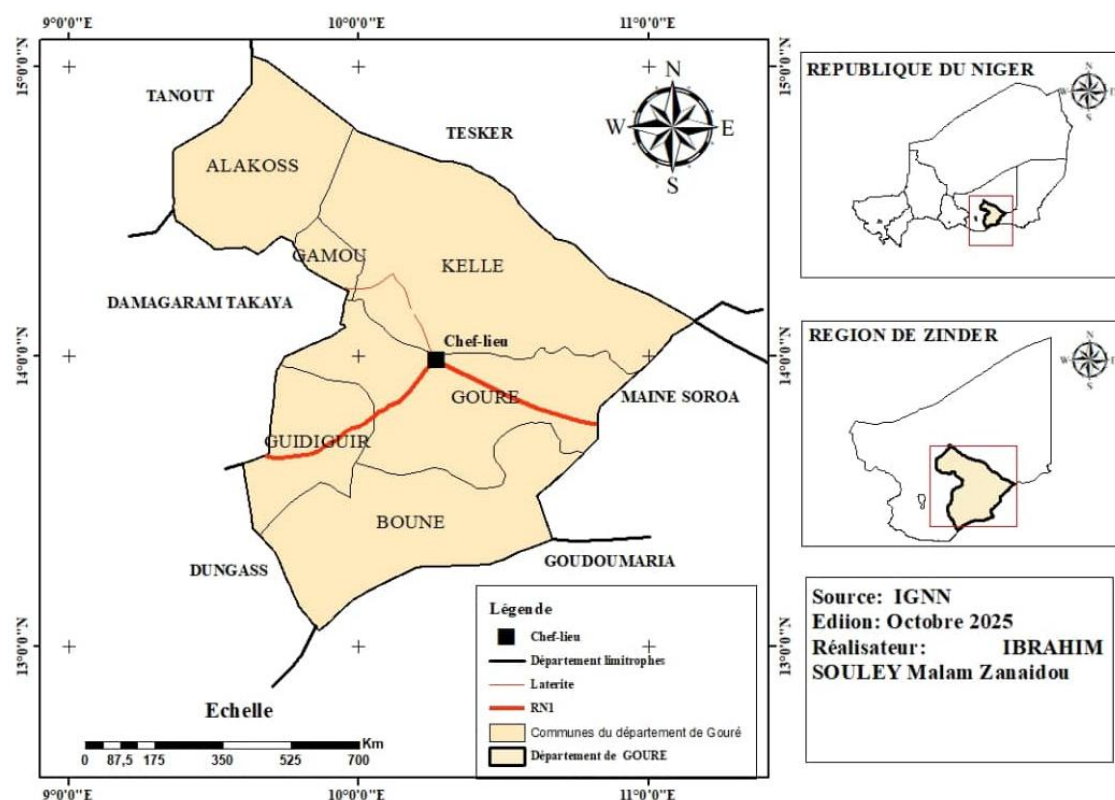


Fig. 1. Carte de localisation

MATÉRIEL

Le matériel utilisé dans cette étude se compose d'un récepteur GPS, destiné au relevé des coordonnées géographiques sur le terrain, et des logiciels de traitement d'images et de Systèmes d'Information Géographique (SIG), notamment ArcGIS 10.8 et QGIS 3.X, ainsi que des outils d'analyse statistique, et de réalisation des graphiques dont le tableur Excel.

LES DONNÉES DE BASE

Le suivi de l'évolution du paysage de la commune de Kéllé se base sur l'analyse des sources de données existantes, notamment les couches géoréférencées des limites administratives et localités du Niger produites par l'IGNN. Elles sont complétées par les images satellitaires issues des différents capteurs Landsat: Thematic Mapper (TM), et Operational Land Imager (OLI). Le tableau 1 donne les caractéristiques des images Landsat utilisées.

Tableau 1. Caractéristiques des images Landsat utilisées

Image	Resolution spatiale	Capteur	Date d'acquisition	Path & Row
Landsat 5 TM	30 m	TM	Juin 1995	187/050-051 188/050-051
Landsat 8 OLI		ETM+	Juin 2015	
Landsat 9 OLI -2		OLI -2 & TIRS-2	Juin 2025	

Source: USGS/EarthExplorer, 2025 adaptés

MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

La méthodologie utilisée pour la détection des changements d'occupation des terres dans la commune de Kéllé se base sur l'analyse diachronique à partir des images Landsat, de la cartographie par classification supervisée et l'utilisation des techniques du Système d'Information Géographique (SIG).

PRÉTRAITEMENT DES IMAGES

Au préalable, il a été procédé à l'identification et l'acquisition des scènes d'images à différentes dates, puis leur téléchargement sur le site l'USGS EarthExplorer. Des compositions colorées en fausses couleurs ont été réalisées à partir des combinaisons de bandes 5-4-3 (Landsat 5 TM) et 6-5-4 (Landsat 8 et Landsat 9 OLI-2) afin d'obtenir une synthèse visuelle permettant une meilleure discrimination des différentes unités d'occupation du sol. Une classification supervisée à l'aide de l'algorithme « *Maximum likelihood* » a été effectué, en se référant à la Nomenclature d'Occupation des Terres du Niger (NOT). Celui-ci calcule une fonction de probabilité multidimensionnelle pour déterminer la probabilité de chaque pixel d'appartenir à l'une des catégories correspondantes aux signatures spectrales [30]. Ainsi, la classification supervisée des images a permis de réaliser la cartographie thématique provisoire. La précision de cette classification a été validée à travers la matrice de confusion et des indices dont le coefficient Kappa entre autres pour vérifier et évaluer le nombre de pixels bien classés et ceux qui ne le sont pas. Les missions de terrain ont permis de collecter les *points de contrôle* à l'aide d'un récepteur GPS afin de corriger la classification. Après intégration des données de terrain et correction de la classification, un filtre spatial majoritaire (*Majority Filter*) a été appliqué pour lisser les éventuels pixels isolés, avant de vectoriser les images classifiées et réaliser les cartes thématiques définitives avec le logiciel ArcGIS 10.8.©.

DÉTECTION DES CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DES TERRES

Afin de mettre en évidence les changements observés entre deux dates, les paires des images classifiées de 1995, 2015 et 2025 ont été croisées entre elles. Ces changements sont appréhendés à travers l'évolution dans le temps et dans l'espace des classes d'occupation des terres. Cette dynamique permet en effet de synthétiser les changements intervenus dans un même paysage à différentes périodes [31]. Dans le cadre de ce travail, la détection des changements entre deux dates a été effectuée avec le plugin MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) de QGIS en utilisant les images classifiées, de 1995 à 2015 et de 2015 à 2025. En plus, cette extension a permis de calculer la matrice de transition, de simuler les évolutions futures du paysage (prédictions de changements d'occupation du sol) et de déterminer le coefficient de Kappa.

Le Taux Global (TG) de l'évolution de l'occupation des terres est calculée en utilisant l'équation proposée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) de 1996. Ainsi, le taux correspondant à la dynamique de chaque unité d'occupation du sol est calculé selon la formule de [1].

$$Tg = \frac{(S2 - S1)}{S1} * 100$$

Où:

Tg: Taux global de croissance;

S₁: la surface d'une classe d'unité de surface à la date **t₁**;

S₂: la superficie de la même classe d'unité de surface à la date **t₂**.

Les données issues des résultats du calcul du taux d'évolution de l'occupation du sol seront précédées des signes moins (-) ou plus (+) pour exprimer une dynamique régressive ou progressive [32].

Le taux d'évolution annuel (T) entre les dates consécutives est lui calculé selon la formule suivante d'Oloukoi et al., de 2007 [8].

$$T = \frac{(\ln S_{i+1} - \ln S_i)}{t \times \ln e} \times 100$$

Où:

S_i = Superficie de la classe d'occupation à la date **i**;

S_{i+1} = Superficie de la classe d'occupation à la date suivante;

t = Nombre d'années qui sépare les dates d'observation **S_i** et **S_{i+1}**;

ln = logarithme népérien et

e = 2.71828 (valeur approchée de **e** de Leonard EULER).

Cette formule mesure le taux moyen annuel d'évolution d'une surface ou d'une variable entre deux dates données [8].

MATRICE DE TRANSITION

Elle permet de mettre en évidence transformations subies par les unités d'occupation des sols entre deux dates t_1 et t_2 . Elle décrit de manière condensée les changements d'état des éléments d'un système pendant une période donnée [33], dont les cellules contiennent la valeur d'une variable ayant passé d'une classe initiale **a** à une classe finale **b** pendant la période allant de t_1 à t_2 [34]. Elle est constituée de **X** lignes et de **Y** colonnes. Le nombre de lignes de la matrice indique le nombre de classes d'occupation des terres au temps t_0 ; le nombre **Y** de colonnes de la matrice est le nombre de classes d'occupation des terres converties au temps t_1 et la diagonale contient les superficies des formations végétales restées inchangées. Les transformations se font donc des lignes vers les colonnes [35].

Dans le cadre de la présente étude, la matrice de transition est obtenue à partir du croisement des images classifiées de 1995, 2015 et 2025, grâce au plugin MOLUSCE de de QGIS et leur traitement avec le tableur Excel après exportation. La figure 2 présente le schéma conceptuel pour le traitement et l'analyse des données.

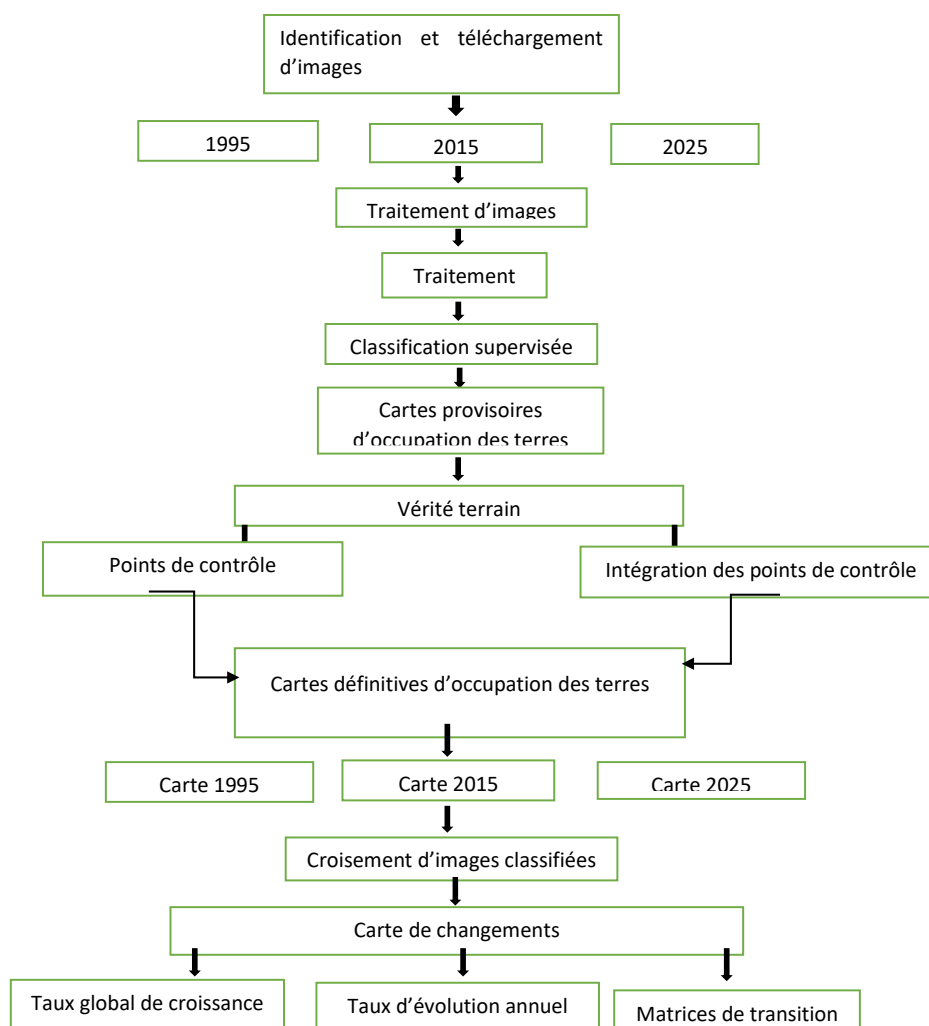


Fig. 2. Schéma conceptuel pour le traitement et l'analyse des données

3 RESULTAS

EVOLUTION CLIMATIQUE

L'analyse des données sur les précipitations enregistrées à la station de Gouré entre 1983 et 2024 (Figure 3) montre une évolution en dent de scie des précipitations. La courbe linéaire marque une tendance au retour à la pluviométrie normale. La sous période 1983 à 1993 révèle une séquence sèche, marquée toutefois par une année excédentaire (1988). C'en est suivie une alternance d'années sèches et humides jusqu'en 2019 où on remarque le retour à la pluviométrie normale. Cette succession des périodes sèches et humides aurait influencé les changements d'occupation des terres, notamment des ressources végétales.

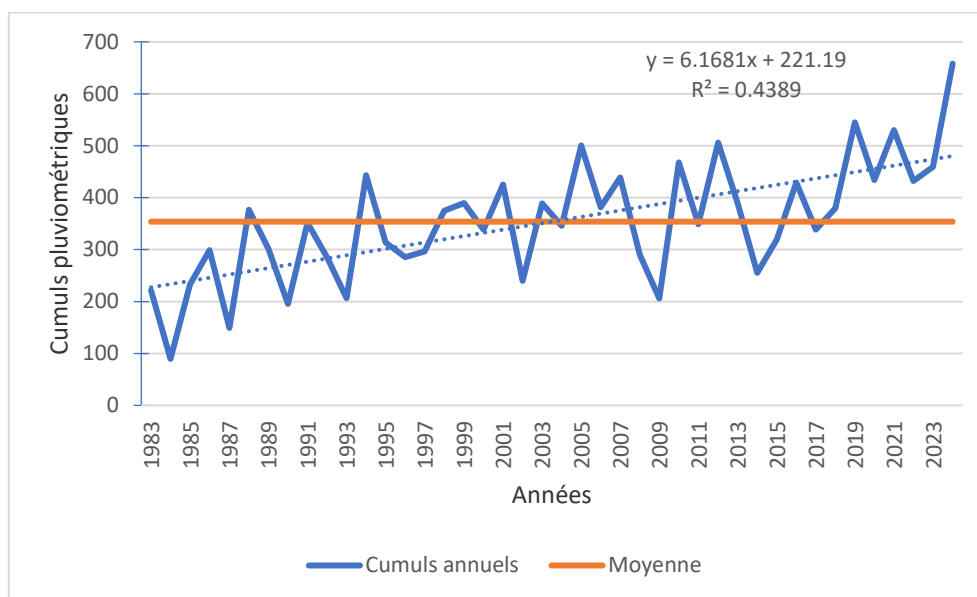


Fig. 3. Evolution de la pluviométrie de la station de Gouré sur la période 1983-2024

Source: Direction Département de la Station Synoptique de Gouré

PRÉCISION DES CLASSIFICATIONS DES IMAGES SATELLITAIRES ET RÉSULTATS CARTOGRAPHIQUES

Le tableau 2 présente les résultats relatifs à la précision des classifications des images de 1995, 2015 et 2025. Les classifications obtenues se révèlent globalement excellentes et fiables, et cette fiabilité est confirmée par les précisions globales de terrain issues des validations sur le terrain, réalisées à l'aide des points de contrôle au sol (*Ground Control Point (GCP)*), comparant les classes de la carte d'occupation des terres provisoire de 2025 à la réalité-terrain.

Tableau 2. Indice de validation des classifications de la commune de Kéllé en 1995, 2015 et 2025

Indice de validation	1995	2015	2025
Coefficient kappa	0,95	0,93	0.98
Precision utilisateur (%)	84,35%	85%	87,5%
Précision globale (%)	98%	97,63 %	98,88%

ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DES TERRES

Les résultats cartographiques d'occupation des terres de la commune de Kéllé sont donnés par les figures. 4, 5, 6 et 7. Il ressort globalement une régression des ressources végétales, notamment de la steppe arborée-arbustive et de steppe arborée dense, tandis que les unités cultures pluviales, ainsi que les sols nus ou dégradés, connaissent une augmentation de leur superficie. Par contre, l'unité affleurement rocheux reste relativement stable.

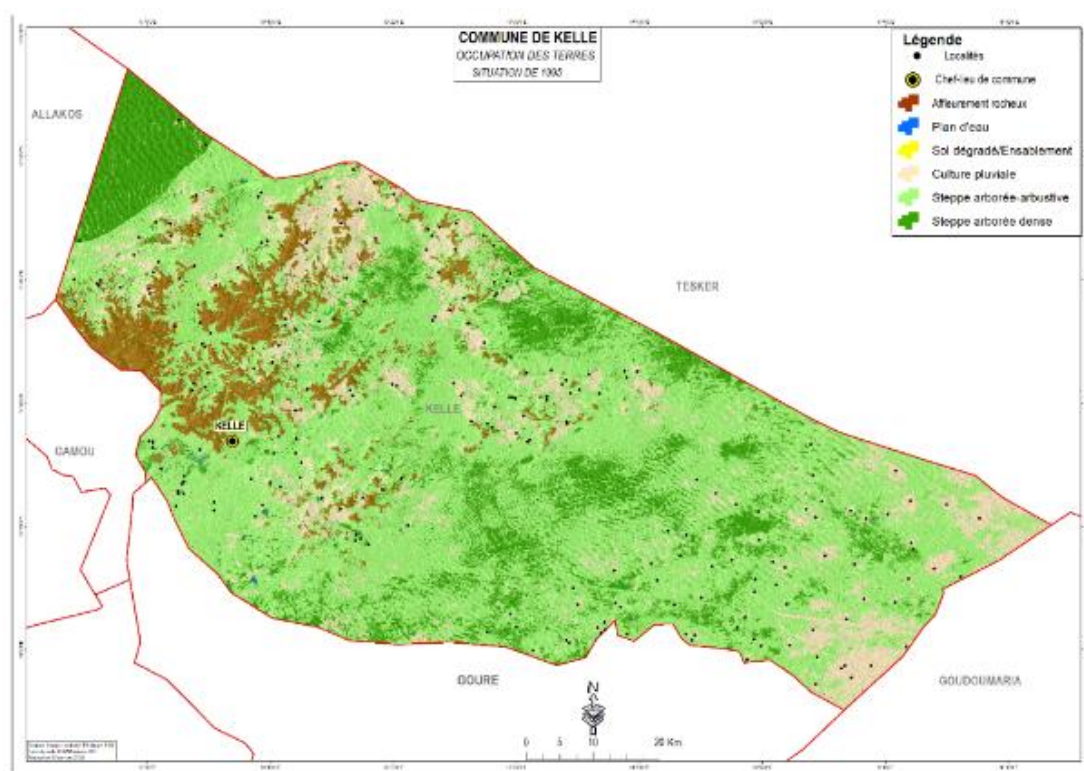


Fig. 4. Carte d'occupation des terres de la commune de Kéllé en 1995

En 1995, la steppe arborée-arbustive et la steppe arborée dense occupaient chacune 423252,45 ha et 73021,59ha, soit 62,54% et 10,79 % de la superficie totale du secteur d'étude. Les zones de cultures pluviales représentaient 118019,25ha, soit 17,44%. Les sols dégradés et ou d'ensablement couvraient quant à eux 5534,46 ha, correspondant à 0,82%. Les affleurements rocheux et les plans d'eau occupaient respectivement 54669,60 ha (8,08%) et 2205,00ha (0,33%).

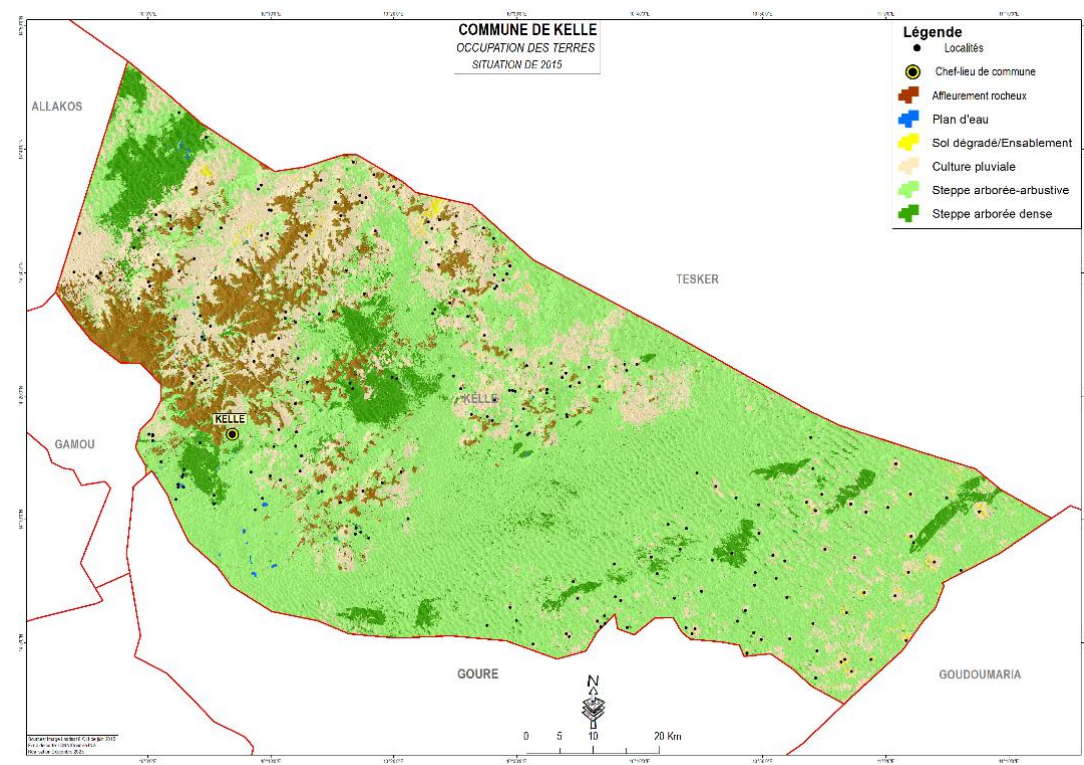


Fig. 5. Carte d'occupation des terres de la commune de Kéllé en 2015

L'analyse de la carte d'occupation des terres de 2015 révèle que les cultures pluviales occupaient 153647,64 ha, soit 22,70 % de la superficie totale de la zone d'étude. La steppe arborée dense et la steppe arborée arbustive représentaient respectivement 411200,28 ha (60,76%) et 53739,63 ha (7,94%). Les sols dégradés et ou d'ensablement couvraient 2704,32 ha, tandis que les plans d'eau s'étendaient sur 740,88 ha.

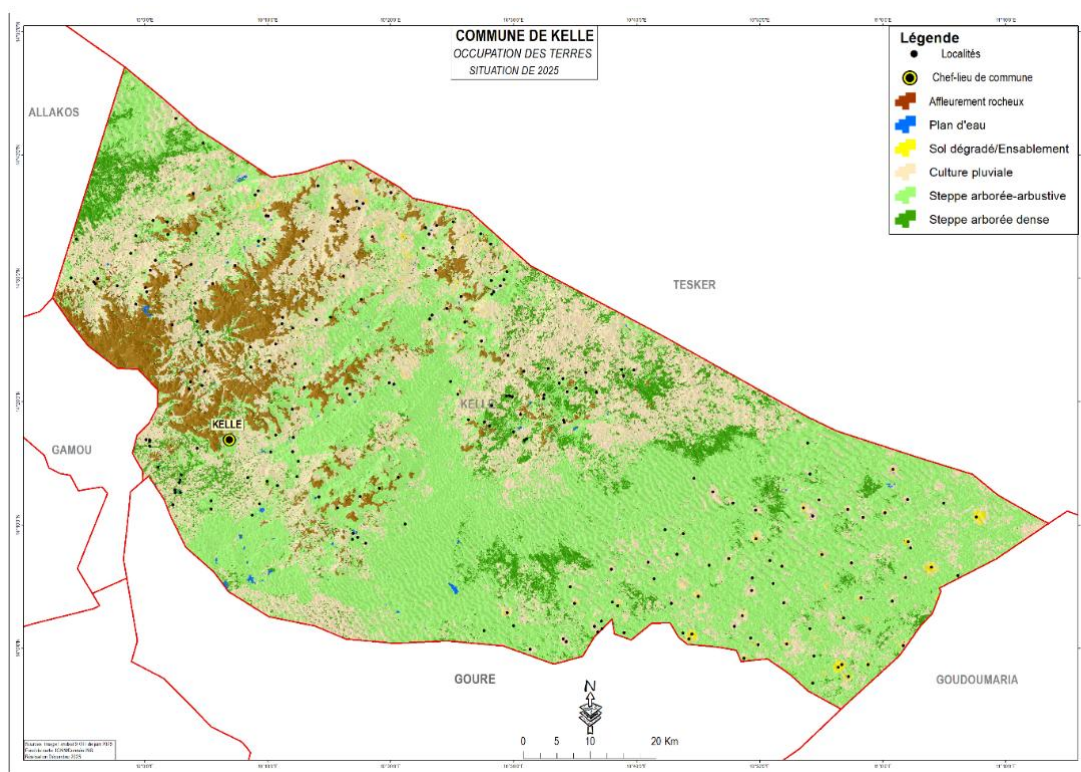


Fig. 6. Carte d'occupation des terres de la commune de Kellé en 2025

En 2025, le paysage de la commune de Kellé se caractérise par une régression des surfaces occupées par la steppe arborée arbustive qui ne représentent plus que 51,48 % contre 62,54% en 1995. Quant à la steppe arborée dense, elles représentaient 10,79% en 1995 contre 7,90% en 2025. En revanche, on observe une expansion des surfaces dédiées aux cultures pluviales allant de 17,44% (118019,25ha) à 31,81 % (215255,16ha), tandis que les affleurements rocheux demeurent relativement intacts.

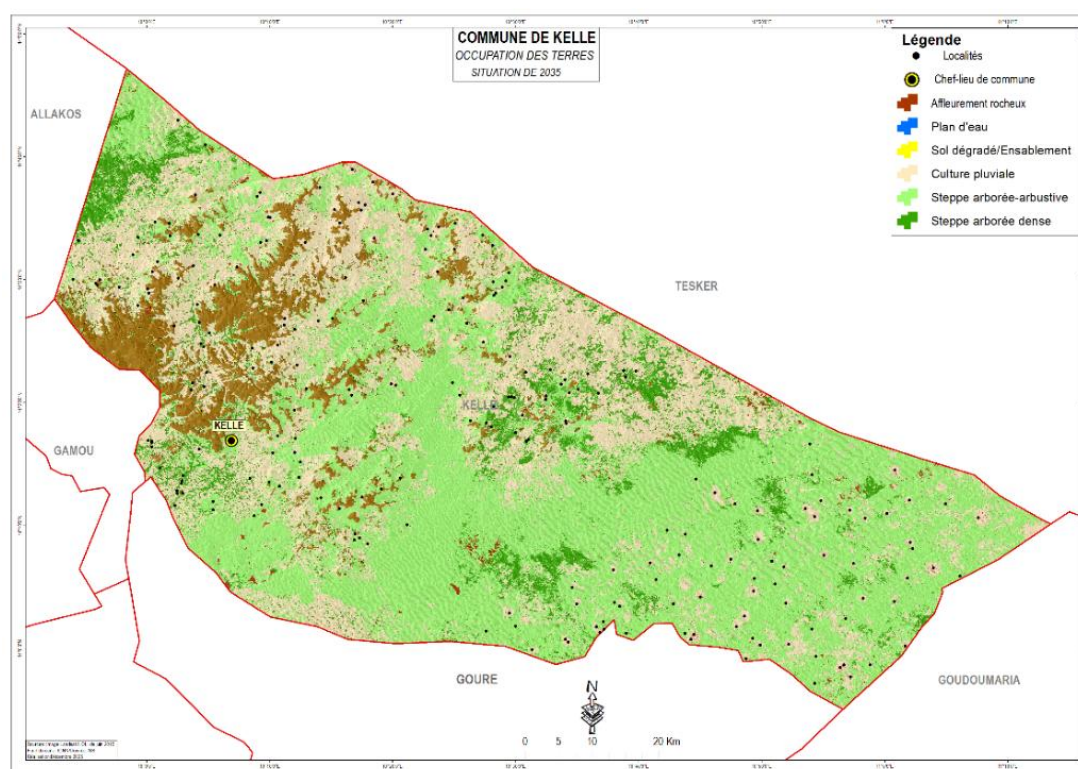


Fig. 7. Carte d'occupation des terres de la commune de Kéllé en 2035

En 2035, le paysage de la commune de Kéllé sera marqué par une régression considérable des formations végétales, notamment de la steppe arborée-arbustive, 62,54% en 1995 contre 51,48% en 2035 (diminution de plus de 10% de son espace occupé au cours de 40 ans). Une tendance similaire s'observera pour certaines unités mais insignifiant par rapport à cette première, telles que la steppe arborée dense (10,79% en 1995 contre 8,61% en 2035), les plans d'eau (0,33% en 1995 contre 0,03% en 2035), les sols dégradés (0,82% en 1995 contre 0,00% en 2035). En revanche, la culture pluviale connaîtra une extension de son espace, traduisant une progression notable de cette unité.

CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DES TERRES INTERVENU DE 1995 À 2025

Les résultats de l'analyse spatio-temporelle des unités d'occupation des terres montrent une importante évolution des superficies emblavées (culture pluviale), dont la part est passée de 17,44 % en 1995 à 22,70 % en 2015 et à 31,81 % en 2025 et une prédiction de 33 % en 2035. En revanche, le plan d'eau et le sol dégradé et ou zone d'ensablement ont connu une évolution en dent de scie. En effet, elles ont passé respectivement de 0,33% et 0,82% en 1995 avant de régresser à 0,11% et 0,40% en 2015 pour évoluer à 0,22% et 0,51% en 2025. Par ailleurs, certaines des unités d'occupation des sols n'ont subi qu'une régression marquée de leurs superficies, notamment la steppe arborée arbustive (passé de 62,54% en 1995 à 60,76% en 2015 pour atteindre 51,48% en 2025), la steppe arborée dense (passé de 10,79% en 1995 à 7,94% en 2015 pour atteindre 7,90% en 2025). Les statistiques détaillées de cette évolution sont présentées dans le tableau.3, tandis que la figure 8 illustre graphiquement la dynamique de chaque unité d'occupation des terres pour les trois périodes de références (1995, 2015 et 2025).

Tableau 3. Statistiques des unités d'occupation des terres de la commune de Kéllé en 1995, 2015, 2025 et prédiction 2023

Unités	1995		2015		2025		Prédiction 2035	
	Superficie (Ha)	Pourcentage	Superficie (Ha)	Pourcentage	Superficie (Ha)	Pourcentage	Superficie (Ha)	Pourcentage
Affleurement rocheux	54669,60	8,08	54669,60	8,07	54669,60	8,07	54669,60	8,08
Plan d'eau	2205,00	0,33	740,88	0,11	1493,28	0,22	192,34	0,03
Sol dégradé/Ensablement	5534,46	0,82	2704,32	0,40	3480,30	0,51	23,85	0,00
Culture pluviale	118019,25	17,44	153647,64	22,70	215255,16	31,81	223335,83	33,00
Steppe arborée-arbustive	423252,45	62,54	411200,28	60,76	348355,17	51,48	340204,89	50,27
Steppe arborée dense	73021,59	10,79	53739,63	7,94	53448,84	7,90	58275,85	8,61

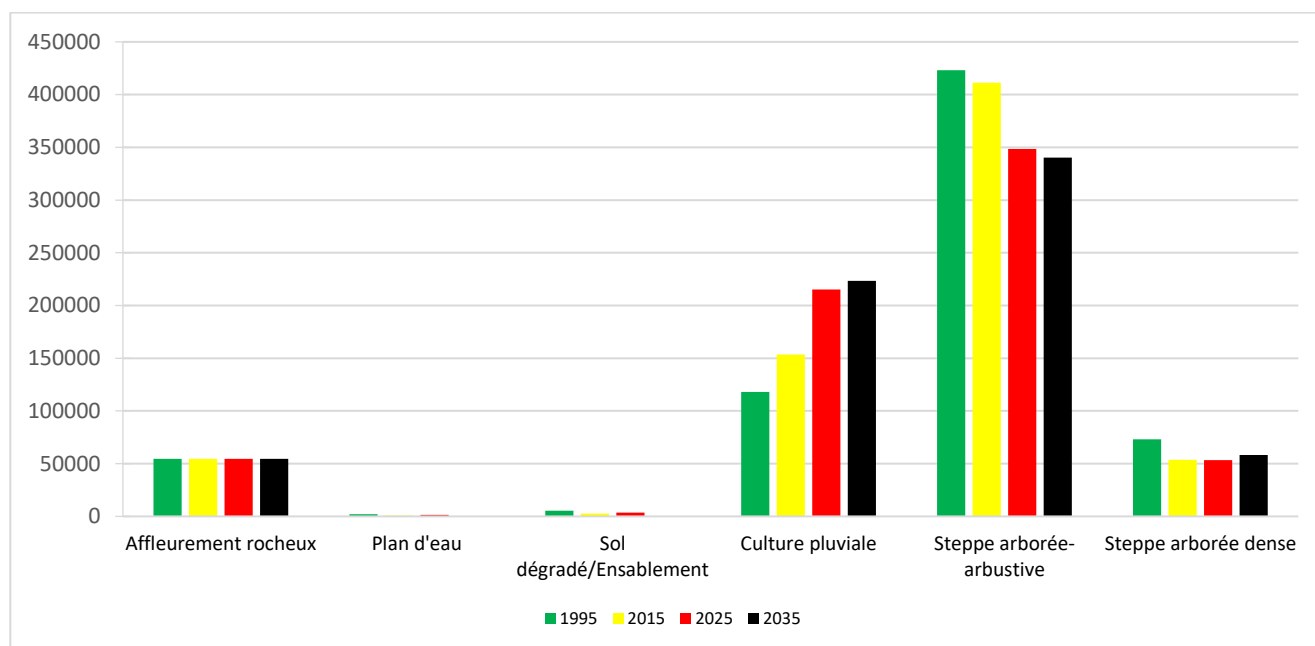


Fig. 8. Evolution des unités d'occupation des terres de la commune de Kellé en 1995, 2015, 2025 et 2035

LE TAUX GLOBAL D'ÉVOLUTION DES UNITÉS D'OCCUPATION DES TERRES DE 1995 À 2035

Le taux d'évolution spatio-temporelle des unités d'occupation des terres (tableau 4) fait ressortir une régression des ressources végétales, notamment des steppes arborée-arbustive et arborée dense qui enregistrent respectivement un taux de variation de **-11,068 % et -2,892**. En revanche, la steppe arborée-arbustive présente une évolution de 50,27 %, tout en demeurant l'unité la plus fortement affectée par la régression. La même tendance est observée pour les plans d'eau et les sols dégradés et ou zones d'ensablement avec des régressions respectives de **-0,105 % et -0,304 %**. Par contre ces deux dernières unités d'occupation des terres ont connu une tendance progressive de **2015-2025** dont respectivement **0,111 % et 0,115 %**. Cependant la diminution des sols dégradés s'explique en partie par les opérations de fixation des dunes et de restauration des sols dégradés actuellement en cours dans la commune. En revanche, l'écosystème pluvial a enregistré une progression notable, avec un taux de **17,446 %**. Ce taux évolue de **6,165 %** entre **1995-2015** à **11,280 %** entre **2015-2025** et **17,446 %** entre **1995-2035**.

Tableau 4. Taux d'évolution des classes d'occupation des terres de la commune de Kellé

Unités d'occupations des terres	1995-2015	2015-2025	Nature	1995-2035	Nature
Affleurement rocheux	0,000	0,000	Relative stabilité	0,000	Relative stabilité
Plan d'eau	-0,216	0,111	Progression	-0,105	Régression
Sol dégradé/Ensablement	-0,418	0,115	Progression	-0,304	Régression
Culture pluviale	6,165	11,280	Progression	17,446	Progression
Steppe arborée-arbustive	-1,781	-9,287	Régression	-11,068	Régression
Steppe arborée dense	-2,849	-0,043	Régression	-2,892	Régression

LES CHANGEMENTS INTERVENUS DE 1995 À 2035

La figure 9 montre les taux annuels d'évolution des classes d'occupation des terres de la commune de Kellé entre 1995 et 2025. L'analyse de celle-ci (figure 9) fait ressortir qu'entre 1995 et 2025, certaines unités ont connu une régression, notamment le plan d'eau, le sol dégradé/Ensablement, la steppe arborée-arbustive et la steppe arborée dense dont les valeurs sont négatives. À l'inverse, les unités présentant des valeurs positives témoignent d'une progression (culture pluviale). Les affleurements rocheux sont au niveau zéro, signifiant que cette unité n'a connu aucune évolution significative.

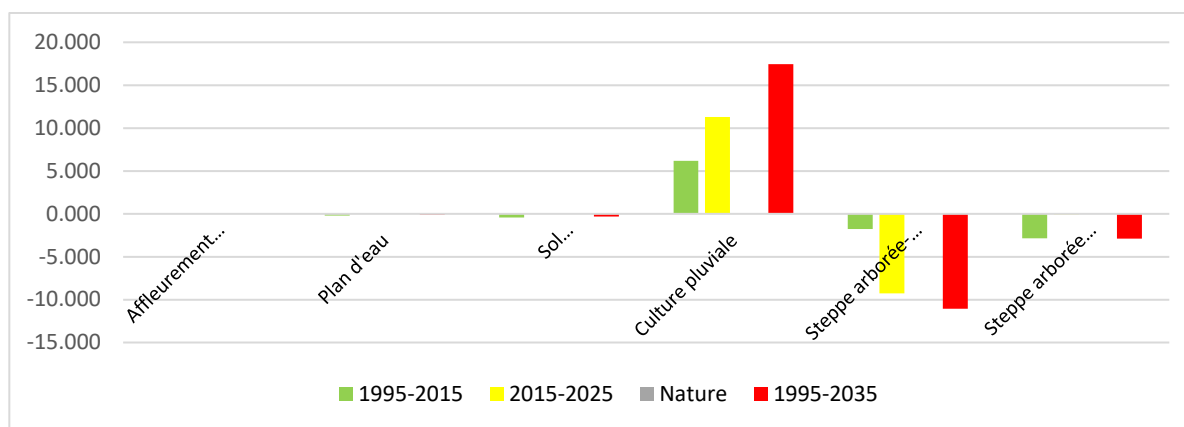


Fig. 9. Taux annuels d'évolution des classes d'occupation des terres de la commune de Kéllé entre 1995 et 2035

LES MATRICES DE TRANSITION DE 1995 À 2025

Les matrices de transition, illustrant les transformations des unités d'occupation des terres de la commune de Kéllé pour les périodes 1995-2015, 2015-2025, 1995-2025, ainsi que la projection à l'horizon 2025-2035 sont présentées dans les tableaux 5, 6, 7 et 8. Ces matrices indiquent pour chaque paire d'années les valeurs exprimées en pourcentage des transformations observées.

Entre 1995 et 2015, des changements majeurs ont été observés au sein de certaines unités d'occupation des terres. Ainsi, 1,00% des superficies occupées par la steppe arborée-arbustive se sont transformées en d'autres unités, notamment 0,054% en culture pluviale et 0,019% en sol dégradé ou zone d'ensablement, tandis que seulement 0,787 % de cette unité sont restés stables. De même, la steppe arborée dense a subi des modifications, avec 0,079% de leur superficie initiale convertie en d'autres unités, contre 0,0921% conservée. L'unité des cultures pluviales a également connu des transformations: 0,887% de sa superficie ont été maintenus, alors que 0,113 % ont été convertis en d'autres formes d'occupation des terres.

Entre 2015 et 2025, les changements les plus significatifs concernent la steppe arborée-arbustive qui n'a conservé que 0,663% de sa superficie initiale. Des transformations importantes sont également observées au niveau de l'unité plan d'eau, dont 0,291% qui se sont transformés en d'autres unités, contre 0,698% de sa superficie initiale. La steppe arborée dense a également connu des modifications de sa superficie en d'autres unités d'occupation des terres, notamment la steppe arborée arbustive (0,078%) et le plan d'eau (0,302%). En revanche, la culture pluviale n'a connu qu'une progression de sa superficie, passant de 0,887% entre 1995-2015 à 0,976% entre 2015-2025. Une seule unité d'occupation des terres a mieux résisté aux changements; il s'agit des affleurements rocheux.

Entre 2015 et 2035, grâce au reboisement entrepris ces dernières années la steppe arborée dense a progressé de 2015-2035. En effet, elle était de 0,712% entre 2015 et 2025 avant d'atteindre en 2035 (10 ans de plus) à 0,758%. Excepté cette unité et la culture pluviale qui ne connaît que l'expansion de son écosystème du fait de la croissance démographique que caractérise la zone d'étude, toutes les autres unités ne font que régresser au cours de ces quatre (4) décennies.

Entre 2025 à 2035, une régression considérable des formations végétales est attendue, notamment au niveau de la steppe arborée-arbustive (-11,068%). Ainsi, une légère régression est observée à l'unité steppe arborée dense (-2,892). Une tendance similaire sera observée pour le plan d'eau (-0,105), le sol dégradé/Ensablement (-0,304%). Cependant, une unité devrait connaître une progression en termes de superficie occupée, notamment la culture pluviale (+17,446 %). Cette progression, particulièrement marquée pour la culture pluviale s'explique par son extension spatiale liée à l'explosion démographique dont une forte demande en terres agricoles.

Tableau 5. Matrice de transition en pourcentage (%) des unités d'occupation des terres entre 1995 et 2015

Classe (1995-2015)	Affleurement rocheux	Plan d'eau	Sol dégradé / Ensablement	Culture pluviale	Steppe arborée-arbustive	Steppe arborée dense	Total
Affleurement rocheux	0,975	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	1,00
Plan d'eau	0,000	0,989	0,000	0,001	0,000	0,010	1,00
Sol dégradé / Ensablement	0,000	0,000	0,981	0,000	0,019	0,000	1,00
Culture pluviale	0,000	0,000	0,014	0,887	0,054	0,044	1,00
Steppe arborée-arbustive	0,000	0,001	0,002	0,202	0,787	0,008	1,00
Steppe arborée dense	0,000	0,000	0,001	0,079	0,000	0,921	1,00
Total	0,975	0,990	0,999	1,168	0,885	0,984	6,00

Tableau 6. Matrice de transition en pourcentage (%) des unités d'occupation des terres entre 2015 et 2025

Classe (2015-2025)	Affleurement rocheux	Plan d'eau	Sol dégradé/Ensablement	Culture pluviale	Steppe arborée-arbustive	Steppe arborée dense	Total
Affleurement rocheux	0,850	0,000	0,000	0,000	0,150	0,000	1,00
Plan d'eau	0,000	0,698	0,000	0,000	0,000	0,302	1,00
Sol dégradé/ Ensablement	0,000	0,000	0,768	0,000	0,232	0,000	1,00
Culture pluviale	0,000	0,001	0,013	0,976	0,010	0,000	1,00
Steppe arborée-arbustive	0,000	0,001	0,002	0,255	0,663	0,078	1,00
Steppe arborée dense	0,000	0,008	0,001	0,279	0,000	0,712	1,00
Total	0,850	0,708	0,785	1,509	1,055	1,093	6,00

Tableau 7. Matrice de transition en pourcentage (%) des unités d'occupation des terres entre 2025 et 2035

Classe (2015-2035)	Affleurement rocheux	Plan d'eau	Sol dégradé / Ensablement	Culture pluviale	Steppe arborée-arbustive	Steppe arborée dense	Total
Affleurement rocheux	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,00
Plan d'eau	0,000	0,945	0,000	0,020	0,035	0,000	1,00
Sol dégradé/ Ensablement	0,000	0,000	0,781	0,000	0,219	0,000	1,00
Culture pluviale	0,000	0,000	0,020	0,980	0,000	0,000	1,00
Steppe arborée-arbustive	0,000	0,001	0,003	0,323	0,589	0,084	1,00
Steppe arborée dense	0,000	0,000	0,000	0,242	0,000	0,758	1,00
Total	1,000	0,946	0,803	1,566	0,843	0,842	6,00

4 DISCUSSION

STEPPE ARBORÉE-ARBUSTIVE ET STEPPE ARBORÉE DENSE

La steppe arborée-arbustive dense, qui occupait 62,54% de la superficie de la commune, soit 423252,45 ha en 1995 a enregistré une régression de 1,78%, pour ne plus couvrir que 60,76% de la surface totale en 2025, soit une superficie de 348355,17 ha. De son côté la steppe arborée dense a aussi connu une baisse significative, passant de 10,79% en 1995 à 7,90% en 2025, soit une diminution de 2,89 % de sa superficie initiale. Cette tendance à la régression des formations végétales mise en évidence dans cette étude a également été observée par d'autres auteurs qui ont travaillé sur le changement d'état d'occupation des terres. Il s'agit notamment des travaux de [9], portant sur la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la commune de Simiri au Niger entre 1973 et 2020. D'autres auteurs ont également confirmé ce recul, voire la disparition des formations végétales [36]; [37]; [38]; [39]. Au Bénin, une étude effectuée par [40] sur la Forêt classée de la Mékrou a mis en évidence une régression des formations végétales, passant de 70,53% en 1992 à 39,33% en 2012. De leur côté, [39] ont montré que la savane arbustive dans la commune d'Allada (Benin) a connu un déclin significatif, passant de 11,47% en 1990 à une disparition complète en 2014. Les résultats obtenus au Niger par [41] dans la Réserve Totale de Faune de Tamou, [42] et [62] dans le département de Gouré, [43] et [16] dans les communes de Gabi et Gothèye, ainsi que ceux de [34] au Togo et de [44] dans la province du Bam au Burkina Faso, confirment globalement une diminution de plus en plus généralisée des formations végétales. Concernant la steppe arbustive, une évolution progressive est attendue à l'horizon 2045 avec une augmentation estimée à 0,30% par rapport à sa situation de 2025. Ces résultats corroborent ceux de [45], qui ont observé une amélioration de la couverture végétale de 66,8% entre 2001 et 2013 dans le sud-est du Burkina Faso. D'autres études menées au Niger, confirment les tendances observées dans la présente étude [46]; [47]; [48]; [49]; [50], [62].

CULTURE PLUVIALE

Les surfaces occupées par les cultures pluviales représentaient respectivement 17,44% de la superficie totale de la zone d'étude en 1995 contre 31,81% en 2025. L'extension de cette unité d'occupation du sol s'est effectuée au détriment d'autres formations, notamment la steppe arborée-arbustive dense et la steppe arbustive. Cette expansion serait en lien avec la conquête de nouvelles terres de cultures, favorisée par la croissance démographique de la commune [51]. Plusieurs travaux ont mis en évidence l'impact de la croissance démographique sur l'expansion des superficies cultivées [52]; [53]; [54]; [55]; [56]; [37]. En effet, les surfaces occupées par les cultures pluviales sont passées de 118019,25 ha en 1995, à 215255,16 ha en 2025, soit une extension de 97235,91 ha en trente ans (30).

PLANS D'EAU ET AFFLEUREMENT ROCHEUX

Les plans d'eau représentaient 0,33% de la superficie totale de la zone d'étude en 1995, contre 0,11% en 2015, puis 0,22% en 2025. Cette évolution en dent de scie serait en lien avec la variabilité pluviométrique qui caractérise la zone, comme l'illustre bien la courbe d'évolution de la pluviométrie du département de Gouré. Les résultats de la présente étude corroborent ceux de [16], qui ont observé entre 1984 et 2017 une régression des plans d'eau de **-23,16%** à Gothèye et de **-11,67%** à Torodi au Niger. De même, [54] ont mis en évidence une diminution des eaux de surface de 9,92% en 1987 à 0,98% en 2013, soit une baisse de **-8.94%**. À l'inverse, d'autres auteurs tels que [57] et [38] rapportent dans leurs travaux une progression des superficies occupées par les plans d'eau.

Quant aux affleurements rocheux, c'est une unité qui est relativement stable, dont les changements sont très négligeables du fait de leurs résistance aux facteurs dégradants. Les superficies occupées par cette unité n'ont pas connu une modification sensible et quantifiable, variant entre 8,08% et 8,07% de la superficie totale entre 1995 et 2025, selon la qualité de l'image traitée.

SOLS DÉGRADÉS OU ZONES D'ENSALEMENT

Dans la commune de Kéllé, les sols dégradés et ou les zones d'ensablement ont connu une dynamique contrastée. Ainsi, les superficies occupées par cette unité sont passées de 0,82% de la superficie totale du secteur d'étude en 1995 à 0,40% en 2015, puis 0,50% en 2025 soit une régression de -0,82% pour la période 1995-2025. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces dynamiques, dont les effets du changement climatique et ses corollaires, ainsi que les actions anthropiques. Ces dernières incluent à la fois des pratiques négatives (déforestation, pratiques agricoles, etc.) et des actions positives (opérations de fixation biologique et mécanique des dunes, restauration des écosystèmes dégradés, etc.). Selon [58], la réduction de la couverture végétale expose davantage les terres aux principaux agents érosifs, notamment le vent et l'eau de ruissellement, dans un contexte sahélien marqué par une forte variabilité pluviométrique et des sols constitués des dépôts sableux éoliens. D'autres études confirment cette tendance dont celle de [38] qui rapporte une progression des sols nus dans la partie Nord du Dallol Bosso au Niger, ou de [59] et [61] qui ont observé des résultats similaires dans d'autres régions du pays. Dans l'Est du Niger, [60] et [62] ont également mis en évidence la dynamique accrue d'ensablement. De même, [9] note une régression de la couverture végétale entre 1973 à 2020, et parallèlement une augmentation des surfaces de sols nus dans la commune de Tondikiwindi au Niger.

5 CONCLUSION

L'étude diachronique de l'évolution de l'état d'occupation des terres de la commune de Kéllé, basée sur l'utilisation des produits de la télédétection et des techniques d'utilisation des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) a permis d'appréhender les changements intervenus entre 1995 et 2025. Les résultats obtenus montrent que la zone d'étude a connu une modification de son écosystème qui se traduit par une régression des formations végétales, notamment la steppe arborée-arbuste, et la steppe arborée dense.

Cependant, l'on observe une extension de certaines unités d'occupation des terres (culture pluviale), tant que d'autres unités comme les plans d'eau et les sols dégradés ont évolué en dent de scie, avec une progression des superficies entre 1995 et 2015, puis une régression entre 2015 et 2025.

Globalement, cette étude met en évidence les transformations majeures survenues au sein des différentes unités d'occupation des terres, et de prédire l'évolution du paysage à l'horizon 2035. Les résultats indiquent une régression de certaines unités d'occupations telles que la steppe arborée-arbustive et la steppe arborée dense, les zones d'ensablement et les plans d'eau, tandis que d'autres unités comme les cultures pluviales devraient connaître une extension de leurs superficies ou une relative stabilité (affleurement rocheux).

REFERENCES

- [1] MAHAMADOU S., SALEY M.B, KOUAME K.J, AMBOUTA J M K, Ibrahim MAMADOU I., N'DOH ANGE F. 2024. Analyse de l'occupation des sols dans le contexte de changement climatique à l'échelle du bassin versant de Karey Gorou (Sud-Ouest du Niger). *Journal of Research in Environmental and Earth Sciences Volume 10 ~ Issue 10 (2024) pp: 09-21 ISSN (Online): 2348-2532*.
- [2] Jofack SVC, Kouamé FK, Dibi N'da H, Tankoano B, Akpa YL, Ngounou NB, 2016. Cartographie de l'occupation de sol des Hauts Plateaux de l'Ouest Cameroun par réseaux de neurones appliqués à une image LANDSAT 8 OLI. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 23 (2): 443-454.
- [3] Pelletier, C., 2017. Cartographie de l'occupation des sols à partir de séries temporelles d'images satellitaires à hautes résolutions Identification et traitement des données mal étiquetées. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, p. 259.
- [4] Gildas LD, Henri STV, Nickson EK, 2016. Dynamique de l'occupation du sol et évolution des terres agricoles dans la commune de Sinende au nord Bénin. *Cahiers du CBRST*, 9: 101-121.
- [5] Ayebou, G., 2017. Stratégies de lutte contre la dégradation des terres dans une zone cotonnière. Cas de la préfecture de l'Est-Mono au Togo. Mémoire de Master, Centre Régional Agrhymet, 75 pages.
- [6] Idrissa M., 2018. Impact du climat et des activités anthropiques sur les écosystèmes dans le Nord-Ouest de la région de Tillabéri au Niger. Thèse de Doctorat Unique de l'Université Abdou Moumouni de Niamey. 2018; 139 pages.
- [7] Harouna, M., 2002. De la migration circulaire à l'abandon du territoire local dans le Zarmaganda (Niger). *Revue européenne des migrations internationales*. 2002; 18 (2): 1-23. DOI: <https://doi.org/10.4000/remi.1662>.
- [8] Moussa Abdou O. et al, 2024. Dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol dans la commune de Simiri, ouest-nigérien. *International Journal of Applied Research* 2024; 10 (6): 193-202.
- [9] Moussa Abdou O. et al. (2024). Etude de la dynamique de l'occupation du sol dans la commune de Tondikiwindi dans l'ouest-nigérien. *AFRIMED AJ - Al Awamia* (145). p. 49-59.
- [10] Ouédraogo A. (2006). Diversité et dynamique de la végétation ligneuse de la partie orientale du Burkina Faso. Thèse de doctorat (Université de Ouagadougou, Ouagadougou). 196 pages.
- [11] Dan Guimbo I. (2011). Fonction, dynamique et productivité des parcs à *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn. et à *Neocarya macrophylla* (Sabine) Prance dans le sud-ouest du Niger. Thèse de Doctorat (Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey, Niger). 158 pages.
- [12] Alohou, EC., Ouinsavi, C., Sokpon, N. (2016). Fragmentation des écosystèmes forestiers: Définitions des concepts et évolution des méthodes d'évaluation. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 17 (2): 474-486.
- [13] Mas JF. 2000. Une revue des Méthodes et des Techniques de Télédétection du Changement. *Journal canadien de télédétection*, 26 (4): 349-362. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10874785>.
- [14] Lu, D, Mausel P, Brondí'Zio E, Moran E. 2004. Change Detection Technic. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (12): 2365-2407. DOI: <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>.
- [15] Avakoudjo, J., et al., 2014. Dynamique de l'occupation du sol dans le Parc National du W et sa périphérie au nord-ouest du Bénin.
- [16] I. BIGA et al, 2020. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols des communes de Torodi, Gothèye et Tagazar de la région de Tillabéri au Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 14 (3): 949-965, 2020.
- [17] Lambin, E. (1988) Apport de la télédétection satellitaire pour l'étude des systèmes agraires et la gestion des terroirs en Afrique occidentale. Exemple au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, 239p.
- [18] Nonguierma, A. (2005) Evaluation et suivi par télédétection des zones humides au Sahel. Centre Agrhymet, CILSS, 15p.
- [19] Elliott, D.C. (1996) A conceptual framework for geoenvironmental indicators. In: *Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems*. Berger, A.R. et Iams, W.J. eds., A.A. Balkema, Rotterdam: 337-349.

- [20] Hulme, M. (1996) Recent climatic change in the world's drylands. *Geophysical Research Letters*, 23: 61-64.
- [21] Gueye, M. et Ozer, A. (2000). Apport de la télédétection à l'étude de la transformation de l'agriculture et de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional). In: *La télédétection en Francophonie: analyse critique et perspectives*. Dubois, J.M.M., Caloz, R. et Gagnon, P. eds., AUPELF-UREF, 141-151.
- [22] Foody, G.M. (2003) Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: an example focused on the NDVI/rainfall relationship. *Remote Sensing of Environment*, 88: 283-293.
- [23] Eklundh, L., Olsson, L. (2003) Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 30, 10.1029/2002 GL016772.
- [24] Hountondji, Y.C., Ozer, P. et Tychon B. (2003) Etude des modifications environnementales à partir des données pluviométriques et NDVI de NOAA-AVHRR en Afrique de l'Ouest. in: *Les Journées des Géographes Belges, Tome 1: Evaluer la capacité du milieu*, Schmitz, S. et Meert, H. (eds.), Editions BEVAS/SOBEG: 19-24.
- [25] Hiernaux, P. et Turner, M.D. (2002). The influence of farmer and pastoralist management practices on desertification processes in the Sahel. In: *Global desertification: Do humans cause deserts?* Reynolds, J.F. et Stafford Smith, D.M. eds., Dalhem University Press: 135-148.
- [26] Bodart, C. (2004). Etude de l'ensablement dans la région de Gouré (Sud-Est du Niger): processus et apport de la télédétection. Mémoire de maîtrise en sciences géographiques, Université de Liège, 150 pages.
- [27] JAHIEL M., 1998. Rôle du palmier dattier dans la sécurisation foncière et alimentaire au sud-est du Niger. *Sécheresse*, 9: 167-174.
- [28] KANEMBOU L., MALAM ASSANE M. & MALAM BOURNA BAGALE M. (2024). Impacts socio-économiques des cultures des cuvettes-oasiennes sur la sécurité alimentaire des populations: cas de la cuvette de Guirsilik dans la commune de Goudoumaria (Région de Diffa/ Sud-Est du Niger). *European Scientific Journal*, ESJ, 20 (29), 106.
- [29] Tahirou et al., 2016 Perception paysanne des ligneux à houppier fermé dans les agrosystèmes de Gaya: cas du terroir villageois de Tanda (République du Niger). *Journal of Applied Biosciences* 106: 10309 –10319.
- [30] Taibou B, Seck D. 2012. Dynamique de l'occupation des sols, cartographie des CLPA, des zones de pêche et mise en place d'un système d'information géographique au Sénégal. Rapport d'exécution University of Rhode Island, Narragansett RI, p. 66.
- [31] Tchibozo É. A. M.T., 2020. Modélisation De La Dynamique Spatio – Temporelle De L'occupation Du Sol Et Analyse Des Changements Du Territoire De La Lama Au Bénin. *European Scientific Journal*, ESJ, 16 (6), 499.
- [32] Souleymane A.D., Aboubacar A., Nassirou A.M. & Garba I., 2025. Dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol dans la zone agropastorale de la commune de Korahane, centre Nord de la république du Niger. *European Scientific Journal*, ESJ, 21 (14), 111.
- [33] Schlaepfer, R., 2002, Analyse de la dynamique du paysage. Fiche d'enseignement 4.2, Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes, Ecole Polytechnique de Lausanne, Suisse, 10 pages.
- [34] Kpedenou KD, Boukpepsi T, Tanzidani T, Tchamie K. 2016. Quantification des changements de l'occupation du sol dans la préfecture de Yoto (Sud Est Togo) à l'aide de l'imagerie satellitaire Landsat. *Rev. Sc. Env.*, 13: 137-156 10.
- [35] Soufouyane Z., Ismaïla T. I., Omer A. T., Mama D. et Ousséni A. (2018). Application de la Télédétection Et du SIG au suivi des formations végétales de la forêt classée des trois rivières au Nord-Est du Bénin. *European Scientific Journal*. Vol. 14 (15). p. 450-469.
- [36] Hountondji Y. H. (2008). Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest: Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal.
- [37] Appolinaire, B. T., Brice A. T. et Ibouaïma Y. (2017). Pression agro-foncière et mutations agraires sur le plateau Adja au Sud-Ouest du Bénin. *European Scientific Journal*. Vol. 13 (8). p. 177-199. DOI: 10.19044/esj.2017.v13n8p177.
- [38] Issoufou M., Boureïma O. et Ado D. (2018). Evolution de l'occupation des sols dans la partie Nord du Dallol Bosso, départements de Filingué et Balleyara, région de Tillabéri-Niger. *European Scientific Journal*. Vol. 14 (30). p. 391-407. DOI: 10.19044/esj.2018.v14n30p391.
- [39] Brun L., Gaudence D., Gibigaye M. et Tente B. (2018). Dynamique de l'occupation du sol dans les zones humides de la commune d'Allada au Sud-Bénin (Sites Ramsar 1017 Et 1018). *European Scientific Journal*. Vol. 14 (12). p. 59-77. DOI: 10.19044/esj.2018.v14n12p59.
- [40] Bouko, B. S., Dossou, P. J., Amadou, B., & Sinsin, B. (2016). Exploitation Des Ressources Biologiques Et Dynamique De La Forêt Classée De La Mekrou Au Bénin. *European Scientific Journal*, ESJ, 12 (36), 228. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n36p22>.
- [41] MAMANE, B. et al, 2018. Dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol dans la Réserve Totale de Faune de Tamou dans un contexte de la variabilité climatique (Ouest du Niger). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 12 (4): 1667-1687, 2018.
- [42] Tidjani, A. D., Biélers, C.L. et Ambouta, K. J. M. (2009). Dynamique saisonnière des paramètres déterminant l'érosion éolienne sur les pâturages dunaires du Niger oriental. *Geo-Eco-Trop.* 33. p. 39-56.
- [43] Mahamane, A. et al, 2007. Analyse diachronique de l'occupation des terres et caractéristiques de la végétation dans la commune de Gabi (région de Maradi, Niger). *Science et changements planétaires / Sécheresse*. 2007; 18 (4): 296-304. Doi: 10.1684/sec.2007.0105.
- [44] Millogo D, Nikiema AA, Koulibaly B, Zombre NP. 2017. Analyse de l'évolution de l'occupation des terres à partir de photographies aériennes de la localité de Loaga dans la province du Bam, Burkina Faso. *Int. J. Bio. Chem. Sci.*, 11 (5): 2133-2143. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.16>.

- [45] Soulama, S. et al. 2015. Impact des activités anthropiques sur la dynamique de la végétation de la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries (sud-est du Burkina Faso) dans un contexte de variabilité climatique. *Journal of Applied Biosciences* 87: 8047– 8064.
- [46] Zabeïrou.T, Guéro.M, Amadou.B, 2004. Etude sur la dynamique de l'ensablement dans le Département de Maïné-Soroa, 28 pages.
- [47] Olsson, L., L. Eklundh et J. Ardo, 2005, A recent greening of the Sahel-trends, patterns and potential causes, *Journal of Arid Environments*, 63, pp 556–566.
- [48] Hermann, S., A. Anyamba, C.J. Tucker, 2005, Recents trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate, *Global Environmental Change*, 15, pp 394-404.
- [49] Reij, C., et al, 2006. Etude de la régénération naturelle assistée dans la région de zinder (niger) p. 259.
- [50] Mahamane.S et Mahamane.L, 2006. Evaluation de la flore et de la végétation dans certains sites traités et non traités des régions de Tahoua, Maradi et Tillabéri. Travaux de recherches, CRESA Niamey, 90 pages.
- [51] Plan de Développement Communal de Kéllé, 2021-2025, 117 pp.
- [52] KANEMBOU L, AMBOUJA J M Karimou, WAZIRI MATO M, 2009. Dynamique des aires pastorales dans le département de Gouré: apport de la télédétection et du SIG. *Revue du Laboratoire de Recherches Biogéographiques et d'Etudes Environnementales (LaRBE)*, n° 005, pp. 119 à 143.
- [53] Hamidou A., Morou B., Mahamane A., Saadou M. et Issaka A. (2012). Caractérisation de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres dans le complexe des forêts de classées de Dan kada Dodo - Dan Gado (région de Maradi, Niger). *Journal des Sciences de l'Environnement*. Vol. 1 (1). p. 16-26.
- [54] Abdou B., Souleymane S. T., Baba C., Cheick Hamalla D., Moriké D., Alou T. et Sidi D. (2016). Pressions anthropiques et dynamique d'occupation des terres dans le terroir de Ziguéna, zone cotonnière du Mali. *European Scientific Journal*. Vol. 12 (5). p. 90-99. DOI: 10.19044/esj.2016.v12n5p90.
- [55] Abdo M. (2014). Pratiques, techniques et technologies de restauration des paysages dégradés du Sahel. *African Forest Forum. Working Paper Series*. Vol. 2 (3). 47 pages.
- [56] Soufouyane Z., Ismaïla T. I., Omer A. T., Mama D. et Ousséni A. (2018). Application de la Télédétection Et du SIG au suivi des formations végétales de la forêt classée des trois rivières au Nord-Est du Bénin. *European Scientific Journal*. Vol. 14 (15). p. 450-469.
- [57] Moussa I. A., Hassane B., Wagani I., Abdourhamane T. A., Abdoulaye A. et Garba Z. (2020). Dynamique hydro-géomorphologique des mares et de l'occupation des sols de 1973 à 2018 dans la commune de Dogonkiria, Dosso. *International Journal of Applied Research*. Vol. 6 (12). p. 294-300.
- [58] Abdourhamane T. A., Rajot J. L., Garba Z, Marticorena B., Petit C. et Sebag D. (2011). Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel. *Catena*, Vol. 85 (2011). p. 205-214.
- [59] IDRISSE, A. et al, 2023. Analyse spatiotemporelle de l'occupation du sol dans la commune de Kirtachi au sud-ouest du Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 17 (3): 1033-1047, 2023.
- [60] KANEMBOU L, KARIMOUNE S, 2013. Processus d'ensablement des cuvettes et suivi par télédétection dans le département de Gouré. *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou (RGO)*, n°002, pp. 173 à 197.
- [61] MALAM ASSANE, M. & al (2021). Les cuvettes oasiennes du Manga, Sud-Est Niger: un patrimoine à forte productivité agricole menacé d'ensablement, protégé par la fixation des dunes. *Afrique SCIENCE* 18 (5) (2021) 102 – 117.
- [62] KANEMBOU, L.; & al (2025). Changes in Land Occupation in the System Oasien of Southeastern Niger, Goudoumaria in Niger. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 10 (11), 1923-1937. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/25nov1323>.

Combinaison d'engrais organiques et/ou minéral sur la culture du maïs à Daloa (Côte d'Ivoire)

[Combination of organic and/or mineral fertilizers on corn crops in Daloa (Côte d'Ivoire)]

Salla Moreto¹, Soro Kouhana², Gnamien Yah Gwladys¹, Coulibaly Assita¹, and Traore-Ouattara Karidia¹

¹Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ, Unité de formation et de recherche en agroforesterie, Laboratoire d'amélioration et de production agricoles, Côte d'Ivoire

²Université Peleforo GON COULIBALY, Département de biochimie-génétique, Unité d'enseignement et de recherche en génétique, Côte d'Ivoire

Copyright © 2026 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 uncontrolled use of synthetic fertilizers pollutes the environment. These products cause soil imbalance, leading to their leaching and infiltration by water into groundwater or waterways. It is therefore important to turn to sustainable, environmentally friendly agriculture based on biological improvement techniques using organic waste to mitigate the effects of synthetic inputs. This study aims to compare the effect of organic and/or mineral amendments on corn cultivation. To this end, the experimental design consists of a randomized Fisher block with three (3) replicates in which four (4) treatments were applied with compositions based on *Tithonia diversifolia* leaves, poultry manure, and NPK. The effects of the treatments were assessed using growth and production parameters. The organo-mineral amendment (poultry manure + *Tithonia diversifolia* + NPK) indicates that each of the fertilizers significantly induced vegetative growth. The yield of the treatments was 9.50 t/ha for the control, 13.47 t/ha for *Tithonia diversifolia* + chicken manure, 16.88 t/ha for NPK, and 21.55 t/ha for *Tithonia diversifolia*+chicken manure+NPK. The results show greater growth and yield in corn grown on plots amended with *Tithonia diversifolia*+chicken manure+NPK. This combination of fertilizers proved beneficial for soil amendment by mobilizing nutrients for the plant.

KEYWORDS: Environment, Agriculture, Fertilizer, *Tithonia diversifolia*, Chicken manure, NPK.

RESUME: L'utilisation non contrôlée des engrais synthétiques polluent l'environnement. Ces produits provoquent le déséquilibre du sol entraînant ainsi leur lessivage et infiltration par les eaux vers des nappes phréatiques ou des cours d'eau. Il serait donc important de se tourner vers une agriculture durable, respectueuse de l'environnement à partir des techniques d'amélioration biologique utilisant des déchets organiques pour atténuer les effets des intrants de synthèse. Cette étude vise à comparer l'effet des amendements organique et/ou minéral sur la culture du maïs. Pour ce fait, Le dispositif expérimental est constitué d'un bloc de Fisher randomisé avec trois (3) répétitions dans lequel quatre (4) traitements ont été appliqués avec des compositions à base de feuille de *Tithonia diversifolia*, de la fiente de volaille et de NPK. Les effets des traitements ont été appréciés à travers des paramètres de croissance et de production. L'amendement organo-minérale (fiente de volaille+*Tithonia diversifolia*+NPK) indique que chacun des fertilisants induits significativement une augmentation végétative. Le rendement des traitements a été de 9,50 t/ha pour le Témoin, de 13,47 t/ha pour *Tithonia diversifolia*+fiente de poulet, de 16,88 t/ha pour NPK et de 21,55 t/ha pour *Tithonia diversifolia* +fiente de poulet+NPK. Les résultats montrent une croissance et un rendement plus importants du maïs des parcelles amendées avec *Tithonia diversifolia*+fiente de poulet+NPK. Cette combinaison de fertilisants est apparue avantageuse pour l'amendement du sol par la mobilisation d'éléments nutritifs pour la plante.

MOTS-CLEFS: Environnement, Agriculture, Engrais, *Tithonia diversifolia*, Fiente de volaille, NPK.

1 INTRODUCTION

L'utilisation optimale des engrais est un des moyens les plus efficaces pour accroître la production agricole en Afrique subsaharienne. Cependant, cette région du monde est confrontée à des problèmes d'approvisionnement et de distribution des engrais [1, 2]. De plus, les producteurs utilisent de façon massive et abusive divers types de d'engrais de synthèse pour augmenter leurs rendements et satisfaire les marchés locaux et en exporter. Malheureusement, l'usage de ces produits chimiques polluent l'environnement, provoquent le déséquilibre du sol et entraîne leur lessivage vers les nappes phréatiques et les cours d'eau [3]. Il serait donc important de se tourner vers une agriculture durable, respectueuse de l'environnement à partir des techniques d'amélioration biologique utilisant des déchets organiques tel que la biomasse de *Tithonia diversifolia* et la fiente de volaille pour améliorer les propriétés des sols [4].

De nombreux auteurs ont montré que *Tithonia diversifolia* a des vertus dans l'amélioration des propriétés physico-chimiques et biologiques du sol. La plante peut être utilisée comme engrais vert [5, 6]. Elle présente un grand potentiel pour augmenter la fertilité des sols pauvres en éléments nutritifs [7], en apportant azote, phosphore et potassium [5]. Dans le domaine de la fertilisation des sols, cette plante est peu utilisée en Côte d'Ivoire, surtout dans le département de Daloa, où elle est disponible à toutes les saisons. En outre, la fumure organique à base de fiente de volailles est un fertilisant peu onéreux, riche en azote, en phosphore et en potassium [8]. Ces deux fertilisants organiques pourraient être utilisés en association avec l'engrais minéral pour améliorer la productivité des sols et augmenter le rendement des cultures.

Dans cette optique, ce travail vise à soutenir la production durable du maïs par des amendements organiques à base de *Tithonia diversifolia* et de la fiente de volaille.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Située au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire, à 383 km d'Abidjan, la ville de Daloa est le chef-lieu de la région du Haut-Sassandra. Elle est comprise entre 6°30 et 8° de latitude Nord et entre le 5° et 8° de longitude Ouest [9]. Elle est limitée par les départements de Vavoua et de Zuénoula au Nord, ceux de Bangolo et de Duékoué à l'Ouest, ceux de Bouaflé et de Sinfra à l'Est et le département d'Issia au Sud (Figure 1).

La parcelle expérimentale est située au sein de l'Université Jean Lorougnon Guédé, entre 6°54'32" et 6°54'53" de latitude Nord et 6°26'17" et 6°26'24" de longitude Ouest.

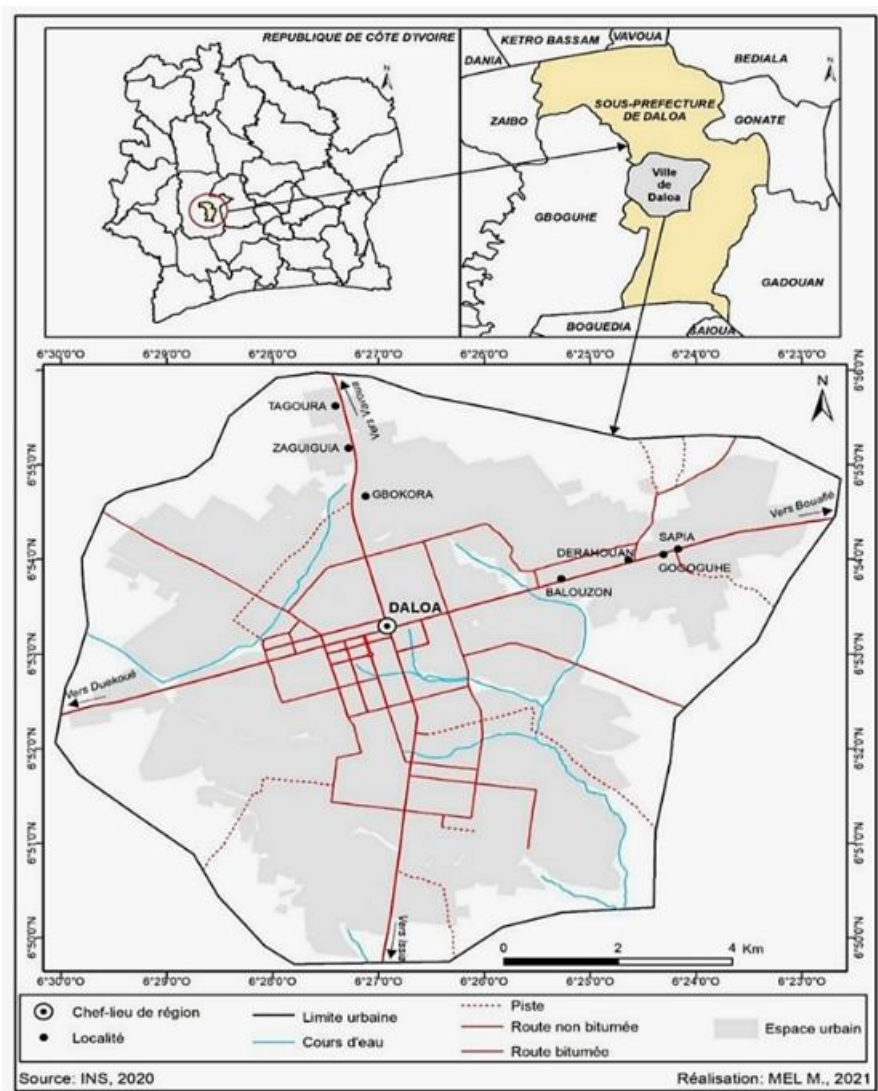


Fig. 1. Carte de localisation de la ville de Daloa [10]

2.2 MATERIEL

Le matériel employé est composé de matériel végétal et de matériel fertilisant. Le matériel végétal utilisé pour la réalisation de cette étude est constitué des plants de maïs issus des semences d'une variété locale. Le matériel fertilisant est constitué de fertilisants organiques et chimique. Les fertilisants organiques sont composés de fiente de volaille (Figure 2A) et des feuilles de *Tithonia diversifolia* (Figure 2B). Quant au fertilisant minéral, il est à base de NPK 12-22-22 de formulation granulée (Figure 2C).



Fig. 2. Fertilisants utilisés

A: Fiente de volaille; B: Feuilles hachées de *Tithonia diversifolia*; C: Engrais (NPK)

2.3 METHODES

2.3.1 PREPARATION DES BIOFERTILISANTS

Deux types de fertilisants organiques ont été formulés (solide et liquide). Les feuilles de *Tithonia diversifolia* ont été utilisées après fermentation. La fiente de volaille a été utilisée suite à sa dissolution dans de l'eau pendant une semaine.

- Biofertilisant à base de *Tithonia diversifolia*

Pour la préparation de fertilisant, les feuilles fraîches de *Tithonia diversifolia* ont été récoltées au sein de l'université Jean Lorougnon Guedé. Elles ont été découpées en petites morceaux (hachées) puis mises dans des sacs pour favoriser la fermentation (Figure 3). Ce processus de fermentation a duré 4 jours.

- Biofertilisant à base de fiente de volaille

La fiente de volaille a été collectée dans une ferme et a été mise en dissolution dans de l'eau ordinaire pendant 7 jours (Figure 4).



Fig. 3. Feuilles de *Tithonia diversifolia* fermentées



Fig. 4. Fiente de volaille dissoute dans de l'eau

2.3.2 MISE EN PLACE DE LA CULTURE DU MAÏS

Un dispositif en bloc de Fisher complètement randomisé avec quatre traitements et 3 répétitions, soit 12 sous blocs ont été utilisés (Figure 5). Chaque sous bloc a été identifié suivant les traitements, tout en tenant compte des répétitions, comme suit:

- Témoin (Tem) parcelle n'ayant reçu aucun fertilisant;
- *Tithonia diversifolia* + Fiente de volaille + NPK (Ti+F+NPK);
- *Tithonia diversifolia* + Fiente de volaille (Ti+F);
- NPK.

Les graines de maïs ont été semées directement. Ce sont en moyenne 2 à 3 graines de la variété locale de maïs qui ont été semées par poquet à une profondeur de 2 à 3 cm. Un espacement de 0,8 m entre les poquets et 0,8 m entre les lignes a été respecté. La densité de semis du maïs était 45 pieds par sous parcelle.

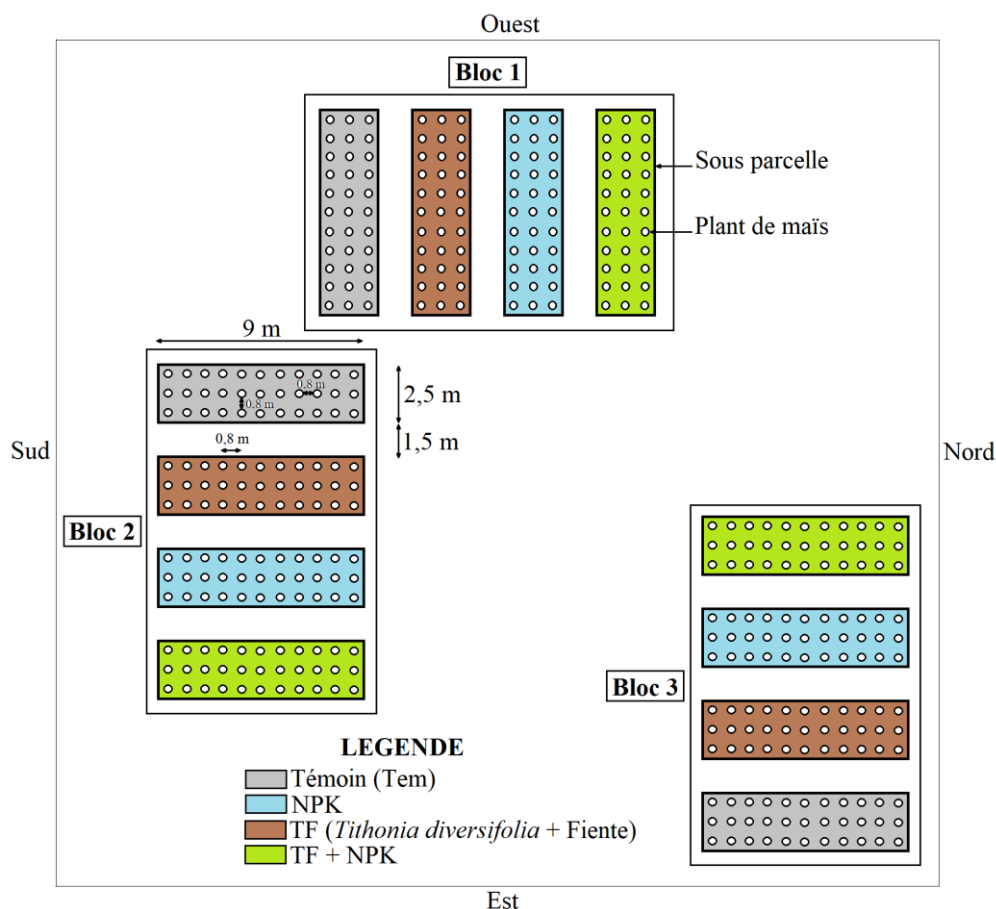


Fig. 5. Dispositif expérimental

2.3.3 APPORTS DE FERTILISANTS

Les différents fertilisants ont été apportés de façon aléatoire. Les fertilisants ont été appliqués mensuellement. Ainsi, la quantité de fertilisant apportée a été faite suite aux travaux [11] et de [12] respectivement pour *Tithonia diversifolia*, la fiente de volaille et le NPK. La quantité de fertilisant à partir du traitement issu de la combinaison des fertilisants organiques, que sont les feuilles hachées fermentées de *Tithonia diversifolia* associée à la fiente de volaille, a été faite en réduisant de 1/3 la quantité de *Tithonia diversifolia*. De même, la quantité de la fiente a été réduite de moitié (1/2) par rapport à celle mentionnée dans le tableau 1. Quant à l'association fertilisants organique (*Tithonia diversifolia* et fiente de volaille) et minéral (NPK), la part de chaque fertilisant a été faite tel que portée dans le tableau 2.

Tableau 1. Quantité de fertilisants apportée combinant *Tithonia* et fiente de volaille par surface de culture

Apport des fertilisants	Périodes d'apports	Traitements	
		<i>Tithonia</i> fermenté	Fiente de volaille
1 ^{er} apport	15 jrs après semis	1 kg/m ²	0,5 kg/m ²
2 ^{ème} apport	30 jrs après semis	1 kg/m ²	0,5 kg/m ²
3 ^{ème} apport	60 jrs après semis	1 kg/m ²	0,5 kg/m ²

Tableau 2. Quantité de fertilisants apportée combinant *Tithonia*, fiente de volaille et NPK par surface de culture

Apport des fertilisants	Période d'apport	Traitements		
		<i>Tithonia</i> fermenté	Fiente de volaille	NPK
1 ^{er} apport	15 jrs après semis	0,75 kg/m ²	0,3 kg/m ²	0,01 kg/m ²
2 ^{ème} apport	30 jrs après semis	0,75 kg/m ²	0,3 kg/m ²	0,01 kg/m ²
3 ^{ème} apport	60 jrs après semis	0,75 kg/m ²	0,3 kg/m ²	0,01 kg/m ²

2.3.4 COLLECTE DES DONNEES

La collecte des données a porté sur les paramètres de croissance (Figure 6) et de production (rendement). Elle a débuté 15 jours après les semis pour les paramètres de croissances et pour ceux de la production après la récolte des épis. Soixante (60) plants de maïs ont été sélectionnés par sous-bloc de manière aléatoire (soit 180 plants sur l'ensemble de la parcelle), pour suivre l'évolution des paramètres végétatifs.

Sur les plants de maïs retenus pour la mesure des paramètres végétatifs, les épis ont été mesurés à l'aide d'une règle graduée et d'un pied à coulisse respectivement pour la longueur et le diamètre puis pesés à l'aide d'une balance électronique pour déterminer la masse. Cette masse a été utilisée pour le calcul du rendement. La masse des graines a été pesée à l'aide d'une balance de précision après leur récolte.

Le rendement a été calculé selon la formule ci-dessous et exprimé en tonne par hectare (t/ha).

$$R = P/S$$

Avec : P = Production (en tonnes) et S = Surface cultivée (en hectare)



Fig. 6. Collecte des paramètres de croissance

A: hauteur de la plante; B: diamètre au collet; C: largeur de feuille; D: longueur de la feuille.

2.3.5 ANALYSE DES DONNEES

Les données collectées ont été saisies et traitées à l'aide du tableur Excel 2016 et du logiciel STATISTICA 7.1. Les paramètres de croissance et de production ont été soumis à des analyses statistiques. Ainsi, un test de normalité de Kolmogorov-Smirnov a été appliqué aux données. De ce fait, une analyse de variance à un facteur (ANOVA) a été réalisée afin d'apprécier des différences significatives entre les traitements en fonction des fertilisants apportés. Le test LSD de Fisher a été utilisé lorsque la différence est significative ($p < 0,05$). Le p-value de l'ANOVA ($p < 0,05$) a été considéré comme seuil de significativité.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 RESULTATS

3.1.1 DIAMETRE AU COLLET DES PLANTS DE MAÏS

Les valeurs moyennes du diamètre au collet sont consignées dans le tableau 3. L'effet des traitements sur ce paramètre été significatif durant toute la période de culture. Les plus grands diamètres au collet ont été obtenues avec le traitement F+Ti+NPK durant la croissance du maïs avec une valeur maximale de $1,86 \pm 0,53$ cm enregistrés au temps T4. Les faibles diamètres au collet ont été observés au niveau du témoin et le traitement F+Ti durant toute la croissance du maïs. De plus, outre les valeurs de TEM et du F+Ti+NPK qui sont statistiquement différentes, celles de Ti+F et de NPK statistiquement identiques dans l'ensemble, sauf au T3.

Tableau 3. Influence des traitements sur le diamètre au collet des plants (cm) de maïs en fonction des temps de mesure

Tps de mesure	Traitements				P-value
	TEM	F + Ti	NPK	F + Ti + NPK	
T1(15jrs)	$0,38 \pm 0,21a$	$0,47 \pm 0,33ab$	$0,54 \pm 0,29b$	$0,81 \pm 0,62c$	0,000
T2(30jrs)	$0,72 \pm 0,36a$	$0,62 \pm 0,34a$	$0,91 \pm 0,47a$	$0,97 \pm 0,40a$	0,000
T3(45jrs)	$1,26 \pm 0,44a$	$1,37 \pm 0,52a$	$1,58 \pm 0,59b$	$1,73 \pm 0,62b$	0,000
T4(60jrs)	$1,31 \pm 0,40a$	$1,46 \pm 0,45b$	$1,56 \pm 0,54b$	$1,86 \pm 0,53c$	0,000

Jrs: jours, Tps: temps; TEM: témoin; Ti+F: *Tithonia diversifolia*+fiente de volaille; F+Ti+NPK: fiente de volaille+*Tithonia diversifolia*+Azote, Phosphore, Potassium; NPK: Azote, Phosphore, Potassium. Sur chaque ligne, les valeurs suivies de la même lettre (sont statistiquement identiques (au seuil de 5 %).

3.1.2 HAUTEUR DES PLANTS DE MAÏS

Les hauteurs moyennes des plants de maïs mesurées sous l'influence des différents fertilisants sont présentées dans le tableau 4. Ce tableau montre que les plus grandes hauteurs des plants de maïs ont été obtenues au niveau du traitement F+Ti+NPK, avec les moyennes allant de $15,90 \pm 5,34$ cm (T1) à $111,78 \pm 57,64$ cm (T4). Par contre, les plus petites hauteurs ont été mesurées sur les parcelles du traitement F + Ti avec les moyennes allant de $12,90 \pm 5,08$ à $83,29 \pm 39,66$ cm (T4). A chaque temps de mesure, les hauteurs des plants de maïs sont significativement différentes d'un traitement à l'autre ($P < 0,05$).

Tableau 4. Influence des traitements sur la hauteur des plants (cm) de maïs en fonction des temps de mesure

Tps de mesure	Traitements				P-value
	TEM	F + Ti	NPK	F + Ti + NPK	
T1(15jrs)	$12,90 \pm 4,82a$	$12,90 \pm 5,08a$	$14,75 \pm 4,63a$	$15,90 \pm 5,34b$	0,001
T2(30jrs)	$27,74 \pm 12,21a$	$21,04 \pm 10,12b$	$26,86 \pm 10,87a$	$30,4 \pm 11,98a$	0,000
T3(45jrs)	$55,04 \pm 22,97ab$	$49,89 \pm 18,52b$	$59,54 \pm 22,79a$	$60,49 \pm 26,94a$	0,048
T4(60jrs)	$74,07 \pm 24,77a$	$83,29 \pm 39,66b$	$103,49 \pm 45,74b$	$111,78 \pm 57,64b$	0,000

Jrs: jours, Tps: temps; TEM: témoin; Ti+F: *Tithonia diversifolia*+fiente de volaille; F+Ti+NPK: fiente de volaille+*Tithonia diversifolia*+Azote, Phosphore, Potassium; NPK: Azote, Phosphore, Potassium. Sur chaque ligne, les valeurs suivies de la même lettre (sont statistiquement identiques (au seuil de 5 %).

3.1.3 LONGUEUR DES FEUILLES DE MAÏS

Le tableau 5 présente les longueurs moyennes des feuilles du maïs soumis aux différents traitements. Les traitements appliqués n'ont eu d'effet significatif sur la longueur des feuilles des plants de maïs ($p > 0,05$), excepté à la deuxième période de mesure (T2). Toutefois, les traitements NPK et F+Ti+NPK ont induit une meilleure croissance en longueur des feuilles avec respectivement des moyennes de $79,74 \pm 15,64$ cm et $79,05 \pm 20,63$ cm enregistrées à T4. La plus faible longueur de feuille mesurée au dernier temps de mesure (T4) a été obtenue avec le traitement témoin ($73,79 \pm 15,49$ cm).

Tableau 5. Influence des traitements sur la longueur des feuilles (cm) de maïs en fonction des temps de mesure

Tps de mesure	Traitements				P-value
	TEM	F + Ti	NPK	F + Ti + NPK	
T1(15jrs)	31,62 ± 10,07a	30,89 ± 11,70a	29,36 ± 8,84a	31,86 ± 12,74a	0,59
T2(30jrs)	51,25 ± 15,47ab	52,81 ± 12,95a	47,57 ± 14,56b	55,36 ± 15,44a	0,03
T3(45jrs)	66,74 ± 16,84a	74,69 ± 16,16a	70,83 ± 17,01a	70,08 ± 26,27a	0,17
T4(60jrs)	73,79 ± 15,49a	79,74 ± 15,64a	74,63 ± 16,20a	79,05 ± 20,63a	0,13

Jrs: jours, Tps: temps; TEM: témoin; Ti+F: *Tithonia diversifolia*+fiente de volaille; F+Ti+NPK: fiente de volaille+*Tithonia diversifolia*+Azote, Phosphore, Potassium; NPK: Azote, Phosphore, Potassium. Sur chaque ligne, les valeurs suivies de la même lettre (sont statistiquement identiques (au seuil de 5 %).

3.1.4 LARGEUR DES FEUILLES DE MAÏS

La largeur des feuilles de maïs des différents traitements est consignée dans le tableau VI. Les valeurs moyennes sont statistiquement identiques dans l'ensemble au niveau des deux premiers temps de mesures (T1 et T2) ($p > 0,05$) Par contre au cours des derniers temps de mesure (T3 et T4), les traitements F+Ti+NPK et NPK ont induit de meilleures croissances en largeur des feuilles par rapport aux traitements F + Ti et témoin. A T4, les largeurs moyennes des feuilles de maïs issues du traitement F+Ti+NPK ont été de $8,30 \pm 2,37$ cm, contre $6,96 \pm 1,43$ cm pour le témoin.

Tableau 6. Influence des traitements sur la largeur des feuilles (cm) de maïs en fonction des temps de mesure

Tps de mesure	Traitements				p-value
	TEM	F +Ti	NPK	F + Ti + NPK	
T1(15jrs)	2,48 ± 0,81a	2,13 ± 0,76b	2,34 ± 0,95b	3,23 ± 5,24b	0,145
T2(30jrs)	4,86 ± 0,64a	4,05 ± 0,22a	4,41 ± 0,23a	4,80 ± 0,21a	0,354
T3(45jrs)	6,05 ± 1,57a	6,27 ± 2,02b	6,99 ± 2,05b	7,21 ± 2,15b	0,002
T4(60jrs)	6,96 ± 1,43a	7,08 ± 1,99a	7,91 ± 1,99b	8,30 ± 2,37b	0,000

Jrs: jours, Tps: temps; TEM: témoin; Ti+F: *Tithonia diversifolia*+fiente de volaille; F+Ti+NPK: fiente de volaille+*Tithonia diversifolia*+Azote, Phosphore, Potassium; NPK: Azote, Phosphore, Potassium. Sur chaque ligne, les valeurs suivies de la même lettre (sont statistiquement identiques (au seuil de 5 %).

3.1.5 NOMBRE DE FEUILLES DES PLANTS DU MAÏS

Le tableau 7 révèle que les différents traitements ont eu un effet significatif ($p < 0.05$) sur le nombre moyen de feuilles. La plus grande valeur a été obtenue avec le traitement F+Ti+NPK $16,94 \pm 2,23$ cm. La plus faible valeur de $11,88 \pm 0,28$ cm, a été enregistrée chez les plants traités avec F + Ti, statistiquement identique au traitement NPK.

Tableau 7. Influence des traitements sur le nombre de feuille de maïs en fonction des temps de mesure

Tps de mesure	Traitements				P-value
	TEM	F + Ti	NPK	F + Ti + NPK	
T1(15jrs)	5,53 ± 1,28a	5,18 ± 1,25ab	5,59 ± 1,92a	4,75 ± 2,02b	0,021
T2(30jrs)	7,28 ± 1,67a	6,33 ± 1,60b	6,86 ± 2,12ab	7,35 ± 2,08a	0,012
T3(45jrs)	10,36 ± 1,93a	11,48 ± 1,91ab	13,06 ± 8,48b	11,8 ± 3,05ab	0,020
T4(60jrs)	12,95 ± 0,30a	11,8 ± 0,28a	14 ± 0,29ab	16,949 ± 2,43b	0,027

Jrs: jours, Tps: temps; TEM: témoin; Ti+F: *Tithonia diversifolia*+fiente de volaille; F+Ti+NPK: fiente de volaille+*Tithonia diversifolia*+Azote, Phosphore, Potassium; NPK: Azote, Phosphore, Potassium. Sur chaque ligne, les valeurs suivies de la même lettre (sont statistiquement identiques (au seuil de 5 %).

3.1.6 ENVERGURE DES PLANTS DE MAÏS

Les valeurs moyennes de l'envergure des plants de maïs soumis aux différents traitements sont présentées dans le tableau 8. L'analyse de variance n'indique pas d'effet significatif ($p > 0,05$), pendant les deux premiers temps de mesures (T1 et T2) contrairement aux derniers temps de mesures. Pendant ces derniers temps de mesures, les plus grandes envergures ont été obtenues avec le traitement F+Ti+NPK avec des moyennes de $90,41 \pm 27,91$ cm (T4) et $109,38 \pm 25,72$ cm (T4). Cependant, les plus faibles envergures ont été observées au niveau du témoin durant presque tous les temps de mesures.

Tableau 8. Influence des traitements sur l'envergure (cm) des plants de maïs en fonction des temps de mesure

Tps de mesure	Traitements				P-value
	TEM	F + Ti	NPK	F + Ti + NPK	
T1(15jrs)	36,9 ± 11,47a	35,16 ± 8,75a	33,81 ± 11,32a	35,483 ± 16,10a	0,589
T2(30jrs)	66,991 ± 23,61a	71,97 ± 26,03a	70,37 ± 21,43a	74,283 ± 24,46a	0,402
T3(45jrs)	85,333 ± 20,45ab	77,35 ± 20,18b	92,76 ± 23,05a	90,416 ± 27,91a	0,001
T4(60jrs)	90 ± 19,34a	94,45 ± 22,37a	104,18 ± 18,10b	109,389 ± 25,72b	0,000

Jrs: jours, Tps: temps; TEM: témoin; Ti+F: *Tithonia diversifolia*+fiente de volaille; F+Ti+NPK: fiente de volaille+*Tithonia diversifolia*+Azote, Phosphore, Potassium; NPK: Azote, Phosphore, Potassium. Sur chaque ligne, les valeurs suivies de la même lettre (sont statistiquement identiques (au seuil de 5 %).

3.1.7 INFLUENCE DES TRAITEMENTS SUR LES EPIS DE MAÏS

L'influence des traitements sur les dimensions et la masse des épis de maïs récoltés est résumée dans le tableau 9. L'analyse statistique montre un effet significatif ($p > 0,05$) des traitements sur la longueur des épis. Le traitement F+Ti a enregistré la plus faible longueur des épis ($12,53 \pm 0,35$ cm), mais supérieure à celle du témoin ($11,11 \pm 0,43$ cm). Cette longueur est la plus élevée $16,65 \pm 1,51$ cm pour le traitement combinant (F+Ti+NPK). Le diamètre minimal des épis ($3,938 \pm 0,50$ cm) a été enregistrée au niveau de maïs qui n'a pas subi de traitement (Témoin). Les traitements ont eu un effet significatif sur le diamètre ($p > 0,05$). Les traitements NPK, F+Ti+NPK et F+Ti sont statistiquement identiques. L'analyse de variance de la masse de l'épi a montré qu'il existe une différence significative avec les fertilisants apportés. La masse moyenne de l'épi la plus élevée ($166,605 \pm 10,23$ grammes) a été obtenu avec le traitement F+Ti+NPK et la plus faible avec le témoin ($99,51 \pm 15,18$ grammes). Les traitements NPK et F + Ti ont permis d'obtenir les épis de grand diamètre avec respectivement des moyennes de $141,02 \pm 11,55$ grammes et $115,43 \pm 7,89$ grammes.

Tableau 9. Influence des traitements sur les paramètres agronomiques de l'épi de maïs

Paramètres	Traitements				P-value
	TEM	F + Ti	NPK	F + Ti + NPK	
Longueur (centimètre)	11,11 ± 0,43a	12,53 ± 0,35ab	13,86 ± 0,56b	16,65 ± 1,51c	0,000
Diamètre (centimètre)	3,93 ± 0,50b	4,20 ± 0,54a	4,29 ± 0,54a	4,32 ± 0,53a	0,001
Masse (gramme)	99,51 ± 15,18a	115,43 ± 7,89ab	141,02 ± 11,55bc	166,60 ± 10,23c	0,000

Jrs: jours, Tps: temps; TEM: témoin; Ti+F: *Tithonia diversifolia*+fiente de volaille; F+Ti+NPK: fiente de volaille+*Tithonia diversifolia*+Azote, Phosphore, Potassium; NPK: Azote, Phosphore, Potassium. Sur chaque ligne, les valeurs suivies de la même lettre (sont statistiquement identiques (au seuil de 5 %).

3.1.8 INFLUENCE DES TRAITEMENTS SUR LES GRAINS DU MAÏS

La production en hectare des grains de maïs est consignée dans la (Figure 7). L'analyse statistique au seuil de 5 % révèle une différence significative ($p > 0,05$) entre les traitements. Les meilleurs rendements ont été obtenus au niveau des parcelles traitées avec F+Ti+NPK (21,55 t/ha). Par contre le plus faible rendement a été enregistré sur les parcelles témoins (9,50 t/ha).

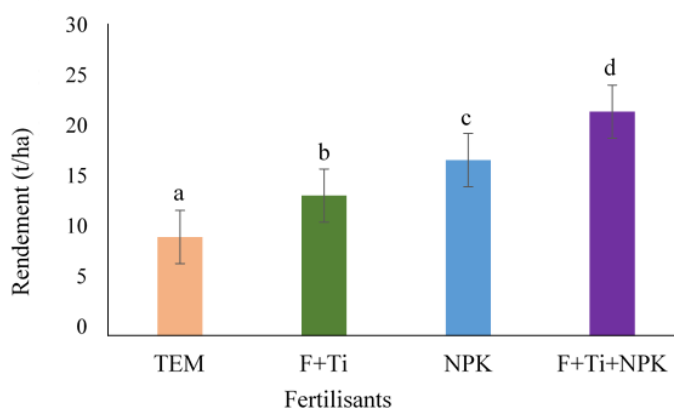


Fig. 7. Rendement du maïs grains par traitement

3.2 DISCUSSION

3.2.1 EFFET DES FERTILISANTS SUR LA CROISSANCE DE LA PLANTE DU MAÏS

L'étude de la croissance de plant de maïs sous les amendements organiques et minéraux montre que les résultats obtenus avec des différents fertilisants se sont avérés statiquement différents par rapport au témoin tous les temps de mesure. Les fertilisants élaborés ont un effet positif sur les jeunes plants de maïs aussi bien sur la hauteur des plants, le diamètre au collet que sur la longueur et la largeur des feuilles.

Au niveau de la hauteur et du diamètre au collet des plants de maïs, la combinaison fiente de volaille + *Tithonia diversifolia*+NPK a donné les meilleurs résultats. Ses résultats similaires ont été obtenus par [13] qui ont travaillé sur la productivité du maïs en République Démocratique du Congo. En effet la particularité du fertilisant (fiente de volaille + *Tithonia diversifolia*+NPK) par rapport aux autres fertilisants est que du point de vue chimique, les teneurs en éléments fertilisants sont supérieurs à ceux des autres. Suite à la forte activité des microorganismes augmentant ainsi la teneur en éléments fertilisants (N, P et K) supérieurs à ceux de tout autre compost. Ils ressortent de l'étude de [14] portants sur l'effet de *Tithonia diversifolia* sur des plantes de maïs quelles constituent une source d'éléments nutritifs et également une source de matière organique. Elle met à la disposition des plants des éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore assurant la croissance et la turgescence de ces plants. Ces résultats sont semblables à ceux de [15], qui a obtenu une action plus soutenue sur la croissance de l'aubergine avec *Tithonia diversifolia* en faible quantité pris séparément ou en combinaison avec le NPK, mais ces résultats pourraient s'expliquer par l'insuffisance de la quantité de *Tithonia diversifolia* apportée aux plantes car la dose optimale recommandée par cet auteur est de 5 t/ha. Par ailleurs [16] ont montré dans une étude sur le maïs que l'utilisation des fertilisants organo-minéraux a permis d'obtenir une bonne croissance des plants.

Par ailleurs, les minéraux libérés par la fiente de volaille en décomposition pourraient favoriser la croissance et la rigidité des tissus végétaux et par conséquent un développement important, harmonieux et une résistance des plants de maïs. Cette action améliore également les propriétés physiques du sol [17] et [18]. [19] ont également montré que l'association de fiente de volaille et les fumures minérales permettaient une augmentation de croissance des paramètres chez la tomate. L'action bénéfique de l'apport des fertilisants organiques a été également démontrée par des études. En effet, selon les études de [20], il ressort que le fertilisant organique azolla a présenté les valeurs les plus élevées que le NPK ainsi que le témoin sur les paramètres végétatifs étudiés, pour les plants de tomates traités. Cette croissance se justifie par le fait que l'azolla a une quantité importante d'éléments d'azote et de phosphore. Ces éléments sont indispensables à la croissance et au développement des plantes et agissent immédiatement sur le développement du feuillage et sur la production des plantes en culture.

Les résultats en second temps avec le traitement à base NPK sont attribués à la libération et à l'utilisation rapide de ses éléments fertilisants (l'azote, le phosphore, et le potassium). L'engrais minéral est utilisé pour corriger rapidement les carences. Cependant, la minéralisation rapide de ce traitement peut entraîner l'infiltration des minéraux dans les horizons inférieurs du sol qui deviennent alors inaccessibles aux racines. L'apport de matière organique à l'amendement minéral corrigerait cette insuffisance. Cela est justifié par l'idée selon laquelle la matière organique, est le meilleur fertilisant de base [21]. Aussi il faut noter que la faible croissance du témoin peut être due aux conditions physico-chimiques du sol. Cette remarque est faite par [22]; lorsqu'ils disent que la faible croissance des plantes peut être attribuée aux facteurs caractéristiques du sol, notamment le pH, la toxicité et les déficiences en nutriments (Ca, Mg, P, K, B et Zn). Pour [21] l'apport d'engrais minéral seul ne peut pas maintenir à long terme la productivité des sols à cause du lessivage et de la dégradation des propriétés des sols. Pour ces auteurs, la matière organique (fertilisant organique) est le meilleur fertilisant de base.

3.2.2 EFFET DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LES PARAMETRES DU RENDEMENT DU MAÏS

L'influence des traitements sur les paramètres de rendement à savoir la longueur, le diamètre du fruit et la masse de l'épi est hautement significative. Les paramètres de rendement des parcelles fertilisées sont plus élevés que ceux du témoin. L'action de traitement F+Ti+NPK a été le plus favorable sur la longueur, le diamètre du fruit et la masse de l'épi par rapport aux autres traitements. Ces résultats suggèrent que l'effet positif des différents fertilisants est au moins en partie dû à sa teneur en azote, car il existe chez le maïs une relation linéaire entre la biomasse produite et la quantité d'azote appliquée au sol [23].

La combinaison de la fumure organique (fiente de volaille et *Tithonia diversifolia*) et de la fumure minérale (NPK) contribue à la grande disponibilité d'éléments minéraux et à l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol. Ces résultats corroborent ceux de [24] au Cameroun, qui ont montré que la combinaison des biomasses de *Tithonia diversifolia* aux engrais inorganiques améliorait la fertilité du sol et la production. De plus, l'apport des fientes de volailles additionné aux engrais minéraux augmente fortement la disponibilité des éléments nutritifs et favorise une accumulation d'eau [25]. [26] ont également montré que l'association fumure minérale et fumure organique permettait une augmentation des rendements de plantes. Ainsi, l'apport combiné des fientes de volailles et des engrais minéraux permet de réduire les pertes d'éléments nutritifs et d'augmenter l'efficacité des engrais azotés [27]. De façon générale, les rendements des plants fertilisés avec F+Ti+NPK sont plus élevés que ceux des traitements du NPK, du compost ainsi que les plants témoins. L'azote est le principal facteur de croissance et de rendement des cultures parmi les principaux éléments minéraux chez la plante [28]. [29] soutient que l'azote étant un facteur limitant pour les rendements, une bonne nutrition azotée s'exprime par un

rendement spectaculaire; c'est pourquoi, l'azote est considéré comme le pivot de la fertilisation. C'est la raison principale des rendements élevés des plants traités avec *Tithonia diversifolia* du fait de sa forte production en azote dans cette étude. Cela pourrait s'expliquer par le fait que, non seulement la biomasse végétale de *Tithonia diversifolia* est d'une concentration élevée en azote (3,55 %), en phosphore (0,40 %), en potassium (4,34 %), en calcium (2,81 %) et en magnésium (0,46 %), mais aussi d'une décomposition rapide dans le sol, selon [30] et [31].

4 CONCLUSION

L'objectif de la présente étude était d'évaluer l'amendement organique sur la culture du maïs. L'étude a montré que l'amendement organominérale F+Ti+NPK améliore significativement la croissance ainsi que le rendement du maïs. La combinaison de biomasse de *Tithonia diversifolia*, de la fiente de volaille et le NPK offrent des potentialités agricoles. Son utilisation comme fertilisant organo-minéral sur les sols s'avère une solution alternative à l'usage unique des engrais minéral. L'effet de la combinaison *Tithonia diversifolia* et fiente de volaille n'est pas à négliger, car les résultats obtenus ont été sensiblement identiques à ceux du NPK. Cette étude confirme que l'association des engrais minéraux avec la matière organique peut être considérée comme une alternative profitable aux paysans, afin de réduire le coût et la quantité des engrais chimiques ainsi que leur impact négatif sur l'environnement.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas intérêts concurrents.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

SALLA Moreto et COULIBALY Assita ont effectué les collectes de données; RB a analysé les données; SALLA Moreto, SORO Kouhana, COULIBALY Assita ont rédigé, lu et corrigé le manuscrit; TRAORÉ-OUATTARA Karidia a supervisé le travail; tous les auteurs ont lu et approuvé la version finale manuscrit. GNAMIEN Yah Gwladys a apporté son expertise en analyse statistique.

REMERCIEMENTS

Aux autorités institutionnelles de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, ainsi qu'aux autorités communale et préfectorale de la ville de Daloa, pour avoir permis et surtout facilités les démarches administratives pour la réalisation du présent travail.

REFERENCES

- [1] Coulibaly M., Kaboré G., Nikiéma A., Hien F. & Sawadogo D. Utilisation du Volta phosphate, Rapport du colloque national. Ministère du développement rural du Burkina, 58 p., 1983.
- [2] Smaling E.M.A. Appauvrissement du sol en nutriments de l'Afrique sub-saharienne. In: Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique Sub-saharienne. Van Reuler H. & Prins W.H, Leidschendam (Pays -Bas), 59-76., 1993.
- [3] Cissé I. Utilisation des pesticides dans le système de production horticole dans la zone des Niayes: les produits et leur impact sur la nappe phréatique. Thèse de doctorat de troisième cycle, Université Cheikh-Anta-Diop de Dakar, Sénégal, 187 p., 2000.
- [4] Crichton L., Shrama A., Hewett S. & Ortega L.B. Recycling Achievements in Euope. Report of Resource Recovery Forum, North Yorkshire, 44 p., 2000.
- [5] Jama B., Palm C.A., Buresh R.J., Niang A.I., Gachengo C. & Nziguheba G. *Tithonia* as green manure for soil fertility improvement in Western Kenya: A Review. *Agroforestry Systems*, 49: 201-221., 2000.
- [6] Salla M, Abobi A.H.D., Coulibaly S., Traoré K., Traoré M.M. Effets de biofertilisants à base de *Tithonia diversifolia* et de *Thevetia neriifolia* sur la production de la laitue à Daloa. Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. 10 (3): 336-340., 2022.
- [7] Achieng J.O., Ouma G., Odhiambo G. & Muyekho F. Effect of *Tithonia diversifolia* (hemsley) and inorganic fertilizers on maize yield on alfisols and ultisols of western Kenya, *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1 (5): 740-747., 2010.
- [8] Biekre A.H.T., Tra B., Denezon T. & Dogbo O. Caractéristiques physicochimiques des composts à base de sous-produits de ferme de Songon en Côte d'Ivoire. *International Journal Biology Chemistry Science*, 12 (1): 596-609., 2018.
- [9] Bertrand, R. & Gigou J. La fertilité des sols tropicaux. *Larose*, Edition Maisonneuve, Paris (France), 397 p., 2002.
- [10] INS Recensement Général de la Population et de l'Habitat. Rapport d'exécution et présentation des principaux résultats. 49 p., 2020.
- [11] Bambara C.A. Effets des fientes de volaille sur les propriétés chimiques du sol et le rendement paddy du riz pluvial strict en zone sud soudanienne du Burkina Faso. Mémoire de Master en Agronomie, UFR Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 54 p., 2017.

- [12] Ngoy G.Y., Yalombe Y.Y., Tshibamba M.J., Odia N.J. & Mukanya K.B.M. Évaluation de l'effet combiné du chaulage et du *Tithonia diversifolia* dans la mobilisation du phosphore sur la culture du niébé dans les conditions edapho-climatiques en RDC. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 3: 5345-5353., 2018.
- [13] Tshibingu R. M., Tshilumba T. M., Mpoyi B. M., Ntatangolo B., Kabongo M. D., Tshibingu M. I., Kazadi N. J., Ngoyi N. D. & Munyuli M.T. Évaluation de la productivité du maïs (*Zea mays* L.) sous amendements organique et minéral dans la province de Lomami, République Démocratique du Congo, *Journal of Applied Biosciences*, 109: 10571-10579., 2017.
- [14] Paliwal R.L. Introduction au maïs et son importance. In: *Le maïs en zone tropical: amélioration et production*. FAO, Rome (Italie): 1-3., 2002.
- [15] Makosso. S. Utilisation combinée de *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray et d'engrais NPK pour améliorer la production de *Solanum melongena* L. dans la zone maraichère de Brazzaville. *Annales de l'Université Marien Ngouabi*, 11 (4): 52-58., 2010.
- [16] Nyembo K. L., Useni S.Y., Mpundu M. M., Bugeme M. D., Kasongo L. Emery. & Baboy L. L. Effets des apports des doses variées de fertilisants inorganiques (NPKS et Urée) sur le rendement et la rentabilité économique de nouvelles variétés de *Zea mays* L. à Lubumbashi, Sud-Est de la RD Congo, *Journal of Applied Biosciences*, 59: 4286-4296., 2012.
- [17] Vanlauwe B., Diels J., Aihou K., Iwuafor E.N.O., Lyasse O., Sangina N. & Merckx R. Direct interactions between N fertilizer and organic matter: evidence from trials with 15 N-labelled fertilizer. In: *Integrated plant nutrient management in sub-Saharan Africa: from concept to practice* (Eds Vanlauwe B, Diels J, Sangina N and Merckx). Wallingford, Royaume-Uni: 173-184., 2002.
- [18] Bationo A., Kimetu J., Ikera S., Kimani S., Mugenda D., Odendo M., Silver M., Swift M.J. & Sanginda N. The Africa Net Work for soil biology and fertility: New challenge and opportunities. In: *Managing of nutriment cycles to sustain soil fertility in sub-saharan Africa*. Academy Science Publishers and Tropical Soil Biology and Fertility Institute of CIAT. Bationo A, Nairobi: 1-23., 2004.
- [19] Somda B.B., Ouattara B., Serme I., Pouya M.B., Lompo F., Taonda J.B. & Sedogo P.M. Détermination des doses optimales de fumures organo-minérales en microdose dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *International Journal Biological And Chemical Sciences*, 11: 670-683., 2017.
- [20] Brasset T. & Couturier C. Gestion et valorisation des cendres de chaufferies bois: Epandage en forêt. *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*, 7 p., 2005.
- [21] Giller K.E., Cadisch G., Palm C. The North-South divide: Organic or resources of nutrient management. *Agronomy*, 22: 703-709., 2002.
- [22] Mukalay M. J., Shutcha M.N., Tshomba K.J., Mulowayi K., Kamb C. F. & Ngongo L.M. Causes d'une forte hétérogénéité des plants dans un champ de maïs dans les conditions pédoclimatiques de Lubumbashi. *Presses universitaires de Lubumbashi, Annales Faculté des Sciences Agronomiques*, 1 (2): 4-11., 2008.
- [23] Walburg G., Bauer M.E., Daughtry C. S. T. & Housley T. L. Effects of Nitrogen Nutrition on the Growth, Yield and Reflectance Characteristics of Corn Canopies. *American Society of Agricultural*, 74: 677-683., 1982.
- [24] Kaho F., Yemefack M., Feujio-Teguefouet P. & Tchantchaoung J.C. Effet combiné des feuilles de *Tithonia diversifolia* et des engrais inorganiques sur les rendements du maïs et les propriétés d'un sol ferrallitique au Centre Cameroun. *Tropicultura*, 29: 39-45., 2011.
- [25] Gomgnimbou, A. P. K., Bandaogo, A. A., Coulibaly, K., Sanon, A., Ouattara, S., et Nacro H. B. Effets à court terme de l'application des fientes de volaille sur le rendement du maïs *Zea mays* L. et les caractéristiques chimiques d'un sol ferrallitique dans la zone sud-soudanienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 13 (4): 2041-2052., 2019.
- [26] Zeinabou H, Mahamane S., Nacro H.B., Bado B.V. & Lompo F., Bationo A. Effet de la combinaison des fumures organominérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil au sahel. *International Journal Biological And Chemical Sciences*, 8: 1620-1632., 2014.
- [27] Jan M. F. Impact of Integrated Potassium Management on Plant Growth, Dry Matter Partitioning and Yield of Different Maize (*Zea Mays* L.) Hybrids. *Pure and Applied Biology*, 7 (4): 2042-2048., 1918.
- [28] FAO. Les engrais et leur application. FAO, Rome, Italie, 51 p., 1980.
- [29] Betrand R. & Gigou J. La fertilité des sols tropicaux. Larose, Edition Maisonneuve, Paris (France), 397 p., 2002.
- [30] Little T.M. & Hills F.J. Agricultural Experimentation. *Design and Analysis*, New York (Etats-Unis), 350 p., 1978.
- [31] Niang C., Gachengo C.C., Nziguheba G. & Amadalo B. *Tithonia diversifolia* as a green manure for soil fertility improvement in Western Kenya. *Agroforestry Systems*, 49: 201-221., 2000.

Influence du gap optique et de l'affinité électronique du ZnSe sur les performances des cellules solaires CIGS

[Influence of the optical bandgap and the electron affinity of ZnSe on the performance of CIGS solar cells]

Youssou Gning¹, Alioune Ngom¹, Moussa Toure¹, Mouhamadou Sam¹, Emmanuel Namena², and Mamadou Lamine Samb¹

¹Département de Physique et Chimie, Université de Thiès, Senegal

²Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT), Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST) 03 BP 7047 Ouagadougou 03, Ouagadougou, Burkina Faso

Copyright © 2026 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 focuses on optimizing the influence of a zinc selenide (ZnSe) buffer layer on the performance of a CIGS thin-film solar cell, with the aim of proposing an alternative to CdS, a commonly used material that contains toxic cadmium. The choice of ZnSe is motivated by its advantageous optoelectronic properties, including a direct optical band gap of about 2.7 eV, high transparency in the visible and near-infrared ranges, an absorption coefficient on the order of 10^4 cm^{-1} and an electron affinity close to 4.1 eV. In addition, ZnSe can crystallize in zinc-blende or wurtzite phases, with possible structural transitions that may promote a type-II band alignment suitable for the ZnSe/CIGS interface.

The main objective of this work is to analyze the effect of the optical band gap and the electron affinity of ZnSe on the key photovoltaic parameters of the cell, namely the short-circuit current density, the open-circuit voltage, the fill factor, and the conversion efficiency. The study is carried out through numerical simulation by solving the fundamental carrier transport equations.

The results show that the optical band gap of ZnSe has a limited impact on the overall performance, with an optimal efficiency of about 23.16% for values between 2.3 and 2.6 eV. In contrast, the electron affinity appears to be a critical parameter: a range between 4.0 and 4.6 eV promotes optimal band alignment and enables good photovoltaic performance, with efficiencies ranging from 19.38% to 24.93%. These findings confirm the potential of ZnSe as an alternative cadmium-free buffer layer to CdS, opening promising prospects for the development of more environmentally and health-friendly CIGS solar cells.

KEYWORDS: CIGS solar cells, Cadmium-free buffer layer, Band alignment, Numerical simulation, Photovoltaic performance, II–VI materials.

RESUME: Cette étude porte sur l'optimisation de l'influence d'une couche tampon en séléniure de zinc (ZnSe) sur les performances d'une cellule solaire à couches minces CIGS, dans le but de proposer une alternative au CdS, matériau couramment utilisé mais contenant du cadmium toxique. Le choix du ZnSe est motivé par ses propriétés optoélectroniques avantageuses, notamment un gap optique direct d'environ 2,7 eV, une forte transparence dans le domaine du visible et du proche infrarouge, un coefficient d'absorption de l'ordre de 10^4 cm^{-1} et une affinité électronique voisine de 4,1 eV. Par ailleurs, le ZnSe peut cristalliser sous les phases zinc-blende ou wurtzite, avec des transitions structurales susceptibles de favoriser un alignement de bandes de type II approprié à l'interface ZnSe/CIGS.

L'objectif principal de ce travail est d'analyser l'effet du gap optique et de l'affinité électronique du ZnSe sur les paramètres photovoltaïques clés de la cellule, à savoir la densité de courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion. L'étude est menée par simulation numérique en résolvant les équations fondamentales du transport des porteurs.

Les résultats obtenus montrent que le gap optique du ZnSe influence faiblement les performances globales, avec un rendement optimal d'environ 23,16 % pour des valeurs comprises entre 2,3 et 2,6 eV. En revanche, l'affinité électronique apparaît comme un paramètre déterminant: une plage comprise entre 4,0 et 4,6 eV favorise un alignement optimal des bandes et permet d'atteindre de bonnes

performances photovoltaïques, avec des rendements compris entre 19,38 % et 24,93 %. Ces résultats confirment le potentiel du ZnSe comme couche tampon alternative au CdS, ouvrant des perspectives intéressantes pour le développement de cellules CIGS plus respectueuses de l'environnement et de la santé humaine.

MOTS-CLEFS: Cellules solaires CIGS, Couche tampon sans cadmium, Alignement de bandes, Simulation numérique, Performances photovoltaïques, Matériaux II–VI.

1 INTRODUCTION

Le sélénure de zinc (ZnSe) est un semi-conducteur II–VI présentant un gap optique direct d'environ 2,7 eV, un coefficient d'absorption de l'ordre de 10^4 cm^{-1} et une affinité électronique proche de 4,1 eV [1] – [3]. Il est transparent sur une large plage spectrale allant du visible à l'infrarouge, et peut cristalliser sous les phases zinc-blende ou wurtzite, avec des transitions de phase dépendant des conditions d'élaboration [4] – [6]. Ces propriétés optoélectroniques et structurales sont favorables à un alignement de bandes compatible avec le CIGS, permettant la formation d'une interface ZnSe/CIGS appropriée [7], [8].

Dans les cellules solaires à couches minces CIGS, la couche tampon la plus utilisée reste le CdS. Toutefois, la toxicité du cadmium motive le développement de couches tampons alternatives sans Cd, parmi lesquelles le ZnSe constitue un candidat prometteur en raison de sa non-toxicité et de sa transparence élevée [9]. L'étude du ZnSe comme couche tampon apparaît ainsi comme une piste pertinente pour l'optimisation des cellules CIGS.

L'objectif de ce travail est d'analyser l'influence du gap optique (E_g) et de l'affinité électronique (χ) du ZnSe sur les performances photovoltaïques d'une cellule CIGS, à travers les paramètres clés que sont la densité de courant de court-circuit (J_{CC}), la tension de circuit ouvert (V_{CO}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η). L'étude est menée par simulation numérique à l'aide du logiciel ATLAS–SILVACO, basé sur la résolution des équations de Poisson, de continuité et de transport des porteurs [9], [10].

L'article est organisé comme suit: une présentation de la théorie de l'alignement des bandes, suivie du modèle et des paramètres utilisés, de la méthodologie de simulation, puis des résultats et de leur discussion.

2 THÉORIE DE L'ALIGNEMENT DE BANDES DE TYPE II

L'alignement des bandes d'énergie entre deux semi-conducteurs décrit la manière dont le sommet de la bande de valence et le fond de la bande de conduction se positionnent lorsque ces matériaux sont mis en contact. Cette notion est essentielle pour comprendre les mécanismes de transfert et de séparation des porteurs de charge à l'interface, en particulier dans les hétérojonctions utilisées en photovoltaïque.

Afin d'analyser cet alignement, un niveau de référence commun, appelé niveau du vide, est généralement adopté pour l'ensemble des matériaux considérés. Dans ce cadre, l'énergie nécessaire pour extraire un électron depuis le niveau de Fermi d'un matériau et l'amener au niveau du vide définit le potentiel de sortie (Φ), également appelé potentiel électrochimique. Cette grandeur dépend de la nature du matériau, de son orientation cristalline et de la densité des porteurs. Toutefois, dans le cas des semi-conducteurs, l'accès direct aux états du niveau de Fermi étant limité, l'utilisation du potentiel de sortie devient peu pratique.

C'est pour cette raison qu'une autre grandeur, l'affinité électronique (χ), est introduite. Elle correspond à l'énergie requise pour promouvoir un électron depuis le minimum de la bande de conduction jusqu'au niveau du vide. Les principaux paramètres énergétiques intervenant dans la description de l'alignement des bandes: à savoir l'énergie du vide E_{vide} , les énergies des bandes de conduction E_C et de valence E_V , le potentiel de sortie Φ , l'affinité électronique χ et le gap énergétique E_g , sont schématiquement présentés à la figure 1 [11].

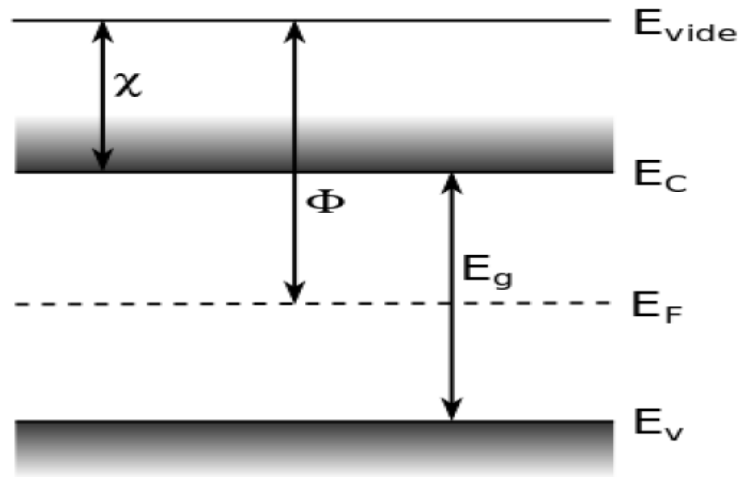


Fig. 1. Paramètres caractéristiques de l'alignement des bandes d'énergie

E_{vide} : Energie du vide (eV).

E_C : Energie du niveau d'énergie de la bande de conduction (eV).

E_V : Energie du niveau d'énergie de la bande de valence (eV).

Φ : potentiel de sortie ou potentiel électrochimique (eV).

χ : affinité électronique (eV).

Dans le cas d'un alignement de bandes de type II, le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction appartiennent à deux semi-conducteurs différents. Ce type de configuration conduit à une hétérojonction dite *staggered*, dans laquelle les électrons et les trous sont spatialement séparés et localisés dans des matériaux distincts. Cette situation favorise la dissociation des paires électron-trou, mais peut également influencer les mécanismes de recombinaison aux interfaces. Un schéma illustrant ce type d'alignement entre deux semi-conducteurs A et B est présenté à la figure 2 [11].

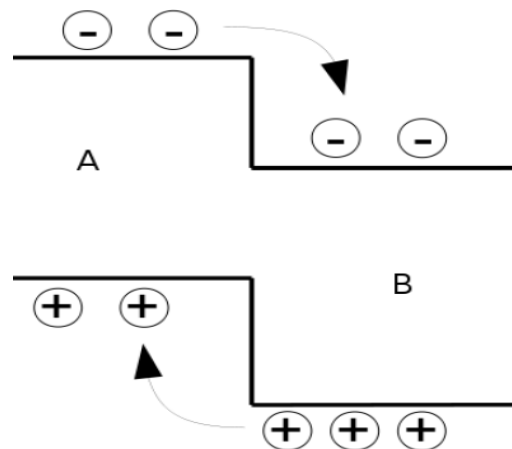


Fig. 2. Alignement des bandes de type II entre deux semi-conducteurs A et B

Plusieurs travaux rapportent que l'interface ZnSe/CIGS présente un alignement de bandes de type II. Cette configuration est notamment attribuée aux variations de phase cristalline du ZnSe, pouvant passer des structures zinc-blende à wurtzite, ce qui modifie sensiblement ses paramètres électroniques et, en particulier, son affinité électronique [11], [12]. La détermination expérimentale précise de l'alignement des bandes à une interface semi-conductrice demeure toutefois complexe. Elle repose généralement sur des techniques spectroscopiques avancées telles que la spectroscopie de photoélectrons X (XPS), la spectroscopie des niveaux profonds (DLTS) ou encore les mesures d'admittance [13].

Le diagramme des bandes d'énergie correspondant à l'interface ZnSe/CIGS, illustrant cet alignement de type II, est présenté à la figure 3 [8].

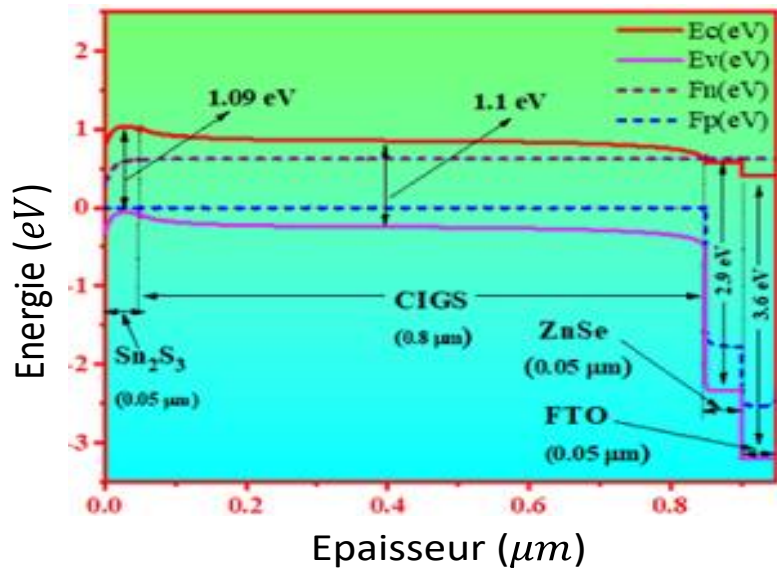


Fig. 3. Diagramme des bandes d'énergie à l'interface ZnSe/CIGS

L'analyse théorique de l'alignement des bandes met ainsi en évidence que la qualité électronique de l'interface ZnSe/CIGS dépend fortement des valeurs du gap optique et de l'affinité électronique des matériaux constitutifs. Ces paramètres conditionnent directement le décalage des bandes de conduction et de valence, influençant les phénomènes de transport et de recombinaison des porteurs, et, par conséquent, les performances photovoltaïques globales de la cellule. Ces considérations justifient pleinement le choix et l'intérêt de l'étude paramétrique menée dans ce travail [11].

3 MODÈLE ET PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES

3.1 CIRCUIT ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT

Le fonctionnement de la cellule étudiée repose sur une jonction p-n classique, dans laquelle l'absorbeur CIGS est de type p, tandis que la couche tampon ZnSe est de type n. Afin de décrire de manière réaliste le comportement électrique de cette cellule sous illumination, un modèle électrique à deux diodes est adopté. Ce modèle permet de prendre en compte simultanément les mécanismes de diffusion, de recombinaison et de fuite associés aux défauts et aux joints de grains.

Le circuit électrique équivalent correspondant à ce modèle est présenté à la figure 4 [14], [15].

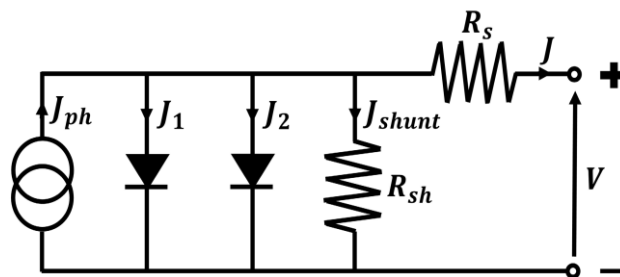


Fig. 4. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire CIGS

Dans ce schéma:

- J_{ph} : représente la densité de photocourant générée par l'absorption du rayonnement incident;
- J_1 : correspond à la densité de courant de diffusion des porteurs majoritaires;
- J_2 : désigne la densité de courant liée aux mécanismes de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace;
- J_{sh} : est la densité de courant de fuite associée principalement aux joints de grains et aux défauts structuraux;
- R_s : est la résistance série, traduisant les pertes ohmiques au niveau des contacts et des interfaces;
- R_{sh} : est la résistance shunt (ou parallèle), modélisant les courants de fuite susceptibles de court-circuiter localement la jonction;
- J : représente la densité de courant totale délivrée par la cellule sous illumination.

Sous éclairage, la densité de courant fournie par la cellule est alors exprimée par la relation suivante:

$$J = J_{ph} - J_{o1} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_S J)}{n_1 K T} \right] - 1 \right\} - J_{o2} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_S J)}{n_2 K T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_S J}{R_{Sh}} \quad (1)$$

où J_{ph} est la densité de photocourant ($A \cdot cm^{-2}$), J_{o1} et J_{o2} les densités de courant de saturation des deux diodes ($A \cdot cm^{-2}$), R_S et R_{Sh} les résistances série et shunt ($\Omega \cdot cm^2$), n_1 et n_2 les facteurs d'idéalité, q la charge élémentaire (C), k la constante de Boltzmann ($J \cdot K^{-1}$), T la température absolue (K), V la tension aux bornes de la cellule et J la densité de courant délivrée [14], [15].

3.2 PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES CARACTÉRISTIQUES

3.2.1 DENSITÉ DE COURANT DE COURT-CIRCUIT (J_{CC})

La densité de courant de court-circuit correspond à la densité de courant fournie par la cellule lorsque la tension appliquée est nulle ($V = 0$). Elle résulte principalement du transport des porteurs minoritaires générés par l'absorption des photons incidents. Elle peut être exprimée par la relation suivante:

$$J_{CC} = q \int_0^{\lambda_g} I_0(\lambda) \frac{hc}{\lambda} EQE(\lambda) d\lambda \approx q \int_0^{\lambda_g} I_0(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda \text{ si } EQE \cong 1 \quad (2)$$

où J_{SC} est la densité de courant de court-circuit ($A \cdot m^{-2}$), λ_g la longueur d'onde correspondant à l'énergie du gap optique (m), λ la longueur d'onde du rayonnement incident (m), h la constante de Planck (J·s), c la vitesse de la lumière dans le vide ($m \cdot s^{-1}$), EQE le rendement quantique externe et q la charge élémentaire [16] – [18].

3.2.2 TENSION DE CIRCUIT OUVERT (V_{CO})

La tension de circuit ouvert est la tension maximale aux bornes de la cellule lorsque la densité de courant délivrée est nulle ($J = 0$). Elle dépend essentiellement du rapport entre la densité de courant de court-circuit et la densité de courant de saturation, et s'exprime par:

$$V_{CO} = \frac{nKT}{q} \cdot \ln \left(\frac{J_{CC}}{J_0} + 1 \right) \quad (3)$$

où V_{OC} est la tension de circuit ouvert (V), n le facteur d'idéalité, k la constante de Boltzmann, T la température absolue, q la charge élémentaire, J_{SC} la densité de courant de court-circuit ($A \cdot cm^{-2}$) et J_0 la densité de courant de saturation ($A \cdot cm^{-2}$) [18], [19].

3.2.3 FACTEUR DE FORME (FF)

Le facteur de forme, également appelé facteur de remplissage, traduit la qualité électrique de la cellule et correspond au rapport entre la puissance maximale réellement délivrée et la puissance maximale idéale. Il est défini par:

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{SC} \times V_{OC}} \quad (4)$$

où FF est le facteur de forme (%), J_m la densité de courant au point de puissance maximale ($A \cdot cm^{-2}$), V_m la tension correspondante (V), J_{CC} la densité de courant de court-circuit et V_{CO} la tension de circuit ouvert [19], [20].

3.2.4 RENDEMENT DE CONVERSION (η)

Le rendement de conversion énergétique permet d'évaluer l'efficacité globale de la cellule solaire. Il correspond au rapport entre la puissance électrique maximale extraite et la puissance lumineuse incidente, et s'exprime par:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_{CC} V_{OC}}{P_{in}} \cdot FF \quad (5)$$

Où P_m est la puissance maximale délivrée (W), P_{in} la puissance incidente (W), FF le facteur de forme (%) et η le rendement de conversion (%) [19], [20].

4 MATÉRIAUX ET MÉTHODE

4.1 MATÉRIAUX

La cellule solaire étudiée est constituée d'un empilement multicouche comprenant un substrat en verre sodo-calcique (SLG), une couche de molybdène (Mo), une couche absorbante de sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS), une couche tampon de sélénure de zinc (ZnSe), une couche fenêtre d'oxyde de zinc (ZnO) et des contacts métalliques en aluminium [8], [21].

4.2 STRUCTURE DE LA CELLULE

Dans le cadre de cette étude, une cellule CIGS de type substrate est considérée. Sa structure complète est de la forme:

SLG/Mo/CIGS/ZnSe/ZnO/Al

Où:

- Le **SLG** joue le rôle de substrat et de support mécanique;
- Le **Mo** constitue le contact arrière et assure la fonction d'anode;
- Le **CIGS** est la couche absorbante principale et forme la base de la jonction p-n;
- Le **znse** agit couche tampon et joue le rôle d'émetteur;
- Le **zno** sert de couche fenêtre et constitue la face avant de la cellule;
- L'**Al** est utilisé contact avant et joue le rôle de cathode.

Le schéma correspondant à cette architecture est représenté à la figure 5.

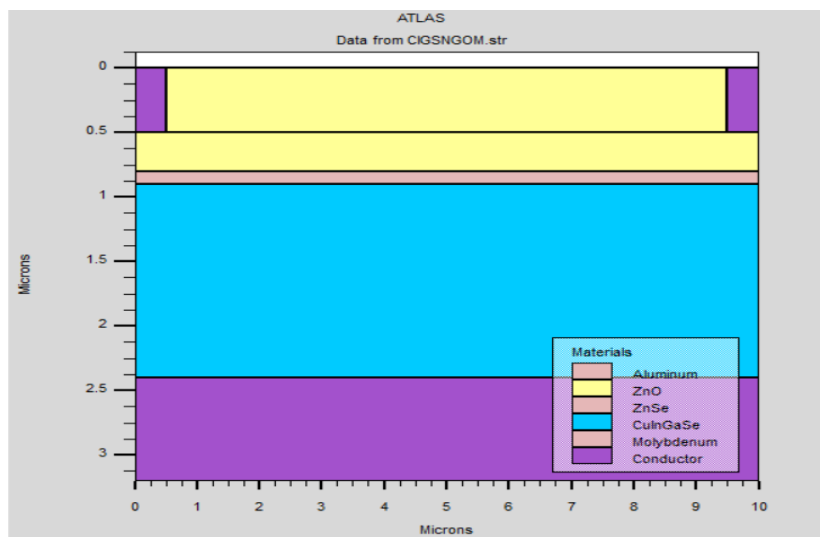


Fig. 5. Schéma de la structure de la cellule simulée

4.3 MÉTHODE

La présente étude est menée par simulation numérique, afin d'analyser l'influence du gap optique (E_g) et de l'affinité électronique (χ) de la couche tampon ZnSe sur les paramètres photovoltaïques caractéristiques de la cellule CIGS, à savoir la densité de courant de court-circuit (J_{CC}), la tension de circuit ouvert (V_{CO}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η).

Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel ATLAS-SILVACO, dont le principe repose sur la résolution auto-cohérente des équations fondamentales du transport des porteurs dans les semi-conducteurs, incluant l'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport par dérive-diffusion [18], [20]. Les mécanismes de recombinaison volumique sont décrits par le modèle de Shockley-Read-Hall (SRH), tandis que les défauts sont représentés par une distribution gaussienne en énergie, conformément aux approches généralement adoptées pour la modélisation des cellules CIGS.

4.3.1 EQUATION DE POISSON

L'équation de Poisson relie le potentiel électrostatique à la densité volumique de charge d'espace au sein du dispositif. Elle s'écrit sous la forme:

$$\Delta V + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (6)$$

Où V est le potentiel électrique, $\rho = q(p - n - N_A + N_D)$ la densité volumique de charge d'espace ($C. cm^{-3}$), ε la permittivité diélectrique relative et q la charge électrique élémentaire [22], [23].

4.3.2 EQUATIONS DE CONTINUITÉ

Les équations de continuité décrivent l'évolution temporelle des concentrations des porteurs en fonction des densités de courant ainsi que des taux de génération et de recombinaison. Elles sont données par:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = + \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (8)$$

Où n et p représentent respectivement les concentrations des électrons et des trous, $\vec{J}_n$ et $\vec{J}_p$ les densités de courant électronique et trou, G_n et G_p les taux de génération, R_n et R_p les taux de recombinaison et q est la charge électrique élémentaire [22], [23].

En régime stationnaire, les dérivées temporelles s'annulent ($\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$) s'annulent et les équations de continuité se réduisent alors à:

$$0 = + \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (9)$$

$$0 = - \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (10)$$

4.3.3 EQUATIONS DE TRANSPORT

Le transport des porteurs est décrit par le modèle de dérive-diffusion. Les densités de courant électronique et trou sont exprimées respectivement par:

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \nabla n \quad (11)$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} + qD_p \nabla p \quad (12)$$

Où μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous, D_n et D_p leurs coefficients de diffusion respectifs, $\vec{E}$ le champ électrique interne au dispositif [22].

4.3.4 RECOMBINAISON VOLUMIQUE (SRH)

Le taux de recombinaison volumique associé à un niveau de piège i , selon le modèle de Shockley–Read–Hall, est donné par:

$$R_{SRH,i} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n(p + n_i \exp^{\frac{E_i - E_t}{kT}}) + \tau_p(n + n_i \exp^{\frac{E_t - E_i}{kT}})} \quad (13)$$

Où E_i est le niveau d'énergie de Fermi, E_t est le niveau énergétique du piège, n_i la concentration intrinsèque, n et p la concentration des électrons et des trous, k la constante de Boltzmann, T la température absolue, $\tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_t}$ et $\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_t}$ sont les durées de vie respectives des électrons et des trous, σ_n et σ_p sont les sections efficaces de capture, v_{th} la vitesse thermique et N_t la densité de piège [24], [25].

4.3.5 RECOMBINAISON SURFACIQUE

La recombinaison induite par les défauts présents aux interfaces, aux surfaces et aux contacts est également modélisée par une expression de type SRH. Le taux de recombinaison surfacique s'écrit:

$$R_{\text{surf}} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p^{\text{eff}}(n + n_i \exp \frac{E_i - E_t}{KT}) + \tau_n^{\text{eff}}(p + n_i \exp \frac{E_t - E_i}{KT})} \quad (14)$$

Les durées de vie effectives des électrons et des trous sont définies par:

$$\frac{1}{\tau_n^{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_n^i} + \frac{d_i}{A_i} S_n \quad (15)$$

$$\frac{1}{\tau_p^{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_p^i} + \frac{d_i}{A_i} S_p \quad (16)$$

où τ_n^i et τ_p^i sont les durées de vie volumique A_i l'épaisseur de l'interface et d_i sa longueur caractéristique, S_n et S_p les vitesses de recombinaison de surface des électrons et des trous [24], [25].

4.3.6 MODÈLE DE DÉFAUTS

La description des défauts électroniques dans les différentes couches de la cellule est réalisée à l'aide d'un modèle de distribution gaussienne en énergie, couramment utilisé pour représenter les états de défauts localisés dans les semi-conducteurs désordonnés et polycristallins tels que le CIGS. Ce modèle permet de tenir compte à la fois de la densité, de la largeur énergétique et de la position des niveaux de défauts dans le gap.

Les distributions gaussiennes des défauts accepteurs et donneurs sont définies respectivement par les relations suivantes:

$$g_{GA}(E) = N_{GA} \exp \left[- \left(\frac{E_{GA} - E}{W_{GA}} \right)^2 \right] \quad (17)$$

$$g_{GD}(E) = N_{GD} \exp \left[- \left(\frac{E - E_{GD}}{W_{GD}} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Où $g_{GA}(E)$ et $g_{GD}(E)$ représentent respectivement les distributions gaussiennes en énergie des défauts accepteurs et donneurs, N_{GA} et N_{GD} les densités effectives correspondantes, W_{GA} et W_{GD} les largeurs énergétiques (écarts-types) des distributions, E_{GA} et E_{GD} les énergies des pics des défauts et E l'énergie considérée. Ce formalisme est conforme aux modèles implémentés dans ATLAS et largement rapportés dans la littérature [24], [25].

4.4 PARAMÈTRES DE SIMULATION

Les simulations numériques sont réalisées à partir de paramètres physiques représentatifs des matériaux constituant la cellule ainsi que des défauts associés. Ces paramètres, extraits de travaux antérieurs et validés expérimentalement ou numériquement, sont synthétisés dans les tableaux 1 et 2, respectivement pour les propriétés des matériaux et celles des défauts. Les valeurs utilisées sont principalement issues des références [3], [8] et [19].

Tableau 1. Propriétés des matériaux

Matériaux	CIGS	ZnO	ZnSe
Gap optique E_g à 300(eV)	1.32	3.3	2.3 – 3.0
Épaisseur $d(\mu\text{m})$	1.5	0.8	0.1
Affinité électronique χ (eV)	4.8	4.1	4.0 – 4.8
Permittivité diélectrique relative ϵ_r	13.6	9	10
Densité d'état effective des électrons $N_{c300}(\text{cm}^{-3})$	$2.2 \cdot 10^{18}$	$2.2 \cdot 10^{18}$	$2.2 \cdot 10^{18}$
Densité d'état effective des trous $N_{v300}(\text{cm}^{-3})$	$1.8 \cdot 10^{19}$	$1.8 \cdot 10^{19}$	$1.8 \cdot 10^{19}$
Mobilité des électrons $\mu_n(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	100	100	100
Mobilité des trous $\mu_p(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	25	25	25
Durée de vie des électrons $\tau_n(\text{s})$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Durée de vie des trous $\tau_p(\text{s})$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Concentration des accepteurs $N_A(\text{cm}^{-3})$	$6 \cdot 10^{16}$	-	-
Concentration des donneurs $N_D(\text{cm}^{-3})$	-	$1 \cdot 10^{18}$	$8 \cdot 10^{16}$

Les paramètres relatifs aux défauts électroniques, introduits sous forme de distributions gaussiennes dans chaque couche, sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Propriétés des défauts

Matériaux	CIGS	ZnO	ZnSe
Concentration de défauts gaussiens (cm^{-3})	$N_{DG} = 1.10^{14}$	$N_{DG} = 1.10^{15}$	$N_{AG} = 1.10^{15}$
Ecart standard W_{GA} et W_{GD} (eV)	0.1	0.1	0.1
Energie du pic E_{GA} et E_{GD} (eV)	0.6	1.65	1.35
Section droite de capture pour les électrons σ_n (cm^2)	1.10^{-17}	1.10^{-17}	1.10^{-17}
Section droite de capture pour les trous σ_p (cm^2)	1.10^{-15}	1.10^{-15}	1.10^{-15}

Dans le cadre de cette étude paramétrique, l'**affinité électronique du ZnSe** est volontairement variée dans l'intervalle **4,0–4,8 eV**, tandis que son **gap optique** est modifié entre **2,3 et 3,0 eV**, afin d'évaluer leur influence sur les performances photovoltaïques de la cellule. L'ensemble des autres paramètres est maintenu constant afin d'isoler l'effet propre de ces deux grandeurs. Les résultats issus de ces variations seront présentés, analysés et discutés dans la section suivante.

5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1 EFFET DU GAP OPTIQUE DE LA COUCHE TAMPON ZNSE

5.1.1 IMPACT SUR LA CARACTÉRISTIQUE COURANT TENSION (J – V)

La figure 6 présente les caractéristiques courant-tension (J-V) de la cellule CIGS pour différentes valeurs du gap optiques de la couches tampon ZnSe.

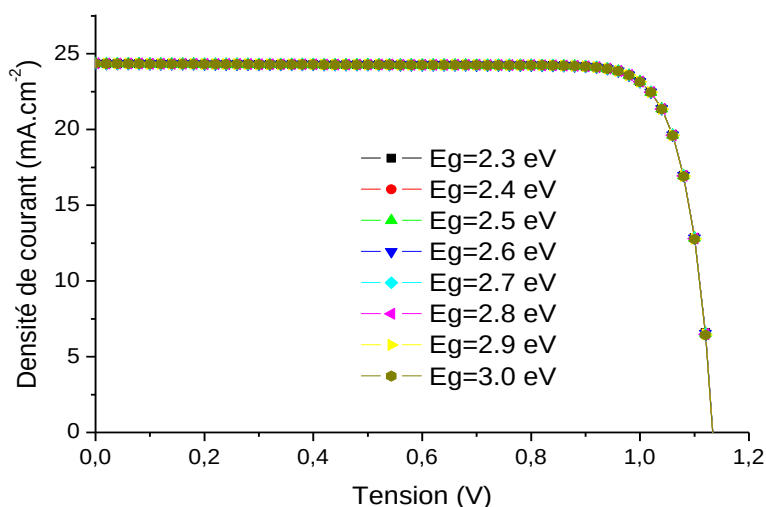


Fig. 6. Caractéristique J-V pour différentes valeurs du gap optique du ZnSe

Il ressort de la figure 6 que les courbes J-V associées aux différentes valeurs du gap optique du ZnSe sont pratiquement superposées. Elles interceptent l'axe des courants à une densité de courant de court-circuit d'environ **24,35 mA.cm⁻²** et l'axe des tensions à une tension de circuit ouvert voisine de **1,13 V**. Ces résultats indiquent que la variation du gap optique du ZnSe, dans l'intervalle considéré, n'affecte que faiblement la forme globale de la caractéristique J-V, suggérant un impact limité sur les paramètres électriques fondamentaux de la cellule. Afin d'approfondir cette observation, l'influence du gap optique sur J_{CC} et V_{CO} est analysée séparément dans les sous-sections suivantes.

5.1.2 INFLUENCE SUR LA DENSITÉ DE COURANT DE COURT-CIRCUIT

La variation de la densité de courant de court-circuit en fonction du gap optique de la couche tampon ZnSe est illustrée à la **figure 7**.

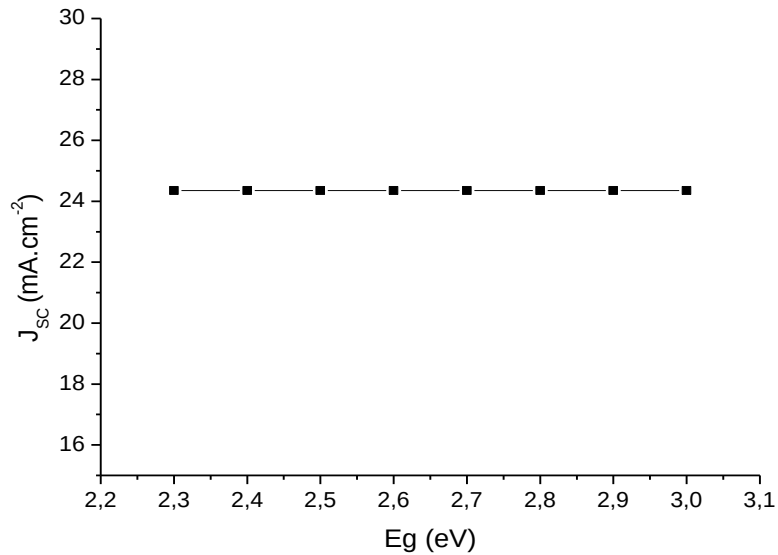


Fig. 7. Densité de courant de court circuit en fonction du gap optique du ZnSe

La figure 7 montre que J_{sc} demeure **constante et égale à $24,35 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$** lorsque le gap optique du ZnSe augmente de **2,3 à 3,0 eV**. Cette stabilité s'explique par le caractère largement transparent de la couche tampon ZnSe dans cette plage de gap, ce qui limite son influence sur l'absorption des photons dans la couche absorbante CIGS. De plus, un alignement favorable des bandes à l'interface ZnSe/CIGS permet de maintenir une collecte efficace des porteurs photogénérés, conduisant à une saturation du photocourant [11].

5.1.3 SUR LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT

Le profil de la tension de circuit ouvert en fonction du gap optique du ZnSe est présenté à la figure 8.

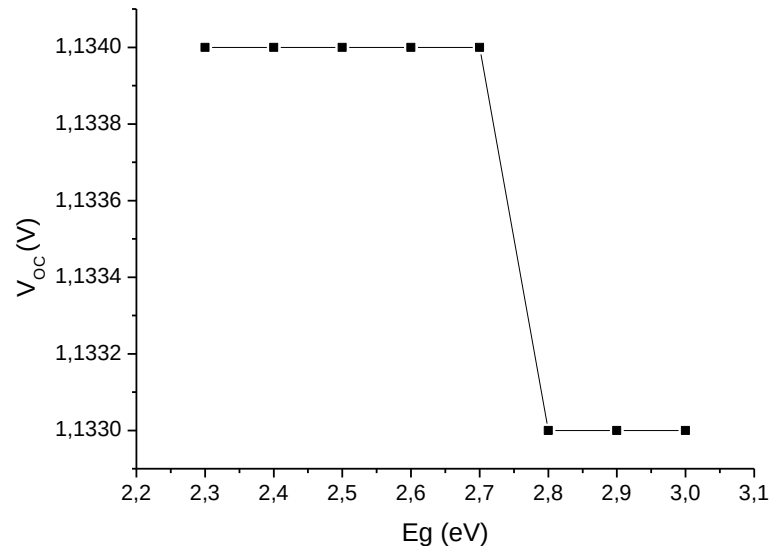


Fig. 8. Tension de circuit ouvert en fonction du gap optique du ZnSe

Comme l'indique la figure 8, la tension de circuit ouvert reste globalement quasi constante, avec une valeur moyenne d'environ 1,13 V lorsque le gap optique varie de 2,3 à 3,0 eV. Une très légère variation est toutefois observée autour de 2,7–2,8 eV, traduisant une faible modification de la densité de courant de saturation. Cette évolution marginale peut être attribuée à l'apparition ou à l'activation de défauts énergétiques à l'interface ou dans la couche tampon, susceptibles d'induire des pertes supplémentaires par recombinaison non radiative [3]. Néanmoins, l'amplitude de cette variation reste faible, confirmant le rôle secondaire du gap optique du ZnSe sur V_{co} dans la plage étudiée.

5.1.4 SUR LE FACTEUR DE FORME

La dépendance du facteur de forme en fonction du gap optique de la couche tampon ZnSe est représenté à la figure 9.

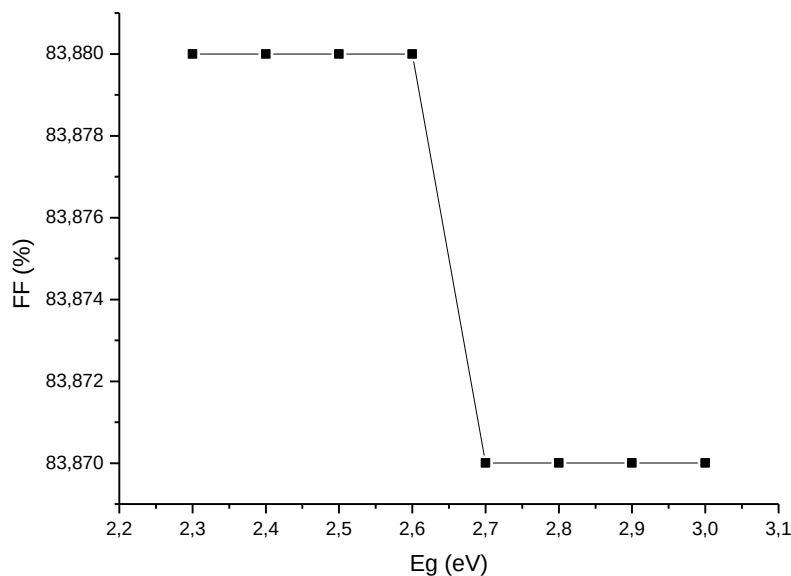


Fig. 9. Evolution du facteur de forme en fonction du gap optique de couche tampon ZnSe

Il apparaît que le facteur de forme demeure pratiquement constant sur l'ensemble de l'intervalle de gap considéré. Des valeurs proches de **83,9 %** sont obtenues lorsque le gap optique varie de **2,3 à 3,0 eV**, avec seulement une variation marginale inférieure à **0,1 %**. Cette stabilité du FF est cohérente avec la faible variation observée pour J_{sc} et V_{oc} , et reflète un alignement des bandes globalement optimal à l'interface ZnSe/CIGS, limitant les pertes résistives et recombinaisons [3], [20].

5.1.5 INFLUENCE SUR LE RENDEMENT DE CONVERSION (η)

Le profil du rendement de conversion en fonction du gap optique du ZnSe est présenté à la figure 10.

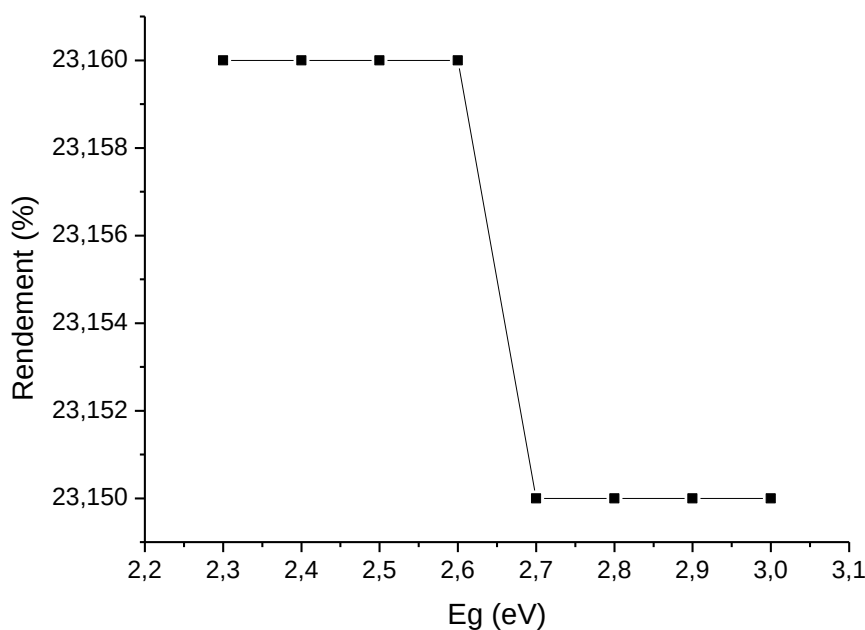


Fig. 10. Profil du rendement en fonction du gap optique du ZnSe

La figure 10 montre que le rendement de conversion reste **quasi constant**, avec des valeurs comprises entre **23,15 % et 23,26 %**, lorsque le gap optique du ZnSe varie de **2,3 à 3,0 eV**. Le rendement maximal, de l'ordre de **23,2–23,3 %**, est obtenu pour des valeurs de gap comprises entre **2,3 et 2,6 eV**. Cette performance élevée est cohérente avec la stabilité du facteur de forme et de la tension de circuit ouvert dans cette plage, et peut être attribuée à une absorption efficace dans la couche CIGS ainsi qu'à un transport et une collecte optimisés des porteurs.

La très légère dégradation du rendement observée lorsque le gap optique est élargi au-delà de **2,6–2,7 eV** peut être liée à une modification subtile de la qualité électronique de l'interface ZnSe/CIGS, susceptible d'accroître les pertes par recombinaison [8], [11].

5.1.6 SYNTHÈSE

Dans l'intervalle étudié, le **gap optique du ZnSe exerce une influence limitée** sur les performances photovoltaïques de la cellule CIGS. La densité de courant de court-circuit J_{sc} reste strictement constante, tandis que la tension de circuit ouvert V_{oc} , le facteur de forme (FF) et le rendement (η) ne présentent que des variations marginales. Le meilleur compromis en termes de rendement est obtenu pour des valeurs de gap optique du ZnSe comprises entre **2,3 et 2,6 eV**, confirmant que, dans cette plage, l'alignement des bandes et les propriétés optoélectroniques de la couche tampon sont favorables au fonctionnement optimal de la cellule.

5.2 EFFET DE L’AFFINITÉ ÉLECTRONIQUE DE LA COUCHE TAMPON ZnSe

5.2.1 IMPACTE SUR LA CARACTÉRISTIQUE J – V

La **figure 11** présente l'évolution des caractéristiques courant–tension (J–V) de la cellule CIGS pour différentes valeurs de l'affinité électronique (χ) de la couche tampon ZnSe.

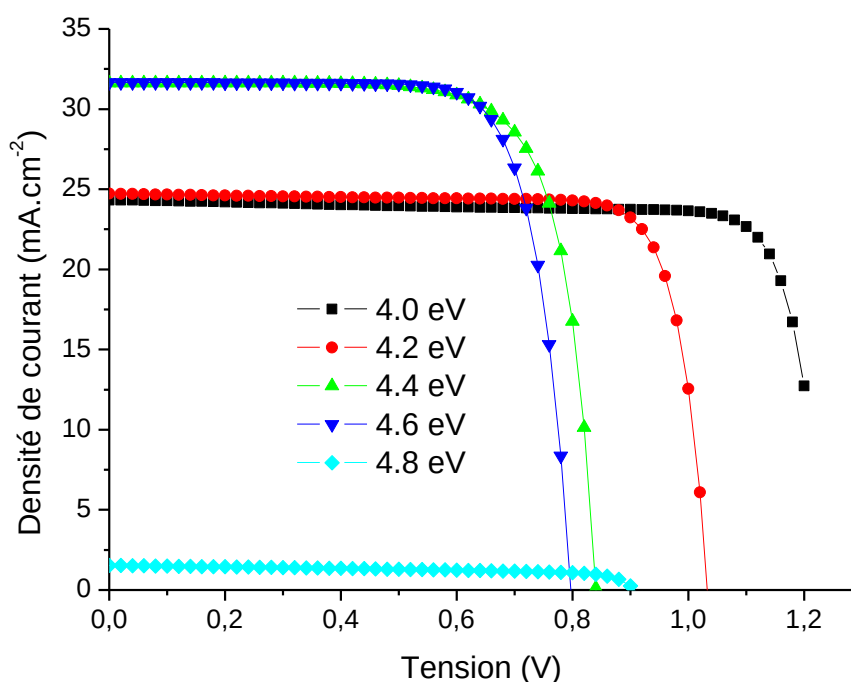


Fig. 11. Caractéristique J-V pour différentes valeurs de l'affinité électronique du ZnSe

L'analyse de la figure 11 montre que la densité de courant délivrée par la cellule augmente sensiblement, passant d'environ **24,33 mA·cm⁻²** à **31,66 mA·cm⁻²** lorsque l'affinité électronique du ZnSe croît de **4,0 à 4,6 eV**. En revanche, une augmentation supplémentaire de χ de **4,6 à 4,8 eV** entraîne une chute brutale de la densité de courant, qui décroît jusqu'à **1,53 mA·cm⁻²**. Parallèlement, la tension aux bornes de la cellule diminue fortement dans cette dernière plage de variation. Ces résultats mettent clairement en évidence que l'affinité électronique du ZnSe exerce une influence marquée sur la forme de la caractéristique J–V, et par conséquent sur les performances électriques de la cellule. Afin de préciser ces effets, l'impact de χ sur J_{sc} et V_{co} est analysé séparément ci-après.

5.2.2 INFLUENCE SUR LA DENSITÉ DE COURANT DE COURT – CIRCUIT

La variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de l'affinité électronique du ZnSe est illustrée à la **figure 12**.

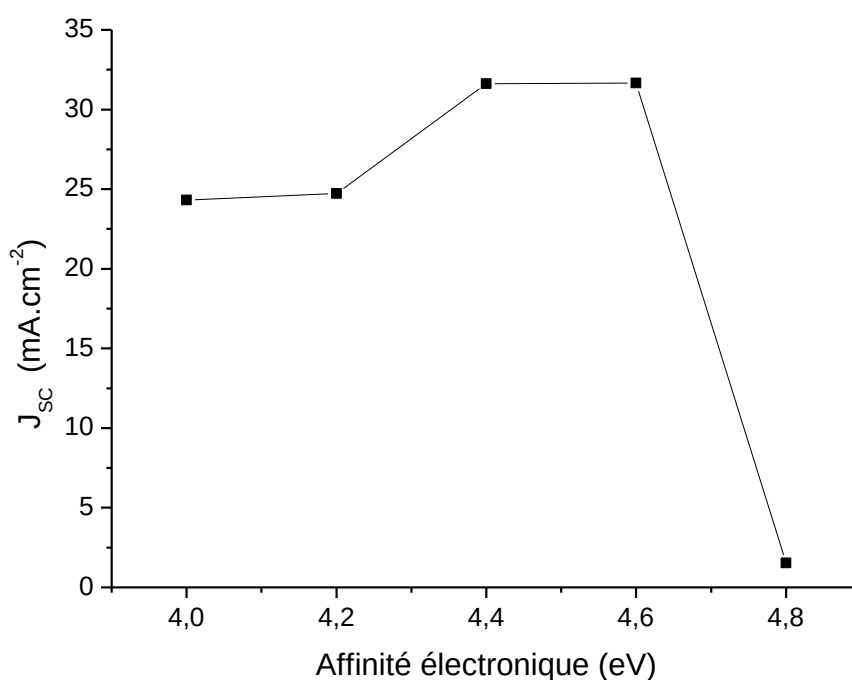


Fig. 12. Profil de la densité de courant de court – circuit en fonction de l'affinité électronique du ZnSe

La figure 12 indique que J_{sc} augmente progressivement de **24,32 à 31,66 mA.cm⁻²** lorsque χ varie de **4,0 à 4,6 eV**, traduisant une amélioration de la collecte des porteurs photogénérés. Cette évolution peut être attribuée à un **alignement favorable des bandes de conduction** à l'interface ZnSe/CIGS, qui facilite le transfert des électrons, améliore la séparation des porteurs et limite les pertes par recombinaison.

En revanche, lorsque l'affinité électronique dépasse **4,6 eV**, une diminution drastique de J_{sc} est observée, avec une valeur chutant jusqu'à **1,53 mA.cm⁻²** à **4,8 eV**. Cette dégradation peut être associée à la formation d'un **désalignement défavorable des bandes**, conduisant à l'apparition d'une barrière énergétique excessive à l'interface. Un tel déséquilibre réduit la transmission des porteurs vers la couche absorbante CIGS et limite l'absorption effective du rayonnement, ce qui se traduit par une baisse significative de la génération de porteurs. Ces résultats suggèrent que la plage d'affinité électronique la plus favorable à un alignement optimal des bandes se situe approximativement entre **4,2 et 4,6 eV** [3], [11].

5.2.3 IMPACT SUR LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT.

L'évolution de la tension de circuit ouvert en fonction de l'affinité électronique du ZnSe est présentée à la **figure 13**.

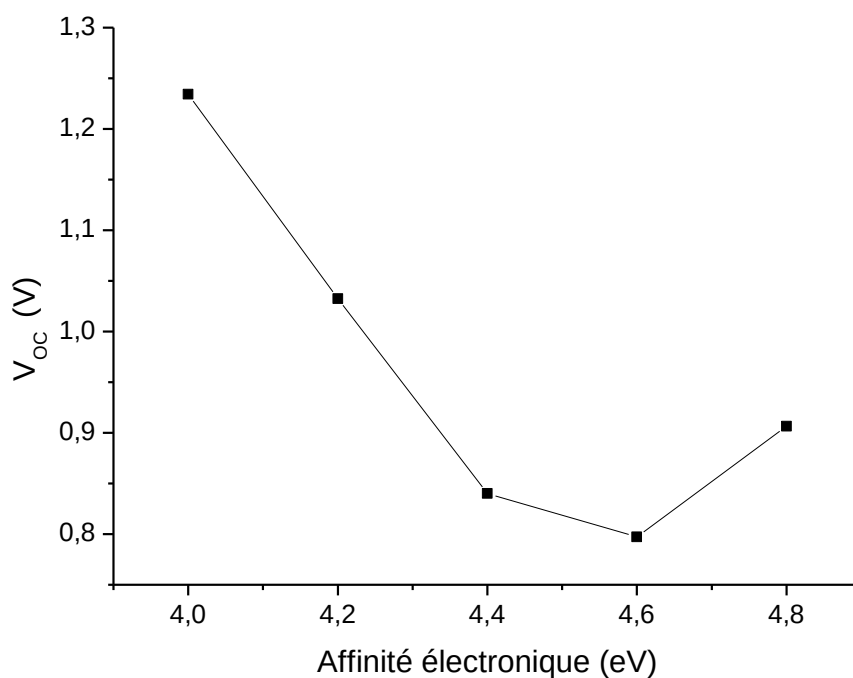


Fig. 13. Profil de la tension de circuit ouvert en fonction de l'affinité électronique du ZnSe

Il ressort de la figure 13 que la tension de circuit ouvert diminue fortement, passant d'environ **1,23 V** à **0,80 V**, lorsque χ augmente de **4,0 à 4,6 eV**. Cette diminution est principalement liée à une augmentation de la densité de courant de saturation, induite par des pertes accrues par recombinaison à l'interface ZnSe/CIGS. Une légère remontée de V_{co} , jusqu'à environ **0,90 V**, est ensuite observée lorsque χ varie de **4,6 à 4,8 eV**, traduisant une modification du transport des porteurs et des mécanismes de recombinaison. Néanmoins, ces valeurs restent nettement inférieures à celles obtenues dans la plage de faible affinité électronique, indiquant que l'intervalle **4,0–4,6 eV** demeure le plus favorable à un bon alignement des bandes [8], [26], [27].

5.2.4 IMPACT SUR LE FACTEUR DE FORME

La dépendance du facteur de forme vis-à-vis de l'affinité électronique du ZnSe est illustrée à la **figure 14**.

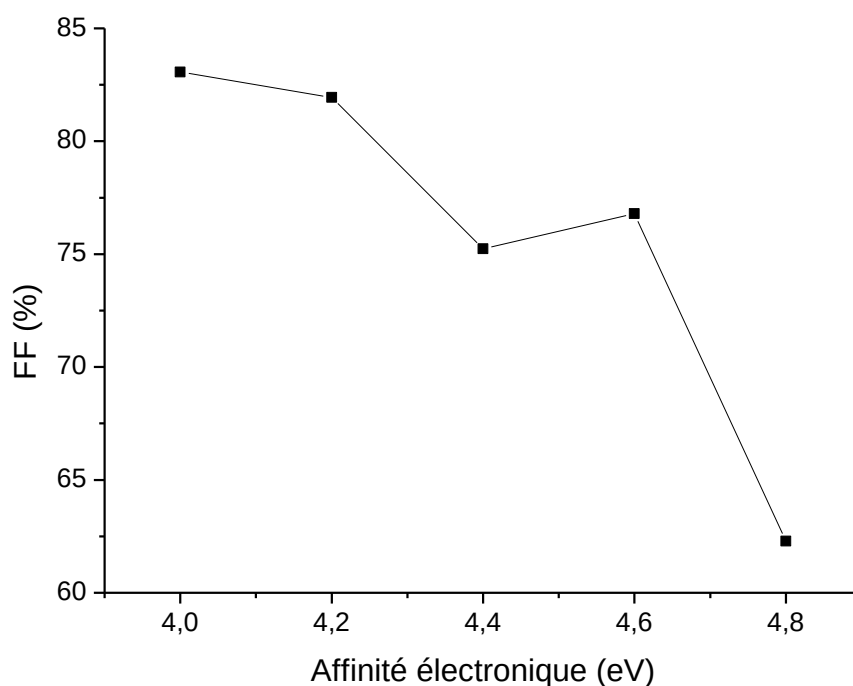


Fig. 14. Profil du facteur de forme en fonction de l'affinité électronique du ZnSe

La figure 14 montre que le facteur de forme décroît de **83,06 %** à **75,23 %** lorsque χ augmente de **4,0 à 4,4 eV**, puis présente une légère augmentation jusqu'à **76,79 %** pour $\chi = 4,6 \text{ eV}$. En revanche, une dégradation prononcée est observée lorsque l'affinité électronique dépasse **4,6 eV**, le facteur de forme chutant jusqu'à **62,28 %** à **4,8 eV**. Cette évolution reflète une augmentation des pertes résistives et recombinaatoires associées à un désalignement marqué des bandes d'énergie à l'interface, confirmant que la plage **4,0–4,6 eV** est la plus propice à un fonctionnement efficace de la cellule [8], [21].

5.2.5 INFLUENCE SUR LE RENDEMENT DE CONVERSION (η)

Le profil du rendement de conversion en fonction de l'affinité électronique du ZnSe est présenté à la **figure 15**.

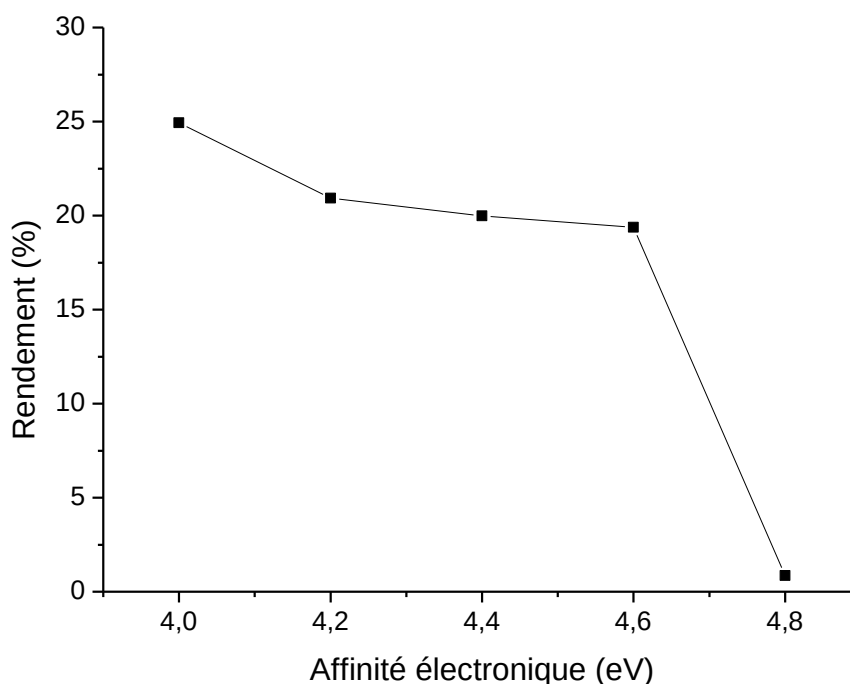


Fig. 15. Profil du rendement en fonction de l'affinité électronique de la couche tampon ZnSe

Comme le montre la figure 15, le rendement diminue progressivement de **24,93 %** à **19,38 %** lorsque χ augmente de **4,0 à 4,6 eV**, puis s'effondre de manière significative pour atteindre **0,86 %** lorsque χ varie de **4,6 à 4,8 eV**. Cette évolution est cohérente avec les tendances observées pour le facteur de forme et la tension de circuit ouvert. Elle confirme que les meilleures performances photovoltaïques sont obtenues pour une affinité électronique du ZnSe comprise entre **4,0 et 4,6 eV**, intervalle dans lequel l'alignement des bandes favorise un transport efficace des porteurs et limite les pertes par recombinaison.

5.2.6 SYNTHÈSE

L'ensemble des résultats montre que **l'affinité électronique du ZnSe exerce un impact majeur** sur les performances de la cellule CIGS. Une augmentation excessive de χ conduit à un désalignement défavorable des bandes, entraînant une forte dégradation de J_{CC} , V_{CO} , du facteur de forme et du rendement. À l'inverse, une affinité électronique comprise entre **4,0 et 4,6 eV** favorise un alignement optimal des bandes à l'interface ZnSe/CIGS et permet d'atteindre les meilleures performances photovoltaïques, en accord avec les résultats rapportés dans la littérature [3], [8], [28].

6 CONCLUSION

Dans ce travail, une étude numérique a été menée afin d'analyser l'influence du gap optique et de l'affinité électronique de la couche tampon ZnSe sur les performances photovoltaïques d'une cellule CIGS, à travers les paramètres clés que sont la densité de courant de court-circuit (J_{CC}), la tension de circuit ouvert (V_{CO}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η).

Les résultats obtenus montrent que la variation du gap optique du ZnSe exerce une influence relativement faible sur les performances globales de la cellule. Un rendement optimal d'environ 23,16 % est atteint lorsque le gap optique est compris entre 2,3 et 2,6 eV, plage dans laquelle l'absorption dans la couche CIGS et l'alignement des bandes demeurent favorables au transport et à la collecte des porteurs.

En revanche, l'affinité électronique du ZnSe apparaît comme un paramètre déterminant. Les simulations mettent en évidence que de bonnes performances photovoltaïques, avec des rendements compris entre 19,38 % et 24,93 %, sont obtenues lorsque l'affinité électronique se situe dans l'intervalle 4,0–4,6 eV. Dans cette plage, l'alignement des bandes à l'interface ZnSe/CIGS est optimal, ce qui limite les pertes par recombinaison et favorise un transfert efficace des porteurs. À l'inverse, une augmentation excessive de l'affinité électronique conduit à un désalignement défavorable des bandes et à une dégradation marquée des performances.

L'ensemble de ces résultats souligne le potentiel du ZnSe comme couche tampon alternative au CdS dans les cellules solaires CIGS. Le caractère non toxique du ZnSe, associé à des performances comparables, voire supérieures dans certaines conditions, en fait une option prometteuse pour le développement de cellules CIGS plus respectueuses de l'environnement. Ces conclusions ouvrent la voie à des travaux futurs intégrant des études expérimentales et une optimisation conjointe des propriétés optoélectroniques et des défauts d'interface.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- **Al**: aluminium
- **ATLAS–SILVACO**: logiciel TCAD de simulation (module ATLAS de la suite SILVACO)
- **CdS**: sulfure de cadmium
- **CIGS**: séléniure de cuivre–indium–gallium ($Cu(In, Ga)Se_2$)
- **DLTS**: spectroscopie transitoire des niveaux profonds (*Deep Level Transient Spectroscopy*)
- E_c : énergie du minimum de la bande de conduction
- E_g : gap optique (énergie de bande interdite)
- **EQE**: rendement quantique externe (*External Quantum Efficiency*)
- E_{vide} : niveau (énergie) du vide
- E_v : énergie du maximum de la bande de valence
- **FF**: facteur de forme (facteur de remplissage)
- J_{cc} : densité de courant de court-circuit
- **J–V**: caractéristique courant–tension
- J_{ph} : densité de photocourant
- J_{01}, J_{02} : densités de courant de saturation (diode 1 et diode 2)
- **Mo**: molybdène
- n_1, n_2 : facteurs d'idéalité (diode 1 et diode 2)
- η : rendement de conversion
- Φ : potentiel de sortie (fonction travail / potentiel électrochimique)
- **Rs**: résistance série
- **Rsh**: résistance shunt (parallèle)
- **SLG**: verre sodo-calcique (*Soda-Lime Glass*)
- **SRH**: recombinaison de Shockley–Read–Hall
- **TCAD**: *Technology Computer-Aided Design* (simulation des dispositifs)
- V_{co} : tension de circuit ouvert
- **XPS**: spectroscopie de photoélectrons X (*X-ray Photoelectron Spectroscopy*)
- **ZnO**: oxyde de zinc
- **ZnSe**: séléniure de zinc
- χ : affinité électronique

REFERENCES

- [1] T. Gupta and R. P. Chauhan, «Optical, dielectric and photocatalytic properties of ZnO, ZnSe, and ZnO/ZnSe photocatalyst,» *Optical Materials*, vol. 142, p. 114045, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.optmat.2023.114045.
- [2] C.-H. Su, «Energy bandgap of ZnSe bulk crystal between 300 K and 1000 K,» *Materials Letters*, vol. 398, p. 138955, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.matlet.2025.138955.
- [3] A. Bakour, M. Al-Hattab, O. Bajjou, and K. Rahmani, «Efficiency enhancement of novel ITO/ZnSe/CNTs thin film solar cell,» *Chemical Physics Impact*, vol. 9, p. 100672, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.chphi.2024.100672.
- [4] M. Slyotov, T. Mazur, V. Prokopiv, O. Slyotov, and M. Mazur, «Sources of optical radiation based on ZnTe/ZnSe/ZnS heterostructures,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 5763–5766, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.476.
- [5] M. Chen *et al.*, «Wavelength dependence of nonlinear optical susceptibility of ZnSe nanocrystalline film,» *Optical Materials*, vol. 134, p. 113114, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.113114.

- [6] L. A. Miya, L. F. Koao, S. V. Motloung, D. D. Hile, H. C. Swart, and T. E. Motaung, «Structure and optical properties of Er³⁺ doped ZnSe nanoparticles,» *Optical Materials*, vol. 157, p. 116339, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.optmat.2024.116339.
- [7] J. E. Castellanos Águila, P. Palacios, J. C. Conesa, J. Arriaga, and P. Wahnón, «Theoretical band alignment in an intermediate band chalcopyrite based material,» *Applied Surface Science*, vol. 424, pp. 132–136, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2016.12.237.
- [8] Md. F. Rahman *et al.*, «A qualitative Design and optimization of CIGS-based Solar Cells with SnS₃ Back Surface Field: A plan for achieving 21.83 % efficiency,» *Heliyon*, vol. 9, no. 12, p. e22866, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22866.
- [9] L. Hafaifa, M. Maache, Z. Allam, and A. Zebeir, «Simulation and performance analysis of CdTe thin film solar cell using different Cd-free zinc chalcogenide-based buffer layers,» *Results in Optics*, vol. 14, p. 100596, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.rio.2023.100596.
- [10] «Semiconductors,» pp. 524–564, Jan. 2025, doi: 10.1016/B978-0-44-313219-3.00072-1.
- [11] L. Gérard, «Structures de semiconducteurs II-VI à alignement de bandes de type II pour le photovoltaïque,» Theses, Université de Grenoble, 2013. Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00941180>.
- [12] Z. Zheng, X. Zu, Y. Zhang, and W. Zhou, «Rational design of type-II nano-heterojunctions for nanoscale optoelectronics,» *Materials Today Physics*, vol. 15, p. 100262, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.mtphys.2020.100262.
- [13] A. Urbaniak, A. Czudek, A. Eslam, R. Wuerz, and M. Igalson, «Consequences of grain boundary barriers on electrical characteristics of CIGS solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 253, p. 112252, May 2023, doi: 10.1016/j.solmat.2023.112252.
- [14] M. Calasan, S. Vujosevic, M. Alruwaili, and M. A. Ibrahim, «Optimization of four-diode equivalent circuit models for solar cells: Analytical formulation and performance enhancement,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 127, pp. 411–430, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.aej.2025.05.047.
- [15] R. Devarapalli, B. V. Rao, and A. Al-Durra, «Optimal parameter assessment of Solar Photovoltaic module equivalent circuit using a novel enhanced hybrid GWO-SCA algorithm,» *Energy Reports*, vol. 8, pp. 12282–12301, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.09.069.
- [16] K. Panchal *et al.*, «Conformity of multi-step diffusion optimization towards high efficiency industrial mono-PERC Si-solar cells,» *Next Materials*, vol. 9, p. 101249, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.nxmte.2025.101249.
- [17] M. Al-Dhaifallah, «Analytical solutions using special trans functions theory for current–voltage expressions of perovskite solar cells and their approximate equivalent circuits,» *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 12, p. 102225, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102225.
- [18] P. E. Pepa, D. Afungchui, O. Holtomo, and J. Ebobenow, «Parameters critically affecting the open circuit voltage of an organic solar cell,» *Heliyon*, vol. 11, no. 4, p. e42684, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42684.
- [19] S. Sikder, Md. K. Hasan, H. Mamur, and M. R. A. Bhuiyan, «Optimizing layer configuration and material selection to enhance CIGS solar cell performance through computational simulation,» *Hybrid Advances*, vol. 10, p. 100460, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.hybadv.2025.100460.
- [20] Md. S. Uddin, R. Hosen, S. Sikder, H. Mamur, and M. R. A. Bhuiyan, «Photovoltaic performance enhancement of Al/ZnO: Al/i-ZnO/CdS/CIGS/Pt solar cell using SCAPS-1D software,» *Next Energy*, vol. 2, p. 100080, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.nxener.2023.100080.
- [21] A. Labadi, S. Tobbeche, O. Saidani, M. Bouladame, and F. Brahimi, «Efficiency improvement of CIGS solar cells with ZnSe buffer layer and SnS BSF layer,» *Micro and Nanostructures*, vol. 206, p. 208257, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.micrna.2025.208257.
- [22] A. Kowsar *et al.*, «An overview of solar cell simulation tools,» *Solar Energy Advances*, vol. 5, p. 100077, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.seja.2024.100077.
- [23] Z. Wei, N. Al-Nuaimi, and S. Gemming, «Optimization of InGaN-based solar cells by numerical simulation: Enhanced efficiency and performance analysis,» *Next Materials*, vol. 6, p. 100325, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.nxmte.2024.100325.
- [24] S. Dabbabi, T. B. Nasr, and N. Kamoun-Turki, «Parameters optimization of CIGS solar cell using 2D physical modeling,» *Results in Physics*, vol. 7, pp. 4020–4024, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rinp.2017.06.057.
- [25] M. Elbar and S. Tobbeche, «Numerical Simulation of CGS/CIGS Single and Tandem Thin-film Solar Cells using the Silvaco-Atlas Software,» *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 1220–1227, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.766.
- [26] R. Charghandeh and A. Abbasi, «Effect of In (O, S) buffer layer on the band alignment and the performance of CZT (S, Se) thin film solar cells,» *Materials Today Communications*, vol. 37, p. 107299, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107299.
- [27] B. Maharana, R. Jha, and S. Chatterjee, «Metal oxides as buffer layers for CZTS based solar cells: A numerical analysis by SCAPS-1D software,» *Optical Materials*, vol. 131, p. 112734, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.112734.
- [28] H. Kafashan and A. Bahrami, «CIGS solar cells using ZrS₂ as buffer layer: Numerical simulation,» *Optik*, vol. 298, p. 171594, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijleo.2023.171594.

Evaluation de l'exposition au bruit chez les travailleurs d'une compagnie minière au Sénégal

[Assessment of noise exposure among workers at a mining company in Senegal]

B.B. Diédhiou¹, A.E.R. Diatta¹, H. Touré², and M. Ndiaye¹

¹Service de Médecine du travail, FMPO, UCAD, Senegal

²Faculté des Sciences Techniques et de Santé de Conakry, Guinea

Copyright © 2026 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: *Introduction:* Noise is a common pollutant in the workplace, particularly in the mining sector, which uses equipment that generates noisy environments. The aim of this study was to assess the occupational noise exposure of workers at a mining company in Senegal. *Methodology:* This was a retrospective, cross-sectional, and descriptive study that covered data recorded from May 2, 2016 to December 31, 2020. *Results:* A total of 393 noise exposure points were measured, with 17.6% exceeding 85 dB. The power plant was the noisiest area, with 53.8% of measurements exceeding 85 dB. Individual measurements of 51 workers in similar exposure groups (SEGs) from each department showed daily average exposure values (AELs) ranging from 55 dB in the SEG of WCP control room operators to 109 dB in the SEG of power plant electricians. Instantaneous noise exposure values (peaks) ranged from 115 dB in the WCP mechanics' Similar Exposure Group to 143 dB in the MSP maintenance workers' Similar Exposure Group. 85.6% of respondents had at least 5 years of service. Hypertension (4.9%) and moderate hearing loss (0.7%) were also recorded. *Conclusion:* Noise pollution is a reality at the Grande Côte Opération (GCO) mine. However, the technical and organizational measures implemented by the company have helped to reduce its harmful effects on workers' health.

KEYWORDS: noise, exposure, mine, prevention, Senegal.

RESUME: *Introduction:* Le bruit est un polluant fréquent dans le milieu professionnel particulièrement dans le secteur minier qui utilise des installations générant des ambiances bruyantes. Le but de cette étude était d'évaluer l'exposition professionnelle au bruit des travailleurs d'une compagnie minière au Sénégal. *Méthodologie:* Il s'agissait d'une étude rétrospective, transversale et descriptive qui portait sur des données répertoriées du 2 mai 2016 au 31 décembre 2020. *Résultats:* Au total, 393 points d'exposition au bruit ont été mesurés dont 17,6% dépassant 85dB. La centrale électrique était la zone la plus bruyante avec 53,8% des mesures qui dépassaient 85dB. Les mesures individuelles de 51 travailleurs de groupe d'exposition similaire (GES) de chaque département ont montré des valeurs d'exposition moyenne (VEM) quotidienne allant de 55 dB dans le GES des opérateurs de la salle de contrôle (control room) du WCP à 109 dB dans le GES des électriciens de la centrale électrique. Les valeurs de l'exposition instantanée aux bruits (pics) avaient des extrêmes allant de 115 dB dans le GES des mécaniciens du WCP à 143 dB dans les GES des maintenanciers du MSP. Les enquêtés avaient une ancienneté d'au moins 5 ans dans 85,6% des cas. L'HTA (4,9%) et la surdité modérée (0,7%) ont été répertoriées. *Conclusion:* les nuisances sonores constituent une réalité dans la mine Grande Côte Opération (GCO). Toutefois, les mesures techniques et organisationnelles mises en place par l'entreprise ont permis de réduire leurs effets néfastes sur la santé des travailleurs.

MOTS-CLEFS: bruit, exposition, mine, prévention, Sénégal.

1 INTRODUCTION

Le bruit est une nuisance fréquente et présente dans la quasi-totalité des secteurs d'activité économique. En milieu professionnel, son ampleur est liée aux progrès croissants des technologies et à l'utilisation à outrance d'outillages et de machines sophistiqués. Il représente une véritable menace pour la santé des personnes exposées car, une exposition à des niveaux sonores élevés pourrait affecter le système auditif et favoriser la surdité professionnelle [1], [2]. Selon l'OMS, le nombre d'individus atteints de déficience auditive incapacitante pourrait atteindre 900 millions d'ici à 2050 si aucune mesure n'est prise [3]. Cette surdité professionnelle est grave par son caractère irréversible avec toutes ses répercussions sanitaires, sociales et professionnelles. La réglementation impose aux employeurs la mise en œuvre de mesures visant à protéger les travailleurs exposés. Au Sénégal, le secteur minier fait partie des secteurs les plus bruyants exposant et menaçant la santé et le bien être des travailleurs. Cependant, on note l'absence d'un véritable programme de réduction des risques liés aux nuisances sonores. Les données disponibles dans ce secteur portant sur l'évaluation des nuisances sonores sont rares. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'exposition professionnelle au bruit des travailleurs de la mine, Grande Côte Opérations (GCO). La finalité de l'étude était de proposer des solutions pour une protection durable des travailleurs.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 CADRE D'ÉTUDE

La Grande Côte Opération (GCO) est une société minière spécialisée dans l'exploration de minerais lourds (zircon, ilménite, rutile, leucoxène). Elle se situe dans une région de dunes côtières qui débute à environ 50 km au nord-est de Dakar et s'étend vers le nord, sur plus de 100 km le long du littoral sénégalais. Le système dunaire contenant des minéraux lourds est large d'environ 2 kilomètres avec quelques zones s'étendant jusqu'à 4,5 kilomètres. Les principales zones de ressources se trouvent au niveau des localités de Diogo, Mboro et Lompoul. Les zones étudiées étaient:

- Le WCP à savoir la drague et l'usine de concentration humide (UCH);
- L'usine de séparation des minéraux (USM);
- La centrale électrique.

2.2 TYPE ET PÉRIODE D'ÉTUDE

Il s'agissait d'une étude rétrospective de type transversal et descriptif. L'étude portait sur les données mesurées du 2 mai 2016 au 31 décembre 2020.

2.3 POPULATION D'ÉTUDE

Les travailleurs officiant dans ces 3 départements sus cités constituaient la population d'étude.

2.4 PROCÉDURE

Dans notre démarche d'évaluation de l'exposition au bruit, nous avons procédé à l'identification des zones de travail ayant une cartographie du bruit et avons recensé les mesures individuelles d'exposition au bruit des travailleurs repartis en groupes d'exposition similaires disponibles dans la base de données. A cela s'ajoute, la collecte des données de la visite médicale annuelle.

Les mesures d'ambiances sonores disponibles dans la base de données des travailleurs d'un groupe d'exposition similaire (GES) exposés au bruit ont été recueillies.

Les travailleurs d'un GES exposés au bruit ayant fait la visite annuelle en 2019 dont les résultats étaient disponibles ont été recueillis.

Toutes les mesures d'ambiance sonore faites durant la période ont été prises en compte.

MESURES INDIVIDUELLES

Les travailleurs ont été divisés en groupe d'exposition similaires (GES) c'est-à-dire en un ensemble de travailleurs, de postes ou de fonctions de travail qui partagent le même profil d'exposition, pour lequel l'exposition est de même nature et d'intensité similaire. Le GES est validé par la suite par une méthode quantitative lorsque le nombre de mesures est suffisant pour établir

le calcul statistique le validant. Le choix aléatoire des travailleurs à l'intérieur du GES pour différents jours (effets des saisons) permet de tenir compte des fluctuations dans un même GES et de la dispersion des expositions d'un jour à l'autre. Dans certaines circonstances, un seul travailleur peut être choisi, mais le mesurage doit s'étaler sur plusieurs journées, non consécutives si possible pour une meilleure image des fluctuations d'un jour à l'autre. Les mesures d'ambiance ont été effectuées avec le sonomètre 3M[®]. Le sonomètre intégrateur est conçu pour mesurer directement Leq_t et s'avère donc très utile si le travail se divise facilement en activités distinctes. Il doit posséder un réseau de pondération A, une plage dynamique de 50 dB, un domaine d'aptitude à la mesure du facteur de crête (différence entre le niveau sonore maximal et le niveau sonore équivalent pendant un intervalle de temps donné) de 30 dB, et une tolérance de classe 2 (conformément à la norme IEC 61672-1, ou ANSI.S1.4). La position de mesure du sonomètre intégrateur est généralement la même que celle du sonomètre, soit au centre de la tête du travailleur mais en l'absence de ce dernier. Les mesures individuelles ont été effectuées avec le dosimètre 3M[®]. Le dosimètre de bruit, appelé ci-après « dosimètre », est conçu pour être porté par les travailleurs pour la mesure de leur exposition au bruit en termes de Leq_t.

Les audiométries étaient réalisées avec l'audiomètre: PISTON[®] qui permet d'explorer le champ auditif oreille par oreille, de Hz en Hz (elle est tonale) pour établir des seuils auditifs (elle est liminaire). L'audiométrie doit être réalisée en cabine insonorisée. Le but de l'audiométrie tonale liminaire est de déterminer, pour chaque oreille, les seuils en conduction aérienne et osseuse; le seuil d'audition est le niveau le plus faible auquel le son est perçu pour chacune des fréquences testées.

MÉTHODES DE RECUEIL DE DONNÉES

- Mesures d'ambiance

Un dépouillement de la base de données de la cartographie bruit a permis de les regrouper et de les classer par zone.

- Mesures individuelles

Un dépouillement de la base de données des mesures individuelles de bruit a permis de les regrouper et de les classer suivant différents niveaux d'exposition et suivant des valeurs de référence (VR) qui sont des valeurs limites auxquelles sont comparées le résultat de notre mesurage. Ces VR sont impérativement associées à une période de référence qui est égale à 12 heures. Ces VR peuvent permettre la mise en œuvre de moyens de maîtrise de l'exposition, si les niveaux mesurés sont supérieurs à la VR utilisée. Elles permettent aussi la mise en œuvre d'une procédure d'évaluation plus approfondie (si elles sont du même ordre de grandeur) et l'instauration d'un programme de surveillance périodique.

- Les dossiers de visite médicale annuelle des travailleurs concernés

2.5 ANALYSE DES DONNÉES

Les données ont été saisies et colligées dans Excel MS Office 360 et Epi info 7.2.4.0 analysées dans ces deux logiciels.

3 RÉSULTATS

Nous avons colligé: 393 mesures d'ambiance sonore, 51 mesures individuelles de bruit (GES) et 266 dossiers de visite médicale répondant aux critères d'inclusion.

3.1 CARACTÉRISTIQUES SOCIOPROFESSIONNELLES

Les travailleurs étaient constitués de 98,5% d'hommes (n=262) et de 1,5% de femmes (n=4) soit, un sex-ratio (H/F) de 65,5 en faveur des hommes. L'âge moyen des travailleurs était de 40 ans +/- 8,6 avec des extrêmes allant de 23 à 60 ans. La médiane était de 39 ans. Les travailleurs avaient une ancienneté à leur poste d'exposition supérieure ou égale à 5 ans dans 85,6% des cas (n=228) contre, 14,4% (n=38) ayant une ancienneté allant de 1 à 4 ans.

Les travailleurs du WCP étaient plus représentés soit 48% (n=127) suivis de ceux de la MSP et de la centrale électrique (Powerstation) soit respectivement, 42% et 10% (n=27).

3.1.1 MESURES D'AMBIANCE

MESURES D'AMBIANCE MSP

- Mesures du dry mill (MSP)

Au niveau du Dry mill, 159 points d'exposition étaient mesurés dont 77% étaient supérieurs à 80 dB et 9,76% (n=20) supérieurs à 85 dB. Le rez-de-chaussée était la zone la plus bruyante avec 12 points de mesures comme l'indique le tableau 1.

- Mesures du Wet mill (MSP)

Vingt points de mesures soit 52% étaient au-dessus de 80 dB et aucun point n'était au-dessus de 85 dB comme l'indique le tableau 1.

MESURES AU NIVEAU DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE

Au niveau de la centrale électrique, 21 points de mesures soit 53,1% étaient au-dessus de la 85dB. Ces points bruyants se trouvaient essentiellement au niveau de la salle des machines avec 20 points de mesures soit 80% sont au-dessus de la 85dB.

MESURES WCP

- Mesures surge bin (WCP)

Au niveau du Surge Bin, 45 points d'exposition soit 85% étaient au-dessus de 80 dB et 8 points étaient supérieurs à 85 dB. Le rez-de-chaussée était le plus bruyant avec 5 points de mesures supérieurs à 85 dB.

- Mesures TDM (WCP)

Au niveau du TDM, 16 points de mesures (59,3%) étaient au-dessous de 80 dB (cfr tableau 1).

- Mesures de WCP/DREDGE

Au niveau du Dredge, 23 points de mesures soit 74% étaient au-dessus de la 80dB. Le niveau 3 avait la majorité de ces points de mesures au-dessus de 85 dB avec 9 points soit 90% des points mesurés dans cette zone. L'Engine all avait un niveau sonore supérieur à 80 dB.

RÉCAPITULATIF DES DONNÉES DE MESURES D'AMBIANCE

Au niveau des 3 trois départements de notre étude, 73% des points de mesure (n=290) étaient au-dessus de 80 dB parmi lesquels 69 points soit, 17,6% étaient au-dessus de 85 dB. La centrale électrique était la plus bruyante avec 53,8% au-dessus de 85 dB.

Tableau 1. Récapitulatif des mesures d'ambiances sonores

Département		Zone d'exposition	Nombre de P.E.< 80dB	Nombre P.E. entre 80 dB à 85 dB	Nombre P.E. > 85dB	Total de points de mesure
MSP PLANT	DRY MILLL	Rez-de-chaussée	14	20	12	46
		Niveau 01	17	19	1	37
		Niveau 02	09	17	2	28
		Niveau 03	00	26	0	26
		Niveau 04	06	20	4	30
		Niveau 05	0	13	1	14
		Niveau 06	0	24	0	24
	WET MILL	Rez-de-chaussée	16	7	0	23
		Niveau 01	00	02	0	02
		Niveau 02	02	11	0	13
Centrale électrique		Salle des machines	04	1	20	25
		Salle compresseur	04	0	0	04
		Salle labo	04	5	1	10

WCP PLANT	SURGE BIN	Rez-de-chaussée	07	17	5	29
		Niveau 01	01	12	0	13
		Niveau 02	0	08	03	11
	TDM	Rez-de-chaussée	10	06	04	20
		Niveau 01	01	0	03	04
		Niveau 02	0	0	03	03
	DREDGE	Rez-de-chaussée	04	0	0	04
		Niveau 01	02	02	0	04
		Niveau 01	01	06	0	07
		Niveau 01	01	05	09	15
Engine all		0	0	01	01	
TOTAL		Toutes zones	103	221	69	393
		Pourcentages	26.21%	56.23%	17.56%	

P.E.: point d'exposition

3.1.2 MESURES INDIVIDUELLES

MESURES DES GROUPES GES DU MSP

- Mesures individuelles des GES des travailleurs du MSP production

Tous les GES du Dry mill avaient des L_{ex12h} et des L_{pc} supérieurs aux seuils d'interventions et le groupe des opérateurs est plus exposé avec une L_{ex12h} à 100,2 dB et un L_{pc} 141 dB.

Tous les GES du Wet mill avaient des L_{ex12h} inférieurs aux seuils d'intervention et les GES des opérateurs et des conducteurs chargeurs avaient des L_{pc} dépassant 135 dB.

Tableau 2. Résultats des mesures individuelles des GES des travailleurs du MSP production

Zones d'exposition	GES	L_{ex12h}	L_{pc}
Dry mill	• Opérateurs	100.2	141
	• Superviseurs	83.1	138.5
	• Coordinateur	83.1	138.5
	• Process specialists	83.6	140.2
Wet mill	• Superviseurs juniors	81.9	127.7
	• Operateurs	77.2	139.5
	• Conducteurs-chargeurs	80.9	142.5

MESURES INDIVIDUELLES DES GES DES TRAVAILLEURS DU MSP MAINTENANCE

Tous les groupes GES des maintenanciers du MSP avaient des L_{pc} qui dépassaient les seuils. Les mécaniciens et machinistes avaient des L_{ex8h} qui dépassaient les seuils.

Tableau 3. Résultats des mesures individuelles des GES des maintenanciers du MSP

Zones d'exposition	GES	L_{ex8h}	L_{pc}
Wet mill/ Dry mill	Mécaniciens	87.7	143
	Belt men	84.6	139.8
	Machinistes	86	139.8
	Instrumentistes	80.9	140.9
	Électriciens	75.9	139.8
	Superviseurs électriciens	70.5	140.8
	Super intendent	81.4	143
	Manager	75.7	143
	Fitter	77.8	141.1

MESURES INDIVIDUELLES DES GES DES TRAVAILLEURS DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE

Tous les GES de la centrale électrique avaient des L_{ex12h} et L_{pC} sont supérieurs aux seuils.

Tableau 4. *Résultats des mesures individuelles des travailleurs de la centrale électrique*

Zones d'exposition	GES	L_{ex12h}	L_{pC}
Centrale électrique production	Opérateurs	103	140
	Assistants opérateurs	105	136.8
	Chef de quart control room	84.5	142.1
	Operation manager	91.3	140.5
	Chef de département	84.5	142.1
Centrale électrique maintenance	Electricien	109	135.3
	Superviseur electricien	106	137.2
	Mécanicien	108	141.7

MESURES INDIVIDUELLES DES GES DES TRAVAILLEURS DU WCP

Tous les GES du WCP avaient des L_{ex12h} majoritairement inférieurs aux seuils et tous leurs L_{pC} étaient supérieurs aux seuils.

Tableau 5. *Résultats des mesures individuelles des GES des travailleurs du WCP*

Zones d'exposition	GES	L_{ex12h}	L_{pC}
WCP Production	Scaffolder	72.5	135.7
	Drege operator	76.8	135.6
	Control room operator	55.2	133.4
	Spiral operator	82.8	138.5
	Plant operator	87.8	135.2
	Supervisor	79.2	140.9
	Doc control / cro	70.5	142.1
	Metallurgie	70.8	138
	Expat supervisor	68.3	142.4
WCP Maintenance Plant	Mecanicien	85	115.8
	Shift fitter	81.4	140.3
	Store men	81.7	140.8
	Electricien instrumentist	78.4	129.7
	Super intendent	66	133.8

3.2 CARACTÉRISTIQUES CLINIQUES ET PARACLINIQUES DES TRAVAILLEURS

L'HTA a été retrouvée dans 4,9% des cas (n=13). Parmi les travailleurs, 4,1% (n=11) souffraient de céphalées chroniques.

L'obésité et le surpoids étaient retrouvés dans 2,6% (n=7) des cas.

L'audiogramme était normal dans 89,8% des cas (n=239). Par contre, des cas de surdité légère et modérée ont été observées respectivement dans 9,4% (n=25) et 0,7% (n=2) des cas.

4 DISCUSSION

L'étude concernait les zones de production et la centrale électrique soit, 393 points de mesure. Les deux cent soixante-six (n=266) travailleurs inclus représentaient 17,3% de l'effectif total de l'entreprise. Dans notre démarche d'évaluation de l'exposition au bruit, nous avons procédé:

- A l'identification des zones de travail ayant une cartographie du bruit;
- Au recensement des mesures individuelles d'exposition au bruit des travailleurs repartis en groupes d'exposition similaires;
- Au recueil des données de la visite médicale annuelle.

Toutes les trois zones ciblées avaient des points de niveaux sonores supérieurs aux normes internationales qui sont comprises entre 80 et 90 dB. Notre étude a montré que 73% des points avaient un niveau sonore supérieur à 80 dB contrairement à Maurin [4] qui avait retrouvé 35% en France. Cette différence est liée au fait que Maurin avait en plus des services de production et de maintenance, pris en compte le laboratoire et le local lesquels services, n'ont pas été pris en compte dans notre étude. L'étendu de la mine et la diversité des installations ont entraîné une priorisation des zones de mesure suite à une évaluation des risques après un inventaire des machines et de leurs caractéristiques. Les rez-de-chaussée des zones mesurées étaient les plus bruyantes et les niveaux sonores diminuaient au fur à mesure qu'on montait de niveau. En effet, les machines les plus bruyantes sont installées au rez-de-chaussée du fait de leur poids et de leur fonction. Cependant, l'inverse a été constaté au niveau du TDM (au WCP) où les niveaux sonores augmentaient au fur à mesure qu'on montait de niveau. La salle des machines de la centrale était la zone la plus bruyante parmi toutes les zones étudiées avec 80% des points supérieurs à 85 dB. Cette salle des machines de la centrale électrique regroupait cinq groupes électrogènes d'une capacité globale de 36 MW.

Pour ce qui est des mesures individuelles, les profils d'exposition constitués au début de notre étude, montrent que plusieurs travailleurs exerçant au niveau de la mine de GCO sont exposés à des niveaux importants de bruit. Ils sont donc probablement à risque de développer des problèmes de surdité ainsi que d'autres problèmes de santé liés au bruit à court ou moyen terme. Notre étude a montré une disparité des niveaux d'exposition tant, sur les valeurs de l'exposition moyenne quotidienne avec des extrêmes allant 55 dB dans le GES des opérateurs de la salle de contrôle (control room) du WCP et à 109 dB dans le GES des électriciens de la centrale électrique. Pour les valeurs d'exposition instantanée aux bruits très courtes (pics), on constate des extrêmes allant 115 dB dans le GES des mécaniciens du WCP et à 143 dB dans le GES des maintenanciers du MSP. Les mesures au MSP ont révélé que le GES des opérateurs du dry mill est le plus exposé (102 dB) alors que les autres GES du MSP ont des expositions inférieures à 85dB. Cette différence s'explique par le fait que les opérateurs ont l'essentiel de leurs activités au rez-de-chaussée qui est la zone la plus bruyante au regard des mesures d'ambiance. Par contre, les maintenanciers ont des niveaux d'exposition plus faibles car intervenant au niveau du rez-de-chaussée pendant de courtes durées. Toutes les mesures des GES de la centrale électrique ont des niveaux d'exposition dépassant la valeur d'action supérieure (VAS) en dehors des managers et chef de quart de la salle de contrôle (control room) qui ont des niveaux d'exposition entre la valeur d'action inférieure (VAI) et la VAS. Les mesures les plus élevées ont été observées chez les électriciens qui interviennent souvent dans la salle des machines qui est la zone la plus bruyante. Les mesures de prévention du bruit telles que, les écrans acoustiques mise en place ont permis d'atténuer le niveau d'exposition des managers et des chefs de quart de la salle de contrôle (control room).

Les mesures des GES du WCP ont montré que tous les GES du WCP ont des valeurs d'exposition moyenne quotidienne (L_{ex12h}) qui étaient majoritairement inférieures aux seuils alors que leurs pics d'exposition (L_{pc}) étaient supérieurs aux seuils. Cette contradiction entre les expositions moyennes et les pics d'exposition s'explique par l'automatisation des procédés avec comme conséquence, la diminution des interventions dans les zones des machines et une présence plus fréquente dans la salle du contrôle room permettant une surveillance à distance du travail. Ainsi, les interventions humaines ne deviennent impératives qu'en cas de détection d'un problème mécanique. La salle du contrôle room est insonorisée par encoffrement justifiant les résultats des mesures d'ambiance qui y sont plus bas dans notre série.

Nous avons colligé les données de la visite médicale annuelle de 266 travailleurs. L'échantillon était essentiellement masculin (98,5%). Cette prédominance masculine des travailleurs du secteur minier est due à l'éloignement des exploitations par rapport aux grandes agglomérations et à la pénibilité du travail effectué dans ces postes. Cette pénibilité explique aussi la jeunesse de notre série où 91% des travailleurs étaient âgés de moins de 45 ans. En République de Guinée et en Côte d'Ivoire, Oularé et chicaya avaient retrouvé dans leur étude, une prédominance masculine respectivement de 84,7% et 90% [5], [6]. Par ailleurs, nous n'avons pas eu assez d'arguments cliniques nous permettant de relier les cas d'hypertension artérielle et de céphalées répertoriés à l'exposition prolongée au bruit. Des cas de céphalées chroniques ont été rapportés par Benzarti [7] chez des travailleurs exposés au bruit dans un centre d'appels. Les deux cas de surdité modérée ont nécessité une investigation et un suivi ORL. Le premier présentait un antécédent de surdité unilatérale à la suite d'une complication d'une pathologie durant l'enfance. Toutefois, le travailleur avait bénéficié d'une protection auditive par changement de poste de travail (affectation à un poste administratif moins bruyant). Le second était une surdité de perception bilatérale faisant suspecter une surdité professionnelle. Cependant, sa surdité était antérieure à son exposition. Il a bénéficié d'une protection auditive et d'une surveillance médicale particulière.

Globalement, cette étude met en évidence la forte émission de bruit au niveau des installations notamment dans la centrale électrique dont les impacts sur la santé des travailleurs ont été atténués par la démarche préventive instaurée par l'entreprise. Les mesures d'exposition individuelle ont montré que 51,3% des GES ont des mesures supérieures aux normes internationales en matière de prévention du bruit. Au niveau de la drague (WCP) les moyens de prévention technique comme l'encoffrement des salles de contrôle et l'automatisation des procédés ont permis de ramener le niveau d'exposition des GES exerçant dans

cette zone d'avoir des L_{ex12h} inférieures aux valeurs de référence. Les données de la surveillance clinique et audiométrique n'ont pas révélé d'effets majeurs sur la santé des travailleurs comme la surdité professionnelle.

5 CONCLUSION

Cette étude met en évidence la forte émission de bruit au niveau des installations notamment dans la centrale électrique dont les impacts sur la santé des travailleurs ont été atténués par la démarche préventive instaurée par l'entreprise. Toutefois, malgré les moyens de prévention des risques mis en place, le niveau global de l'exposition au bruit dans notre série reste au-dessus des normes voire même critique à l'instar de la centrale électrique. L'acceptabilité du risque est habituellement associée à des valeurs limites de référence à ne pas dépasser dans l'environnement de travail. Il est important de renforcer ces mesures techniques ou organisationnelles en procédant à la réduction du bruit par modification des caractéristiques acoustiques des locaux, le changement des méthodes de travail, le choix d'équipements moins bruyants, la réduction de l'exposition au bruit.

REFERENCES

- [1] B. Otoghile, A.O. Paul, C.O. Confidence, « Effects of Occupational Noise on Quality of Life », vol. 4, no. 5, pp. 1142- 46, 2018.
- [2] S. Oubian, M. Lankoandé, A. Guetta, Y. Gyebré, M. Seremé, K. Ouoba, « Aspects Cliniques et Audiométriques des Nuisances Sonores dans les Centrales Electriques de la Ville de Ouagadougou ». European Scientific Journal 2020, vol. 16, no. 6, pp. 395-405, 2020.
- [3] OMS. https://www.who.int/docs/default-source/documents/world-hearing-day-2018-infographic-fr.pdf?sfvrsn=54cce8d_12, (consulté, le 13/01/2025).
- [4] N. Maurin, « La nouvelle réglementation bruit au poste de travail et sa déclinaison au niveau des installations du CEA Saclay avec prise en compte des facteurs potentiels d'exposition multifactorielle, » [Online] Available: <https://documentation.ehesp.fr/memoires/2007/igs/maurin.pdf> (consulté, le 2/07/2025).
- [5] F. Oularé, C. Namoudou, S. Camara, K.A.L. Evrard, A.E.R. Diatta, A.M. Diallo et al., « Evaluation du risque lié à l'exposition au bruit dans une usine de ciment: perspectives et recommandations (étude transversale), » PAMJ-OH, vol. 14, no.4, pp. 1-12, 2024.
- [6] A. F. Tchicaya, A. Ina, Y. M. Kouassi, P. T. Dje, L. M. A. N'Guessan, C. P. Guiegui, et al, « Evaluation de la protection auditive des travailleurs d'une usine de transformation de fèves de cacao de 2010 à 2011 en Côte d'Ivoire, » Med Afr Noire, vol. 63, no. 11, pp. 573-581, 2016.
- [7] M. Benzarti, J. Hsinet, N. Khouja, A. Amri, S. Ayari, S. Ouni et al., « Troubles auditifs liés à la surexposition sonore dans les centres d'appels. À propos de 39 cas, » Arch Mal Prof, vol. 75, no. 3, pp. S22-S22, 2014.

Land use mapping in the Sébi-Ponty watershed, Senegal

Rokhaya Diouf¹, Vieux Boukhaly Traore², Hyacinthe Sambou¹, Mamadou Lamine Ndiaye³, and Bienvenue Sambou¹

¹Institute of Environmental Sciences (ISE), Cheikh Anta Diop University, Dakar, Senegal

²Department of Physics, Cheikh Anta Diop University, Dakar, Senegal

Ecological Monitoring Center (CSE), Dakar, Senegal

Copyright © 2026 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: Measuring the spatial impact of human activities on ecosystems is an important step towards effectively managing the changes affecting these natural areas. The objective of this study is to determine land-use dynamics and changes in vegetation cover in the Sébi-Ponty watershed in the Dakar region. To this end, we defined seven land-use classes (tree crops, water, market gardening, agricultural areas, shrub savanna, bare soil, and built-up areas). Satellite data and Landsat images from three periods (1984, 2000, and 2016) were carefully selected and analyzed. Auxiliary data (GPS surveys, topographic maps, and interviews) were also used. The analysis of changes in the land-use classes was carried out using the integration of geographic information systems (GIS) with ArcGIS software and remote sensing techniques with ENVI software. The results obtained highlighted strong dynamics within the land-use classes. This dynamic is characterized by an increase in tree farming, market gardening, and construction at the expense of bare soil, shrub savanna, and agricultural areas. During the same period, the shrub savanna has significantly declined in vitality, indicating a trend toward degradation. The values of the confusion matrix and the kappa coefficient confirm this situation. These results highlight the relevance of our integrated approach, which is applicable to other similar studies.

KEYWORDS: Land use, dynamics, remote sensing, GIS, diachronic analysis, maximum likelihood.

1 INTRODUCTION

Land use in ecosystems has become a major environmental concern, in the context of a decisive disruption brought about by climate change [1]. It is one of the main factors leading to the degradation of various plant communities [2]. Globally, environmental degradation is a cause for concern due to the threat it poses to both ecosystem functioning and the well-being of human communities [3,4]. This degradation is all the more worrying given the increasingly intense climatic conditions and demographic pressures for access to resources [5]. The causes are both natural and anthropogenic [6,7,8]. Anthropogenic causes stem from various pressures related to rapid population growth, technological advancements, industrialization, agricultural expansion, and mining [9,10]. The resulting changes pose serious threats to the functioning of ecosystems and natural resources, particularly in the Sahel region [11,12, 13, 14]. This leads researchers [15,5] to conclude that understanding the challenges related to land cover and land use is crucial for effective environmental management. Therefore, studies are needed to measure the spatial and temporal extent of human impact on landscapes, in order to formulate proposals to mitigate the spatial impacts affecting natural areas [16,17, 18]. Numerous scientific studies utilize remote sensing and geographic information systems to assess the state and changes in land cover and land use [19]. This will allow for the evaluation of the effects of human and natural pressures on ecosystems [4,10, 18]. According to [20,21], and [22], numerous cartographic studies addressing various aspects have demonstrated the value of using satellite imagery at different spatial and temporal resolutions to monitor the dynamics of surface conditions. According to [23], the integration of remote sensing, geographic information systems (GIS), and expert systems constitutes a new field of research. [24] used GIS and weighted multi-criteria analysis based on satellite imagery to identify soils suitable for coffee and cocoa cultivation in Côte d'Ivoire; [25] used remote sensing to quantify changes in land cover and land use in the Welkom-Virginia gold region; [26] ont évalué la dynamique entre les différents types l'occupation et de l'utilisation des sols pour comprendre l'impact anthropique des activités d'extraction aurifère au Cameroun oriental de 1987 à 2017 en utilisant des images Landsat. This study aims to determine the dynamics of land use, the extent, and changes in land cover classes within the Sébi-Ponty watershed in the Dakar region. Since 1936, this area has contained a water retention basin with an annual capacity of 512,000 m³

and a surface area of 27.14 ha, formerly used for drinking water supply. From 1984 onwards, the site became a market gardening, pastoral and fish farming production area for local consumption through irrigated plots with a total area of 33 hectares. In addition, this project has enabled the restoration of wildlife ecosystems. Given its potential and the activities developed there, the basin plays a crucial role in poverty reduction strategies for the surrounding populations. Consequently, the evolution of the space and its various uses around the basin is a major concern for public authorities. To achieve the stated objective, high resolution satellite data and images from 1984, 2000, and 2016 were used. Auxiliary data (GPS surveys, topographic maps, interviews) were also employed. The maximum likelihood classification method, combined with mapping techniques, contributed to the characterization of the main spatial entities in the area (tree crops, water, market gardening, agricultural spaces, shrub savanna, bare soil, and built-up areas) using ArcGIS and ENVI software. The results revealed a strong dynamic in land cover classes. This dynamic is characterized by the conversion of bare soil, shrub savanna, and agricultural spaces into tree crops, market gardening, and built-up areas. During the same period, vegetation cover has significantly decreased in vitality, indicating a trend toward degradation. The values of the confusion matrix and the kappa coefficient confirm this situation. These results underscore the relevance of our approach.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 STUDY ENVIRONMENT

2.1.1 PRESENTATION OF WATERSHED

The Sébi-Ponty reservoir is located in the commune of Diamniadio, in the Rufisque department of the Dakar region (Fig. 1a). This commune is a crossroads town between Thiès, Mbour, and Dakar. It is undergoing significant transformation with the Diamniadio urban center project. The population is estimated at 23,547 inhabitants [27]. The Wolof and Fulani ethnic groups are among the inhabitants, often leading to conflicts between herders and market gardeners. The reservoir serves the villages of Sébi-Ponty, Déni Malick Guèye, Déni Diarkhath, Nguent, and Déni Babacar Diop. It was constructed in 1936 to supply drinking water to the teacher training college. With a water surface area of 27.14 ha, the basin's retention capacity is 512,000 m³, allowing for the irrigation of plots covering an area of 33 ha located upstream, downstream, left bank and right bank (Fig.1b).

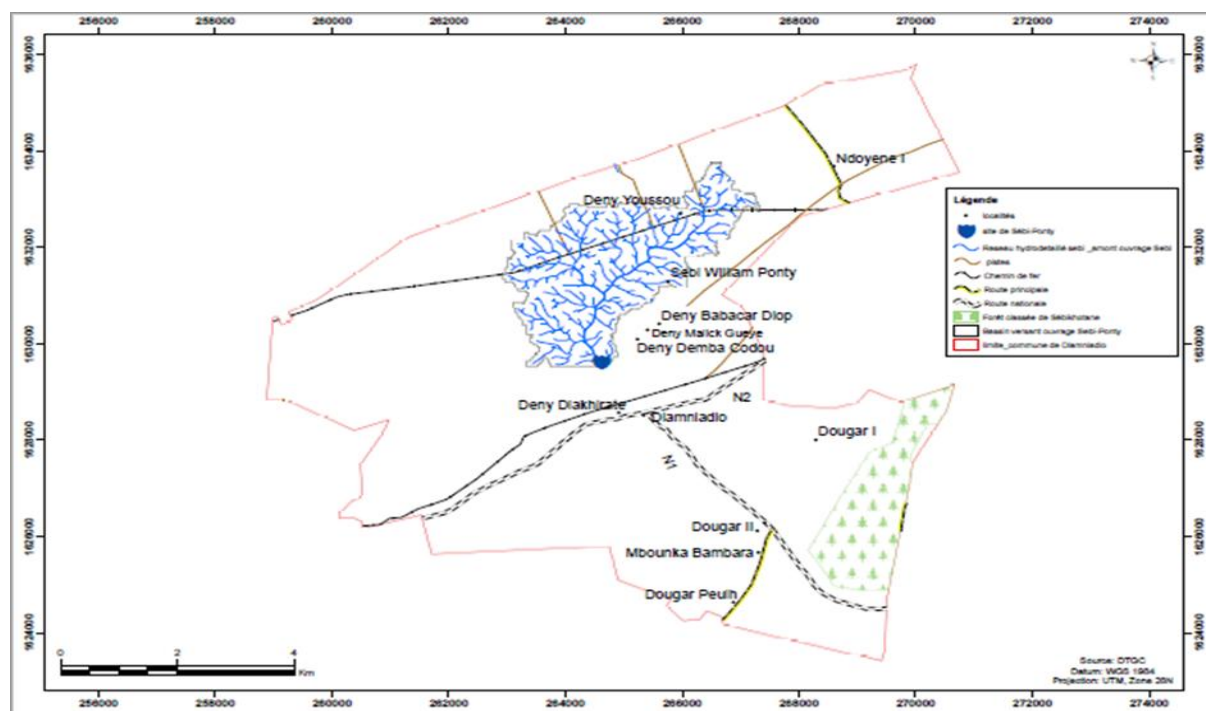


Fig. 1. a. Location of the Sébi-Ponty watershed

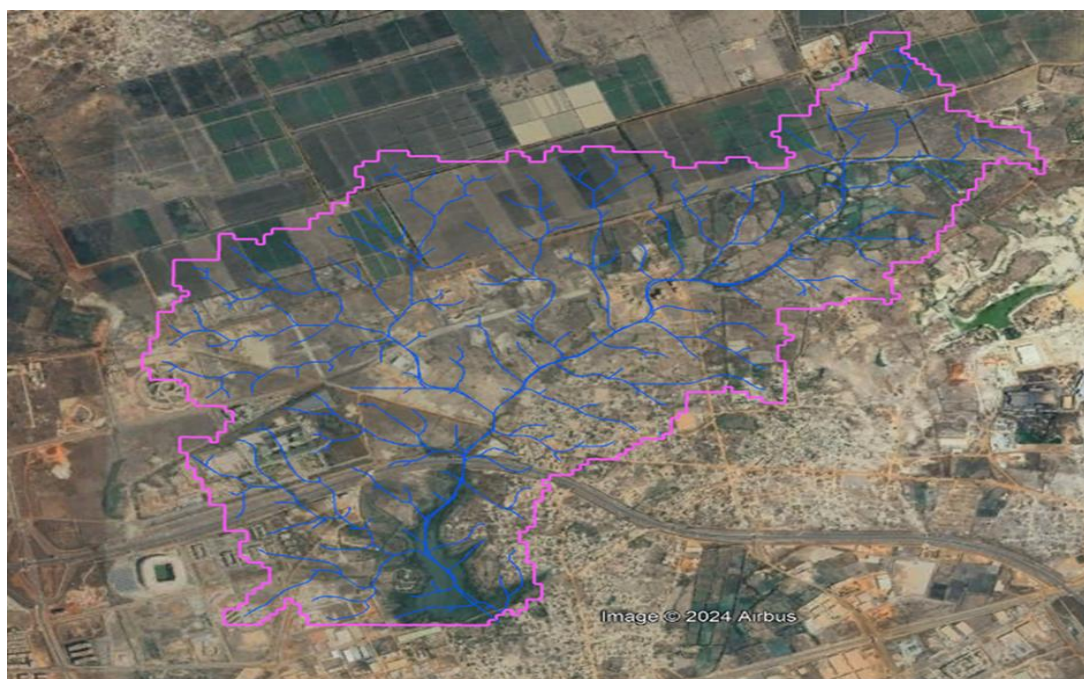


Fig. 1. b. Irrigation plots

2.1.2 PRESENTATION OF SOIL TYPES

In the Sébi-Ponty watershed, the soil units encountered are halomorphic soils, tropical ferruginous soils, hydromorphic soils, and calcimorphic soils (Fig. 2). Halomorphic soils cover a large part of the watershed, approximately 7.62 km² or 86.61%. These are saline soils whose formation is influenced by the presence of soluble salts (sodium and/or magnesium). Calcimorphic soils occupy 0.02 km² (0.24%). The Sébi-Ponty area belongs to the group of calcareous brown soils due to their calcium carbonate content, characterized by incomplete settling. In addition to these, there are deep pseudogley hydromorphic calcareous brown soils to the west of the perimeter. Tropical ferruginous soils cover approximately 0.70 km² or 7.94%, located west of the spillway and representing a small proportion compared to other soil types. These soils, developed on residual Quaternary dune formations, are sandy and rich in clay at depth. Hydromorphic soils cover approximately 0.20 km² or 2.24% (Table 1). These soils are suitable for several types of crops. The hydromorphic soils located downstream of the spillway are characterized by temporary waterlogging during certain periods of the year. These soils are suitable for various crops (orchards, market gardens).

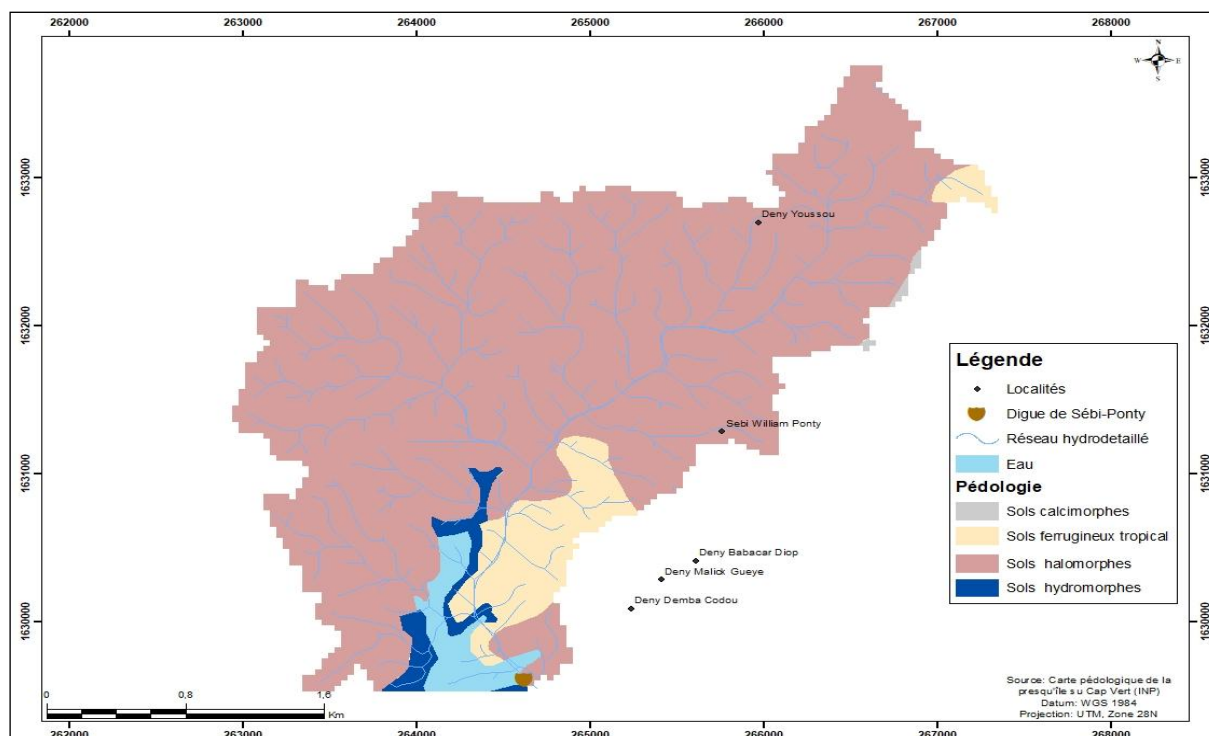


Fig. 2. Soil map of the watershed

Table 1. Area of soil units

Soil types	Partial area (Km ²)	Area (%)
Halomorphic soil	7,62	86,61
Calcimorphic soil	0,02	0,24
Water	0,26	2,97
Tropical ferruginous soil	0,70	7,94
Hydromorphic soil	0,20	2,24
TOTAL	8,8	100

2.1.3 PRESENTATION OF THE DIGITAL TERRAIN MODEL

Figures 3a and 3b respectively present the 3D Digital Terrain Model (DTM) of the Sébi-Ponty watershed and its map. The figures show that the topography decreases from north to south. The maximum elevation is 54.1 m, located in the north (upstream) and slightly in the center, and the minimum elevation is 22 m, specifically in the south (downstream) and slightly in the center. The total topographic difference is therefore 32.1 m.

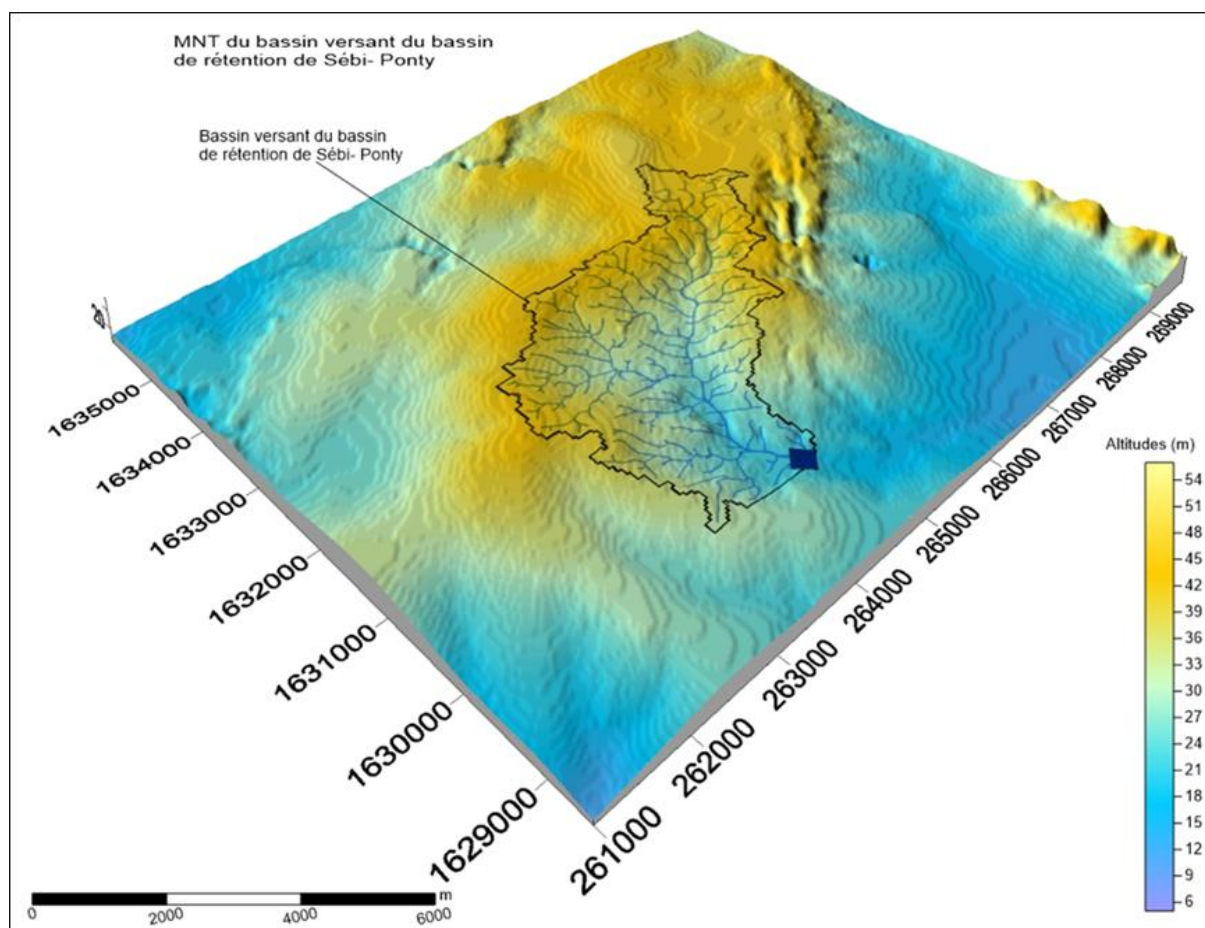


Fig. 3. a. 3D Digital Terrain Model (DTM)

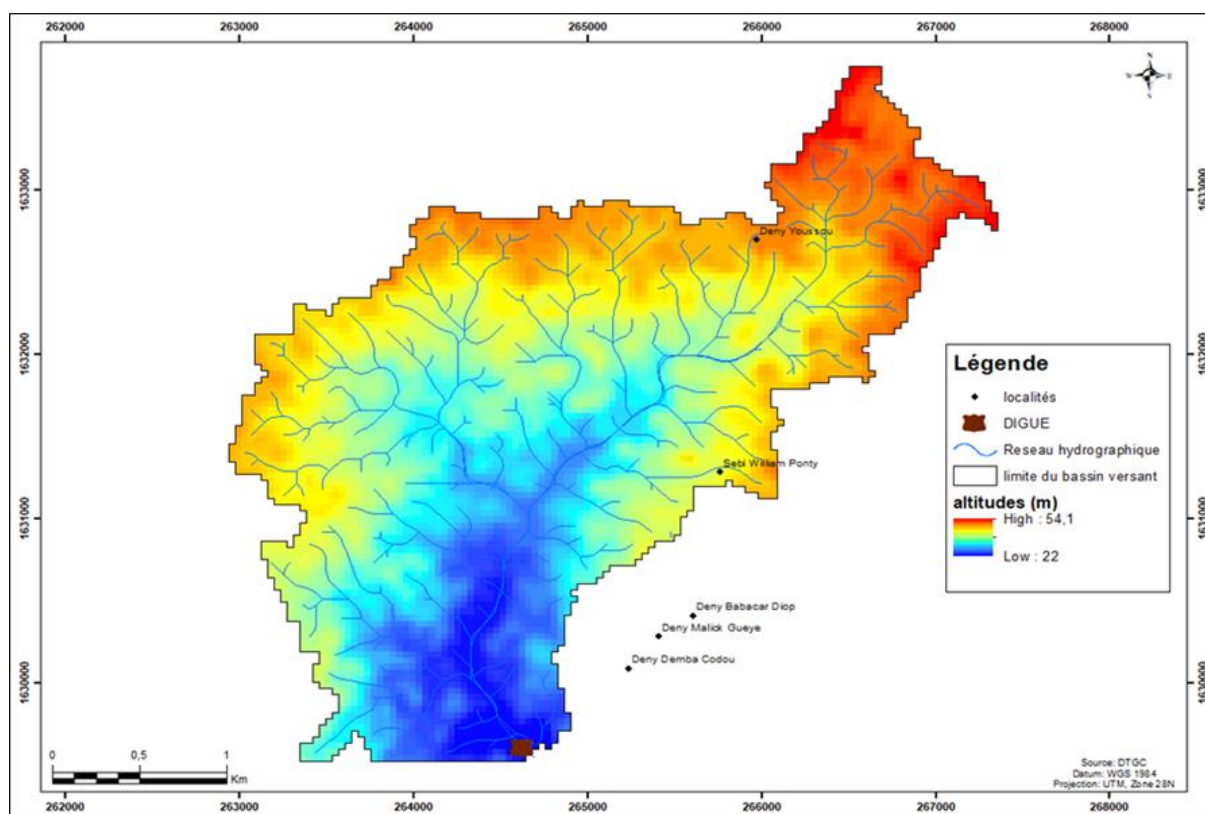


Fig. 3. b. Digital Terrain Model Map

2.1.4 PRESENTATION OF CHARACTERISTIC ALTITUDES

Table 2 presents the altitude variables and the 3D numerical elevation model of the Sébi-Ponty watershed. The maximum altitude represents the highest point in the watershed, while the minimum altitude represents the lowest point, generally at the outlet. These altitudes allowed us to determine the altitudinal range of the Sébi-Ponty watershed. The average altitude is $H_{moy} = 26$ m, which is lower than the median altitude $H_{med} = 30$ m. The average slope of the Sébi-Ponty watershed is therefore irregular. It is very steep upstream, where high terrain predominates, and becomes gentler downstream, where low plateaus and plains dominate.

Table 2. Altitude parameters of the Sébi-Ponty basin

Parameters	Symbols	Units	Value
Maximum altitudes	H_{max}	m	54,1
Minimum altitudes	H_{min}	m	22
Altitude at 5% of the total surface	$D_{5\%}$	m	49
Altitude at 95% of the total surface	$D_{95\%}$	m	28
Average altitude	H_{moy}	m	26
Median altitude	H_{med}	m	43

2.1.5 PRESENTATION OF THE DIGITAL ALTITUDE MODEL

Figures 4a and 4b respectively present the 3D Digital Elevation Model and its map. The areas between the contour lines are represented as different color classes, from the high altitude class, whose highest point is 54 m, to the low-altitude class, whose lowest point is 22 m. The DEM has four elevation bands equidistant from each other at 8 m intervals. The high-altitude areas are located in the north (upstream) and slightly in the center of the basin; the low altitude areas are located in the south (downstream) and slightly in the center. The relief is essentially dominated by stepped plateaus.

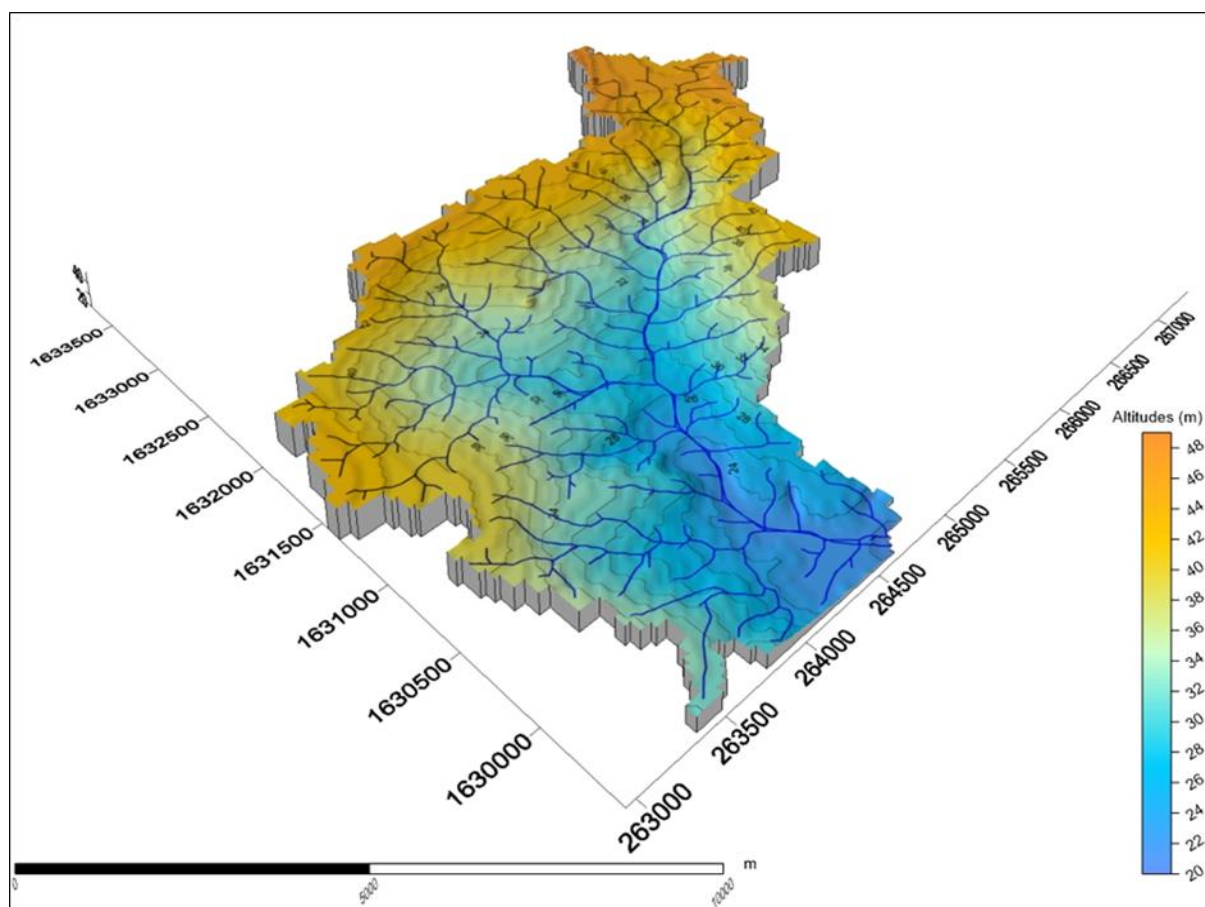


Fig. 4. a. 3D digital elevation model

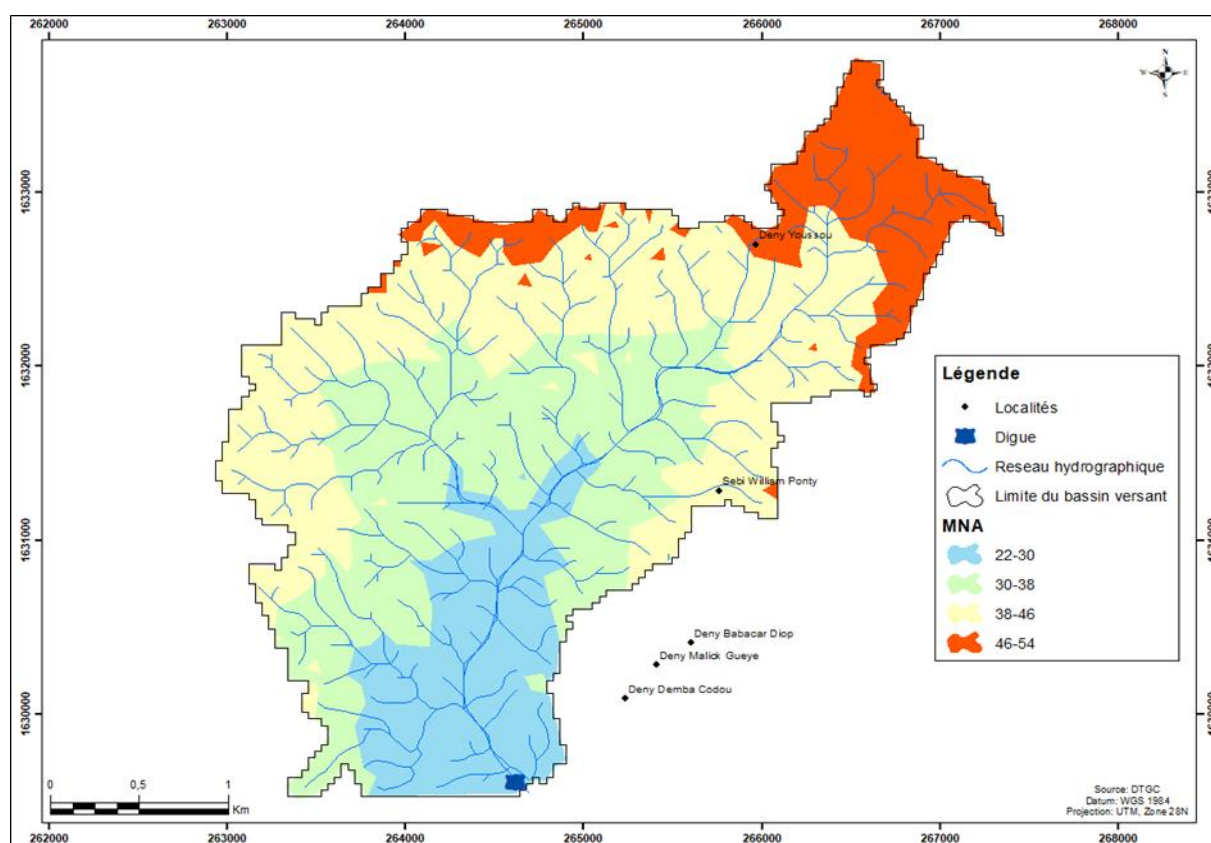


Fig. 4. b. Map Digital Elevation Model

2.2 DATA USED

In this study, we used satellite data and Landsat images from NASA (National Aeronautics and Space Administration) and the USGS (United States Geological Survey). We focused on the availability of high-resolution images of the site and the acquisition period. Therefore, the following dates were chosen: May 11, 1984, March 27, 2000, and April 9, 2016; the Sébi-Ponty site is located in scene 205-50. The year 1984 was characterized by drought, while 2000 saw a slight return of rainfall to normal levels. The images were selected during the dry season to minimize exaggerated vegetation cover due to herbaceous plant growth. The dates are characterized by ground cover related to the density of woody vegetation. Furthermore, another advantage of the dry season is the low cloud cover. Field observations of vegetation types and cultivated areas were carried out in November 2016. Auxiliary data (GPS surveys, 1/50000 topographic map, interviews with farmers) were obtained from fieldwork conducted between February and March 2016.

2.3 DATA EXPLOITATION

We processed the data using three procedures: preprocessing, georeferencing, visual interpretation, and pseudo-directed classification. The use of multi-date images necessitated atmospheric correction, as recommended by [28,29]. The images were geometrically corrected (georeferenced), and a calibration of the bands used for this purpose was performed. Image preprocessing, including calibration, color composite creation, and directional classification, relied on the capabilities of the ENVI software. According to [30], it is essential that the images used exhibit the most homogeneous characteristics possible so that differences resulting from their comparison are associated with actual changes in the state of the land. The creation of land cover and change maps was made possible using GIS tools such as ArcGIS. No radiometric correction was performed on any of the images used. To avoid discrepancies due to differences in Landsat sensors and to optimize image overlay for diachronic analysis, the 1984 and 2000 data were calibrated against the 2016 image, which served as a reference. This calibration was corrected using landmarks identified on the topographic map and GPS surveys collected in the field, allowing for necessary corrections to improve the maps. To detect changes over time, we initially used an unsupervised classification method to facilitate the selection of different land cover classes. In this study, seven classes were chosen and compared with external data providing information on the nature of land cover.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 LAND USE STATUS IN 1984

Figure 5a presents the 1984 land cover map. It shows significant vegetation cover, primarily shrub savanna, representing the largest land cover class with an area of 358.73 hectares, or 40.79% of the sub-watershed. In 1984, arboriculture and market gardening were already well-developed in the area. These two land cover units occupied 65.51 and 19.76 hectares, respectively. The construction of the watershed in 1936 allowed for water retention over an area of 10.45 hectares. This water retention facilitated the development of market gardening, especially during the dry season. Agricultural areas occupy the northern part of the sub-watershed with 247.77 hectares and constituted the second largest land cover unit in the sub-watershed in 1984.

3.2 LAND USE STATUS IN 2000

Figure 5b illustrates the distribution of land cover units in 2000. Spatial changes in the different units are evident. The area of agricultural land decreased by 5.12% of the sub-watershed. The same trend is observed for market gardening, the area of which decreased by 5.63 hectares, representing a loss of 1.64%. This decrease benefited arboriculture, which saw an increase of 254.42 hectares, or 28.93%, corresponding to an increase of 188.90 hectares, or 21.48%. The lack of water in 2000 was mainly due to the deterioration of the retention basin resulting from a lack of maintenance. Similar to arboriculture, the area of buildings also increased, while bare soil, shrub savanna, and agricultural land decreased.

3.3 LAND USE STATUS IN 2016

Figure 5c shows the spatial distribution of land use in 2016. The area of shrub savanna decreased by 5.33%. Concurrently, market gardening and arboriculture increased by 29.06 hectares and 10.32 hectares respectively, representing growth of approximately 3.30% for market gardening and 1.18% for arboriculture. The area of agricultural land decreased from 202.76 hectares in 2000 to 200.41 hectares in 2016, a reduction of 5.38%. The significant improvement in rainfall since the 2000s has greatly contributed to water retention in the retention basin. Thus, the increase in the area covered by water in 2016 (1.16%) reflects a positive impact of the retention basin rehabilitation. In conclusion, the overall trend in land use dynamics is progressive for arboriculture, which recorded a growth rate of 22.66%. Improved water resource availability in 2016 boosted market gardening by 2.66%.

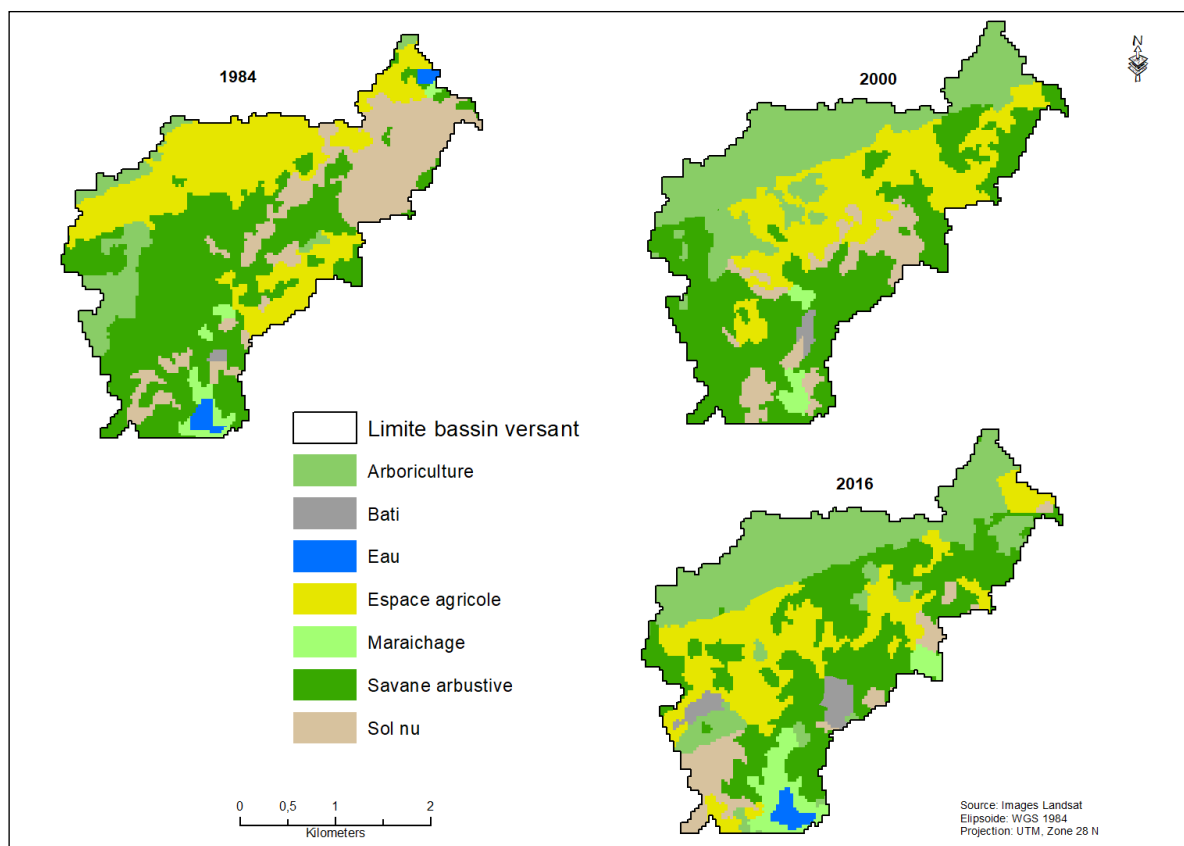


Fig. 5. Land use map of the Sébi-Ponty catchment area in 1984 (A), 2000 (B), 2016 (C)

3.4 EVOLUTION OF LAND USE UNITS

The results from the maximum likelihood directed classification were exported in vector format to ArcGIS software for final cartographic processing, specifically for layout and area calculation. Seven land cover classes were identified. Calculations performed on the land cover maps allowed for the determination of the area of each class during these years (Table 3). Analysis of the table shows that from 1984 to 2000, the area of agricultural land decreased by 5.12%. The same trend is observed for the market gardening class, whose area decreased by 5.63 hectares, representing a loss of 1.64%. This decrease benefited arboriculture, which saw an increase of 254.42 hectares, or 28.93%, corresponding to an increase of 188.90 hectares, representing a growth of 21.48%. The lack of water in 2000 was primarily due to the deterioration of the retention basin resulting from a lack of maintenance. Similarly, the area of shrub savanna decreased between 2000 and 2016, losing 5.33% of its surface area. Concurrently, market gardening and arboriculture increased by 29.06 hectares and 10.32 hectares respectively, representing growth of approximately 3.30% for market gardening and 1.18% for arboriculture. The area of agricultural land decreased from 202.76 hectares in 2000 to 200.41 hectares in 2016, a reduction of 5.38%. The significant improvement in rainfall since the 2000s has greatly contributed to water retention in the basin. Thus, the increase in the area covered by water in 2016 (1.16%) reflects a positive impact of the rehabilitation of the retention basin.

Table 3. Evolution of land use units

Land use classes	Area					
	1984		2000		2016	
	Hectare	%	Hectare	%	Hectare	%
Arboriculture	65,51	7,45	254,42	28,93	264,80	30,11
Built	2,25	0,26	5,95	0,68	23,41	2,66
Water	10,45	1,19		0,00	10,24	1,16
Agricultural area	247,77	28,17	202,76	23,05	200,41	22,79
Market gardening	19,76	2,25	14,13	1,61	43,19	4,91
Shrubby savannah	358,73	40,79	327,97	37,29	281,12	31,96
Bare ground	175,1	19,91	74,3	8,45	56,38	6,41
Total	879,55	100	879,55	100	879,55	100

3.5 LAND COVER CHANGE RATE

Figure 6 shows the land cover changes in the Sébi-Ponty sub-watershed from 1984 to 2016. Tree farming saw an increase of 22.66%. Improved water availability in 2016 boosted market gardening by 2.66%. Agricultural areas also experienced fluctuations in cultivated land, decreasing from 247.77 ha (28.17%) in 1984 to 200.41 ha (22.79%) in 2016, a reduction of 5.38%. Shrub savanna and bare soil also declined, by 8.82% and 13.50% respectively, while built-up areas increased by 2.41%.

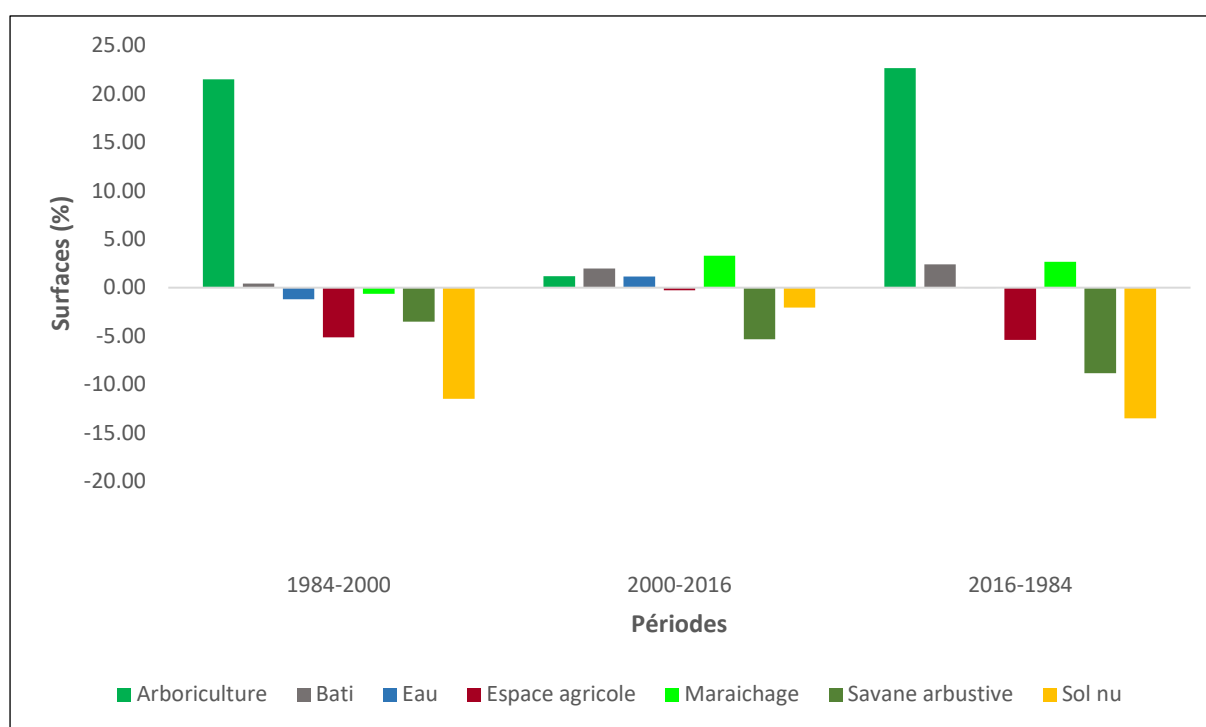


Fig. 6. Land cover change rates in the Sébi-ponty sub-watershed

3.6 VALIDATION OF LAND USE CLASSES

The validation of the results obtained by supervised classification from the training plots was carried out by determining confusion matrices and calculating Kappa coefficients. This operation made it possible to check the quality of the results obtained, to assess the potential risks of confusion, and to evaluate the ability to better differentiate land cover classes [31]. The results obtained from the confusion matrices are satisfactory, with accuracy percentages exceeding 84% and Kappa coefficients greater than 0.80 for all the processed images (Table 4). These results made it possible to identify the land cover classes with a different legend depending on the sub-watershed. The nomenclature and definitions of the vegetation cover classes are based on the nomenclature of [32, 33, 34, 35]

Table 4. Accuracy of Landsat image classification

Sub-basin \ Years	1984		2000		2010	
	Kappa	Precision	Kappa	Precision	Kappa	Precision
Sébi-Ponty	0.83	86 %	0.85	88 %	0.87	89 %

4 CONCLUSION

This study aims to contribute to the efficient assessment of landscape dynamics in the Sébi-Ponty watershed. Our objective is to determine the extent and changes in the land cover classes defined for this purpose. To achieve this, satellite data and high-resolution Landsat images from three dates: May 11, 1984, March 27, 2000, and April 9, 2016 were used. Auxiliary data (GPS surveys, topographic maps, and interviews with farmers) were also employed. The images were selected during the dry season to minimize over-representation of vegetation cover and to ensure low cloud cover. Color composite and directional classification, combined with geographic information systems, were used to determine land cover dynamics and changes in vegetation cover within the site. This work was made possible through the use of ArcGIS and ENVI software. The results obtained are consistent and revealing. In 1984, fruit growing and market gardening occupied 65.51 and 19.76 hectares respectively. The construction of the watershed in 1936 made it possible to retain water over an area of 10.45 hectares. This water retention facilitated the development of market gardening, especially during the dry season. Agricultural areas covered 247.77 hectares and constituted the second largest land use unit in the sub-watershed in 1984. In 2000, the area of agricultural land decreased by 5.12%, market gardening decreased by 5.63 hectares, a loss of 1.64%, while fruit growing increased by 254.42 hectares, or 28.93%, corresponding to an increase of 188.90 hectares, representing a rise of 21.48%. The lack of water in 2000 was due to the deterioration of the retention basin caused by a lack of maintenance. Overall, from 1984 to 2000, tree cultivation and built-up areas increased while bare soil, shrub savanna, and agricultural land declined. In 2016, shrub savanna decreased by 5.33%; market gardening and tree cultivation increased by 29.06 hectares and 10.32 hectares respectively, representing a 3.30%

increase for market gardening and a 1.18% increase for tree cultivation; agricultural land decreased by 2.35 hectares, or 5.38%. The increase in the area covered by water in 2016 (1.16%) reflects a positive impact of the retention basin rehabilitation. In summary, from 2000 to 2016, the overall trend in land-use dynamics was progressive for arboriculture, which recorded a growth rate of 22.66%. Improved water resource availability in 2016 boosted market gardening by 2.66%. Ultimately, the results obtained highlighted a significant spatial shift in land-use classes. These changes are characterized by an increase in arboriculture, market gardening, and buildings at the expense of bare soil, shrub savanna, and agricultural areas. During the same period, vegetation cover has considerably declined, indicating a trend toward degradation. The results obtained from the confusion matrices are satisfactory, with accuracy rates exceeding 84% and kappa coefficients greater than 0.80 for all processed images, validating our results even though we are aware of the limitations of our approach, which does not account for changes in climatic conditions. Therefore, to ensure the validity of the identified changes, it will be necessary to study other sectors and remote sites. Whatever the outcome, continuous monitoring of land cover class transformations appears important for defining environmental management programs adapted to local realities. The results would allow stakeholders to measure the impacts of their operations and find the best ways to rehabilitate degraded areas. In this regard, we recommend the establishment of an observatory dedicated to this issue.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to sincerely thank NASA (National Aeronautics and Space Administration) and USGS (United States Geological Survey) for making their satellite data and image extraction sites freely accessible.

REFERENCES

- [1] V. M. Faye, C. Mbow, A. Thiam, « Évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol entre 1973 et 2010 dans la zone agropastorale du lac de Guiers (Sénégal) », *Vertigo, la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol.16, no.1, pp. 1-14, 2016.
- [2] L.D. Gildas, H.S.T.Vodounon and N.E. Kinzo, « Dynamique de l'occupation du sol et evolution des terres agricoles dans la commune de sinende au nord-benin », *Cahiers du CBRST / Cahiers du CBRSI*, vol. 9, pp.101-121, 2016.
- [3] J.D.D.M. Mokoso, B.N. Asimbo et M.R. Ekele, « Regards sur les impacts environnementaux de projet d'exploitation minière semiindustrielle dans le bassin du Congo. Cas de la rivière Aruwimi (territoire de Basoko, RD Congo) », *European Scientific Journal*, vol. 17, no. 29, pp. 328-363, 2021.
- [4] S. S.Traore, S. Dembele, D. Dembele, N. Diakite and C. H.Diakite, « Land use dynamics and vegetal cover trajectory around three mining sites in Southern Mali between 1988 and 2019 », *Physio-Géo*, vol. 17, pp. 151-166, 2022.
- [5] I. THIAW, « Characterization of land use and aquatic plant dynamics in the Senegal River Delta using Remote Sensing and Geographic Information Systems », *Environmental and Water Sciences*, vol.6, no.4, pp. 894- 902, 2022.
- [6] J. Obodai, K.A. Adjei, S.N. Odai and M. Lumor, « Land use/land cover dynamics using Landsat data in a gold mining basin the Ankobra, Ghana. Remote Sensing Applications », *Society and Environment*, vol. 13, pp. 247-256, 2019.
- [7] S.S.Traore, T.Landmann, E.K. Forkuo et P.C.S. Traore, « Assessing longterm trends in vegetation productivity change over the Bani river basin in Mali (West Africa) », *Journal of Geography and Earth Sciences*, vol.2, no.2, pp. 21-34, 2014.
- [8] S.S.Traore, E.K.Forkuo, P.C.S.Traore et T. Landmann, « Assessing the interrelationship between vegetation productivity, rainfall, population and land cover over the Bani River Basin in Mali (West Africa) », *IOSR Journal of Engineering*, vol. 5, no. 6. pp. 10-18, 2015.
- [9] J.A. Larapulido, A. Guevarasangines et C.A. Martelo, « A meta-analysis of economic valuation of ecosystem services in Mexico », *Ecosystem Services*, vol. 31, partie A, pp. 126-141, 2018.
- [10] I.R. Orimoloye et O.O. Ololade, « Spatial evaluation of land-use dynamics in gold mining area using remote sensing and GIS technology », *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17, pp. 4465-4480, 2020.
- [11] S.Thiam, « Suivi des écosystèmes sahéliens à partir de la télédétection satellitaire application au delta intérieur du Niger (Mali) et à la région du lac de Guiers (Sénégal) », Thèse de doctorat en Géographie, Université de Paris-I-Panthéon, 187 p., 1997.
- [12] E. F. Lambin, B. L. Turner, H. Geist, S. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruc, O.T. Coomes, R. Dirzo and al., « The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths », *Global Environmental Change*, vol.11, pp. 261-269, 2001.
- [13] A. Bebbington, L. Hinojosa, D.H.Bebbington, M.L. Burneo Et X. Warnaaars, « Contention and ambiguity: mining and the possibilities of development », *Development and Change*, vol. 39, no.6, pp. 887-914, 2008.
- [14] G.M. Mudd, « Global trends and environmental issues in nickel mining: sulfides versus laterites », *Geology Reviews*, vol. 38, no.12, pp. 9-26, 2010.
- [15] M. A. Sarr, « Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le Nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat », *Cybergeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, vol.472. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.22707>, 2009.
- [16] Z.Q. Hu et T. Chen, « ERDAS aided extraction of vegetation fraction from remote sensing information in coalmine area based A case study of Shenfu coalmine », *Journal of Northwest Forestry University*, vol. 23, no.2, pp. 164-167, 2008.
- [17] X.Liu, W.Zhou et Z.Bai, « Vegetation coverage change and stability in large openpit coal mine dumps in China during 1990-2015 », *Ecological Engineering*, vol. 95, pp. 447-451, 2016.

- [18] Y.U. Sikuzani, S.Boisson, S.C. Kaleba, C.N. Khonde, F. Malaisse, J.M.Halleux, J. Bogaert Et F.M. Kankumbi, «Dynamique de l'occupation du sol autour des sites miniers le long du gradient urbain rural de la ville de Lubumbashi, RD Congo», *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, vol. 24, no.1, pp. 1-14,2020.
- [19] M. Thériault, I. Sparfel, f. Gourmelon, and I.L. Berre, «Modélisation des changements d'occupation et d'utilisation du sol. Cadres formels et exemple d'application», *Revue internationale de géomatique*, vol. 21, no. 3, pp. 267-295,2011.
- [20] S. Guèye, «Étude de l'évolution de la région du lac de Guiers: apports de la télédétection au suivi du milieu», *Mémoire de Maîtrise, Section de géographie, UFR de Lettres et Sciences Humaines, Université Gaston Berger de Saint Louis*, 1999.
- [21] M. J. Y. D.Sarr, «Caractérisation des sols de la zone du lac de Guiers par télédétection et analyses de laboratoire», *Mémoire de DEA, Institut des Sciences de l'Environnement, Université Cheikh Anta Diop de Dakar*, 84 p., 2005.
- [22] L. Touré and D. Dieng, «Apports du Système d'information géographique (SIG) dans la gouvernance foncière des communautés rurales du Sénégal. Exemple du cas de Keur Momar Sarr», *RGLL*, 8, pp. 34-45, 2010.
- [23] D.Lu Et Q.Weng, «A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no.5, pp. 823-870,2007.
- [24] G.F.Yao, D. Baka, N.K.Y. Kouakou, B.M. Ouattara, K. Amani, J.L.Esehi, B. Kouame and A. Y. Kouame, «Contribution of GIS to Soil Landscape Mapping by Multi-Criteria Analysis Using Weighting: The Case of the Square Degrees of M'Bahiakro (Centre) and Daloa (Centre-West) in Ivory Coast», *Open Journal of Geology*, vol. 14, 101-116, 2024.
- [25] A. Madasa, I.R. Orimoloye Et O.O. Ololade, «Application of geospatial indices for mapping land cover/use change detection in a mining area», *Journal of African Earth Sciences*, vol. 175, pp. 104-108. 2021.
- [26] M.A. Kamga, S.C. Nguemhe, M.O. Ayodele, C.O. Olatubara, S. Nzali, A. Adenikinju and M. Khalifa, «Evaluation of land use/land cover changes due to gold mining activities from 1987 to 2017 using Landsat imagery, East Cameroon», *Geo Journal*, vol. 85, pp. 1097-1114, 2019.
- [27] ANSD, «Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2013».
- [28] J.M. Lamachère et C. Puech, «Télédétection, cartographie des états de surface et modélisation hydrologique», In ORSTOM (réd.) *Actes de l'atelier FAO. Montpellier*, 55 p., 1996.
- [29] R. Richter,«Correction of atmospheric and topographic effects for high spacial resolution satellite imagery», *International Journal of remote sensing*, Academic Press Inc., New York, 245 p., 1997.
- [30] Y.Moisan, M.Bernier et J.M.M.Dubois, «Détection des changements dans une série d'images ERS-1 multitudes à l'aide de l'analyse en composantes principales», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no.6, pp.1149-1167,1999.
- [31] M.C.Girard et C.Girard, «Traitement de données de télédétection», Paris, Edition Dunod, 529 p., 1999.
- [32] A.M. Aubreville, «Accord à Yangambi sur la nomenclature des types de vegetation Bois et Foret des Tropique», 51, pp.23-27,1956.
- [33] J.L.Trochain, «Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique Tropicale», *Bulletin de l'Institut d'Etude Centrafricaines*, Nouvelle série, no. 13- 14, pp. 55-93, 1957.
- [34] J.G. Adam «Contribution à l'étude de la flore de la végétation de l'Afrique Occidentale la Basse Casamance: deuxième partie», - *Bull. IFAN*, sér. 1 – 25, p. 116- 167,1962.
- [35] T. Monod. «Après Yangambi (1956): Note de phytogéographie Africaine», *Bulletin de l'Institut Français d'Afrique Noire*. Tome XXV, série A no. 2, pp. 215-265, 1963.

APPENDIX

OVERVIEW OF THE RETENTION BASIN



Évaluation des connaissances des femmes enceintes vues lors du suivi prénatal sur la nutrition maternelle à Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

[Assessment of Pregnant Women's Knowledge on Maternal Nutrition During Antenatal Care in Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)]

Bassirou Doussa¹, Boubacar Savadogo², Bamory Ouattara³, and Anne Lise Viviane Toe⁴

¹Prowess University, 16192 Coastal Highway Lewes, DE 19958 State of Delaware, USA

²Institut de Recherche en Sciences de la Santé (IRSS), 03 BP 7192 Ouagadougou 03, Burkina Faso

³Université Nazi Boni, 01 BP 1091, Bobo Dioulasso 01 Burkina Faso

⁴Direction de la santé de la famille, 03 BP 7009 Ouagadougou, Burkina Faso

Copyright © 2026 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: Malnutrition, particularly among pregnant women, represents a major public health challenge in Burkina Faso due to its negative impacts on maternal and child health. This study aimed to analyze the level of knowledge of pregnant women attending antenatal care (ANC) regarding maternal nutrition. It specifically assessed their knowledge of the three food groups, the principles of a balanced diet, the consequences of malnutrition during pregnancy, and iron–folic acid supplementation. This was a quantitative, cross-sectional, and descriptive study with prospective data collection, conducted from March 1 to April 30, 2024, at the Guimbi Ouattara Primary Health Care Center (CSPS) in Bobo-Dioulasso. Data were collected using the Kobocollect application and analyzed with SPSS and Excel software. A composite indicator, the Maternal Nutrition Knowledge Index (MNKI), based on five domains, was developed to facilitate the analysis and interpretation of the results. The findings indicate a moderate overall level of maternal nutrition knowledge, with a global MNKI of 62.8%. Although most participants demonstrated good practical skills in composing a balanced meal, significant gaps remain regarding the identification of food groups, the recommended duration of iron–folic acid supplementation during the postpartum period, and the understanding of the consequences of inadequate nutrition during pregnancy. Women with no formal or low educational attainment, those living outside the health facility catchment area, and primigravidae in early pregnancy emerged as the most vulnerable groups, highlighting the need to strengthen targeted nutrition education and behavior change communication interventions.

KEYWORDS: knowledge, maternal nutrition, pregnant women, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

RESUME: La malnutrition chez la femme enceinte constitue un enjeu majeur de santé publique au Burkina Faso en raison de ses impacts négatifs sur la santé maternelle et infantile.

Cette étude avait pour objectif d'analyser le niveau de connaissances des femmes enceintes bénéficiant de soins prénatals (SPN) sur la nutrition maternelle. Elle s'est intéressée à leur connaissance des trois groupes d'aliments, des principes d'une alimentation équilibrée, des conséquences d'une malnutrition au cours de la grossesse ainsi que de la supplémentation en fer + acide folique (FAF).

Il s'est agi d'une étude quantitative, transversale et descriptive à collecte prospective, réalisée du 1er mars au 30 avril 2024 au Centre de Santé et de Promotion Sociale (CSPS) Guimbi Ouattara de Bobo-Dioulasso. Les données ont été recueillies au moyen

de l'application Kobocollect, puis analysées à l'aide des logiciels SPSS et Excel. Un indicateur composite, l'Indice des Connaissances en Nutrition Maternelle (ICNM), reposant sur cinq domaines a été élaboré.

Les résultats indiquent un niveau moyen de connaissances nutritionnelles, avec un ICNM global de 62,8 %. Bien que la majorité des participantes aient démontré une bonne capacité pratique à composer un repas équilibré, d'importantes lacunes persistent concernant l'identification des groupes d'aliments, la durée recommandée de la supplémentation en FAF dans le post-partum et la compréhension des conséquences d'une alimentation inadéquate pendant la grossesse. Les femmes non scolarisées ou faiblement instruites, celles vivant hors de l'aire sanitaire et les primigestes en début de grossesse apparaissent comme les groupes les plus vulnérables, soulignant la nécessité de renforcer des interventions ciblées d'éducation nutritionnelle et de communication pour le changement de comportement.

MOTS-CLEFS: connaissances, nutrition maternelle, femmes enceintes, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

1 INTRODUCTION

La grossesse, également appelée gestation humaine, est un état physiologique caractérisé par la présence et le développement d'un embryon ou d'un fœtus dans l'utérus. Elle débute généralement à partir de la dernière période menstruelle et se poursuit jusqu'à l'accouchement. Chez l'être humain, sa durée moyenne est d'environ 40 semaines, soit un peu plus de neuf mois (Merger, 2001).

Elle est caractérisée par une adaptation de l'organisme maternel favorisant un développement optimal du fœtus et en vue de l'allaitement (Ayoubi, 2012).

Cette adaptation est variable en fonction de l'âge gestationnel et est en rapport avec les variations hormonales et la croissance fœtale, son but principal étant le bon déroulement de la grossesse. Il est donc de rigueur d'observer une alimentation équilibrée et diversifiée, car le déséquilibre alimentaire, pourrait conduire à la malnutrition qui constitue un problème important pour la santé des populations dans le monde avec de conséquences diverses aussi bien pour la mère que pour le fœtus et l'enfant (Ayoubi, 2012).

Malheureusement selon un rapport de l'ONU, le nombre de femmes enceintes et de mères allaitantes souffrant de malnutrition aiguë a augmenté de 25,45% entre 2020 et 2022 dans 12 pays à « l'épicentre de la crise alimentaire mondiale » (ONU, 2023). Ce rapport note qu'entre 2020 et 2022, le nombre de femmes enceintes ou allaitantes souffrant de malnutrition aiguë est ainsi passé de 5,5 à 6,9 millions, dans 12 pays.

Ces 12 pays (l'Afghanistan, le Burkina Faso, l'Éthiopie, le Kenya, le Mali, le Niger, le Nigéria, la Somalie, le Soudan, le Soudan du Sud, le Tchad et le Yémen) constituent « l'épicentre de cette crise nutritionnelle ». L'étude qui s'est essentiellement basée sur l'analyse de données relatives à l'insuffisance pondérale et à l'anémie dans presque tous les pays, estime que plus d'un milliard de femmes et d'adolescentes dans le monde souffrent de dénutrition, de carences en micronutriments essentiels et d'anémie.

Dans les pays en développement, environ 2 milliards de personnes constituées essentiellement des femmes et des enfants souffrent de carence alimentaire provoquée par l'absence d'un ou plusieurs micronutriments importants (ONU, 2023).

L'Asie du Sud et l'Afrique subsaharienne concentrent 68% des femmes et adolescentes présentant un poids insuffisant et 60% de celles souffrant d'anémie (UNICEF, 2020).

En Afghanistan, environ 71% des femmes enceintes souffrent d'anémie (Abdelhakh, 2019).

En Afrique au sud du Sahara, plus de 20% de mortalité maternelles post – natales sont dues à la carence en fer (Abdelhakh, 2019).

Au Burkina Faso, malgré l'amélioration continue des indicateurs de santé, la mortalité maternelle et néonatale reste élevée, et les statistiques sur l'état nutritionnel indiquent que la dénutrition est très répandue chez les femmes et les enfants.

Selon l'EDS 2010, 16 % des femmes en âge de procréer étaient sous-alimentées (IMC <18,5kg/m²), et 58 % des femmes enceintes étaient anémiques. La prévalence de l'insuffisance pondérale à la naissance (14 %) et du retard de croissance chez les moins de cinq ans (33 %) reste élevée. (ALIVE AND THRIVE, 2021) Tout ceci met en évidence la nécessité de renforcer les interventions nutritionnelles fournies pendant la grossesse en vue d'optimiser l'équilibre nutritionnel.

C'est ainsi qu'en 2017, le Burkina Faso a intégré les recommandations de l'OMS pour améliorer la santé maternelle et infantile, notamment en révisant les politiques de santé reproductive afin d'y inclure la nutrition maternelle dans les services SRMNIA (Ministère de la santé-BF, 2021).

Dans les Hauts-Bassins, le déficit de compétences des agents de santé sur l'éducation nutritionnelle et les lacunes organisationnelles compromettent la qualité du dépistage, de la prise en charge nutritionnelle et de la promotion de la nutrition maternelle (Plan d'action-DRSHP/HB, 2022).

Au District Sanitaire de DAFRA, les indicateurs montrent une amélioration de la nutrition infantile entre 2020 et 2021, tandis que les efforts en nutrition maternelle demeurent insuffisamment consolidés (Plan d'action -DS/DFR, 2023).

La surveillance nutritionnelle au CSPA de GUIMBI OUATTARA rencontre des insuffisances dans le dépistage et la prise en charge, malgré l'intégration de la nutrition maternelle dans les outils de soins prénatals (Plan d'action -CSPA/G, 2024).

Cette étude a pour objectif d'évaluer les connaissances des femmes enceintes vues en SPN au CSPA Guimbi Ouattara de Bobo Dioulasso sur la nutrition maternelle.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 TYPE D'ÉTUDE

Il s'est agi d'une étude quantitative, transversale à visée descriptive et à collecte prospective des données.

2.2 POPULATION D'ÉTUDE/ CRITÈRES D'INCLUSION ET DE NON-INCLUSION

La population d'étude était composée des femmes enceintes quel que soit l'âge de la grossesse.

Il fallait être physiquement présente au moment de l'enquête et accepter volontairement et librement de participer à l'étude. Les femmes porteuses d'une grossesse pathologique n'ont pas été incluses.

2.3 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE/ÉCHANTILLON

2.3.1 DÉTERMINATION DE LA TAILLE DE L'ÉCHANTILLON

La table de Krejcie et Morgan construite à partir de la formule ci-après a été utilisée, pour obtenir la taille de l'échantillon.

$$S = \frac{X^2 NP (1-P) + d^2 (N-1) + X^2 P (1-P)}{d^2}$$

S = Taille de l'échantillon

X^2 = la Valeur du tableau du Chi carré pour 1 degré de liberté au niveau de confiance souhaité (3, 841)

N = Taille de la population

P = la proportion de la population (supposée être de 50 car cela fournirait la taille maximale de l'échantillon)

d = degré de confiance (0,05)

La population d'étude (femmes enceintes) (N) s'est fondée sur les grossesses attendues dans l'aire sanitaire du CSPA Guimbi Ouattara qui est de **830** et la taille de l'échantillon obtenue a été n = **265**.

2.3.2 ÉCHANTILLONNAGE

Il a été procédé à un tirage aléatoire simple sans possibilité de remise jusqu'à l'obtention des 265 femmes venues dans la structure pour des soins prénatals au cours de la période du 1^{er} mars au 30 avril 2024 et ayant marqué leur accord pour la participation à l'étude.

2.4 COLLECTE ET ANALYSE DES DONNÉES (TECHNIQUE, OUTILS, PÉRIODE, RECRUTEMENT)

La méthode de collecte des données a été l'enquête et la technique d'entretien a été utilisée avec un questionnaire adressé aux femmes enceintes lors des SPN. Les données ont été collectées à l'aide de l'application Kobocollect.

L'analyse des données a été faite à l'aide du logiciel SPSS et Microsoft Excel et ont été présentées sous forme de textes, tableaux et graphiques. Elle a apprécié et évalué les connaissances des femmes enceintes en nutrition maternelle pour un équilibre nutritionnel au cours de la grossesse.

Un indicateur composite « ICNM » (Indice des Connaissances en Nutrition Maternelle) sur la base de cinq domaines a été construit: (A) groupes d'aliments, (B) alimentation équilibrée, (C) fréquence des repas, (D) supplémentation fer+acide folique (FAF), (E) connaissances des conséquences pour améliorer la lisibilité et l'interprétation des résultats avec les seuils suivants: « faible < 50% », « moyen 50–75% », « bon > 75% ».

Une analyse multivariée a été réalisée afin d'identifier les facteurs associés à une faible connaissance nutritionnelle chez les femmes enceintes. Les variables dépendantes étaient:

- Domaine A: connaissance des groupes d'aliments (faible si score <50%)
- Domaine C: fréquence des repas (faible si score <50%)
- Domaine D: supplémentation fer + acide folique (faible si score <50%)
- ICNM global: indicateur composite des connaissances (faible si <50%)

Les variables explicatives incluaient: âge (catégories), niveau d'instruction, résidence (dans/hors aire sanitaire), statut matrimonial, parité/gestité et âge gestationnel.

Des régressions logistiques binaires ont été utilisées pour chaque domaine et une régression linéaire pour l'ICNM continu. Les résultats ont été exprimés en Odds Ratios (OR) ajustés avec IC à 95%.

2.5 ASPECTS ÉTHIQUES

L'obtention des autorisations auprès des autorités administratives de l'aire sanitaire a été obtenue. Tous les participants à l'étude ont bénéficié des garanties de confidentialité, d'anonymat et de non-discrimination. L'obtention du consentement libre et éclairé a été requis pour tous les participants.

3 RESULTATS

3.1 NIVEAU DE PARTICIPATION À L'ÉTUDE

Le niveau de participation a été satisfaisant. Pour une cible attendue de 265 gestantes, nous avons enregistré 270 enquêtées.

3.2 CARACTÉRISTIQUES SOCIO-DÉMOGRAPHIQUES

Les femmes enquêtées étaient âgées de 16 à 54 ans (moyenne: 27,2 ans), résident majoritairement hors de l'aire sanitaire (74,8%), dont 25,2% dans les secteurs 4 et 5. Parmi elles, 90% vivent en union (78,1% en monogamie, 2,6% en polygamie, 9,3% en concubinage), 9,6% sont célibataires et 0,4% veuves. Sur les 270 femmes enceintes interrogées, 9,6% sont sans instruction, 16,7% ont une éducation non formelle, 5,6% ont suivi l'enseignement franco-arabe, et 68,2% ont un niveau post-primaire ou plus, dont 5,2% universitaire.

3.3 ANTÉCÉDENTS OBSTÉTRICAUX

Parmi les femmes enquêtées, 34,4 % vivaient leur première grossesse, tandis que 26,3 % en étaient à leur deuxième, et 3,3 % à leur sixième. La gestité moyenne était de 2,45, avec des valeurs allant de 1 à 6, et un écart type de 1,457. Concernant la parité, 35,6% n'avaient jamais accouché, 25,6 % avaient au moins un accouchement, et 3,3 % en étaient à leur sixième accouchement. La parité moyenne était de 1,43, avec des extrêmes de 1 à 5, et un écart type de 1,459. L'âge gestationnel moyen des grossesses en cours était de 5,40 mois, avec des extrêmes de 1 à 9 mois, et un écart type de 2,137.

Le tableau n° 1 résume la gestité, la parité et l'âge gestationnel des enquêtées.

Tableau 1. Répartition des enquêtées selon les antécédents obstétricaux (gestité, parité, âge gestationnel)

Unité	Gestité		Parité		Age de la grossesse	
	Fréquence	Pourcentage %	Fréquence	Pourcentage %	Fréquence	Pourcentage%
0	NA	NA	96	35,6	NA	NA
1	93	34,4	69	25,6	3	1,1
2	71	26,3	37	13,7	22	8,1
3	38	14,1	37	13,7	32	11,9
4	36	13,3	22	8,1	48	17,8
5	23	8,5	9	3,3	35	13
6	9	3,3	0	0	44	16,3
7	0	0	0	0	27	10
8	0	0	0	0	35	13
9	0	0	0	0	24	8,9
Total	270	100	270	100	270	100

3.4 CONNAISSANCES DES FEMMES ENCEINTES SUR LA NUTRITION MATERNELLE

3.4.1 CONNAISSANCES SUR LES TROIS GROUPES D'ALIMENTS

3.4.1.1 NOMBRE DE GROUPES D'ALIMENTS

Sur la connaissance des trois groupes d'aliments, 34,4% des enquêtées ont pu donner une réponse exacte, 60% ont déclaré ne pas en connaître et 5,6% ont donné une réponse incorrecte.

3.4.1.2 EXEMPLES D'ALIMENTS PAR GROUPE

Il s'est agi pour les enquêtées ayant énuméré les trois groupes d'aliments d'en citer au moins deux exemples par groupe d'aliments.

Sur les 93 enquêtées ayant correctement répondu à la question sur les trois groupes d'aliments, 32,20% (respectivement 23,60% pour deux exemples et 8,60% pour trois et plus) ont pu donner au moins deux exemples par groupes d'aliments, 62,40% ont déclaré ne pas en connaître.

3.4.2 CONNAISSANCE SUR L'ÉQUILIBRE NUTRITIONNEL

3.4.2.1 ALIMENTATION ÉQUILIBRÉE

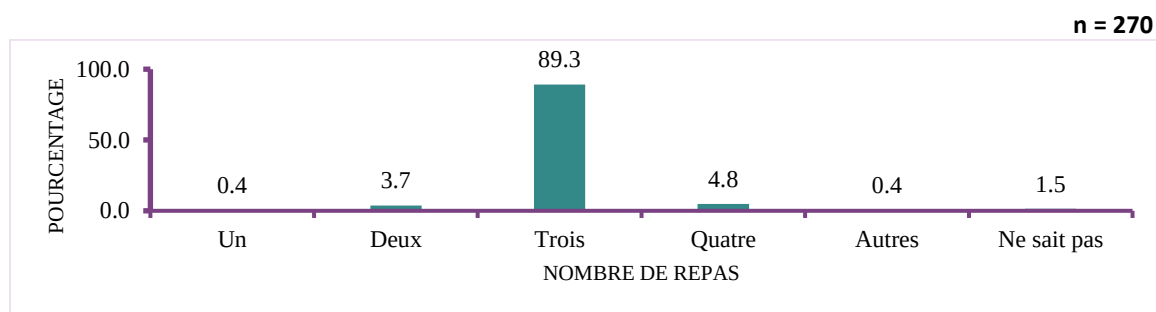
Il a été demandé à chaque enquêtée de composer un mets équilibré à partir d'aliments locaux disponibles dans la localité et en références aux trois groupes ci-dessus décrits. Chaque met devrait obligatoirement comporter au moins un aliment énergétique ou de force + un aliment de construction ou de croissance + un aliment protecteur.

Sur l'ensemble des enquêtées, 88,90% ont pu correctement composer un mets complet à partir des aliments locaux disponibles dans leur terroir et 9,2% ont déclaré ne pas en savoir.

3.4.2.2 NOMBRE DE REPAS QUOTIDIEN RECOMMANDÉ

Sur le nombre de repas quotidien recommandés, 89,3% des enquêtées ont correctement répondu à la question.

Le graphique 1 répartit les enquêtées selon leur connaissance du nombre de repas quotidien recommandé.

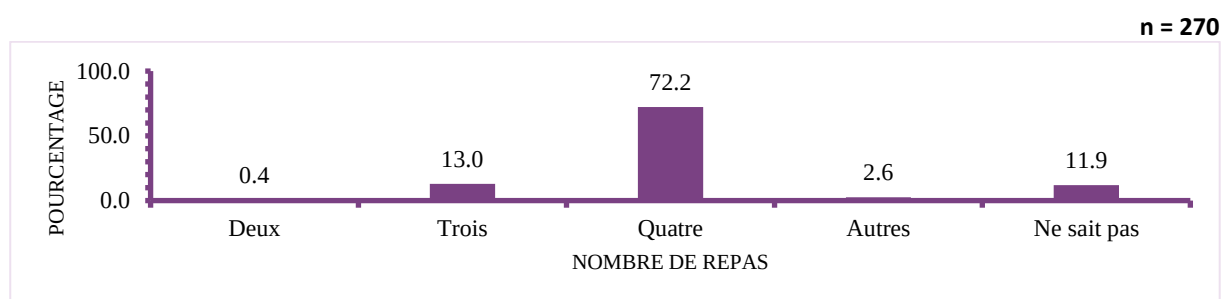


Graphique 1. Répartition des enquêtées selon la connaissance du nombre de repas quotidien recommandé.

3.4.2.3 NOMBRE DE REPAS QUOTIDIEN RECOMMANDÉ CHEZ LA FEMME ENCEINTE

En ce qui concerne le nombre de repas quotidien recommandés chez la femme enceinte, 72,2% des enquêtées ont donné une réponse correcte, 13% ont donné une réponse incorrecte et 11,9% ont déclaré ne pas en connaître.

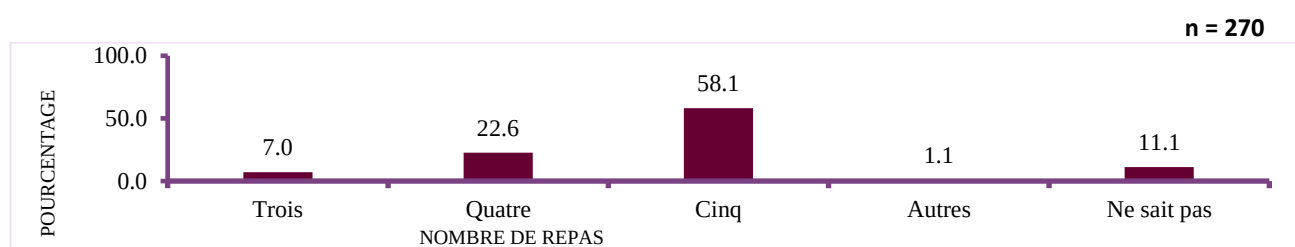
Le graphique 2 répartit les enquêtées selon leur connaissance du nombre de repas recommandés au cours de la grossesse.



Graphique 2. Répartition des enquêtées selon la connaissance du nombre de repas quotidien recommandés au cours de la grossesse

3.4.2.4 NOMBRE DE REPAS QUOTIDIEN RECOMMANDÉ CHEZ LA FEMME ALLAITANTE

Sur le nombre de repas quotidien recommandés au cours de l'allaitement, 58,10% des enquêtées ont donné une réponse correcte, 29,60% ont donné une réponse incorrecte et 11,1% ont déclaré ne pas en connaître. Le graphique 3 répartit les enquêtées selon leur connaissance du nombre de repas recommandés au cours de l'allaitement.



Graphique 3. Répartition des enquêtées selon la connaissance du nombre de repas quotidien recommandé au cours de l'allaitement

3.4.3 CONNAISSANCES SUR DE LA SUPPLÉMENTATION EN FER + ACIDE FOLIQUE (FAF)

3.4.3.1 POSOLOGIE QUOTIDIENNE

Sur les 270 femmes enceintes interviewées, 227 soit 84,10% ont correctement déterminé la prise quotidienne du fer+acide folique dans le cadre de la prévention de l'anémie chez la femme enceinte, 14,5% en ont donné une réponse erronée et 1,5% ont déclaré ne pas en savoir.

3.4.3.2 DURÉE DE LA SUPPLÉMENTATION

Sur l'ensemble des enquêtées, 41,5% ont pu connaître que la supplémentation en fer+acide dans le cadre de la prévention de l'anémie chez la femme enceinte s'étend jusqu'à six semaines après accouchement, 3,3% ont déclaré ne pas en connaître et 55,20% ont donné une réponse incorrecte.

3.4.3.3 IMPORTANCE DE LA SUPPLÉMENTATION EN FER + ACIDE FOLIQUE AU COURS DE LA GROSSESSE

La presque totalité des enquêtées soit 98,60% ont déclaré que la prise régulière du fer+acide folique au cours de la grossesse augmente le sang, 0,10% ont évoqué la lutte contre les malformations du fœtus, 0,40% la protection du bébé, 0,70% l'éviction des maladies pendant la grossesse et 0,20% n'en savait rien.

3.4.4 CONNAISSANCES SUR LES CONSÉQUENCES D'UNE ALIMENTATION NON ÉQUILIBRÉE ET NON ADAPTÉE AU COURS DE LA GROSSESSE.

Sur l'ensemble des interviewées sur les conséquences d'une alimentation non équilibrée et non adaptée au cours de la grossesse, 66,3% ont évoqué au moins une conséquence scientifiquement valable et 33,2% ont déclaré ne rien en connaître.

3.5 SYNTHÈSE GLOBALE DES CONNAISSANCES: INDICE DES CONNAISSANCES EN NUTRITION MATERNELLE (ICNM)

L'indicateur composite « ICNM » (Indice des connaissances en nutrition maternelle) a été construit sur la base des cinq domaines: (A) groupes d'aliments, (B) alimentation équilibrée, (C) fréquence des repas, (D) supplémentation fer+acide folique (FAF), (E) connaissances des conséquences.

Chaque domaine est la moyenne des sous-indicateurs correspondants et l'ICNM est la moyenne des cinq domaines (poids égaux).

Les sous-scores obtenus sont: A = 22,8% (faible), B = 88,9% (bon), C = 73,2% (moyen), D = 62,8% (moyen), E = 66,3% (moyen).

L'ICNM global s'élève à 62,8% (moyen) avec des disparités importantes entre domaines.

Ces résultats montrent une compétence pratique élevée pour la composition d'un mets équilibré, mais une faible maîtrise des notions de base (classification et exemples d'aliments) et une méconnaissance de la durée de la supplémentation en fer+acide folique dans le post-partum.

3.6 ANALYSE MULTIVARIÉE

- **Niveau d'instruction:** Les femmes sans instruction présentaient un risque significativement plus élevé de faible connaissance des groupes d'aliments (OR ajusté > 3, $p < 0,001$) et de la durée de supplémentation en fer + acide folique (OR > 2, $p < 0,05$).
- **Résidence hors aire sanitaire:** Associée à une probabilité accrue de méconnaissance des recommandations sur la fréquence des repas pendant l'allaitement (OR $\approx 1,8$, $p < 0,05$).
- **Parité et âge gestationnel:** Les primigestes au premier trimestre avaient un risque plus élevé de faible ICNM global (OR $\approx 1,5$, $p < 0,05$), suggérant une moindre exposition aux conseils nutritionnels.
- **Interactions:** L'effet combiné « faible instruction + résidence hors aire » multipliait par 4 le risque de faible connaissance des groupes d'aliments ($p < 0,01$).

Ces résultats confirment que la maîtrise conceptuelle (classification des aliments), la durée de la supplémentation fer + acide folique dans le postpartum et les conséquences d'une malnutrition maternelle sont les points les plus faibles.

Partant de ces considérations, les profils les plus à risque sont, les femmes sans instruction ou avec éducation non formelle, celles résidentes hors aire sanitaire et les primigestes en début de grossesse.

Ces constats appellent à des interventions ciblées: IEC/CCC renforcée sur les groupes d'aliments et la durée de la supplémentation, avec un focus sur les femmes peu instruites et éloignées des structures sanitaires.

4 DISCUSSION

4.1 CONNAISSANCES SUR LES TROIS GROUPES D'ALIMENTS

Parmi les 270 femmes enceintes interrogées, 60 % ne connaissaient pas les trois groupes d'aliments, tandis que 5,6 % ont fourni une réponse erronée. Ainsi, seules 34,4 % ont correctement identifié lesdits groupes. Parmi les 162 femmes présentant des connaissances insuffisantes, seulement 22,23 % avaient atteint un niveau d'instruction post-primaire ou supérieur. Cette faible scolarisation apparaît comme un facteur déterminant du déficit de connaissances nutritionnelles, notamment en ce qui concerne les groupes d'aliments essentiels à une alimentation équilibrée, comme le confirme l'analyse multivariée (OR ajusté > 3; $p < 0,001$).

Ces résultats sont inférieurs à ceux rapportés par Delhay O. dans son étude sur l'équilibre nutritionnel et la grossesse, où 51 % des participantes (55 femmes) avaient obtenu un score de connaissances $\geq 5/10$, aussi bien pour l'identification des groupes d'aliments que pour l'alimentation recommandée pendant la grossesse (Delhay, 2021). Cette différence pourrait être attribuée à des disparités de niveau socio-économique entre les populations étudiées, influençant l'accès à l'information nutritionnelle.

Par ailleurs, parmi les 93 femmes (34,40 %) ayant correctement identifié les trois groupes d'aliments, seules 30 (32,20 %) ont été capables de citer au moins deux exemples par groupe, tandis que 62,40 % n'étaient pas en mesure de donner des exemples concrets. Parmi ces 30 femmes, 70 % avaient un niveau d'instruction post-primaire ou supérieur, mettant en évidence le rôle central de l'éducation dans l'acquisition et la maîtrise pratique des connaissances nutritionnelles.

Ces résultats sont comparables à ceux de Delhay O. (Delhay, 2021), qui rapportait que 36 % des femmes enquêtées avaient fourni une réponse correcte concernant les groupes d'aliments.

L'ensemble de ces données souligne la nécessité de renforcer les interventions d'éducation nutritionnelle ciblant les femmes enceintes, en particulier celles ayant un faible niveau d'instruction.

4.2 CONNAISSANCE SUR L'ALIMENTATION ÉQUILIBRÉE

Sur la base de leur capacité à composer un mets équilibré à partir d'aliments locaux disponibles, en respectant les trois groupes d'aliments (énergétiques, de construction et protecteurs), 88,90 % des femmes interrogées ont réussi à proposer un plat complet. En revanche, 9,2 % ont déclaré ne pas savoir comment le faire. Ces résultats révèlent une bonne appropriation des ressources alimentaires locales pour une alimentation équilibrée, bien que certaines femmes présentent encore des lacunes en matière de connaissances nutritionnelles.

A cette question, nos résultats sont proches de ceux de ALIVE AND THRIVE dans son rapport d'enquête finale de 2021 sur l'Évaluation de la Faisabilité d'Intégrer un Paquet d'Interventions nutritionnelles maternelles aux Services de Soins prénatals au Burkina Faso (UNICEF, 2020) qui avait conclu que 81,10% des femmes enceintes avaient pu donner les fondements et l'importance d'une alimentation équilibrée.

4.3 FRÉQUENCE DES REPAS QUOTIDIEN RECOMMANDÉ EN DEHORS DE LA GROSSESSE, AU COURS DE LA GROSSESSE ET PENDANT L'ALLAITEMENT

Sur la question du nombre de repas recommandé en dehors de la grossesse, 89,3% des enquêtées ont correctement répondu à la question.

Sur la question du nombre de repas recommandé, en dehors de la grossesse, 89,3% des enquêtées ont correctement répondu à la question, au cours de la grossesse, 72,20% des enquêtées ont donné une réponse correcte, 13% ont donné une réponse incorrecte et 11,9% ont déclaré ne pas en connaître au cours de l'allaitement, seulement 58,10% des enquêtées ont donné une réponse correcte.

Partant des proportions ci-dessus mentionnées, la connaissance du nombre de repas recommandé en fonction des trois états physiologiques de la femme retenus est insuffisante.

Nos résultats se rapprochent de ceux de ALIVE AND THRIVE (ALIVE AND THRIVE, 2021) qui avait trouvé que 92,80% des enquêtées avaient répondu correctement à la question sur le nombre de repas en routine et 65% au cours de la grossesse.

Cette insuffisance de connaissances des femmes enceintes sur ces éléments importants de la nutrition maternelle traduit la difficulté pour elles à assurer un bon équilibre nutritionnel pour une expérience positive de la grossesse.

4.4 CONNAISSANCES SUR DE LA SUPPLÉMENTATION EN FER + ACIDE FOLIQUE (FAF)

Sur l'ensemble des femmes enceintes interrogées, 84,10 % ont correctement identifié la posologie quotidienne recommandée du fer-acide folique dans la prévention de l'anémie pendant la grossesse. Ce résultat est comparable à celui rapporté par ALIVE & THRIVE (ALIVE AND THRIVE, 2021), qui indiquait que 81,90 % des femmes savaient que la supplémentation recommandée correspond à 30 comprimés par mois, soit un comprimé par jour.

En revanche, concernant la durée de la supplémentation en fer + acide folique en période post-partum, seules 41,50 % des femmes savaient que celle-ci doit se poursuivre jusqu'à six semaines après l'accouchement dans le cadre de la prévention de l'anémie. Cette proportion est nettement supérieure à celle rapportée par ALIVE & THRIVE (ALIVE AND THRIVE, 2021), qui estimait ce niveau de connaissance à 15,60 %. Cette divergence peut s'expliquer par les différences méthodologiques entre les deux études: notre analyse s'est centrée spécifiquement sur la durée de la supplémentation en période post-partum, tandis que l'étude ALIVE & THRIVE considérait la durée moyenne recommandée au cours de la grossesse, généralement estimée à six mois.

Bien que ces sous-variables puissent être perçues comme acquises en raison de leur caractère routinier dans les consultations prénatales, les résultats mettent en évidence une persistance de lacunes dans la connaissance des femmes enceintes, en particulier concernant la continuité de la supplémentation après l'accouchement.

Par ailleurs, la quasi-totalité des femmes enquêtées (98,60 %) a reconnu l'importance de la supplémentation en fer-acide folique au cours de la grossesse. Les bénéfices les plus fréquemment cités étaient l'augmentation du volume sanguin maternel (98,60 %). Des proportions marginales ont évoqué la prévention des malformations fœtales (0,1 %), la protection du bébé (0,4 %), la prévention des maladies au cours de la grossesse (0,7 %), tandis que 0,2 % déclaraient ne pas connaître les bénéfices de cette supplémentation. Ces résultats sont globalement similaires à ceux d'ALIVE & THRIVE (ALIVE AND THRIVE, 2021), qui rapportaient une reconnaissance de l'importance de la supplémentation chez 88,40 % des femmes interrogées.

Ainsi, malgré un niveau de connaissance globalement satisfaisant concernant certaines dimensions de la supplémentation en fer + acide folique, les justifications avancées par les participantes révèlent une compréhension partielle des bénéfices réels et multiples de cette intervention.

Ces constats interpellent les prestataires des services de soins prénatals (SPN) sur la nécessité de renforcer les activités d'information, éducation et communication pour le changement de comportement (IEC/CCC), afin d'assurer une appropriation complète et correcte des objectifs et des bénéfices de la supplémentation par les femmes enceintes.

4.5 CONNAISSANCES SUR LES CONSÉQUENCES D'UNE ALIMENTATION NON ÉQUILIBRÉE ET NON ADAPTÉE AU COURS DE LA GROSSESSE

Sur l'ensemble des interviewées sur les conséquences d'une alimentation non équilibrée et non adaptée au cours de la grossesse, 66,30% ont évoqué au moins une conséquence scientifiquement valable (augmentation du risque de la morbidité et mortalité maternelle (risque d'avortement, d'accouchement prématuré, d'infection, etc.) = 37,4%, retard de croissance intra-utérine / petit poids de naissance = 2,6%, risque de morbidité et de mortalité néonatale et infantile élevé = 23,3%, malformations congénitales = 1,9%, Diminution du développement cognitif = 1,1%), et 33,2% ont déclaré ne rien en connaître.

Sur cette question, seulement 66,30% des enquêtées ont pu donner au moins une conséquence d'une alimentation non équilibrée et non adaptée au cours de la grossesse et 33,20% n'ont pu donner aucune conséquence.

L'insuffisance de connaissance sur cette sous variable pourrait impacter considérablement sur l'équilibre nutritionnel des femmes enceintes en vue de leur assurer une expérience positive de la grossesse.

5 CONCLUSION

La grossesse entraîne une augmentation des besoins métaboliques, liée aux transformations physiologiques chez la femme enceinte et aux exigences du développement du fœtus. Dans ce contexte, l'amélioration de la santé maternelle et infantile constitue une priorité majeure des actions gouvernementales au Burkina Faso.

Malgré les progrès enregistrés dans les indicateurs de santé, la mortalité maternelle et néonatale demeure élevée, et la dénutrition reste largement répandue chez les femmes et les enfants. En réponse, l'OMS a actualisé ses directives sur les Soins Prénatals (SPN), en mettant l'accent sur les interventions nutritionnelles (OMS, 2012). Toutefois, malgré les efforts déployés pour lutter contre la malnutrition, notamment maternelle, le phénomène persiste dans la zone de couverture du CSPS Guimbi Ouattara à Bobo-Dioulasso, soulignant la nécessité de renforcer les actions ciblées dans cette aire sanitaire.

Cette étude a donc visé à explorer ce problème à travers l'évaluation des connaissances des femmes enceintes facteur déterminant pour un équilibre nutritionnel optimal au cours de la grossesse.

Les résultats obtenus ont mis en évidence une insuffisance de connaissances des femmes enceintes au cours de la période de gravidité.

Des recommandations ont été formulées à l'endroit des gestantes elles-mêmes d'abord et des différents acteurs du système sanitaire, depuis le niveau institutionnel jusqu'au niveau opérationnel.

Les actions entreprises incluent notamment l'intégration de la nutrition maternelle dans le counseling individuel des femmes enceintes lors des consultations prénatales, la mise en place de Groupes de Suivi et d'Animation de la Pratique d'ANJE (GASPA) dans l'aire sanitaire, ainsi que l'inscription d'activités spécifiques à la nutrition maternelle dans le plan d'action 2025 de la formation sanitaire (formations sur site, supervisions internes, journées de sensibilisation, etc.).

CONFLIT D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêt pour cette publication.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le directeur régional de la Santé des Hauts Bassins pour nous avoir accordé l'autorisation de mener cette étude dans son ressort territorial, le médecin chef du district sanitaire de Dafra pour sa franche collaboration, l'Infirmier chef de poste du Centre de Santé et de Promotion Sociale Guimbi Ouattara de Bobo Dioulasso et l'ensemble de son personnel pour l'hospitalité et l'aimable compréhension tout au long de l'étude. Nos remerciements s'adressent également au personnel de l'Institut International des Sciences et Technologies (IISTech) du Burkina Faso pour l'accompagnement en vue de l'aboutissement de ce travail.

REFERENCES

- [1] MERGER R., MELCHIOR J., LEVY J., Précis d'obstétrique, 6^e édition, MASSON, Paris, 2001, 706 pages.
- [2] AYOUBI J-M et al. Nutrition et femme enceinte, EMC, Obstétrique, 2012.
- [3] ONU Infos, La malnutrition des femmes enceintes et des jeunes mamans, article publié le 07 mars 2023.
- [4] UNICEF, Rapport mondial sur la nutrition, 2020: Agir en faveur de l'égalité pour mettre fin à la malnutrition.
- [5] ABDELHAKH H., YOUSSEF A., prévalence de la malnutrition chez la femme enceinte, mémoire de fin d'étude, master en sciences alimentaires, soutenu publiquement le 09 juillet 2019.
- [6] ALIVE AND THRIVE, Burkina Faso, Evaluation de la Faisabilité d'Intégrer un Paquet d'Interventions nutritionnelles maternelles aux Services de Soins prénatals au Burkina Faso, rapport d'Enquête Finale, août 2021.
- [7] MINISTERE DE LA SANTE du Burkina Faso, & Alive and Thrive, Le renforcement des capacités des agents de la santé et des agents de santé à base communautaire peut-il améliorer les services de nutrition dans des soins prénatals ? résultats d'une étude menée dans la région de la Boucle du Mouhoun (districts sanitaires de Toma et Boromo) et celle des Hauts bassins (districts sanitaires de Dandé et Léna) de janvier 2019 à janvier 2021.
- [8] PLAN D'ACTION DRSHP HAUTS BASSINS 2023, 194 pages, décembre 2022.
- [9] PLAN D'ACTION DS DAFRA 2023, 111 pages, avril 2023.
- [10] PLAN D'ACTION CSPS GUIMBI OUATTARA 2024, 74 pages, février 2024.
- [11] DELHAYE O., L'équilibre nutritionnel et la grossesse, connaissances et informations des femmes: enquête dans une maternité.
- [12] ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, soixante-cinquième assemblée mondiale de la santé A65/13 Point 13.4 de l'ordre du jour provisoire 16 mars 2012 sur les grossesses chez les adolescentes et les jeunes femmes.

Biomasse aérienne et capacité de séquestration de carbone dans un système agroforestier de la Réserve de Biosphère de Luki, RD Congo - Kongo central

[Aboveground biomass and carbon sequestration capacity in an agroforestry system of the Luki Biosphere Reserve, DR Congo - Kongo Central]

Diansambu Makanua Isaac^{1,3}, Vangu Dimbi Daniel¹, Phanzu Mbundu Maurice¹, Mbungu Phaka Christophe², Ngoma Mvuzolo Antoine¹, Nimi Nimi Goerge¹, Tisu Phaku Jospin¹, Mabanga Mabanga Alphonse¹, and Mavinga Mvumbi Sylvain¹

¹Université Président KASA-VUBU. Faculté des sciences Agronomiques et Environnement. BP 314 Boma, RD Congo

²Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques (INERA), Antenne de Gestion et conservation des ressources naturelles (GCRN, LUKI). BP 2037 Kinshasa, RD Congo

³École régionale Post-Universitaire d'Aménagement et de Gestion Intégrée des Forêts et territoires Tropicaux (ERAIFT), Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2026 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 Luki Biosphere Reserve is under significant anthropogenic pressures that compromise its tree diversity and carbon sequestration capacity. In response to these challenges, agroforestry appears as a sustainable alternative, offering socioeconomic and environmental benefits while contributing to the fight against climate change. This study aims to quantify above-ground biomass and carbon sequestration capacity in an agroforestry system within this reserve.

The study involved determining the floristic composition of the agro-forests and estimating the biomass of woody plants. Data were collected through floristic and dendrometric inventories conducted based on a hierarchical sampling method that included 8 plots of 0.25 ha each. Floristic and structural parameters were measured on trees with a diameter equal to or greater than 10 cm. Diversity was assessed using species richness and diversity indices.

Floristic and structural parameters were measured on trees with a diameter greater than or equal to 10 cm. Diversity was assessed using species richness and diversity indices, while biomass was estimated using the allometric equation of Chave et al. (2005), adapted for humid tropical forests. The results reveal a woody flora composed of 42 species belonging to 24 botanical families. An average density of 76 stems/ha and an average basal area of 0.48 m²/ha were recorded. Estimated biomass ranges from 20.875 t for the conventional field to 50.404 t for the agro-forest. Carbon sequestration capacity is estimated at 10.421 t/ha in the conventional field and 25.193 t/ha in the agro-forest, thus confirming the study hypothesis.

KEYWORDS: Agroforestry, Carbon sequestration, Aboveground biomass, Tree diversity, Luki Biosphere Reserve.

RESUME: La Réserve de Biosphère de Luki subit de fortes pressions anthropiques qui compromettent sa diversité arborée et sa capacité de séquestration du carbone. Face à ces contraintes, l'agroforesterie apparaît comme une alternative durable, offrant des avantages socioéconomiques et environnementaux tout en contribuant à la lutte contre le changement climatique. Cette étude vise à quantifier la biomasse aérienne et la capacité de séquestration du carbone dans un système agroforestier au sein de cette réserve.

L'étude a consisté à déterminer la composition floristique des agroforêts et à estimer la biomasse des ligneux. Les données ont été collectées à travers des inventaires floristiques et dendrométriques réalisés sur la base d'un échantillonnage hiérarchisé comprenant 8 relevés de 0,25 ha. Les paramètres floristiques et structuraux ont été mesurés sur les arbres de diamètre supérieur ou égal à 10 cm. La diversité a été évaluée à l'aide de la richesse spécifique et des indices de diversité, tandis que la biomasse a été estimée à partir de l'équation allométrique de Chave et al. (2005), adaptée aux forêts tropicales humides.

Les résultats révèlent une flore ligneuse composée de 42 espèces appartenant à 24 familles botaniques. Une densité moyenne de 76 tiges/ha et une surface terrière moyenne de 0,48 m²/ha ont été enregistrées. La biomasse estimée varie de 20,875 t pour le champ classique à 50,404 t pour l'agroforêt. La capacité de séquestration du carbone est estimée à 10,421 t/ha dans le champ classique et à 25,193 t/ha dans l'agroforêt, confirmant ainsi l'hypothèse de l'étude.

MOTS-CLEFS: Agroforesterie, Séquestration du carbone, Biomasse aérienne, Diversité arborée, Réserve de biosphère de Luki.

1 INTRODUCTION

Les forêts tropicales sont les écosystèmes terrestres les plus diversifiés (Poorter *et al.*, 2004; Sheil *et al.*, 2004; Schroeder *et al.*, 2010; Stahl et Christopherson, 2010). Ces forêts renferment plus de la moitié des espèces qui peuplent la terre, avec un fort taux d'endémisme (Parmentier *et al.*, 2007). Elles produisent aussi une grande quantité de biomasse végétale aérienne. Elles ont, par conséquent, une forte capacité à séquestrer le carbone (Chave *et al.*, 2001; Chave *et al.*, 2005). De plus, elles sont, après l'océan, les principaux puits de dioxyde de carbone, gaz qui est l'une des causes du réchauffement de notre planète (Pan *et al.*, 2011).

Malgré leur diversité spécifique importantes et leur rôle dans la réduction des gaz à effet de serre, les forêts tropicales terrestres ont connu ces dernières décennies, une dégradation allant jusqu'à la perte de superficies de plus en grandes au profit des espèces cultivées (Altieri et Pengue, 2006; FAO, 2006). Les différents impacts néfastes de l'intensification agricole ont amplifié divers problèmes environnementaux, tels que précisés par Ash *et al.* (2011), la déforestation, l'érosion, la désertification, la perte de biodiversité et la contamination de l'eau potable. De façon particulière, Montagnini et Nair (2004); Ghazoul et Sheil (2010) affirment que les conséquences liées à la déforestation sont diverses, parmi lesquelles, ils citent en premier lieu, la perte de la biodiversité forestière exacerbée par des activités humaines.

En République Démocratique du Congo, ce sont plutôt les petits agriculteurs qui sont pointés du doigt (Tchatchouet *et al.*, 2015). Leur présence la plus remarquable est liée aux facteurs de causalité, notamment, la précarité rurale, l'insécurité foncière et l'urbanisation due à l'explosion démographique. En outre, dans l'Hinterland de Kinshasa, Mavinga (2019) révèle que du point de vue environnemental, la culture itinérante a provoqué plusieurs conséquences tels que: la destruction des habitats des espèces végétales et animales, la perte des éléments de la biodiversité, la pollution atmosphérique surtout dans le cas de l'agriculture sur brûlis sous l'influence des émissions gazeuses, l'érosion du sol causée par l'absence de couvert végétal ainsi que la pollution des eaux par les intrants agricoles, la perturbation non conditionnée des écosystèmes forestiers.

Pour Dounias (2000), l'expression agriculture itinérante sur brûlis désigne plusieurs variantes de pratiques agricoles traditionnelles dans les régions forestières tropicales. Ces dernières sont caractérisées par le défrichement de petites surfaces de forêt, la mise en culture puis la jachère et l'itinérance des parcelles cultivées. Il s'agit d'un système agricole commun à environ douze millions de personnes appartenant à près de 1500 ethnies vivant dans la zone intertropicale.

En quête d'une alternative écologiquement soutenable, socialement acceptable et économiquement profitable à l'agriculture conventionnelle, plusieurs chercheurs ont proposé des systèmes agroforestiers comme étant des activités agricoles complexes qui intègrent les arbres aux cultures et ou à l'élevage du bétail (Nair, 1993). Ce genre d'activités représente aux yeux des chercheurs, une des solutions pour concilier la production agricole et la protection de l'environnement (Parrish *et al.*, 1998).

Parmi les systèmes agroforestiers tropicaux, ceux à base de cacaoyers, ont fait l'objet de nombreuses études qui ont permis de rendre compte de la diversité des espèces végétales et animales, qu'ils renferment (Duguma, 1998; Parrish *et al.*, 1998; Power et Flecker, 1998; Leakey, 2001; Schroth *et al.*, 2004). Ces études sont unanimes sur le fait que les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers abritent de nombreuses espèces par rapport aux plantations monoculturelles. D'autres études telles que menées par Stephan-Dewenteret *et al.* (2007); Smiley et Kroschel (2008); Duguma *et al.* (2001); Kotto-Sameet *et al.* (1997); Gockowski et Sonwa (2011); Somarriba *et al.* (2013) ont aussi permis de démontrer leur importance dans la séquestration du carbone atmosphérique.

Cependant, plusieurs points sombres restent à éclaircir quant aux relations pouvant exister entre la forte diversité floristique et la biomasse végétale aérienne des espèces dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers. La détection de cette relation permettrait d'avoir une idée du compromis entre la diversité biologique dans les agro-forêts et leur capacité à séquestrer du carbone. En forêt tropicale par exemple, il est admis que la diversité des espèces végétales, augmente la biomasse des arbres sur pied (Naeem *et al.*, 1996; Chapin *et al.*, 2000; Pacala et Kinzig, 2002; Diaz *et al.*, 2009; Ruiz-Jean et Potvin, 2010; Chisholm *et al.*, 2013).

Au regard de ce qui précède, la question principale de cette étude se formule comme suit: la biomasse aérienne qui existe dans la biosphère de Luki, peut-elle séquestrer le carbone dans un système agroforestier ? Quelle est la méthode à appliquer pour inventorier les arbres ? Quelle est la technique à utiliser pour caractériser les arbres et les peuplements ? Quels sont les indicateurs quantitatifs et qualitatifs des espèces végétales pour mieux quantifier la production ligneuse ? Ces préoccupations nous poussent à présupposer que la diversité floristique dont dispose la biosphère de Luki a une capacité naturelle qui peut fournir des services écologiques dans un système agroforestier, d'autant plus qu'elle assure une meilleure productivité forestière. L'inventaire dendrométrique est la méthode appropriée pour inventorier les arbres. L'analyse des paramètres dendrométriques s'avère la technique fiable pour caractériser physiquement les arbres et les peuplements.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer à partir du système agroforestier de la Réserve de Biosphère de Luki, le rôle de la biomasse aérienne dans l'atténuation du changement climatique, d'une part et, d'autre part, quantifier sa contribution en tant que puits de carbone, pour ensuite comprendre l'impact environnemental sur la biodiversité et la santé des sols. Cette façon de procéder donne lieu aux aménagistes et autres décideurs dans le domaine forestier de choisir le type d'écosystème forestier qui stocke le mieux le carbone dont l'excès est nocif à l'environnement global.

De manière spécifique, l'étude vise à:

1. Déterminer la diversité floristique de la biosphère de Luki dans un système agroforestier.
2. Evaluer la diversité des espèces ligneuses dans les écosystèmes.
3. Inventorier la composition floristique des agroforêts.
4. Définir physiquement les arbres et les peuplements du système agroforestier de la Réserve de Luki.

2 MILIEU

La réserve de biosphère de Luki est située à l'Ouest de la République Démocratique du Congo, précisément au Sud-Est du Massif forestier du Mayombe Congolais (R D Congo.), dans la province du Bas-Congo, aux confins de trois territoires des districts du Bas Fleuve et de Boma, à savoir:

1. Le territoire de Lukula, dans le Secteur de Patu, où se trouve la grande partie de la réserve, notamment le Nord-Ouest, l'Ouest, le Sud-ouest et la zone centrale.
2. Le territoire de Seke-Banza, dans le Secteur de Bundi, où se localise la partie septentrionale et le Nord-est de la réserve.
3. Le territoire de Moanda, dans le Secteur de Boma-Bundi, où s'étendent l'Est et le Sud-Est de la réserve. Cette partie constitue la pointe méridionale extrême du massif forestier Guinéo - congolais où elle occupe une superficie de 32 714 ha (330 km²). Ceci représente près du quart de la superficie (1 389 km²) des sept groupements administratifs appartenant à la réserve. Ses limites extrêmes, Nord et Sud, passent par la latitude 05° 30' et 05° 43' Nord et celles de l'Ouest et de l'Est par les longitudes 13° 04' et 13° 17' Est.

La position à l'intersection de ces trois territoires fait la convoitise des populations des territoires précités et constitue un handicap sérieux à sa bonne gestion (Konzo, 2009).

2.1 APERÇU HISTORIQUE SUR LA RBL

La réserve forestière de Luki fut créée le 12 janvier 1937 par l'ordonnance coloniale n°5 Agri (carte 1), dans le but de poursuivre la recherche forestière orientée vers la sylviculture et l'exploitation du bois et ce, compte tenu de la proximité de l'océan. L'écosystème forestier du Mayombe, faisant partie de cette réserve, revêt une importance centrale sur le plan scientifique en tant que forêt semi caducifoliée jouissant d'une influence et abritant encore plusieurs espèces dont beaucoup sont exploitées à des fins commerciales. Cet écosystème forestier, unique en République Démocratique du Congo, est aussi très important pour l'équilibre climatique de la région et pour sa riche diversité biologique. Son adhésion au réseau mondial des réserves de biosphère visait non seulement la sauvegarde de l'écosystème unique mais aussi l'exploitation rationnelle des ressources naturelles en vue d'obtenir un rendement maximum et soutenu. L'activité humaine dans la réserve devrait par conséquent être limitée et orientée, selon dans le sens de corriger et de rétablir l'équilibre écosystémique (Lubini, 1984)

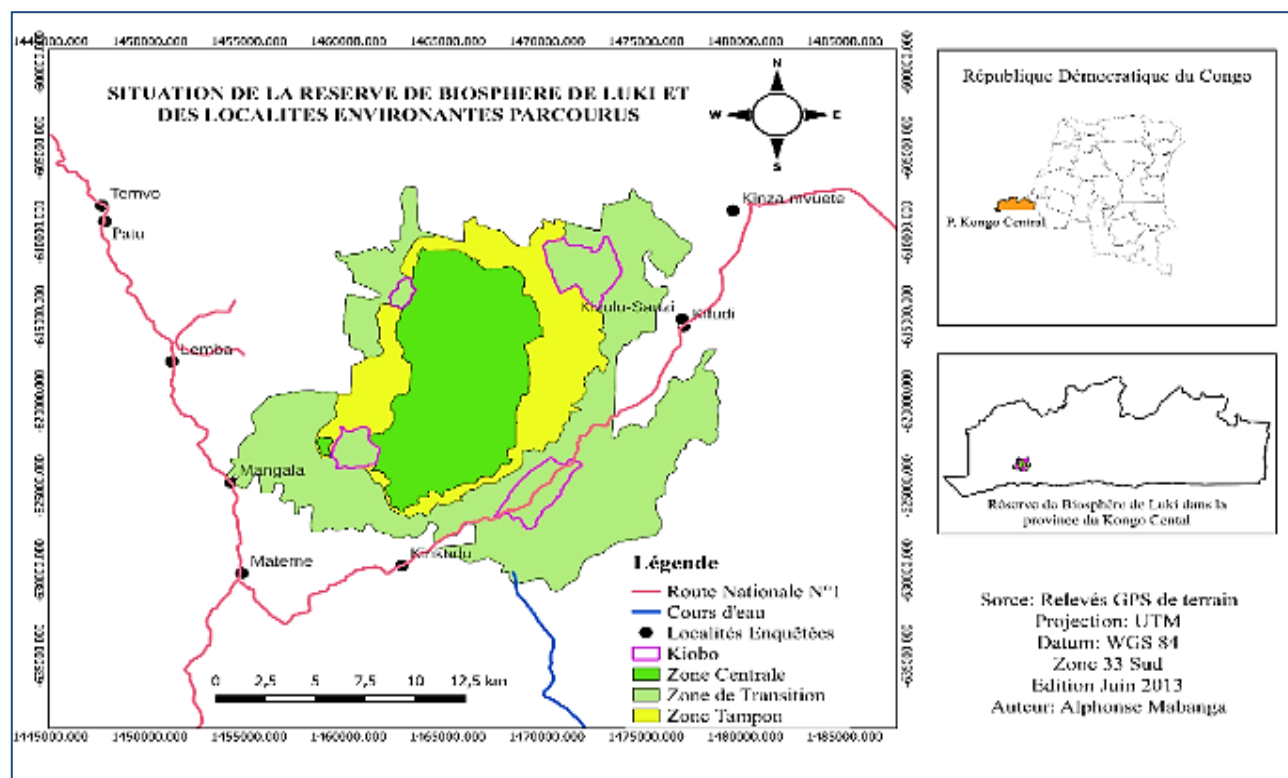


Fig. 1. Carte de Situation de la Réserve de Biosphère de Luki

Source: Alphonse MABANGA, 2013

La réserve de biosphère de Luki demeure aujourd'hui l'unique source de semences de la région. De plus, elle constitue un maillon d'une politique efficace de reboisement aménagement des terres forestières (Gâta, 1997).

2.2 CARACTÉRISTIQUES BIOPHYSIQUES

Le relief de la Réserve de Biosphère de Luki est semblable à celui du Mayombe, lequel se relève progressivement des plateaux côtiers jusqu'aux monts Bangu, situées à 150 km de l'océan Atlantique (Donis, 1948). Il est constitué d'une série de collines dont l'altitude varie entre 150 m (pont ferroviaire de la rivière Luki) et 500 m (crête centrale de la réserve). L'amplitude moyenne de l'altitude entre le pont des vallées et les collines environnantes est de l'ordre de 40 à 70m (Donis, 1956) Ce domaine se présente sous la forme d'un vaste losange irrégulier dont le centre séparant les vallées de la Luki et de la Ntosi, est occupé par une crête particulièrement accessible.

La périphérie, surtout occupée par des forêts remaniées, est comparativement moins accidentée (Pendje et Baya, 1992). En général, le relief de la réserve formé de collines et de petites montagnes, de vallées hautes ou basses, de cours d'eau permanents ou temporaires favorise la diversité des biotopes et constitue aussi un obstacle à la pénétration humaine. Il présente donc un atout à la fois pour le développement de la biodiversité et la conservation de la réserve. (Héritier, 2006).

La réserve de biosphère de Luki connaît un climat tropical humide (Aw5, selon la Classification de Köppen), marqué par deux saisons: une saison des pluies de sept mois (mi-octobre à mi-mai) et une saison sèche de cinq mois (mi-mai à mi-octobre). La saison sèche est interrompue par de petites pluies et atténuée par de fréquents brouillards, en particulier dans les vallées.

3 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Toute recherche scientifique doit comporter l'utilisation des procédures rigoureuses, définies, transmissibles, susceptibles d'être appliqués à nouveau dans les mêmes conditions, adaptées au genre de problème et phénomène en cause (Biloso, 2008). La collecte des données s'est basée sur deux volets dont la recherche documentaire et de l'inventaire dendrométrique sur terrain.

3.1 RECHERCHE DOCUMENTAIRE

La recherche documentaire a consisté à la consultation des ouvrages, mémoires et autres publications scientifiques ou rapports présentant un intérêt évident pour le sujet en étude, afin d'enrichir notre base de données.

3.2 INVENTAIRE DENDROMÉTRIQUE

L'inventaire dendrométrique a concerné deux formations végétales ont été inventoriées: un espace agroforestier et un espace d'agriculture classique. Une parcelle d'un hectare a été installée dans chaque type de formation végétale. Tous les arbres dont le diamètre à hauteur poitrine est supérieur ou égale à 10 centimètres ont été mesurés. Les paramètres relevés étaient l'espèce de l'arbre et son DHP.

3.3 ANALYSE DES PARAMÈTRES DENDROMÉTRIQUES

Cette section comporte trois sections: diamètre à haut poitrine, calcul de la densité et la surface terrière, structure diamétrique.

3.3.1 DIAMÈTRE À HAUTEUR POITRINE (DHP)

Pour mesurer le diamètre à hauteur de poitrine (Dhp), nous avons utilisé la formule exprimant la relation entre la circonférence et le diamètre; Comme c'est la longueur du tour du tronc (la circonférence) des arbres, et non la longueur du segment passant par le centre du tronc (le diamètre) qui a été mesurée sur le terrain. Cette circonférence a été convertie en diamètre selon la formule de (Avery, T.E. & Burkhardt, H.E. 2002):

$$Dhp = \frac{\text{Circonférence}}{\pi}$$

Avec

C (cm): circonférence de l'arbre

Dhp (cm): diamètre à hauteur poitrine

$\pi = 3,14$

3.3.2 CALCUL DE LA DENSITÉ ET LA SURFACE TERRIÈRE

La densité exprime le nombre de ligneux, ayant leur Dhp ≥ 10 cm par unité de surface soit:

$$D = \frac{N}{S} \text{ (Cours de sylviculture UKV 2021)}$$

La surface terrière en tant que somme des sections qu'occupent les individus ligneux au niveau de leur Dhp a été calculée selon la formule suivante:

$$ST = \frac{\pi * (Dhp)^2}{40000} \text{ Prodan, M. (1968)}$$

3.3.3 STRUCTURE DIAMÉTRIQUE

Les diamètres des arbres qui ont été inventoriés, ont permis de décrire les courbes la distribution des tiges en classes de diamètre de 10 cm d'amplitude. La première classe étant de 10 cm (inclus) à 20 cm (exclus), la seconde classe de 20 cm (inclus) à 30 cm (exclus), etc. (Meyer, H.A. (1930).

3.4 ANALYSE DES PARAMÈTRES FLORISTIQUES

La richesse floristique est le premier paramètre d'analyse de la biodiversité. C'est le nombre d'espèces et familles qui sont rencontrées sur une surface déterminée lors de la descente sur terrain (Fisher et al., 1943).

Dans le contexte de cette étude, quatre points sont exploités: indices de diversité, indice de diversité de Shannon, indice d'équitabilité ou de Pielou, indice de Jaccard

3.4.1 INDICES DE DIVERSITÉ

Avec la densité et la richesse spécifique, deux peuplements peuvent présenter des structures très différentes, notamment les espèces ayant des abondances inégales.

Pour tenir compte de cet aspect, les recours à deux indices est envisageable: l'indice de Shannon (H') et l'indice de Simpson (D) (Doucet, 2003).

3.4.2 INDICE DE DIVERSITÉ DE SHANNON (H)

L'indice de diversité de Shannon ou Shannon-Weaver (H) mesure la diversité en tenant compte de la richesse spécifique, mais aussi de la proportion représentée par chaque espèce au sein de la communauté. Cet indice accorde une grande importance aux espèces rares.

L'indice de diversité de Shannon croît au fur et à mesure que la diversité augmente.

$$H = \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \text{ (Dajos, 1996)}$$

3.4.3 INDICE D'ÉQUITABILITÉ OU DE PIELOU (J)

L'équitabilité de Pielou est le rapport de la diversité d'un peuplement ou d'un échantillon et le nombre N d'espèces présentes dans la parcelle. Il exprime la répartition équitable des individus au sein des espèces. Cet indice varie entre 0 et 1. Lorsqu'une espèce constitue la majorité de l'effectif, cet indice tend vers 0. Et il tend vers 1 lorsque toutes les espèces ont la même abondance.

$$J = \frac{\sum_{i=1}^S \frac{H}{\ln S}}{\ln S} \text{ Pielou, E.C. (1966)}$$

3.4.4 INDICE DE JACCARD (Pj)

L'indice de Jaccard (Pj) teste de la similarité entre les habitats pris deux à deux. Il est calculé à travers la formule suivante:

$$Pj = \frac{c}{a+b-c} \times 100 \text{ Jaccard, P. (1901)}$$

3.5 CALCUL DE LA BIOMASSE ÉPIGÉE

L'estimation de la biomasse a été faite sur base d'un paramètre: le diamètre à hauteur de la poitrine (Dhp) qui a été introduit dans l'équation de Chave et al. (2005).

$$AGB = xp * \exp(-1,499 + 2,148 * \ln(dhp) + 0,207 * (\ln(dhp))^2 - 0,0281 * (\ln(dhp))^3)$$

3.5.1 CALCUL DE LA CONVERSION DE LA BIOMASSE EN CO2

Pour obtenir le stock de carbone d'un peuplement, nous divisons la biomasse par 2. La valeur obtenue est à son tour multipliée par le ratio CF (carbone fraction) qui est de 0,50 d'après le (GIEC, 2006), soit :

$$C = AGB \times 0.5$$

3.5.2 CALCUL DE LA CONVERSION DU STOCK DE CARBONE EN CARBONE ÉQUIVALENT

Pour convertir le stock de carbone en carbone équivalent, nous nous sommes servis de l'étude de GIEC (2006) comme suit:

$$TCO_2 \text{ (Tonne)} = TC \times 3.66$$

Avec;

TCO₂: total carbone équivalent;

TC: total stock de carbone;

Facteur de conversion: 3,66;

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1.1 DIVERSITÉ DES ESPÈCES LIGNEUSES DANS LES ÉCOSYSTÈMES ÉTUDIÉS

Un total de 152 individus, 42 espèces, réparties en 24 familles, ont été inventoriés dans les deux types de végétations, notamment dans le système agroforestier et dans le champ classique.

Dans le système agroforestier, nous avons un total de 31 espèces, réparties en 20 familles ont été inventoriées, dont les *fabaceae* représentent 6 espèces; les *sapindaceae* avec 3 espèces; les *annonaceae*, *meliaceae*, *myristicaceae*, et *sterculiaceae* avec 2 espèces chacune; suivi des *anacardiaceae*, *apocynaceae*, *bombacaceae*, *burseraceae*, *cannabaceae*, *clusiaceae*, *combretaceae*, *euphorbiaceae*, *irvingiaceae*, *malvaceae*, *moraceae*, *olacaceae*, *rutaceae*, et *ulmaceae* seulement avec 1 espèce chacune.

Dans le champ classique, nous retrouvons 30 espèces, réparties en 19 familles ont été inventoriées, dont les *fabaceae* reviennent à la première position avec 7 espèces; les *sapindaceae* avec 3 espèces; les *annonaceae*, *meliaceae* et *sapotaceae* avec 2 espèces; les *bombacaceae*, *burseraceae*, *cannabaceae*, *clusiaceae*, *combretaceae*, *euphorbiaceae*, *irvingiaceae*, *lauraceae*, *lecythidaceae*, *moraceae*, *rutaceae*, *simaroubaceae*, *sterculiaceae* et *ulmaceae* avec une espèce seulement chacune.

4.1.2 DIVERSITÉ RELATIVE

Les figures 2 & 3 ci-dessous illustrent la répartition des espèces au sein des familles pour les deux écosystèmes, notamment le champ classique et l'agroforesterie

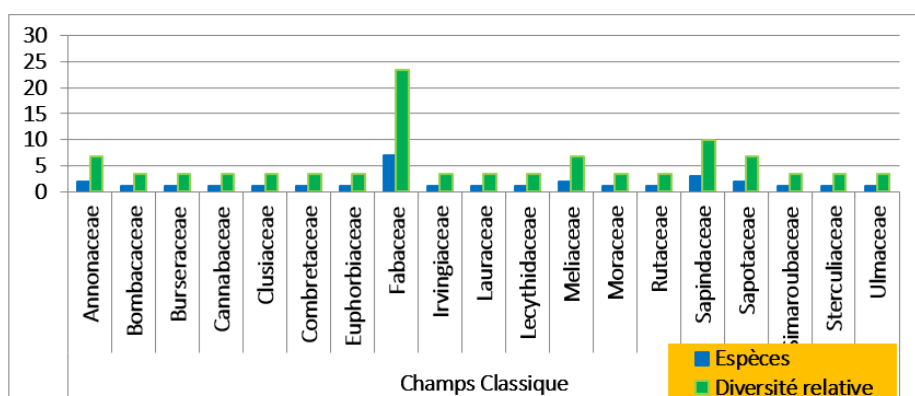


Fig. 2. Diversité relative dans le champ classique

Dans le champ classique ce sont les espèces de la famille des *Fabaceae* qui dominent avec une diversité relative de 23,33%; suivie la famille de *Sapindaceae* avec 10%; et vient les *Sapotaceae*, *Meliaceae* et *Annonaceae* avec 6,66%; à la fin nous avons le reste de familles avec notamment une abondance relative de 3,33% chacune.

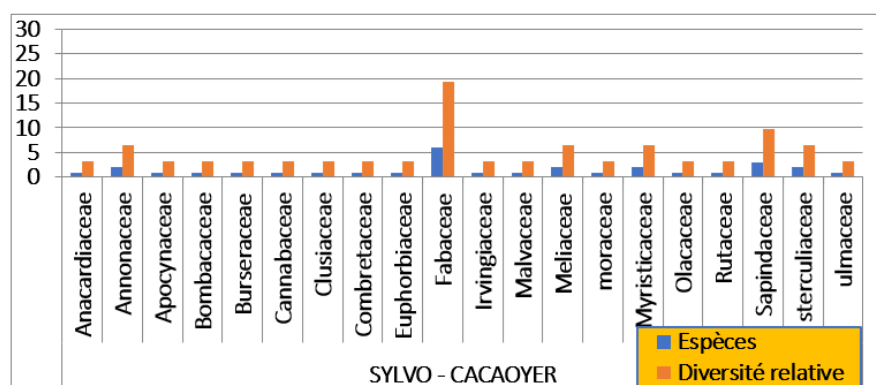


Fig. 3. Diversité relative dans l'agroforestier

Dans le sylvo-cacaoyer, c'est toujours les *Fabaceae* qui dominent avec une diversité relative de 19,35%; suivie de *Sapindaceae* avec 9,67%; les *Annonaceae*, *Meliaceae*, *Myristicaceae*, et *Sterculiaceae* avec 6.

La figure 4 ci-dessous illustre la répartition des arbres au sein des classes de diamètres pour les deux types d'écosystèmes étudiés.

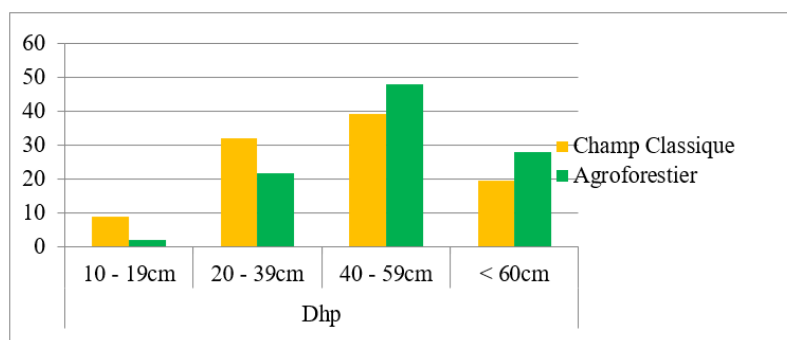


Fig. 4. Structure diamétrique des ligneux

Les individus identifiés n'ont pas la même structure diamétrique. Les valeurs obtenues mettent en évidence la dominance des tiges de la classe de 40-59cm avec 39,28% et 47,91% respectivement pour le champ classique et le système agroforestier classique; Il sied de signaler aussi la représentativité dans la classe de 20-39cm, soit 32,14% dans le champ et 21,87% dans l'agroforestier; suivi la classe d'exploitation avec 19,64% et 28,12% pour le champ classique et l'agroforestier; Et pour finir avec la classe de 10-19cm, soit 8,92% et 2,08% respectivement dans le champ classique et l'agroforestier.

4.1.3 INDICES DE DIVERSITÉ FLORISTIQUE

Les figures qui suivent nous renseignent sur les indices de diversité floristique dans le champ classique et dans l'agroforestier. La comparaison de l'indice de Shannon pour les deux écosystèmes montre que les moyennes dans l'agroforestier et le champ classique sont respectivement de l'ordre 2,06 et 2,33 (Figure 5). Ces deux valeurs expliquent que les peuplements dans les deux zones sont hétérogènes; ce qui traduit la présence d'une bonne biodiversité.

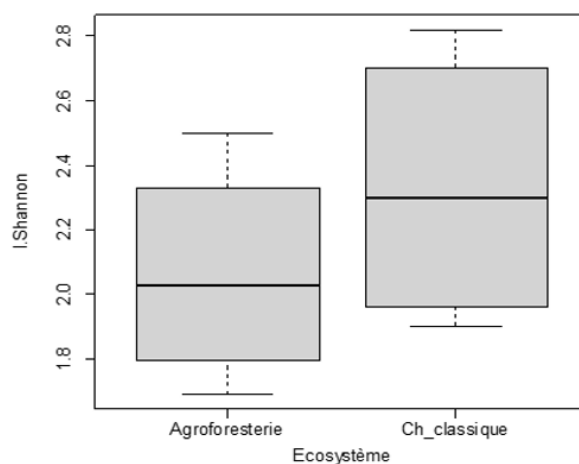


Fig. 5. Dispersion de l'indice de Shannon pour chaque écosystème étudié

En effet, les résultats des tableaux 6, et 7 présentent les comparaisons de l'indice de Shannon pour les zones étudiées. Les figures 6, 7 et 8 présentent la dispersion de l'indice d'équitabilité pour chaque zone, la corrélation entre les effectifs des espèces et le stock de carbone champ classique, la corrélation entre les effectifs des espèces et le stock de carbone agroforesterie.

Tableau 1. Comparaison de l'indice de Shannon pour les zones étudiées

Indice de Shannon									
	Mean	sd	IQR	0%	25%	50%	75%	100%	I.Shannon :n
Agrof	2.0625	0.34	0.3975	1.69	1.84	2.03	2.245	2.50	4
Ch_cl	2.3300	0.44	0.65	1.90	1.99	2.30	2.640	2.82	4

P-Value: 0,3 > 0,05: donc il n'a pas de différence significative

Le test T-Student a montré qu’il n’y a pas de différence significative entre les diversités floristiques dans le système agroforestier et dans le champ classique, d’où le P-Value est 0,3.

Tableau 2. Comparaison de l'indice de Shannon pour les zones étudiées

Indice d'équitabilité de Piélou								
	mean	Sd	IQR	0%	25%	50%	75%	100%
Agrof	0.82	0.035	0.02	0.80	0.80	0.815	0.8350	0.88
Ch_cl	0.97	0.005	0.002	0.97	0.9700	0.970	0.9725	0.98

P-Value: 0.000205 ***< 0,05: donc il y a une différence très significative

Le test T-Student a montré qu’il n’y a pas de différence significative entre les diversités floristiques dans le système agroforestier et dans le champ classique, d’où le P-Value est 0,3.

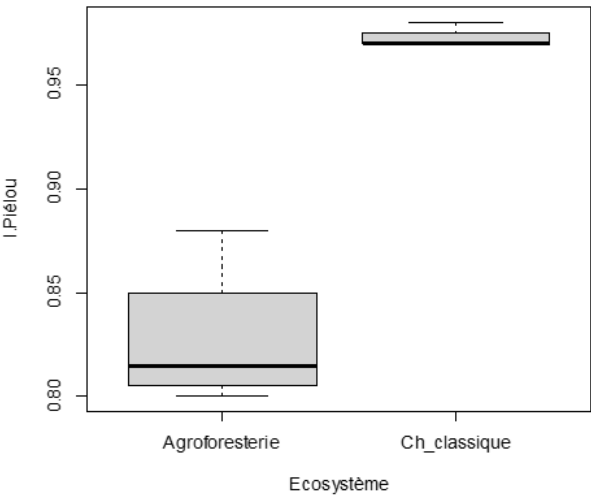


Fig. 6. Dispersion de l'indice d'équitabilité pour chaque zone

L'indice d'équitabilité de Pielou, J (figure 6) indique respectivement les moyennes 0,82 et 0,97 dans l'agroforestier et le champ classique. Le P-Value étant égale à **0.000205** (< 0,05) démontre qu'il y a une différence très significative.

Par contre, il est constaté que la similarité entre ces deux types d'écosystèmes inventoriés dans la RBL est inférieure à 50% (Soit 45,23%).

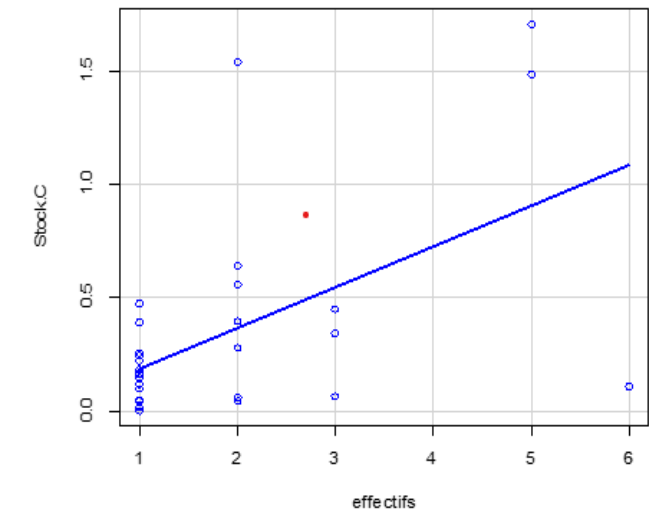


Fig. 7. Corrélation entre les effectifs des espèces et le stock de carbone champ classique

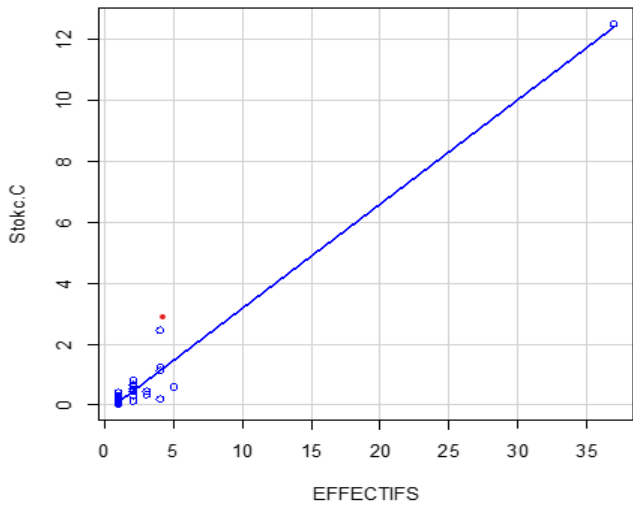


Fig. 8. Corrélation entre les effectifs des espèces et le stock de carbone agroforesterie

5 DISCUSSION

La portée de cette étude était sur la biomasse aérienne et la capacité de séquestration de carbone dans un système Agroforestier dans la Réserve de Biosphère de Luki.

L'étude de la diversité floristique à la RBL a révélé que le système Agroforestier a une diversité d'espèce plus élevée que celle du champ classique. Avec 31 espèces appartenant à 20 familles dans l'agroforesterie et 30 espèces provenant de 19 familles dans le champ classique. Par conséquent, la densité d'espèce à l'hectare dans l'agroforesterie est plus élevée que celle dans le champ classique (96 arbres/ha contre 56 arbres/ha). Ces résultats sont inférieurs à ceux trouvés par OBVALA (2021), qui avait travaillé sur une régénération naturelle assistée par la mise en défens et enrichie à *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. et *Acacia mangium* Wild. Sur deux zones dont il avait trouvé une densité de (373,3 arbre/ha contre 271,2 arbres/ha).

(Alassani Amela et al., 2024) ont travaillé sur la diversité structurale des peuplements à *Afraegle paniculata* (Schum.) dans les placettes d'agroforêts de Doufelgou au Togo et ont trouvé que les *Malvaceae* et les *Rutaceae* sont les familles les plus abondantes respectivement avec 57,07% et 55,82%, ce qui est largement supérieur à nos résultats dont la famille de *fabaceae* est la plus représentée dans les deux écosystèmes notamment avec 23%, dans le champ classique et 19,35% dans l'agroforesterie, suivi de *sapindaceae* avec 10% pour le champ classique et 9,67% pour l'agroforesterie.

(Mabanga, 2023) avait travaillé sur la diversité des ligneux et stock de carbone épigé du parc agroforestier autour de la RBL et a trouvé que les tiges de régénération sont plus abondantes soit la classe de 10-20cm: 68,4% et 22,6% pour 20-30cm, ce qui est différent de nôtre, dont les classes d'avenir sont les plus représentées, soit celle de 40-59cm à 39,28% pour le champ classique et 47,91% pour l'agroforêt, suivi de la classe de 20-39cm avec 32,14% pour le champ classique et 21,87% pour l'agroforêt. Les tiges de régénération sont les moins représentées car l'étude s'était déroulée dans les vieux agroforêts où les pratiques sylvicoles sont fréquentes, ce qui élimine souvent les pionniers (tiges de régénération).

La comparaison de l'indice de Shannon pour les deux écosystèmes montre que les moyennes dans l'agroforesterie et le champ classique sont respectivement de l'ordre 2,06 et 2,33 (Figure 5). Ces deux valeurs expliquent que les peuplements dans les deux zones sont hétérogènes; ce qui traduit la présence d'une bonne biodiversité, (Biga et al., 2020) ont trouvé l'indice de Shannon qui varie entre 3,5 et 2,6 dans un état d'une régénération et structure de la végétation ligneuse des parcs agroforestiers de l'Ouest du Niger, et l'indice d'équitabilité de Pielou qui varie de 0,7 à 0,6n traduisant ainsi une diversité moyenne dans la zone d'étude.

6 CONCLUSION

Cette étude a eu pour objectif global de quantifier la biomasse aérienne et la capacité de séquestration de carbone dans un système agroforestier dans la Réserve de Biosphère de Luki. Les résultats obtenus montrent que la flore ligneuse du champ classique et de l'agroforestier autour de la RBL est diversifiée, avec 56 individus repartis en 30 espèces appartenant à 19 familles botaniques pour le champ classique (1ha) et 96 individus repartis en 31 espèces appartenant à 20 familles botaniques pour l'agroforestier (1ha). L'écosystème agroforestier est caractérisé par une importance degré de diversification floristique par rapport à celui du champ classique. En dépit du statut de réserve de ce premier, l'association de cacaoyers aux ligneux influence fortement son développement (dynamique, structure et fonctionnement). En effet, les ligneux sont majoritairement représentés par les tiges d'avenir et ceux d'exploitables, pour les deux types d'écosystèmes.

Bien qu'ayant un bon potentiel futur de séquestration de carbone, le stock de carbone moyen de 0,34t et 0,81t respectivement dans le champ classique et l'agroforestier, contenu dans la biomasse des ligneux de ces écosystèmes, demeure faible. Ceci est le reflet de l'empreinte humaine dans les écosystèmes forestiers situés autour de la RBL où la production de combustibles ligneux est devenue l'activité qui occupe plus la population et de ce fait, il s'observe de plus en plus la transition de la forêt vers d'autres formes d'utilisation de sol. Afin de faire de cette réserve un véritable refuge de la diversité floristique et un puits important de carbone dans le contexte changeant de l'environnement global, il est nécessaire de lutter contre la déforestation et la dégradation de sa couverture forestière selon une approche paysagère. De ce fait, la promotion des systèmes agroforestiers de bon augure est d'une importance cruciale.

Au regard des résultats obtenus, il apparaît opportun au vu des enjeux socioéconomiques et environnementaux que procurent l'agroforesterie, d'élargir la quantification de la diversité spécifique et le stock de carbone dans et autour de la RBL dans les systèmes agroforestiers en intégrant la notion de la durabilité de ces systèmes selon une approche adaptée à la zone d'étude.

REFERENCES

- [1] Altieri, M. et Pengue, W. 2006. GM soybean: Latin America's new coloniser. *Seedling January*: 13-17.
- [2] Ash, N., Bennett, K., Reid, W., Irwin, F., Ranganathan, J., Scholes, R., Tomich, T.P., Brown, C., Gitay, H., Raudsepp-Heare, C., Lee, M. 2011. Les écosystèmes et le bien être humain. OislandPress, Washington, USA. 301 p.
- [3] Botarela, 2012. Le mécanisme de la photosynthèse. Repéré sur le site de Botarela, section Les stratégies de photosynthèse: <http://botarela.fr/Poaceae/Famille/Photosynthese-2.html#top>.
- [4] Bourque, 2010 Le cycle du carbone. Repéré sur le site de l'université Laval, section.
- [5] Chartier D., Nasuti S. 2009 Le délicat apprentissage d'une préservation conjointe des écosystèmes et des sociétés. pp.97-112. In GLON E. [éd]. Protéger la nature, est-ce protéger la société ? Revue Géographie et culture n°69, 2009, Publiée avec la reconnaissance scientifique du CNRS, l'Harmattan.
- [6] Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. and Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*

145: 87-99.

- [7] Christophe D. 2017. « Techniques de l'arboriste; chassez les idées reçues », Matériel et paysage, n°127, p. 28.
- [8] Day, M., Baldauf, C., Rutishauser, E. and Sunderland T.C.H. 2013. Relationships between tree species diversity and aboveground biomass in Central African rainforests: implications for REDD. *Environmental Conservation*. pp.1 - 9.
- [9] Duguma, B., Gockowski, J. and Bakala, J. 1998. Smallholder cocoa (*Theobroma cacao*) cultivation in agroforestry systems of west and central Africa: Challenges and opportunities. Paper from workshop held in Panama, 3/30-4/2, 1998. Smithsonian institution. Washington, D.C., USA.
- [10] Dupraz C., Liagre F., 2008, Agroforesterie – des arbres et des cultures. Éditions France Agricole, 410 p.
- [11] FAO 2006. Global forest resource assessment 2005. Progress towards sustainable forest management, Forestry Paper 147, 320 p.
- [12] FAO. 2003 Etude perspective du secteur forestier en Afrique: Rapport sous-régionale Afrique centrale, FOSA.
- [13] FAO. 2012 Manuel d'inventaire forestier avec références particulières aux forêts tropicales hétérogènes, O.A.A., Rome, 198 p.
- [14] Ghazoul, J. and Sheil, D. 2010. Tropical rain forest ecology, diversity, and conservation. Oxford University Press. 516p.
- [15] Gockowski, J. and Sonwa, D. 2011. Cocoa intensification scenarios and their predicted impact on CO2 emissions, biodiversity conservation, and rural livelihoods in the Guinea rain forest of West Africa. *Environ. Manage.* 48: 307-321.
- [16] Kotto-Same, J., Woomer, P.L., Mounkan, A. and Zapack, L. 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agric. Ecosyst. Environ.* 65: 245–256.
- [17] Leakey, R.R.B. 2001. Win: Win land use strategies for Africa: 1. Building on experience elsewhere and capitalizing on the value of indigenous tree products. *International Forestry Review* 3: 1-10.
- [18] Mauwa, 2012 Estimation du carbone fixe dans un bloc forestier dans la Réserve de biosphère de Luki, Mémoire fin d'étude, Faculté des sciences agronomiques, Eaux et forêts, Université de Kinshasa, Inédit. 41p.
- [19] Mavinga, M., S., 2019, Production de combustibles et dégradations des formations forestières dans l'Hinterland de Kinshasa, Thèse de doctorat en Sciences/Université de Kinshasa. Domaines: Sciences de l'Environnement - Orientation: Biodiversité et Ecosystèmes, Faculté des Sciences et Technologie, République Démocratique du Congo, 313 p.
- [20] Michel Becker, Jean-François Picard et Jean Timial, Larousse des arbres, des arbustes et des arbrisseaux de l'Europe occidentale, Larousse, 1982, p. 13; p. 11.
- [21] Montagnini, F. and Nair, P.K.R. 2004. Carbon sequestration: An under exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforest Syst* 61: 281-298.
- [22] Nair, P.K.R. 1993. An Introduction to Agroforestry. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [23] Nations Unies, 2014 Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes – ONU.
- [24] Othman., 2015 Les plantes pérennes sont des plantes ligneuses qui fabriquent des tissus secondaires durs, appelés xylème ou plus communément bois.
- [25] Parrish, J., Reitsma, R., and Greenberg, R. 1998. Cacao as crop and conservation tool. Paper from workshop on Shade Grown Cocoa held in Panama, 3/30-4/2, 1998. Smithsonian Migratory Bird Centre. Washington, D.C.
- [26] Pellerin, S. 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?, Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude. 92 p. INRA.
- [27] Poorter, L., Bongers, F., Kouamé, F.N. and Hawthorne, W.D. 2004. Biodiversity of West African Forests: An Ecological Atlas of Woody Plant Species. CABI Publishing, Nederland, Pays-Bas. 521 p.
- [28] Power, A.G. and Flecker, A.S. 1998. Agroecosystem and biodiversity. Paper from workshop held in Panama, 3/30-4/2, 1998. Smithsonian institution. Washington, D.C., USA.
- [29] Scheldeman, X. and van Zonneveld, M. 2012. Manuel de formation à l'analyse spatiale de la diversité et de la distribution des plantes. Bioversity International, Rome, Italia. 186 p.
- [30] Schroth, G., Gustavo, A.B., da Fonseca, C.A., Harvey, C., Gascon, Vasconcelos, H.L. and Izac, A-M.N. 2004. Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes. Island Press, Washington DC., USA. 523 pp.
- [31] Sheil, D., Puri, R.K., Basuki, I., van Heist, M., Wan, M., Liswanti, N., Sardjono, M.A., Samsuodin, I., Sidiyasa, K., Permana E., Angi, E.M., Gatzweiler, F., Johnson, B. and Wijaya, A. 2004. A la découverte de la biodiversité, de l'environnement et des perspectives des populations locales dans les paysages forestiers. Méthodes pour une étude pluridisciplinaire du paysage. Center for International Forestry Research. 97 p.
- [32] Smiley, G.L. and Kroschel, J. 2008. Temporal change in carbon stocks of cocoa -Giricidia.
- [33] Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Davila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Avila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E. and Deheuvels, O. 2013. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 173: 46-57.
- [34] Stephan-Dewenter, I., Kessler, M., Barkmann, J., Bosa, M., Buchori, D., Erasmih, S., Fausth, H., Geroldh, G., Glenke, K., Gradstein, S.R., Guhardjai, E., Hartvelld, M., Herteld, D., Höhna, P., Kappash, M., Köhler, S., Leuschner, C., Maertens, M., Marggrafe, R., Migge-Kleiank, S., Mogeai, J., Pitopang, R., Schaefer, M., Schwarzem, S., Sporn, S.G., Steingrebe, A., Tjitrosoedirdjo, S.S., Tjitrosoemitoi, S., Tweleh, A., Weber, R., Woltmann, L., Zeller, M.N. and Tschamtkes, T. 2007. Tradeoffs between income, biodiversity, and ecosystem functioning during tropical rainforest conversion and agroforestry intensification. *PNAS* 104 (12): 4973-4978.
- [35] Prodan, M. (1968). *Forest Biometrics*. Pergamon Press, Oxford, 447 p.
- [36] Avery, T.E. & Burkhardt, H.E. (2002). *Forest Measurements*.
- [37] Pielou, E.C. (1966). *The measurement of diversity in different types of biological collections*. *Journal of theoretical biology*, 13 (1), 131 – 144. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0).
- [38] Jaccard, P. (1901). Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura. *Bulletin de la société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 37, 547 – 579.
- [39] Meyer, H.A. (1930). *Diameter distribution series in even-aged stands*. Yale University School of Forestry Bulletin.
- [40] Fisher, R.A., Corbet, A.S. & Williams, C.B. (1943). The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population. *Journal of Animal Ecology*, 12 (1), 42 – 58.

Experimental study of the thermal performance of a hybrid photovoltaic-thermal collector

Combari Pagou Hartwig¹, Djiguemde Bagre Sara², Dianda Boureima², Traore Damus Abdoul Aziz¹, Tamboura Alou², and Iname Allasane¹

¹University Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso

²National Center for Scientific and Technological Research, Ouagadougou, Burkina Faso

Copyright © 2026 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: Photovoltaic solar modules are in high demand in Sahel countries. Unfortunately, the intense heat reduces the performance of these modules. Cooling them is therefore recommended. One technique for cooling a photovoltaic solar module involves coupling it with a solar thermal collector to recover some of the heat produced and transfer it to a heat transfer fluid. This work is a comparative experimental study of the thermal performance of a solar thermal collector and a hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) solar collector. A water-based solar thermal collector and a hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collector were designed. This experimental study consisted of monitoring the evolution of the water temperature at the inlet and outlet of each collector, the temperature at the surface of the PV-T module, the temperature of the air confined within the solar thermal collector, and the site's solar irradiance. The results showed a maximum hot water temperature of 87°C for the solar thermal collector and 74°C for the PV-T solar collector under a maximum solar irradiance of approximately 985 W/m². The thermal efficiency of the PV-T collector is about 0.36 times greater than that of the solar thermal collector. These results clearly demonstrate that sufficient heat can be recovered with a PV-T collector.

KEYWORDS: solar thermal collector, PV-T collector, water, temperature, efficiency.

1 INTRODUCTION

Solar energy represents an inexhaustible primary energy source on a human scale. Its use poses no danger to the environment or living beings. Solar energy is used either for thermal energy production through solar water heaters, solar dryers, etc., or for electrical energy production through PV solar modules and thermodynamic solar power plants. While temperature increase is a major advantage for solar thermal and thermodynamic collectors, the same is not true for PV solar modules. In fact, the efficiency of a photovoltaic solar module decreases as its temperature rises, leading to a drop in production. Cooling a photovoltaic solar module is a major problem, especially in hot countries [1]. The hybrid photovoltaic/thermal solar collector is therefore a solution to overcome this problem. A hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collector is a device that allows the simultaneous production of electricity and heat. It enables true energy cogeneration by allowing the exploitation of the electricity and heat produced. It consists of a flat-plate solar collector and a photovoltaic solar module (crystalline or amorphous). There are several types of PV-T collectors: water-based, air-based, and nanoparticle-based PV-T collectors. The literature reveals enough studies conducted to determine the performance of these PV-T collectors and the parameters influencing this performance. Tiwari et al. (2007) [2], following a parametric study on glazed and unglazed air-based PV-T collectors, found that adding the extra glass almost doubles the useful thermal efficiency, while the electrical efficiency drops by about 10%. Sarhaddi et al. [3] performed an energy and exergetic analysis of a hybrid PV-T air solar collector. The exergetic efficiency of this PV-T collector was approximately 10.75%. Tiwari et al. (2006) [4] also presented a steady-state theoretical and experimental study of a naturally or mechanically ventilated air PV-T solar collector. Their study showed that additional recovery of the thermal energy produced improves the overall efficiency of the air PV-T system by approximately 18%. Tripanagnostopoulos et al., [5] conducted a study on PV-T solar collectors using either air or water as the

heat transfer fluid. The objective of their work was to cool the PV solar modules and increase hot air production. While air PV-T solar collectors offer advantages (no freezing, no damage in case of leaks), they are less efficient compared to water-based hybrid PV-T collectors. A glazed water-based PV-T solar collector was studied by Sandnes and Rekstad [7]. The objective of their work was to evaluate the thermal and electrical performance, as well as the interactions between the hot water production and the electrical production of the collector. Ben Cheikh et al. [8] presented a study on the performance of a hybrid water-based solar collector through the development of a heat balance that incorporates the heat exchanges between the different components of the hybrid collector. They concluded that the fluid outlet temperature increases with radiation and that the temperature of the photovoltaic solar cells in the hybrid collector is lower than that of conventional PV solar cells. A. Khelifa et al., [9] performed a numerical study of a water-based PV-T collector. They showed that the device's efficiency is a function of radiation. H. Ben Cheikh et al. carried out a numerical modeling of a water-based PV-T solar collector. They concluded that this technology is an alternative to photovoltaic solar generators and conventional thermal solar collectors installed separately. Faizal et al., [10] studied the thermal performance of nanofluid solar collectors. The results confirmed that the higher density and lower specific heat of nanofluids offer a higher thermal efficiency than water. Luo et al., [11] simulated the performance of a solar collector with nanofluids using a 2D model and by solving the radiative transport equations of the particulate media and the combination of the heat transfer equations by conduction and convection. Their results show that the use of the nanofluid solar collector can improve efficiency and output temperature. Rahman et al., [12] performed a numerical study for a triangular solar collector with nanofluids using the Galerkin weighted residual finite element method for a wide range of Grashof numbers (Gr). Ladjevardi et al., [13] numerically studied the effects of using nanofluids on the performance of a solar collector. They showed that the thermal efficiency of the nanofluid-based collector increases by approximately 88% compared to that of a pure water collector at an inlet temperature of 313 K.

In a previous work, Dianda et al (2018) [14] conducted a numerical study on the electrical and thermal performance of a PV-T sensor. This work follows on from this previous work with a comparative experimental study of the thermal performance of a thermal sensor and a hybrid PV-T sensor.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALS

Two systems have been put in place: a solar thermal collector and a hybrid solar PV-T collector.

2.1.1 THE SOLAR THERMAL COLLECTOR

The solar thermal collector studied is a flat-plate glazed collector using water as the heat transfer fluid.

It essentially consists of a glass pane, an absorber, a coil, and insulation.

THE GLASS OR TRANSPARENT COVER

The glass serves to protect the absorber, limit heat loss upwards and create a greenhouse effect in the solar thermal collector. The glass used is clear glass. Table 1 shows some of the characteristics of the glass used.

Table 1. Characteristics of the type of glass used [15]

Type of glass	Reflection (%)	Absorption (%)	Transmission (%)
Clear glass	8	9	83

This choice is motivated by the availability of the material and its more attractive purchase cost. Clear glass also has some interesting characteristics.

THE ABSORBER

The absorber is the component of the solar thermal collector that captures solar radiation, converts it into heat and transfers it to the heat transfer fluid. It must have good thermal conductivity, a high absorption coefficient and, above all, low emissivity.

We used a black-painted aluminium sheet absorber measuring 0.5 m long and 0.4 m wide.

Table 2 shows some of the characteristics of this absorber.

Table 2. Absorber characteristics [16]

Material	Thermal conductivity (w/m °C)	Coefficient of expansion	Absorption (%)	Emission (%)
Aluminium	230	2,38	0.92-0.97	0.95

THE INSULATION

It is used in a solar thermal collector to prevent heat loss downwards. Generally speaking, the choice of insulation is made by considering certain parameters such as thermal conductivity, maximum operating temperature under steady-state conditions, sensitivity to humidity, and cost.

We chose fiberglass as our insulation.

Table 3 presents some characteristics of glass wool

Table 3. Characteristics of glass wool [16]

Materials	Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Maximum operating temperature (°C)
Glass wool	0,030-0,040	150

We chose it because of its rather interesting physical characteristics.

THE COIL

The coil, or water circulation pipe, recovers the heat produced at the absorber and transfers it to the water. The coil is made of copper and is ladder-shaped to facilitate the circulation of hot water by thermosiphon.

Figure 1 shows the different elements of the thermal sensor.

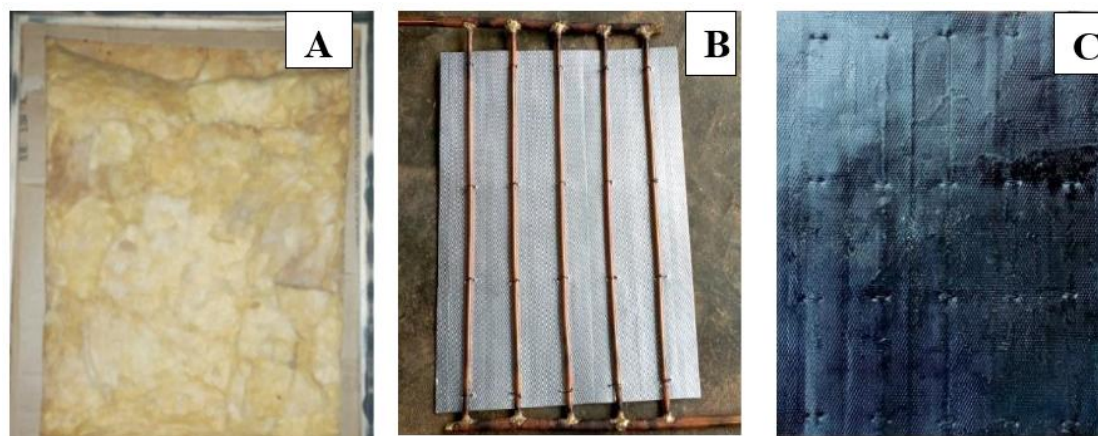


Fig. 1. Elements of the thermal sensor: A- the insulator B- the coil C- the absorber

2.1.2 THE PV-T HYBRID SOLAR COLLECTOR

The hybrid PV-T solar collector, as its name suggests, consists of a PV solar collector and a thermal collector designed to recover the heat produced by the PV module.

The thermal solar collector is similar to the one described in the previous section but without a transparent cover (glass). This collector is placed below the PV module.

The PV solar module occupies the space previously occupied by the transparent cover of the thermal collector. The characteristics of the PV module are listed in Table 4.

Table 4. Characteristics of the PV solar module used

Brand	ETDF German technology
Model	50P
Maximum power (P_{max})	50 W
Power Tolerance	$\pm 3\%$
Maximum power voltage (V_{mp})	17,70 V
Maximum power current (I_{mp})	2,83 A
Open circuit voltage (V_{oc})	21,60 V
Short circuit current (I_{sc})	3,13 A
Maximum system voltage	DC 1000 V
Maximum series fuse	15 A
Weight	4,0 Kg
Dimensions	660*550*25mm
Am	1,5
E	1000 W/m ²
Température	25°C
NOCT (Air 20 °C, Sun 1kW/m ² , Wind 1 m/s)	50°C
Application class	Class A

Figure 2 shows the rear face of the PV-T hybrid module.

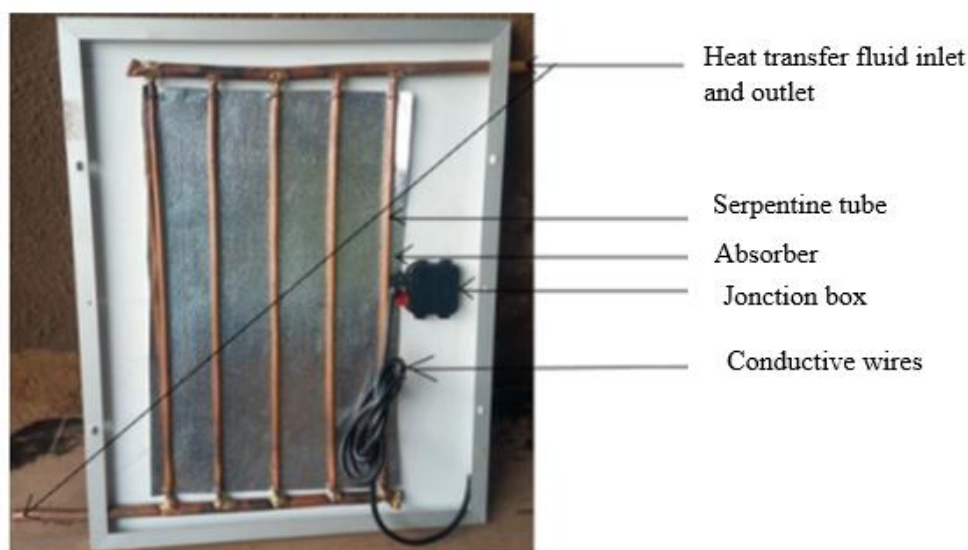


Fig. 2. PV-T solar module without its insulation

2.1.3 MEASURING DEVICES

The temperature evolution of certain parts of the two sensors was monitored using a datalogger equipped with ten thermocouples. Sunlight was also measured using a solarimeter.

Figures 3 and 4 show the measuring devices.



Fig. 3. Datalogger



Fig. 4. Solarimeter

2.2 METHODS

2.2.1 EXPERIMENTAL PROTOCOL

The experimental study consisted of monitoring the temperatures of certain elements of the two sensors and the amount of sunlight throughout the day. This was done to determine the thermal performance of these sensors. The temperatures recorded were that of the water at the inlet and outlet of the sensors, that of the rear surface of the hybrid PV-T solar module, and that of the air confined under the glass of the thermal sensor.

2.2.2 ELEMENTS FOR CALCULATING PERFORMANCE

The thermal efficiencies of the solar thermal collector and the hybrid PV-T solar collector were evaluated and compared.

The efficiency of the solar thermal collector is given by equation 1 :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{th} c \Delta T_{th}}{I_{th} A_{th}} \quad (1)$$

where $\dot{m}_{th}$ is the mass flow rate of water at the thermal sensor (kg/s)

ΔT_{th} is the temperature variation of the water at the thermal sensor (K)

c is the specific heat capacity of water (J/kg.K)

I_{th} represents the solar flux arriving at the thermal collector (W/m²)

A_{th} denotes the area of the thermal sensor (m²)

The efficiency of the hybrid PV-T sensor is given by relation 2 :

$$\eta_{PVT} = \frac{\dot{m}_{PVT} c \Delta T_{PVT}}{I_{PVT} A_{PVT}} \quad (2)$$

where $\dot{m}_{PVT}$ is the mass flow rate of water at the level of the PV-T hybrid sensor (kg/s)

ΔT_{PVT} is the variation in water temperature at the level of the PV-T hybrid sensor (K)

I_{PVT} denotes the solar flux arriving at the hybrid PV-T sensor (W/m^2)

A_{th} denotes the area of the hybrid PV-T sensor (m^2)

The quotient of equations 1 and 2 allows a comparison of the thermal efficiencies of the two sensors on the energy supplied by the thermal solar sensor and the hybrid PV-T solar sensor.

$$r = \frac{\eta_{th}}{\eta_{PVT}} \quad (3)$$

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 TEMPORAL CHANGES IN TEMPERATURE AND SUNSHINE

The temperature variations of the different elements and the solar irradiance over time are recorded as graphs.

The various tests on the two sensors were carried out simultaneously.

TEMPERATURE CHANGES IN THE DIFFERENT ELEMENTS OF THE THERMAL SENSOR

Figure 5 shows the temporal evolutions of sunshine, water temperatures at the inlet and outlet of the thermal sensor during the day.

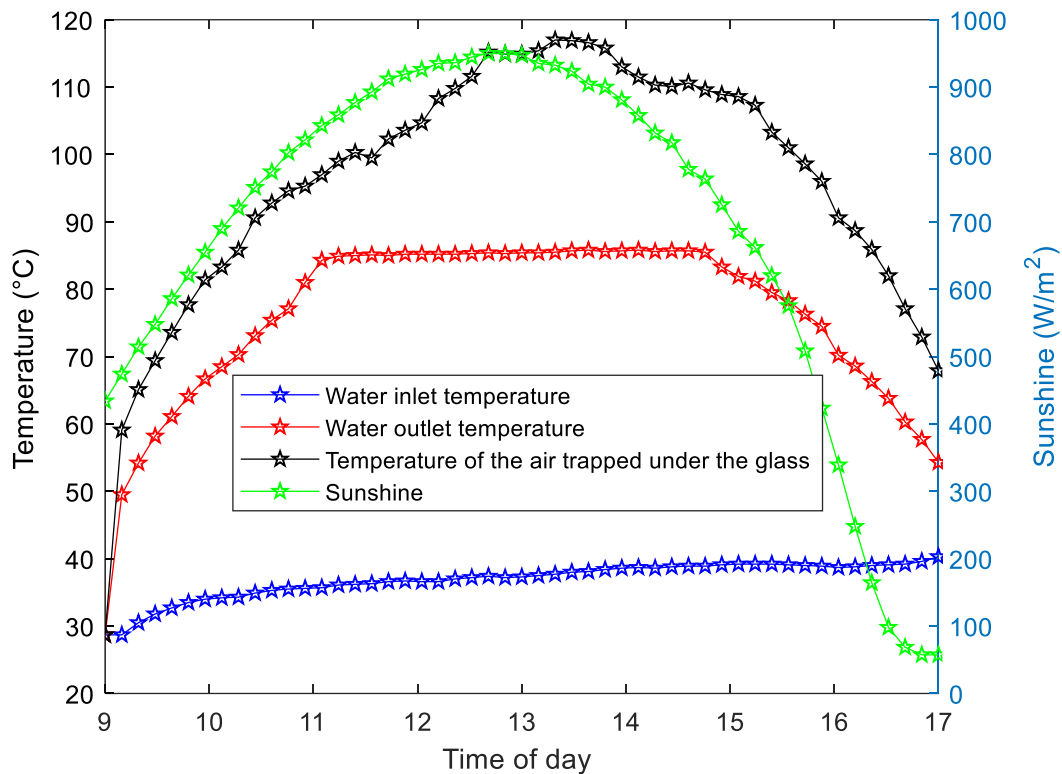


Fig. 5. Evolution of sunlight and temperatures of the different elements of the solar thermal collector during the test day

The solar irradiance increases from 9: 00 AM to 12: 30 PM, reaching its maximum value of approximately $985 W/m^2$. It then decreases rapidly, reaching a value of $50 W/m^2$ around 5: 00 PM. The average daily solar irradiance is approximately $500 W/m^2$. The air trapped between the glass and the absorber follows a similar pattern to the solar irradiance. This behavior is explained

by the fact that the heat obtained originates from the ground. It reaches a temperature of approximately 118°C. This explains the good performance of the thermal collector. The water supplying the collector comes from the national water distribution network. Its temperature varies slightly from 30°C to approximately 40°C. The water temperature at the collector outlet evolves according to a rising (rapid) phase from 9am to 11am, a falling phase from 2: 45pm to 5pm and a phase at a stable temperature of 87°C between 11am and 2: 45pm. This significant rise in water temperature of approximately 40°C demonstrates good thermal conversion of the solar thermal collector.

TEMPERATURE EVOLUTION OF THE DIFFERENT ELEMENTS OF THE HYBRID PV-T SOLAR COLLECTOR

Figure 6 shows the temporal evolution of sunlight and temperatures of certain elements of the hybrid PV-T sensor.

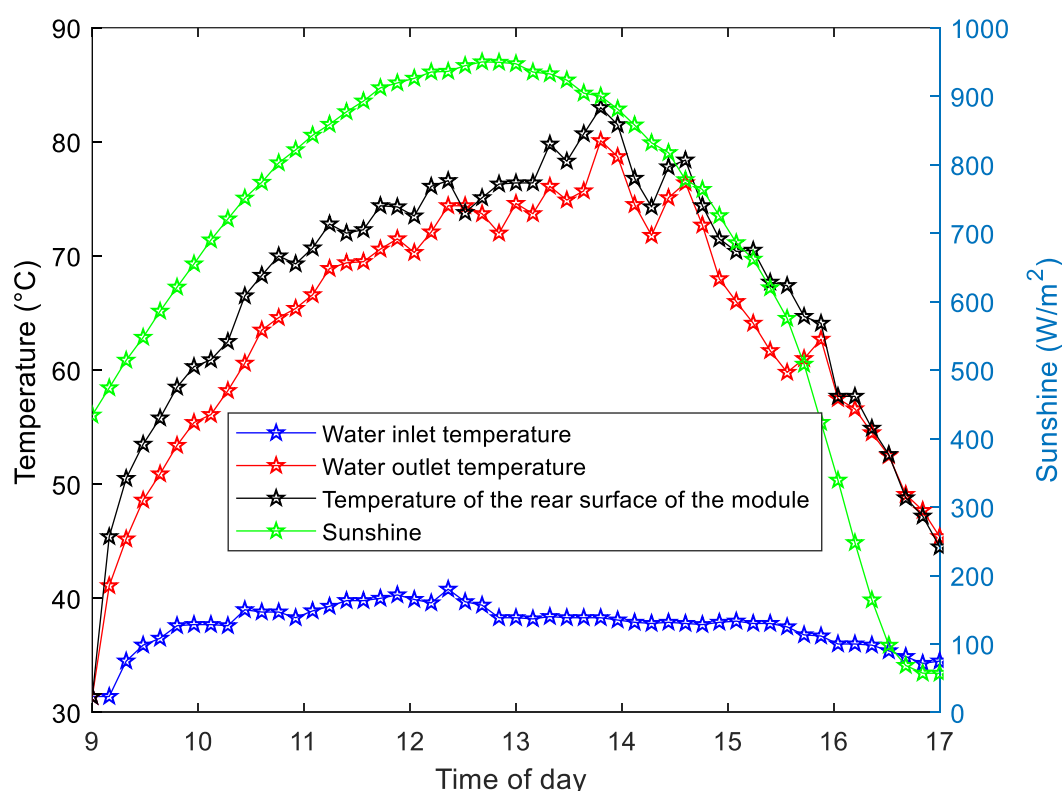


Fig. 6. Temporal evolution of the temperatures of the different elements of the hybrid PV-T solar collector during the day

A solar thermal collector is placed on the back of the PV module to recover heat. Figure 6 shows that the temperatures of the water and the back of the PV module evolve similarly, with the temperature at the back of the module being slightly higher than that of the water (at the outlet). This demonstrates good "direct" heat transfer from the absorber to the water. The maximum temperature reached by the water is approximately 80°C. The temperature of the mains water supplying the collector fluctuates slightly between 30°C and 40°C. Between 11: 00 AM and 2: 45 PM, the average temperature of the hot water is approximately 74°C. The significant rise in water temperature indicates the amount of heat recovered by the PV module.

COMPARATIVE EVOLUTION OF WATER OUTLET TEMPERATURES IN THE THERMAL COLLECTOR AND IN THE PV-T COLLECTOR

Figure 7 shows the comparative evolution of the water outlet temperatures in the thermal collector and in the PV-T collector.

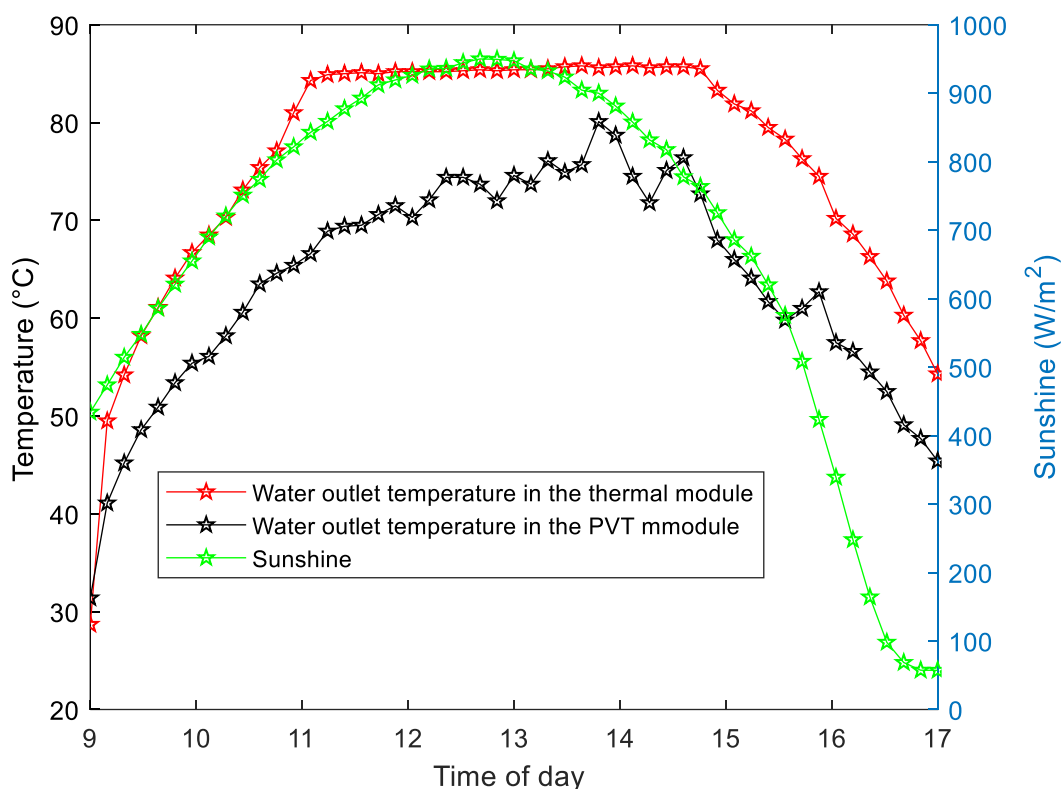


Fig. 7. Temporal evolution of water outlet temperatures in the thermal collector and in the PV-T hybrid solar collector

Comparing the water outlet temperatures of the solar thermal collector and the PV-T hybrid solar collector, the thermal solar collector's water outlet temperature is higher than that of the PV-T hybrid solar collector. This is explained by the fact that the thermal solar collector receives direct solar radiation. However, the fact that the temperature differences are not large demonstrates the efficiency of the PV-T hybrid collector.

3.2 EFFICIENCY RATIO

The efficiency ratio given by equation (3) was calculated assuming that the mass flow rates of water in the solar thermal collector and in the hybrid PVT solar collector are identical.

A value has been found. This shows that the solar thermal collector has an efficiency approximately 2.75 times that of the hybrid PV-T solar collector, and that the hybrid PV-T collector has an efficiency approximately 0.36 times that of the hybrid collector. This result clearly demonstrates that hybridization offers a dual advantage: the production of hot water and the cooling of the PV module.

4 CONCLUSION

In this experimental study, the thermal performance of a hybrid PV-T solar collector and a conventional solar thermal collector was evaluated. The results show that the water temperature at the outlet of the solar thermal collector is higher than that of the hybrid collector. However, the latter can reach 74°C. The hybrid PV-T solar collector has an efficiency exceeding one-third that of the conventional solar thermal collector. Hybridization therefore offers advantages. Indeed, it allows for the production of hot water at a relatively high temperature while simultaneously cooling the PV module, thus improving its electricity production. In this experimental study, the thermal performance of a hybrid PV-T solar collector and a conventional solar thermal collector was evaluated. The results show that the water temperature at the outlet of the solar thermal collector is higher than that of the hybrid collector. However, the latter can reach 74°C. The hybrid PV-T solar collector has an efficiency exceeding one-third that of the conventional solar thermal collector. Hybridization therefore offers advantages. Indeed, it

allows for the production of hot water at a relatively high temperature while simultaneously cooling the PV module, thus improving its electricity production.

REFERENCES

- [1] H. Ramdani, Modélisation des Performances d'un Capteur Hybride Photovoltaïque/Thermique à Base d'un Nanofluide TiO₂, Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2022.
- [2] A. Tiwari et M. S. Sodha, « Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, n° 1, p. 17-28, 2007.
- [3] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, et A. Behzadmehr, « Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector », *Energy Build.*, vol. 42, n° 11, p. 2184-2199, 2010.
- [4] A. Tiwari, M. S. Sodha, A. Chandra, et J. C. Joshi, « Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, n° 2, p. 175-189, 2006.
- [5] Y. Tripanagnostopoulos, « Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems », *Sol. Energy*, vol. 81, n° 9, p. 1117-1131, 2007.
- [6] J.-H. Kim, S.-H. Park, et J.-T. Kim, « Experimental performance of a photovoltaic-thermal air collector », *Energy Procedia*, vol. 48, p. 888-894, 2014.
- [7] B. Sandnes et J. Rekstad, « A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model », *Sol. Energy*, vol. 72, n° 1, p. 63-73, 2002, doi: 10.1016/S0038-092X(01)00091-3.
- [8] H. Ben Cheikh El Hocine et M. Marir-Benabbas, « Etude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PVT », *Revue Energ. Renouvelables*, vol. 16, n° 2, p. 257-268, 2013.
- [9] A. Khelifa et K. Touafek, « Etude de l'influence des paramètres externes et internes sur le capteur hybride photovoltaïque thermique (PVT) », *J. Renew. Energ.*, vol. 15, n° 1, p. 67-75, 2012.
- [10] M. Faizal, R. Saidur, S. Mekhilef, et M. A. Alim, « Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector », *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, p. 162-168, 2013.
- [11] Z. Luo, C. Wang, W. Wei, G. Xiao, et M. Ni, « Performance improvement of a nanofluid solar collector based on direct absorption collection (DAC) concepts », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 75, p. 262-271, 2014.
- [12] M. M. Rahman, S. Mojumder, S. Saha, S. Mekhilef, et R. Saidur, « Augmentation of natural convection heat transfer in triangular shape solar collector by utilizing water based nanofluids having a corrugated bottom wall », *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 50, p. 117-127, 2014.
- [13] S. M. Ladjevardi, A. Asnaghi, P. S. Izadkhast, et A. H. Kashani, « Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption », *Sol. Energy*, vol. 94, p. 327-334, 2013.
- [14] Boureima Dianda, Thierry Sikoudouin Maurice KY, Emmanuel Ouedraogo, Koami Soulemmane Hayibo and Dieudonné Joseph Bathiebo, Theoretical Study of a Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector, Indian Journal of Science and Technology, Vol 11 (43), 2018, DOI: 10.17485/ijst/2018/v11i43/132133.
- [15] H. Abdi, Contribution à la détermination des performances de capteurs plans a contact direct eau-plaque d'absorption, PhD Thesis, Blida, 1999.
- [16] H. Abdi, « Contribution à la détermination des performances de capteurs plans a contact direct eau-plaque d'absorption », PhD Thesis, Blida, 1999.

Comparaison de quatre techniques de pollinisation sur la maintenance phénotypique de lignées épurées du maïs (*Zea mays* L.) à Kinshasa

[Comparison of four pollination techniques for the phenotypic maintenance of maize inbred lines (*Zea mays* L.) in Kinshasa]

Christophe Asanzi Mbeyame^{1,2}, David Nsimba Nsiku^{1,3}, and Marie-Thérèse Kilima Salima¹

¹Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, RD Congo

²Institut National pour les Etudes et la Recherche Agronomiques (INERA), RD Congo

³Recherche and développement, Centre de Recherche en Agrumiculture (CERAGRU), Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2026 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 present study consists in comparing pollination techniques in order to maintain the phenotypic characteristics of maize inbred lines. In fact, the objective of this work was to detect the influence of different pollination techniques on the maintenance of some characters of four maize inbred lines (i.e., REGN, CZL0919, MUL692 and CML312) in order to identify the most conservative multiplication technique of these inbred lines. To achieve this, two experiments were carried out. The first one consisted in maintaining the inbred lines according to the four techniques (selfing, SIB crossing, pollination with pollen bulk, and natural pollination in an isolated crossing block); and the second one consisted in the evaluation of their descendants (offspring) according to a split plot design with three replications at the Seed Production Center (CEPROSEM). The results of this study revealed that the selfing method presented the lowest genetic variance to the initial population. Therefore, this explains that the selfing method is the most conservative mode of multiplication. Notwithstanding, moving from one season to another, one should switch between self-fertilization (selfing) and the pollinisation with a bulk of pollen (half-sib), whether that being natural or artificial, to avoid the phenomenon of gene depression.

KEYWORDS: heredity, trait, inbreeding, gene, fertilization, seeds, hybrids.

RESUME: Le présent travail consiste à comparer les techniques de pollinisation en vue de maintenir quelques caractères phénotypiques de quatre lignées épurées du maïs (REGN, CZL0919, MUL692 et CML312). L'objectif est de mettre en évidence la technique de multiplication la plus conservatrice de ces lignées de maïs. Pour y arriver, deux expériences ont été conduites: la première a consisté au maintien des lignées suivant les quatre techniques (Auto-fécondation « Selfing », pollinisation enchaînée plant à plant « S.I.B Crossing », pollinisation avec mélange de grains de pollen « Bulk » et la pollinisation naturelle sur un bloc de croisement isolé; et la seconde a consisté en l'évaluation de leurs descendances suivant un dispositif en parcelles subdivisées (*split plot design*) avec trois répétitions, pendant la campagne agricole 2020-2021 au Centre de Production de Semences (CEPROSEM). Les résultats issus de cette étude ont révélé que la technique d'auto-fécondation a présenté une distance génétique plus faible par rapport au matériel initial. Ceci explique que l'auto-fécondation est le mode de multiplication le plus conservateur de lignées comparées, suivie du mélange de grains de pollen. Nonobstant, pour passer d'une saison à l'autre, il est recommandé d'alterner l'auto-fécondation et la pollinisation avec mélange de grains de pollen (demi-frères) qu'il soit naturel ou artificiel, en vue d'éviter le phénomène de la consanguinité.

MOTS-CLEFS: hérédité, caractère, consanguinité, gène, fécondation, semences, hybrides.

1 INTRODUCTION

La culture de maïs est, après celle de blé et du riz au niveau mondial, l'une des cultures les plus importantes pour l'alimentation directe ou indirecte de l'homme [1]. Il constitue la deuxième culture vivrière après le manioc, en République Démocratique du Congo [2].

Avec 360 calories et 9,3 à 15-17% de protéines pour cent grammes de grains dans les variétés du maïs Opaque2 (Quality Proteine Maize), le maïs peut contribuer à la satisfaction des besoins énergétiques et nutritionnels des populations qui ont le maïs comme aliment de base [3].

La ville province de Kinshasa est l'une des provinces (avec le Katanga, le Kasai et le Bandundu) où la consommation du maïs est élevée en RD Congo [3]. A titre d'exemple, la consommation du maïs a été estimée à 15 kg/tête/an en 2012 [4].

Le maïs est cultivé à travers toutes les provinces du pays où il est présent dans la quasi-totalité des champs en culture pure ou en association avec d'autres cultures [5]. Il est surtout produit par les exploitations traditionnelles de très petite taille, centrées sur la sécurité alimentaire familiale et sert de matière première pour certaines industries dont la brasserie, la savonnerie, et l'huilerie [6].

Les rendements moyens nationaux restent faibles (0,8 à 1 t/ha) à cause de la faible utilisation des variétés améliorées et des intrants agricoles connexes, et de l'importance des dégâts dus aux divers bio agresseurs [1].

La variabilité génétique est à la base de tout programme d'amélioration des plantes. C'est un réservoir dans lequel le sélectionneur puise pour mettre au point des variétés qui répondent le mieux à des exigences précises [7].

L'augmentation de rendement de maïs est fortement liée à l'amélioration génétique, 60% aux USA et 58% en France [1]. Les hybrides, à cause de l'effet hétérosis, sont plus productifs et rentables par rapport aux variétés à pollinisation libre [4]. La création d'hybrides passe avant tout par l'obtention des lignées fixées qui prend jusqu'à 8 générations d'auto-fécondations, ce processus peut prendre 4 à 8 ans. Or ces dernières, non seulement il faut les épurer, mais il faut aussi réussir à assurer leur maintenance génétique. Le maintien de lignées épurées permet de contrôler génétiquement la création des hybrides en vue d'améliorer la productivité du maïs [8].

Selon [9], la production des semences certifiées de maïs hybrides implique de maximiser la pureté des grains. Il est donc très important d'anticiper le maintien des caractères des lignées épurées afin de réduire les risques de perdre leurs caractères. Cet exercice constitue un goulot d'étranglement pour les semenciers et serait même à la base du coût élevé des semences hybrides.

Vu l'urgence et la nécessité, il importe de trouver une méthode de pollinisation qui maintiendrait les caractères des lignées dans un temps record. Raison pour laquelle cette étude intitulée « Comparaison de quatre techniques de pollinisation sur le maintien de quelques caractères des lignées épurées du maïs (*Zea mays* L.) à Kinshasa » a été entreprise.

L'objectif global de ce travail est la création des hybrides pouvant assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle, ainsi que la réduction de seuil de pauvreté de population congolaise.

De manière spécifique, cette étude vise à:

- Déceler l'influence de quatre techniques de pollinisation sur le maintien de quelques caractères de quatre lignées épurées du maïs; et
- Identifier la technique de multiplication la plus conservatrice de ces lignées de maïs.

Ces quatre modes sont: l'Auto-fécondation (AF), la technique de pollinisation enchainée plant à plant (PP), le mélange de grains de pollen (MP) et la pollinisation naturelle en blocs isolés (PN).

A moyen ou à long terme, les lignées maintenues seront le point de départ de plusieurs travaux d'amélioration variétale du maïs en RDC. Elles serviront entre autres à faire:

- Des croisements pour l'obtention des hybrides, de synthétiques et de composites; qui pourront combiner leurs performances agro-morphologiques en vue de l'amélioration de la productivité du maïs;
- L'hybridation pour l'obtention de variétés à potentialités agronomiques élevées.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MILIEUX D'ÉTUDES

2.1.1 LOCALISATION

Les expériences ont été menées durant trois saisons, du 19 octobre 2020 au 27 octobre 2021, sur deux sites expérimentaux différents: au Centre de Production des Semences (CEPROSEM) et au site expérimental de la Faculté des Sciences Agronomiques de Université Pédagogique Nationale (UPN). Ces deux sites qui se trouvent dans la ville de Kinshasa, jouissent des mêmes conditions climatiques de cette ville située entre 15° 14' longitude Ouest et 4° 22' latitude Sud et à 550 m d'altitude.

Sa couverture pédologique est du type sableux, avec un pH oscillant autour de 5,7 [4]. Concernant la végétation précédente, le terrain a été couvert par une végétation composée de: *Mucuna pruriens*, *Eleusine indica*, *Boeravia diffusa*, *Panicum maximum*, *Carex spp.* et *Tridax procumbens*.

2.1.2 CLIMAT

Le climat de la ville province de Kinshasa est tropical chaud et humide du type AW₄, selon la classification de Köppen. Il est marqué par l'alternance de deux saisons:

- Une grande saison sèche de quatre mois qui va de mi-mai à mi-septembre;
- Une grande saison de pluie allant de mi-septembre à mi-janvier.

Elles sont intercalées respectivement par deux petites saisons: la petite saison sèche entre mi-janvier et mi-mars et la petite saison de pluie entre mi-mars et mi-mai [10].

Les données météorologiques ayant prévalu pendant la période expérimentale sont présentées dans les figures 1, 2 et 3.

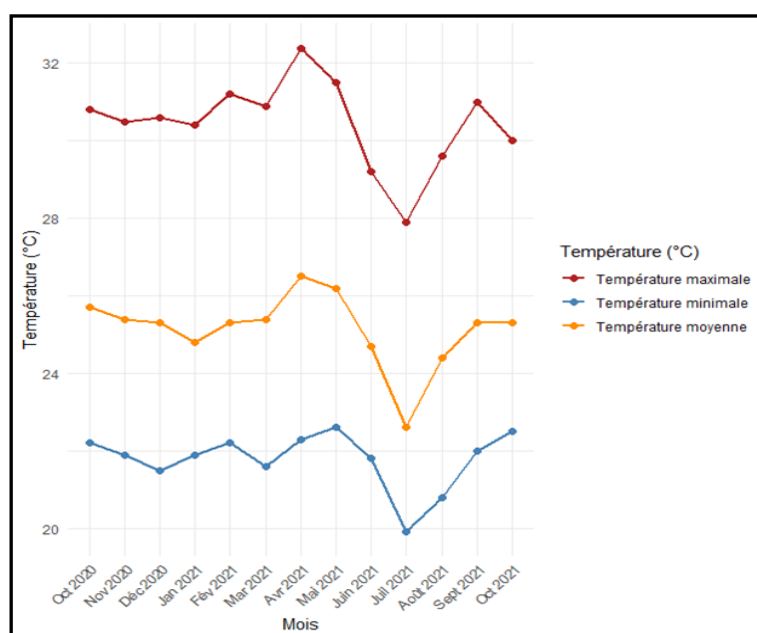


Fig. 1. Températures minimale, moyenne et maximale mensuelles

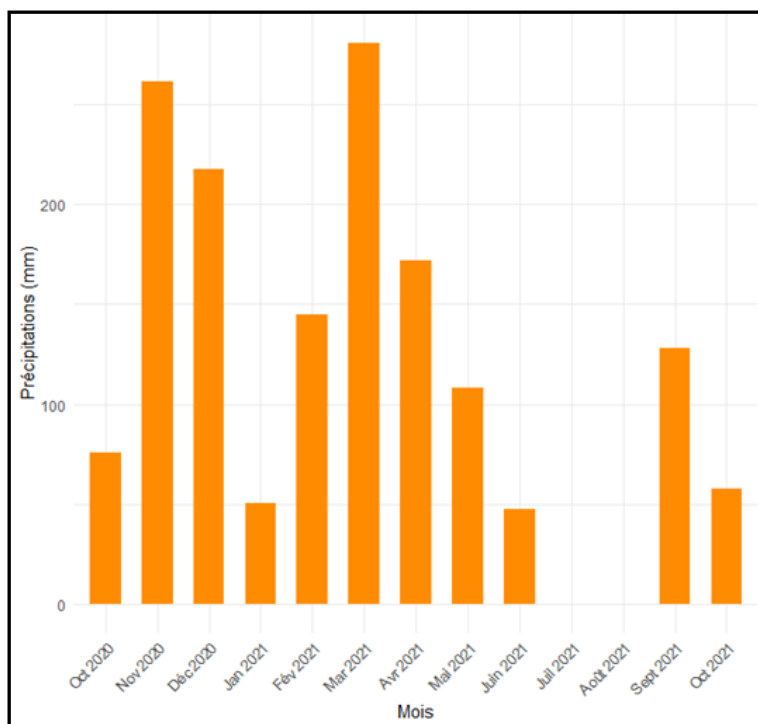


Fig. 2. Précipitations mensuelles

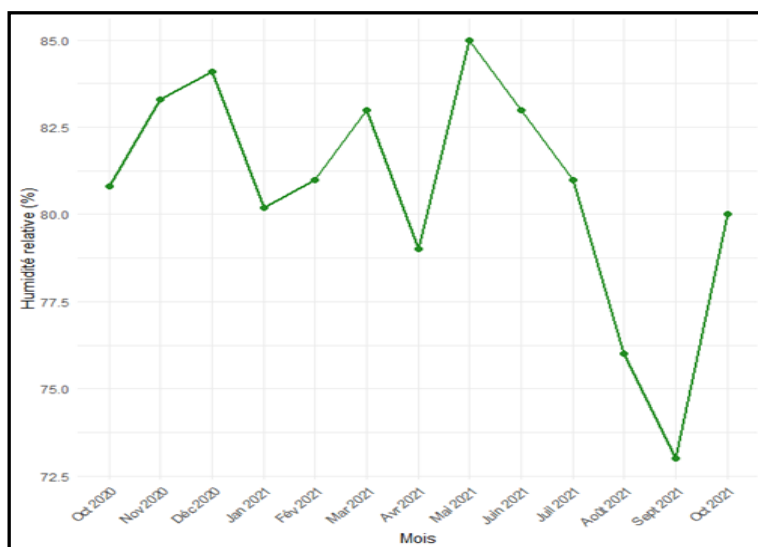


Fig. 3. Humidité relative mensuelle

2.2 MATÉRIEL

2.2.1 MATÉRIEL GÉNÉTIQUE

Le matériel génétique utilisé dans notre étude était constitué des semences de quatre lignées épurées du maïs, il s'agit de: REGN, CZL0919, MUL 692 et CML 312. Ces lignées sont originaires du Centro Internacional de *Mejoramiento de Maíz y Trigo* (CIMMYT Harare) et de *Kenyan Agricultural and Livestock Research Organization* (KALRO Nairobi).

2.2.2 MATÉRIEL DE POLLINISATION

- Les agrafes: pouragrafer les enveloppes;
- Les enveloppes Kaki de pollinisation: qui ont servi à isoler les panicules pour récolter les grains de pollens du plant mâle et les ensemençer sur la soie de la plante femelle recouvrir l'épi après avoir effectué la pollinisation;
- Les sachets d'isolation de l'épi: pour isoler les soies;
- L'agrafeuse: pour attacher les enveloppes couvrant les panicules et l'épi à la plante; et
- Le marqueur: pour mentionner sur les enveloppes la date et les méthodes de pollinisation utilisée sur les lignées.

2.3 MÉTHODES

L'expérimentation a connu deux phases: la première a consisté à la maintenance des lignées épurées de maïs par les quatre techniques de pollinisation, et la seconde a consisté en l'évaluation des descendance.

2.3.1 MAINTENANCE DES LIGNÉES ÉPURÉES PAR POLLINISATION CONTRÔLÉE ET PAR POLLINISATION NATURELLE

A. POLLINISATION CONTRÔLÉE

Cet essai a été conduit au CEPROSEM du 19 octobre 2020 au 28 février 2021, quatre lignées épurées ont été utilisées notamment: REGN, CZL0919, MUL 692 et CML 312. Trois méthodes de pollinisation ont été appliquées:

- L'autofécondation (AF);
- La pollinisation plant à plant (PP); et
- Le mélange de grains de pollen (MP).

Pour y parvenir, deux blocs de croisement ont été utilisés dans cet essai, séparés l'un de l'autre par un sentier de 2 m. Ces blocs mesuraient chacun 9 m sur 5 m.

Le terrain a subi un hersage de 20 cm de profondeur à l'aide d'un motoculteur. 200 kg de Diammonium phosphate (18N-46P₂O₅) ont été appliqués comme engrais de fond, 3 jours avant le semis par un épandage manuel suivi de l'incorporation avec du râteau. Les grains de quatre lignées épurées (REGN, CZL0919, CML312 et MUL692) ont été semés en date du 19 octobre 2020 aux écartements de 75 cm x 25 cm (soit une densité de 53 333 plants/ha) avec 2 grains par poquet de 4 cm de profondeur. 21 jours après le semis, un démariage a été effectué en laissant un plant par poquet.

Deux sarclages ont eu lieu: le premier 20 jours après le semis et le second suivi d'un buttage 30 jours plus tard. Deux applications d'urée ont eu lieu comme fumure d'entretien, 50 kg appliqués 21 jours après semis en combinaison avec 100 kg de NPK (17-17-17) et 50 kg 25 jours plus tard. Ceci a conduit aux doses de 99 kg N, 109 kg de P₂O₅ et 17 kg de K₂O par hectare. Signalons également que deux traitements phytosanitaires ont été administrés pour contrôler la chenille légionnaire d'automne, en utilisant l'Emacot. La récolte a eu lieu 131 jours après le semis et chaque lignée épurée était récoltée individuellement. Les semences obtenues ont été séchées, traitées et stockées en vue des travaux ultérieurs.

A.1 ISOLEMENT DES INFLORESCENCES

Le but de l'isolement était de protéger les parcelles de production de semences de toute pollution par un grain de pollen d'origine génétique étrangère [1].

Lors des croisements, le sachet qui protégeait l'épi était retiré très rapidement avec soin. Il était important de prendre ces précautions pour éviter les contaminations. Mais cela n'exclue pas les possibilités de contaminations dues aux grains de pollen étrangers. La courte période pendant que la soie est exposée pour recevoir le grain de pollen, donne une probabilité de 1% à un grain de pollen étranger de se déposer sur celle-ci [11].



Planche 1. Isolement de l'inflorescence mâle (panicule)



Planche 2. Isolement de l'inflorescence femelle (soie)

A.2 AUTOFÉCONDATION (AF)

La lignée était obtenue en utilisant les grains de pollen d'une plante pour féconder les soies de la même plante. La procédure est la suivante:

- Couvrir les inflorescences femelles avec les sachets d'isolation;
- Protéger les inflorescences mâles par les enveloppes au moins huit heures avant la pollinisation (pour éviter la contamination) pour permettre de conserver côte à côte les lignées différentes, sans que l'on soit obligé de les disperser en de nombreuses parcelles isolées;
- Choisir les bonnes plantes sur chaque ligne de chaque lignée;
- Récolter les pollens sur une plante X d'une lignée et le déposer sur les soies ou l'inflorescence femelle de la même plante X après que l'enveloppe soit fermée, pliée retenue par une agrafe.

A.3 POLLINISATION ENCHAÎNÉE PLANT À PLANT (PP)

Après l'isolement des inflorescences, la lignée était obtenue en utilisant, pour chaque plante, les grains de pollen de sa voisine. C'est-à-dire, les grains de pollen du plant 1 pour féconder les soies du plant 2, et ceux du plant 2 pour féconder les soies du plant 3, ainsi de suite.

A.4 MÉLANGE DE GRAINS DE POLLEN (MP)

La lignée était obtenue en fécondant la plante par plusieurs grains de pollen mélangés au préalable dans des enveloppes de collecte. Toutes ces lignées étaient obtenues durant la saison A de la campagne agricole 2020-2021.



Planche 3. Isolement de soie après pollinisation « Bulk »

B. MAINTENANCE DES LIGNÉES PAR LA POLLINISATION NATURELLE (PN) EN BLOCS ISOLÉS

Les quatre lignées de maïs ont été semées aux écartements de 75 cm x 25 cm. Chaque lignée était installée sur un petit bloc qui mesurait 7 m x 5 m (35 m²), en laissant les plantes s'interféconder en petit groupe. Les lignées CZL0919 et CML312 ont été installées sur le site de l'Université Pédagogique Nationale (UPN), séparées l'une de l'autre d'une distance de plus de 400 m comme le recommande Marceau (2010). La lignée CZL0919 était semée le 16 février 2021 et a été récoltée le 10 juin 2021. La lignée CML312 a été semée, en date du 15 février 2021 et sa récolte a eu lieu le 19 juin 2021.

Les lignées MUL 692 et REGN ont été installées au CEPROSEM à une distance d'isolement de 350m. La lignée MUL 692 a été semée le 17 février 2021 pour être récoltée le 5 juin. En fin, le semis de la lignée REGN a eu lieu le 5 mars, et sa récolte est intervenue le 28 juin 2021.

2.3.2 EVALUATION DES DESCENDANCES OBTENUES

A. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Cet essai a été conduit suivant un dispositif en parcelles subdivisées (Split-Plot) avec trois répétitions. Les quatre lignées de maïs (REGN, CZL0919, MUL 692 et CML 312) ont constitué le facteur principal et ont été réparties de façon aléatoire aux parcelles principales; et les quatre techniques de pollinisation: Autofécondation (AF), Fécondation de plant à plant (PP), Fécondation par mélange de pollens (MP) et Pollinisation Naturelle en bloc isolé (PN) qui ont constitué le facteur secondaire, ont été affectées aussi de façon aléatoire aux sous parcelles. Chaque bloc mesurait 12 m sur 5 m et la parcelle expérimentale était représentée par une ligne de maïs de 5 m de long.

B. MISE EN PLACE ET CONDUITE DE L'ESSAI

L'itinéraire technique est le même que celui du premier essai. Celui-ci était entouré de 3 lignes de bordure de côté largeur et 4 lignes de côté longueur. Le champ d'essai mesurait 18 m de longueur et 12 m de largeur et la superficie totale du champ était de 216 m² celles de la parcelle principale (lignée) et sous-parcelle étaient respectivement de 15 m² et de 3,75 m². Le champ était reparti en 3 blocs qui mesuraient chacun 12 m de longueur et 5 m de largeur, ils étaient séparés l'un de l'autre par un sentier de 1 m (entre bloc I et II) et 2 m (entre bloc II et III). Dans chaque bloc, on avait 4 parcelles principales de 5 m de longueur et 3 m de largeur. Chaque parcelle principale avait 4 lignes qui composaient les parcelles secondaires.

2.3.3 COLLECTE DE DONNÉES

Les observations ont été effectuées sur un échantillon de 20 plants dans chaque technique de pollinisation. Les données collectées au premier essai ont constitué la référence génétique (phénotypique), et les mêmes ont été prises au second essai (évaluation) en

vue d'une comparaison par méthode de pollinisation avec la référence (témoin). Deux groupes de variables ont fait l'objet de ces observations:

2.3.3.1 VARIABLES QUANTITATIVES

- **Hauteur des plantes (HP):** C'est la distance entre le collet et l'extrémité de la panicule (exprimée en cm), elle a été prélevée au moment de remplissage des grains (stade grains laiteux), à l'aide d'une latte graduée en bois de 3 m.
- **Hauteur à l'insertion de l'épi (HIE):** C'est la distance entre le collet et le nœud d'insertion de l'épi le plus haut (en cm), elle a été prélevée au même moment et avec le même instrument de mesure que la hauteur du plant.
- **Diamètre au collet (DC):** C'est le diamètre de la tige mesuré au collet (en mm) au moment du remplissage des grains (stade grains laiteux), à l'aide d'un pied à coulisse.
- **Durée de la floraison mâle 50% (JFM):** C'est l'estimation de la période d'anthèse, par comptage du nombre de jours qui s'écoule entre la levée et la date à laquelle au moins la moitié des plants de la parcelle échantillon dégagent les pollens au niveau du tiers-médian de la ramification principale de leurs panicules.
- **Durée de la floraison femelle 50% (JFF):** Il s'agit d'une estimation de la période de floraison des épis marquée par une émission des stigmates (Soies), par comptage du nombre de jours entre la levée et la date à laquelle au moins la moitié des plants de la parcelle échantillon émet des soies.

2.3.3.2 VARIABLES QUALITATIVES

- **Coloration anthocyanique des soies:** nous avons indiqué les couleurs de styles, dans l'ordre de leur fréquence, sur 20 plants à la floraison.
- **Type de ramification paniculaire:** C'est une appréciation du type de ramification de la panicule effectuée au stade grain-laiteux.

2.3.4 ANALYSES STATISTIQUES DES DONNÉES

Les données collectées lors du premier essai ont été analysées en utilisant les statistiques descriptives, avec le logiciel statistix version 8.0. Les données de variables quantitatives ont été synthétisées dans un tableau, en considérant leurs moyennes et erreurs-types.

Pour le second essai, les ANOVA (Analysis of variance) ont été appliquées aux paramètres de croissance avec le logiciel statistix 8.0, conformément aux sources de variations reconnues d'un dispositif en split plot. Le test de la plus petite différence significative a été fait pour comparer les différentes moyennes observées. Tandis que les résultats de caractères qualitatifs ont été résumés dans un tableau de distribution des fréquences.

Le package ggplot2 a permis de produire les graphiques en utilisant le logiciel R version 5.2.1.

3 RESULTATS

3.1 CARACTÉRISATION DE QUATRE LIGNÉES ÉPURÉES DU MAÏS BASÉE SUR LES PARAMÈTRES DE CROISSANCE

Les résultats de la caractérisation morpho-métrique des lignées épurées du maïs en rapport avec la croissance et la précocité à la floraison sont présentés dans la figure 4 qui révèle que les diamètres de référence pour les quatre lignées étudiées sont respectivement de: 18,7mm pour REGN; 16,4mm pour CZL0919; 15,8mm pour MUL692 et 15,7mm pour CML312. En ce qui concerne la hauteur à l'insertion de l'épi, elle est de 66,6cm pour REGN; 57,1cm pour CZL0919; 55,4cm pour MUL692 et 62,7cm pour CML 312. Pour ce qui est de la hauteur du plant; la lignée REGN a surclassé les autres avec 189,7cm de haut, suivi de CML312 (164,1cm); CZL0919 (162,3cm) et MUL692 avec 156,7cm de hauteur.

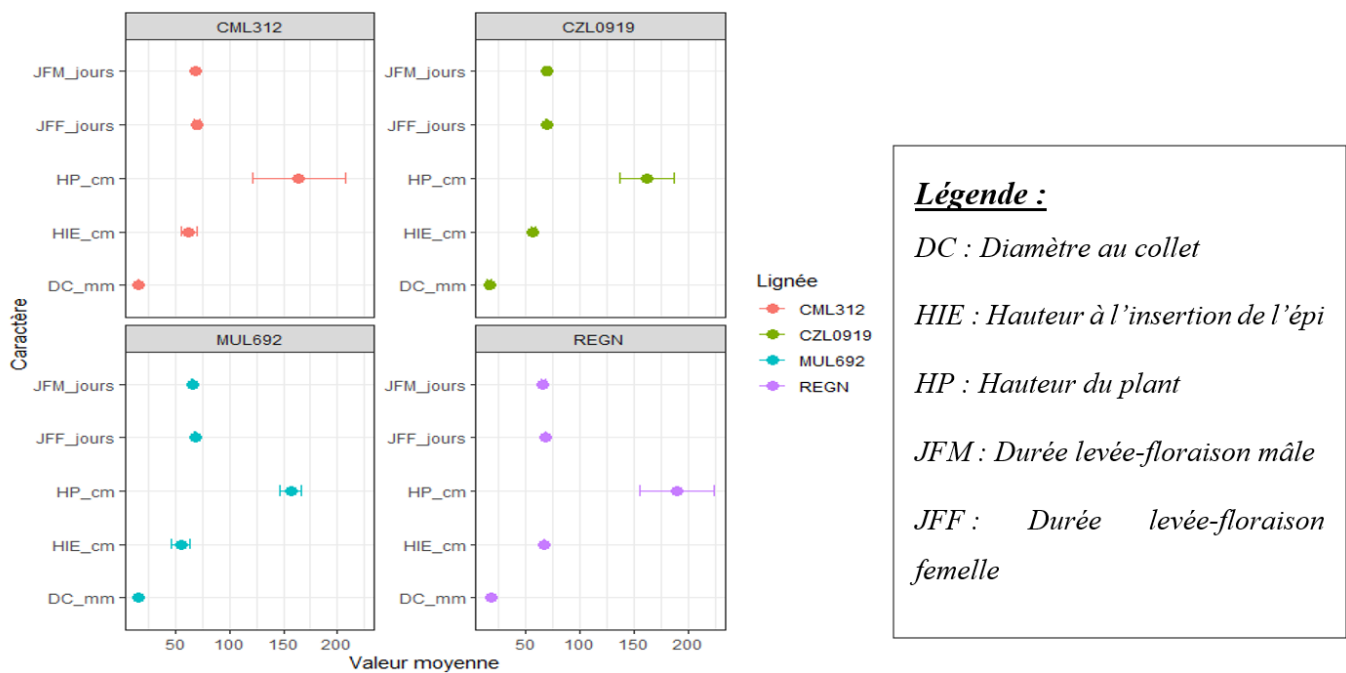


Fig. 4. Caractéristiques morpho-métriques des lignées épurées du maïs

Cette figure visualise en outre que, pour le nombre des jours à la floraison mâle, les lignées REGN et MUL692 ont fleuri 3 jours avant (66 et 65,5 jours respectifs) par rapport aux lignées CZL0919 et CML312 lesquelles ont connu respectivement 69,5 et 69 jours.

Concernant la durée levée-floraison femelle, c'est encore le tandem REGN (68 jours) et MUL692 (68,5 jours) qui a fleuri avant le couple CZL0919 (69,5 jours) et CML312 (70 jours).

3.2 CARACTÉRISATION DE QUATRE LIGNÉES ÉPURÉES DU MAÏS BASÉE SUR LA COLORATION ANTHOCYANIQUE DES SOIES ET LE TYPE DE RAMIFICATION PANICULAIRE

Les résultats illustrés dans les figures 5 et 6 ci-dessous, présentent la caractérisation des lignées épurées sur la coloration anthocyannique des soies et le type de ramification panículaire en pourcentage.

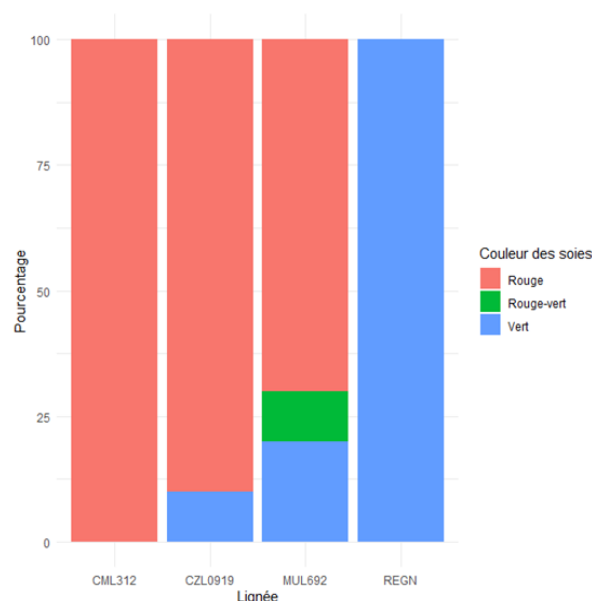


Fig. 5. Couleur des soies par lignée

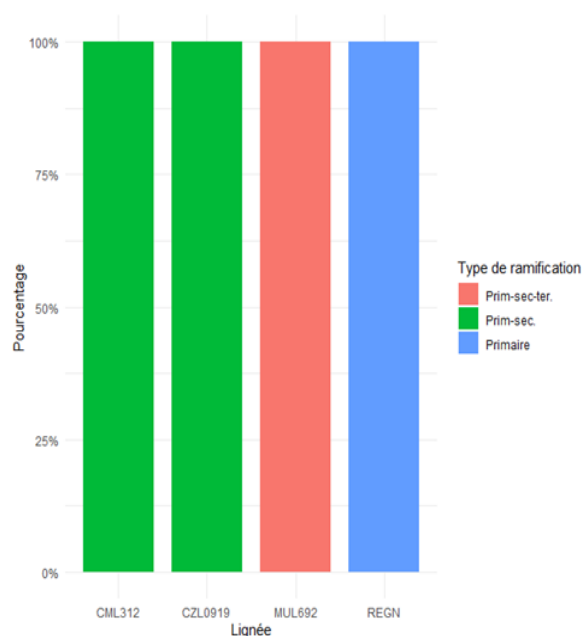


Fig. 6. Type de ramification par lignée

Légende: Prim-sec.: Primaire-secondaire, Prim-sec-ter.: Primaire-secondaire-tertiaire.

Les résultats relatifs à la coloration anthocyannique des soies et du type de ramification paniculaire indiqués dans le tableau 4 montrent que la lignée REGN a présenté 100 % des soies de couleur verte; CZL0919 a présenté 90 % des soies de couleur rouge et 10 % de couleur verte; MUL692 a donné 70 % des soies rouges, 20 % des soies vertes et 10 % des soies rouges-vertes et la lignée CML312 a présenté 100 % des soies rouges.

En rapport avec le type de ramification paniculaire, ces résultats indiquent que toutes les lignées épurées du maïs sont du type primaire-secondaire.

3.3 EVALUATION DES LIGNÉES ÉPURÉES SUIVANT DIFFÉRENTES MÉTHODES DE POLLINISATION

Les résultats de différentes variables prises en compte lors de l'évaluation de quatre lignées et quatre techniques de pollinisation sur la maintenance génétique des lignées épurées sont consignés dans le tableau 1. Il y a lieu de signaler que les résultats sur la coloration anthocyannique des soies et le type de ramification paniculaire sont exprimés sous-forme de la distribution de fréquences, en termes de pourcentage.

Tableau 1. Synthèse des résultats des variables quantitatives et qualitatives de quatre lignées et quatre techniques évaluées dans un dispositif en parcelles subdivisées répétées trois fois pendant la campagne agricole 2020-2021 au CEPROSEM

Lignée	Méthode	DC (mm)	HIE (cm)	HP (cm)	JFM (jours)	JFF (jours)	Couleur de soies		
							Rouge	Vert	Rouge-vert
REGN	AF	18,0	61,3ab	174,1a	72,0	76,3abcd	-	100,0	-
	PP	17,0	57,1b	173,0a	72,0	80,0ab	-	100,0	-
	MP	17,8	59,4abcd	172,0a	72,7	76,0abcd	3,3	96,7	-
	PN	17,2	60,4abc	172,5a	72,0	76,0abcd	-	100,0	-
Moyenne REGN		17,5a	59,5	172,9a	72,2	77,1	0,82	99,18	-
CZL0919	AF	16,0	52,6bcd	149,3d	70,7	75,7abcd	83,3	16,7	-
	PP	18,2	60,0abc	166,2abc	69,7	72,7bcd	83,3	10,0	6,7
	MP	17,9	56,6bc	162,5bc	73,3	78,7abc	83,3	16,7	-
	PN	17,7	50,6bcd	160,5bcd	68,0	70,7d	76,7	16,7	6,6
Moyenne CZL0919		17,5a	55,0	159,6ab	70,4	74,4	81,65	15,02	3,33
MUL692	AF	16,0	52,6bcd	157,0cd	68,0	75,7abcd	30,0	20,0	50,0
	PP	16,7	52,0bcd	170,2ab	68,0	72,0bcd	73,3	13,3	13,3
	MP	16,9	64,6a	174,5a	68,0	72,0bcd	50,0	20,0	30,0
	PN	17,0	58,8abcd	167,3abc	68,0	72,0bcd	66,7	23,3	10,0
Moyenne MUL692		16,7a	57,0	167,3a	68,0	73,0	55	19,15	25,85
CML312	AF	15,0	45,7c	146,3d	69,3	78,3abc	76,7	3,3	20,0
	PP	13,7	45,0c	145,8de	68,0	72,0bcd	86,7	3,3	10,0
	MP	12,7	39,0cd	126,5 ^e	72,7	82,7a	63,3	10,0	26,7
	PN	13,5	43,0cd	135,1 ^e	71,3	82,0ab	70,0	16,7	13,3
Moyenne CML312		13,7b	43,0	138,4b	70,3	78,8	74,17	8,33	17,5
Moyenne autofécondation		16,4	53,0	156,7	70,0b	76,5ab	47,5	35	17,5
Moyenne pollinisation plant à plant		16,4	53,6	163,8	69,4b	74,2b	60,83	31,65	7,5
Moyenne mélange de pollens		16,3	55,0	158,9	71,7a	77,3a	49,98	35,85	14,18
Moyenne pollinisation naturelle		16,3	53,0	158,9	69,8b	75,2ab	53,35	39,18	7,48
P _{Lignée}		0,0091**	0,068 ^{NS}	0,0043**	0,0931 ^{NS}	0,2019 ^{NS}	-	-	-
P _{Technique}		0,9982 ^{NS}	0,6860 ^{NS}	0,0936 ^{NS}	0,0484*	0,1157 ^{NS}	-	-	-
P _{lignée*technique}		0,2802 ^{NS}	0,0056**	0,0060**	0,2345 ^{NS}	0,0097**	-	-	-
CV lignée (%)		11,71	23,21	8,86	4,56	8,26	-	-	-
CV lignée*technique (%)		8,24	7,75	4,23	2,80	4,34	-	-	-
Ppds(lignée)		2,9	-	21,4	-	-	-	-	-
Ppds(technique)		-	-	-	3,3	-	-	-	-
Ppds(lignée*technique)		-	20,4	25	-	11,4	-	-	-

Légende: DC = Diamètre au collet, HIE = Hauteur à l'insertion de l'épi, HP = Hauteur du plant, JFM = Durée floraison mâle, JFF = Durée floraison femelle, AF = Autofécondation, PP = Pollinisation plant à plant, MP = Mélange de pollen, PN = pollinisation naturelle en blocs isolés; P = probabilité, CV = coefficient de variation, Ppds = Plus petite différence significative.

Les résultats des analyses de variance et des comparaisons de moyennes mentionnés dans le tableau ci-haut révèlent que:

A. DIAMÈTRE AU COLLET (DC)

Il existe une différence hautement significative entre les lignées. Ceci signale que le diamètre au collet constitue une caractéristique liée aux génotypes; car, il varie d'une lignée à une autre. Deux groupes homogènes différents se sont dégagés lors de la comparaison des moyennes deux à deux. Les lignées REGN (17,5 mm); CZL0919 (17,5 mm) et MUL692 (16,7 mm) ont eu un diamètre au collet plus grand par rapport à CML312 (13,7 mm). Cependant, au niveau des techniques de pollinisation et des interactions lignées-techniques, une différence non significative s'est dégagée (Figure 7). C'est-à-dire que le diamètre n'est pas un caractère influençable par la technique de pollinisation.

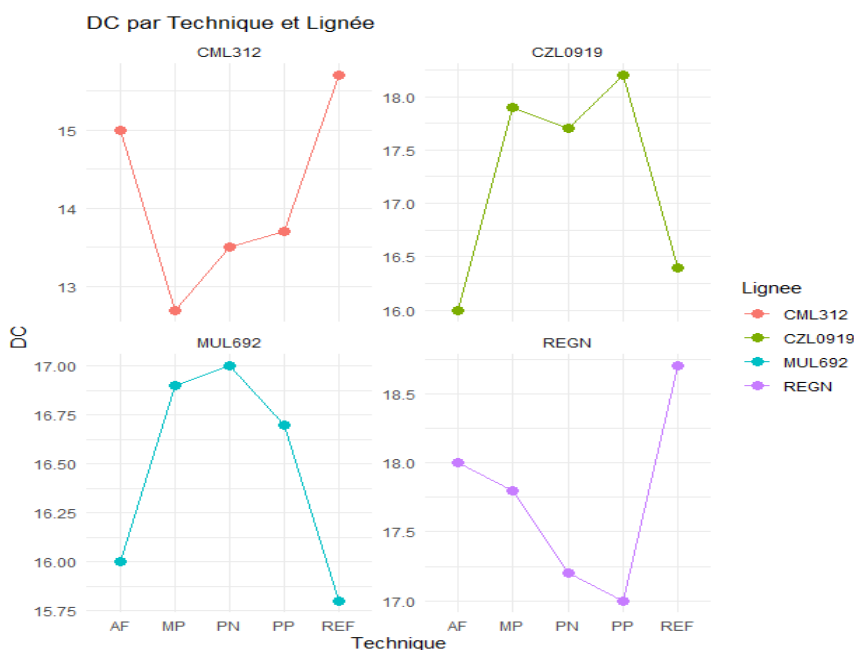


Fig. 7. Tendence du diamètre au collet de différentes lignées en fonction de techniques de pollinisation

B. HAUTEUR À L'INSERTION DE L'ÉPI (HIE)

La différence est hautement significative au niveau des interactions lignées-techniques. Cela signifie que la hauteur à l'insertion de l'épi a été affectée par les effets combinés de deux facteurs. Il s'observe quatre groupes homogènes différents (a, b,c, d). L'interaction CML312-MP a eu la plus petite hauteur à l'insertion de l'épi (39,0 Cm). Toutefois, les lignées et les techniques n'ont pas produit d'effets sur ce caractère (Figure 8).

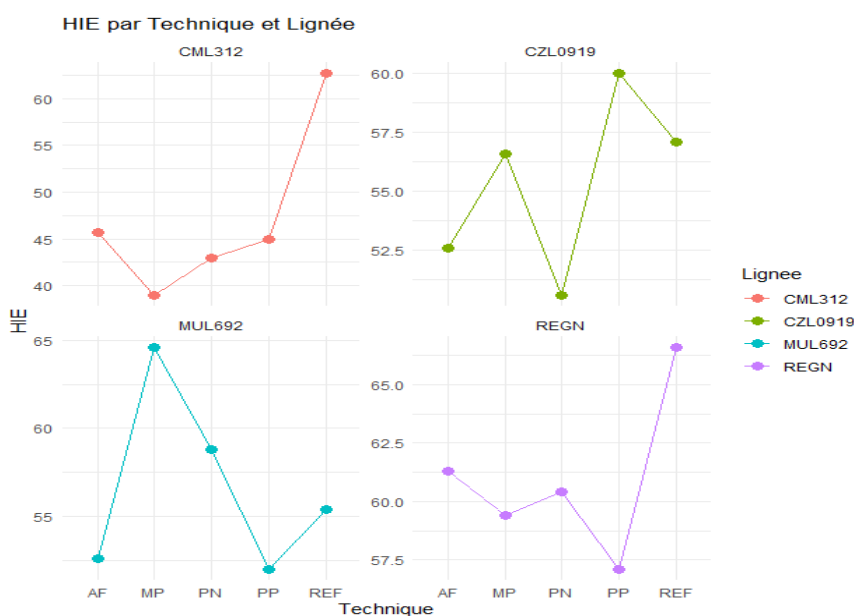


Fig. 8. Tendence de la hauteur à l'insertion de l'épi de différentes lignées en fonction de techniques de pollinisation

C. HAUTEUR DU PLANT (HP)

Un comportement hautement différent a été signalé, tant pour les lignées qu'au niveau des interactions lignées-techniques (Figure 9). Les lignées ont été classées en deux groupes homogènes (a et b) et les interactions en cinq groupes (a, b,c, d,e). La lignée

CML312 a présenté la plus petite hauteur du plant (138,4 Cm). Cependant, l'interaction CML312-PN a donné une petite hauteur (135,1 Cm). Mais, la différence a été non significative au niveau de technique. Cela signifie que celle-ci n'a pas été un facteur influençant la hauteur du plant.

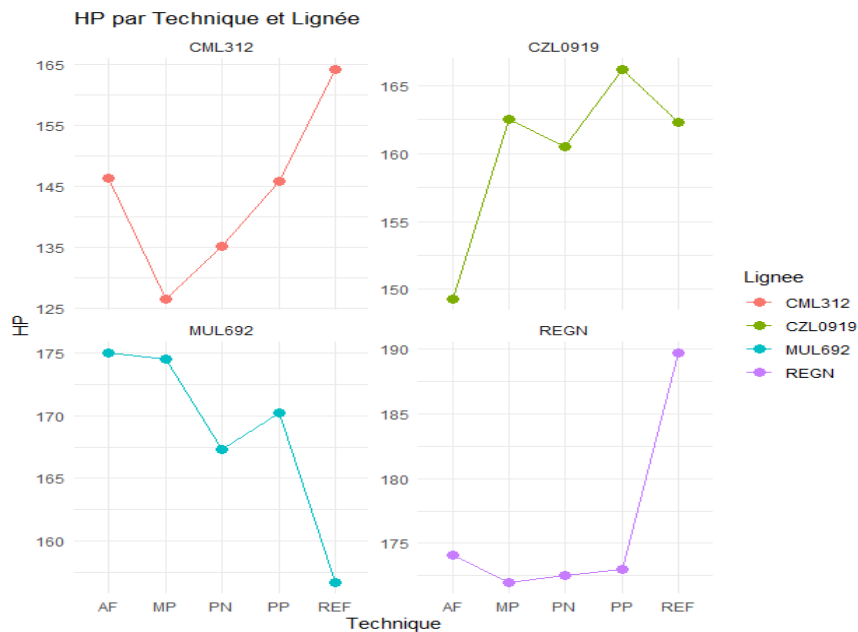


Fig. 9. Evolution de la hauteur du plant de différentes lignées en fonction de techniques de pollinisation

D. DURÉE LEVÉE-FLORAISON MÂLE (JFM)

Elle a été significativement différente d'une technique à une autre. Ceci veut dire, le facteur technique a influencé le nombre de jours à la floraison mâle. La comparaison des moyennes fait apparaître deux groupes homogènes (a et b). Trois techniques dont AF (70,0 jours); PP (69, 4 jours) et PN (69,8 jours) ont provoqué une précocité par rapport à l'autre technique (MP). Entre-temps, une différence non significative a été observée au niveau des lignées et des interactions.

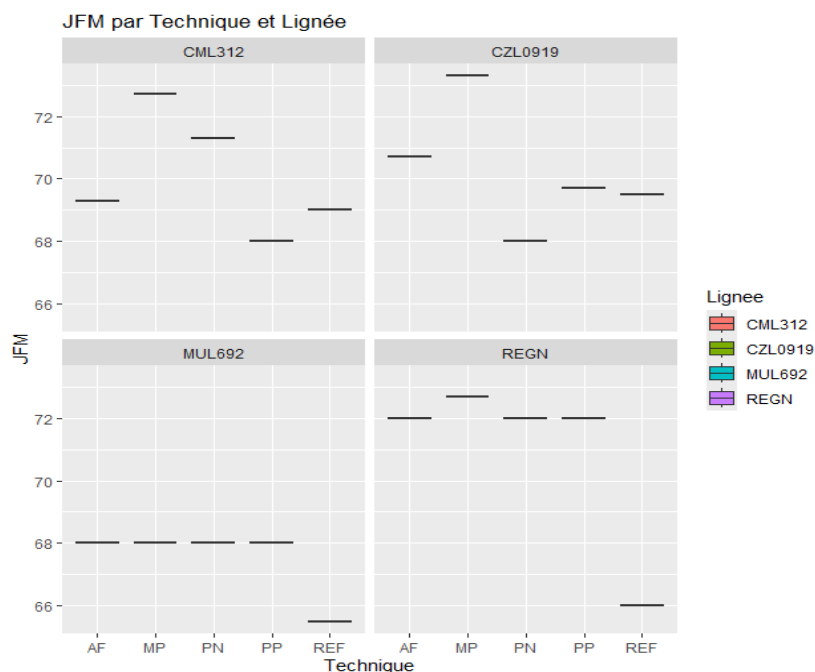


Fig. 10. Evolution de la floraison mâle de différentes lignées en fonction de techniques de pollinisation

E. DURÉE LEVÉE-FLORAISON FEMELLE (JFF)

La différence entre les interactions lignées-méthodes, pour cette variable, a été hautement significative. Cela signifie que les différentes interactions ont influencé ce paramètre (Figure 11). Quatre groupes homogènes se sont dégagés (a, b,c et d). L'interaction CZL0919-PN (70,7 jours) a été précoce contrairement à d'autres interactions. Tandis que, aucune différence n'a été observée, que ce soit au niveau de lignées qu'au niveau de techniques.

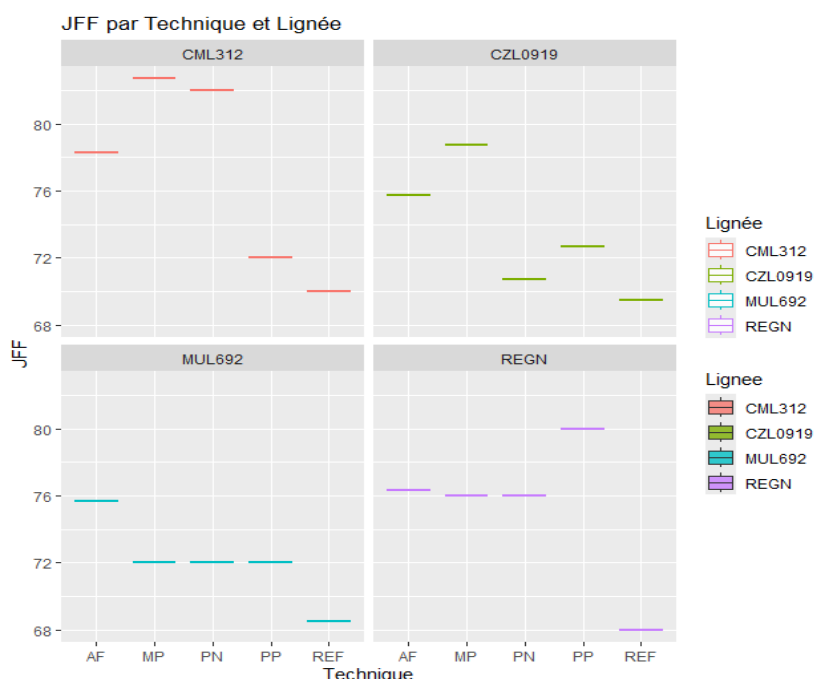


Fig. 11. La floraison femelle de différentes lignées en fonction de techniques de pollinisation

F. LA COLORATION ANTHOCYANIQUE DE SOIES

- La lignée REGN a présenté: 100% des soies de couleur verte pour la technique d'autofécondation, de la pollinisation plant à plant et la pollinisation naturelle; 96,7% des soies vertes et 3,3% des soies rouges pour la technique mélange de pollens.
- La lignée CZL0919 a présenté, pour la technique d'autofécondation, 83,3% des soies rouges et 16,7% des soies vertes. Avec la technique plant à plant, elle a donné 83,3% des soies rouges, 10% des soies vertes et 6,7% des soies rouges-vertes. 83,3% des soies rouges et 16,7% des soies vertes ont été aperçues avec le mélange de pollens et 76,7% des soies rouges, 16,7% des soies vertes et 6,6% des soies rouges-vertes avec la pollinisation naturelle.
- La lignée MUL692 a donné 30% des soies rouges, 20% des soies vertes et 50% des soies rouges-vertes avec la technique d'autofécondation; 73,3% des soies rouges, 13,3% des soies vertes et 13,3% des soies rouges-vertes avec le plant à plant; 50% des soies rouges, 20% des soies vertes et 30% des soies rouges-vertes avec le mélange de pollens; et 66,7% des soies rouges, 23,3% des soies vertes et 10% des soies rouges-vertes avec pollinisation naturelle.
- La lignée CML312 à son tour a présenté 76,7% des soies rouges, 3,3% des soies vertes et 20% des soies rouges-vertes avec l'autofécondation; 86,7% des soies rouges, 3,3% des soies vertes et 10% des soies rouges-vertes avec la technique plant à plant; 63,3% des soies rouges, 10% des soies vertes et 26,7% des soies rouges-vertes avec le mélange de pollens; et enfin 70% des soies rouges, 16,7% des soies vertes et 13,3% des soies rouges-vertes avec la pollinisation naturelle.

G. LE TYPE DE RAMIFICATION PANICULAIRE

Les différentes lignées ont connu le même type de ramification (primaire- secondaire), quelle que soit la technique de pollinisation appliquée.

3.4 COMPARAISON DES RÉSULTATS DE QUATRE LIGNÉES ÉPURÉES ET QUATRE TECHNIQUES DE POLLINISATION AVEC CEUX DE RÉFÉRENCE

3.4.1 PARAMÈTRES QUANTITATIFS

La comparaison de différentes techniques de pollinisation par rapport aux caractères de référence des lignées épurées est réalisée dans le but de faire sortir la meilleure technique qui maintient les caractères de croissance.

Tableau 2. *Comparaison des résultats des variables quantitatives de croissance de quatre techniques de pollinisation appliquées à 4 lignées épurées de maïs vis-à-vis de la référence*

Lignée	Paramètre	Référence	Evaluation			
			AF	PP	MP	PN
		Moyenne $\pm$ ET	Moyenne $\pm$ ET	Moyenne $\pm$ ET	Moyenne $\pm$ ET	Moyenne $\pm$ ET
REGN	DC	18,7 $\pm$ 1,15	18,0 $\pm$ 1,1	17,0 $\pm$ 1,1	17,8 $\pm$ 1,1	17,2 $\pm$ 1,1
	HIE	66,6 $\pm$ 0,13	61,3 $\pm$ 5,8	57,1 $\pm$ 5,8	59,4 $\pm$ 5,8	60,4 $\pm$ 5,8
	HP	189,7 $\pm$ 34,18	174,1 $\pm$ 7,5	173,0 $\pm$ 7,5	172,0 $\pm$ 7,5	172,5 $\pm$ 7,5
	JFM	66,0 $\pm$ 2,00	72,0 $\pm$ 1,9	72,0 $\pm$ 1,9	72,7 $\pm$ 1,9	72,0 $\pm$ 1,9
	JFF	68,0 $\pm$ 0,00	76,3 $\pm$ 3,5	80,0 $\pm$ 3,5	76,0 $\pm$ 3,5	76,0 $\pm$ 3,5
CZL0919	DC	16,4 $\pm$ 1,90	16,0 $\pm$ 1,1	18,2 $\pm$ 1,1	17,9 $\pm$ 1,1	17,7 $\pm$ 1,1
	HIE	57,1 $\pm$ 2,20	52,6 $\pm$ 5,8	60,0 $\pm$ 5,8	56,6 $\pm$ 5,8	50,6 $\pm$ 5,8
	HP	162,3 $\pm$ 25,53	149,3 $\pm$ 7,5	166,2 $\pm$ 7,5	162,5 $\pm$ 7,5	160,5 $\pm$ 7,5
	JFM	69,5 $\pm$ 2,50	70,7 $\pm$ 1,9	69,7 $\pm$ 1,9	73,3 $\pm$ 1,9	68,0 $\pm$ 1,9
	JFF	69,5 $\pm$ 0,50	75,7 $\pm$ 3,5	72,7 $\pm$ 3,5	78,7 $\pm$ 3,5	70,7 $\pm$ 3,5
MUL692	DC	15,8 $\pm$ 1,35	16,0 $\pm$ 1,1	16,7 $\pm$ 1,1	16,9 $\pm$ 1,1	17,0 $\pm$ 1,1
	HIE	55,4 $\pm$ 8,58	52,6 $\pm$ 5,8	52,0 $\pm$ 5,8	64,6 $\pm$ 5,8	58,8 $\pm$ 5,8
	HP	156,7 $\pm$ 10,18	175,0 $\pm$ 7,5	170,2 $\pm$ 7,5	174,5 $\pm$ 7,5	167,3 $\pm$ 7,5
	JFM	65,5 $\pm$ 0,50	68,0 $\pm$ 1,9	68,0 $\pm$ 1,9	68,0 $\pm$ 1,9	68,0 $\pm$ 1,9
	JFF	68,5 $\pm$ 0,50	75,7 $\pm$ 3,5	72,0 $\pm$ 3,5	72,0 $\pm$ 3,5	72,0 $\pm$ 3,5
CML312	DC	15,7 $\pm$ 0,28	15,0 $\pm$ 1,1	13,7 $\pm$ 1,1	12,7 $\pm$ 1,1	13,5 $\pm$ 1,1
	HIE	62,7 $\pm$ 7,55	45,7 $\pm$ 5,8	45,0 $\pm$ 5,8	39,0 $\pm$ 5,8	43,0 $\pm$ 5,8
	HP	164,1 $\pm$ 42,83	146,3 $\pm$ 7,5	145,8 $\pm$ 7,5	126,5 $\pm$ 7,5	135,1 $\pm$ 7,5
	JFM	69,0 $\pm$ 1,00	69,3 $\pm$ 1,9	68,0 $\pm$ 1,9	72,7 $\pm$ 1,9	71,3 $\pm$ 1,9
	JFF	70,0 $\pm$ 2,00	78,3 $\pm$ 3,5	72,0 $\pm$ 3,5	82,7 $\pm$ 3,5	82,0 $\pm$ 3,5

Légende: ET = erreur-type.

Il ressort du tableau 2 ci-dessus, après comparaison des résultats pour le diamètre au collet, que les techniques (autofécondation et mélange) ont présenté un bon caractère de maintien de la lignée REGN par rapport à d'autres techniques. Pour ce qui est de la hauteur du plant, toutes les techniques ont été bonne pour maintenir la lignée. En revanche, aucune technique n'a été meilleure quant à la hauteur à l'insertion de l'épi, à la floraison mâle et femelle.

Toutes les techniques ont su maintenir le diamètre au collet et la hauteur du plant de la lignée CZL0919; concernant la hauteur à l'insertion de l'épi, le mélange a donné une longueur approximative (56,6cm) de celle du départ (57,1cm) et elle a été de même pour la hauteur du plant où elle a donné une hauteur égale à celle du départ (162,5cm); la technique plant à plant (69,7 jours) est bonne pour stabiliser le nombre des jours à la floraison mâle de cette lignée. Cependant aucune technique n'a été bonne à la stabilisation de cette lignée par rapport au nombre des jours à la floraison femelle.

Il se constate aussi que toutes les techniques se sont avérées bonnes pour conserver le diamètre au collet de MUL692. Alors que, pour la hauteur à l'insertion de l'épi, toutes les techniques ont été bonnes sauf la technique de mélange de grains de pollen. La technique d'autofécondation s'est montrée conservatrice de la hauteur du plant par rapport aux autres techniques. Cependant, aucune technique n'a su maintenir le délai des jours à la floraison mâle et femelle.

Par contre, aucune technique n'a été meilleure pour maintenir le diamètre au collet et la hauteur à l'insertion de l'épi de CML312, et toutes les techniques ont su maintenir la hauteur du plant. Les techniques autofécondation et plant à plant ont maintenu les jours à la floraison mâle, mais seule la technique plant à plant a maintenu le nombre des jours à la floraison femelle.

3.4.2 PARAMÈTRES QUALITATIFS

Les résultats de la comparaison de différentes techniques de pollinisation par rapport aux caractères qualitatifs de référence des lignées épurées sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Comparaison des résultats des variables qualitatives de quatre techniques de pollinisation appliquées à 4 lignées épurées de maïs vis-à-vis de la référence

Lignées	Paramètre	Fréquence (%) Avant pollinisation	Fréquences après pollinisation (en %)			
			AF	PP	MP	PN
REGN	Couleur soies					
	Rouge	0,00	0,00	0,00	3,3	0,00
	Vert	100,00	100,00	100,00	96,7	100,00
	Rouge-vert	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Type de panicule					
	Primaire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Primaire-secondaire	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
CZL0919	Couleur soies					
	Rouge	90,00	83,3	83,3	83,3	76,7
	Vert	10,00	16,7	10,0	16,7	16,7
	Rouge-vert	0,00	0,00	6,7	0,00	6,6
	Type de panicule					
	Primaire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Primaire-secondaire	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
MUL692	Couleur soies					
	Rouge	70,0	30,0	73,3	50,0	66,7
	Vert	20,0	20,0	13,3	20,0	23,3
	Rouge-vert	10,0	50,0	13,3	30,0	10,0
	Type de panicule					
	Primaire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Primaire-secondaire	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
CML312	Couleur soies					
	Rouge	100,00	76,7	86,7	63,3	70,0
	Vert	0,00	3,3	3,3	10,0	16,7
	Rouge-vert	0,00	20,0	10,0	26,7	13,3
	Type de panicule					
	Primaire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Primaire-secondaire	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Couleur soies					
	Rouge	100,00	76,7	86,7	63,3	70,0
	Vert	0,00	3,3	3,3	10,0	16,7
	Rouge-vert	0,00	20,0	10,0	26,7	13,3
	Type de panicule					
	Primaire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Primaire-secondaire	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Couleur soies					
	Rouge	100,00	76,7	86,7	63,3	70,0
	Vert	0,00	3,3	3,3	10,0	16,7
	Rouge-vert	0,00	20,0	10,0	26,7	13,3
	Type de panicule					
	Primaire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Primaire-secondaire	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Les résultats repris dans le tableau 3, montrent que toutes les techniques ont maintenu les caractères qualitatifs de la lignée REGN, sauf la technique de mélange de grains de pollen qui a fait perdre 3,3% de sa pureté génétique liée à la coloration anthocyanique de soies. Concernant le type des panicules, toutes les techniques de pollinisation ont maintenu la lignée en produisant le type primaire-secondaire.

Au niveau de la lignée CZL0919, il ressort des fluctuations de la coloration de soies. Les soies rouges sont passées de 90% à 83,3% pour les techniques d'autofécondation, pollinisation plant à plant et mélange de grains de pollen; et à 76,7% pour la pollinisation naturelle. La fréquence des soies vertes a eu une tendance à la hausse pour autofécondation, mélange de grains de pollen et

pollinisation naturelle en passant de 10% à 16,7%. Tandis que cette fréquence a été maintenue à 10% pour plant à plant. De plus, la fréquence de coloration intermédiaire rouge-vert a eu tendance à augmenter pour le plant à plant et pour la pollinisation naturelle; en passant de 0% à 6,7%. Pour les deux autres techniques, à savoir: autofécondation et mélange de grains de pollen, cette fréquence est restée la même. Pour ce qui est de type de ramification paniculaire, aucun changement n'a été constaté.

Les résultats en rapport avec la lignée MUL692 montrent que, seule la technique de pollinisation naturelle en blocs isolés qui a présenté une fréquence rapprochée à celle du départ. Alors que, le type de panicule primaire-secondaire a été observé chez toutes les techniques.

Les résultats de la lignée CML312 montrent qu'aucune technique de pollinisation n'a maintenu la coloration de soies. Cependant, toutes les techniques ont maintenu le type de panicule de la dite lignée.

4 DISCUSSION

4.1 PARAMÈTRES QUANTITATIFS

Les résultats de cette étude révèlent une grande variabilité au sein des lignées, techniques et les interactions. La variabilité génétique observée est beaucoup plus remarquable au niveau de lignées pour ce qui est du diamètre au collet. Nos résultats sont en accord avec ceux trouvés par [8] dans ses recherches.

La référence [1] a montré que la hauteur dépend d'un hybride à un autre. Une grande variation entre les lignées et les interactions lignées-techniques a été remarquée en ce concerne la hauteur du plant. Ces résultats confirment ceux observés dans [1], [4].

Les résultats identiques pour la hauteur à l'insertion de l'épi ont été révélés en ce qui concerne les lignées et techniques. Cependant, un comportement différent a été observé au niveau des interactions lignées-techniques.

La référence [12] a observé une variation entre les lignées lors de son étude au Burkina Faso. Malgré que nous ayons travaillé dans des milieux différents, nos résultats ont abouti à la même conclusion.

Les quatre techniques de pollinisation sont différentes pour ce qui est de la durée floraison mâle. La référence [8] a révélé des différences entre les lignées pour le délai de la floraison mâle. Ces résultats corroborent à ceux que nous avons trouvé dans notre étude.

Toutefois, une très grande variabilité a été trouvée pour les interactions lignées-techniques quant à la durée de la floraison femelle. Les résultats trouvés par [8] ne confirment pas nos résultats pour le nombre des jours à la floraison.

4.2 PARAMÈTRES QUALITATIFS

4.2.1 COLORATION ANTHOCYANIQUE

La lignée REGN présente des épis à soies vertes; après évaluation, exceptée la technique de mélange de grains de pollen, toutes les techniques ont maintenu la couleur de soies de cette lignée (100% de soies vertes).

La lignée CZL0919 présente de nature 90% des épis à soies rouges et 10% des épis à soies vertes; après évaluation, seule la technique plant à plant qui s'est rapprochée au caractère initial en présentant 83,3% des soies rouges et 10% des soies vertes.

Concernant la lignée MUL692, elle présente de nature 70% des épis à soies rouges, 20% à soies vertes et 10% de couleur intermédiaire. La comparaison de différentes techniques montre que la pollinisation libre a produit des caractères presque similaires par rapport à ceux du départ. La lignée CML312 présente 100% des épis à soies rouges; après comparaison, aucune technique n'a pu maintenir la couleur des soies de la dite lignée.

Ceci s'expliquerait comme mentionné dans [13], du fait qu'il existe un lien entre la couleur du grain, de la rafle et des soies aux caractères phénotypiques d'intérêt agronomique ou non. La nature de ces liens est complexe, méconnue et semble difficile à mobiliser dans le cadre de la sélection paysanne.

4.2.2 TYPE DE RAMIFICATION PANICULAIRE

Il s'est avéré un même type pour toutes les techniques sur toutes les lignées. Entretemps, il a été du type primaire-secondaire.

5 CONCLUSION

La présente étude consistait à comparer quatre techniques de pollinisation du maïs en vue de maintenir quelques caractères de quatre lignées épurées. Pour y arriver, l'expérimentation a connu deux phases, la première était consacrée à la caractérisation référentielle de ces lignées puis à l'application de techniques de pollinisation, et la seconde a consisté à l'évaluation des lignées obtenues, selon les techniques utilisées, au CEPROSEM. Un bloc de croisement a été utilisé pour les trois techniques (autofécondation, pollinisation plant à plant et mélange des grains de pollens) et quatre petits blocs isolés pour la technique naturelle (Deux à l'UPN et deux au CEPROSEM). Cependant, l'évaluation s'est effectuée suivant un dispositif en parcelles subdivisées (*split plot design*).

Les résultats obtenus ont montré que les techniques (autofécondation et mélange de grains de pollen) sont meilleures pour maintenir le diamètre au collet de la lignée REGN. Les techniques autofécondation, plant à plant et pollinisation naturelle sont bonnes pour la durée à la floraison mâle de la lignée CZL0919. Concernant MUL692, l'autofécondation a maintenu la hauteur du plant. Pour CML312, l'autofécondation et plant à plant ont été meilleurs pour le délai entre la floraison mâle. Quant à la coloration anthocyannique de soies, pour CZL0919, seules les lignées issues de la technique plant à plant qui se sont rapprochées aux caractères initiaux. En revanche, la pollinisation libre s'est avérée meilleure pour MUL692. Cette étude a révélé que toutes les techniques ne maintiennent pas les lignées de la même manière, et ne maintiennent pas tous les caractères de la même façon. Il y a des lignées qui se conservent mieux avec certaines techniques de pollinisation, et aussi certains caractères qui se conservent mieux avec certaines techniques de pollinisation. Bien que toutes les techniques soient bonnes au maintien de ces lignées, la technique d'autofécondation s'est avérée meilleure et la plus conservatrice.

D'où pour un premier temps nous recommandons, pour passer d'une saison à une autre, de pratiquer l'alternance entre autofécondation et mélange de grains de pollen qu'il soit naturel ou non afin d'éviter les effets de la consanguinité.

Il serait aussi intéressant que cette étude soit menée dans des conditions agro-environnementales différentes de celle de Kinshasa et qu'elle soit répétée dans le temps afin de comprendre de manière spécifique l'efficacité de chaque technique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les chercheurs de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Pédagogique Nationale (UPN) notamment le Professeur Ordinaire Antoine MUMBA DJAMBA, le regretté Professeur Ordinaire Jean-Claude Lukombo Lukeba et le Doctorant Prosper Mudimbiyi, d'avoir participé à la réflexion critique de ce travail.

Ils remercient également l'Institut National pour les Etudes et la Recherche Agronomique (INERA), le Centre de Recherche en Agrumiculture (CERAGRU) et le Centre de Production des Semences (CEPROSEM) pour l'appui logistique considérable dont ils ont bénéficié tout au long de cette recherche de longue haleine.

REFERENCES

- [1] L.K. Nyembo, Augmentation du rendement du maïs (*Zea mays* L.) par l'exploitation de l'effet hétérosis des hybrides produits au Katanga, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi, RDC, 157p., 2010.
- [2] L.K. Nyembo, M.M. Mpundu et L.L. Baboy, «Évaluation et sélection de nouvelles variétés de Maïs (*Zea mays* L.) à haut potentiel de rendement dans les conditions climatiques de la région de Lubumbashi, Sud-est de la RD Congo», *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol.6, n°1, pp.21-27, 2014.
- [3] P.N. Nsumbu, Y.N. Kasongo et N. Dowiya, «Impact de la saison sur le rendement du maïs à Kinshasa, R.D. Congo», *Congo sciences*, vol.6, n°2, pp.96-102, juillet 2018.
- [4] D.N. NSIMBA, C.M. ASANZI et P.M. MUDIMBIYI, «Effets des doses croissantes d'azote et de phosphore sur deux variétés du maïs (*Zea mays* L. var Mudishi1 et Pan53) dans les conditions édapho-climatiques de Kinshasa», *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, vol.2, n°1, pp.52-59, 2019.
- [5] PAM, Etude des marchés des céréales en relation avec la sécurité alimentaire, les programmes de transferts monétaires dans les provinces du Kasai Central, du Kasai Oriental, Haut-Katanga, p. 5, 2017.
- [6] Chausse J.P., Kembola T. et Ngonde R., Agriculture, pierre angulaire de l'économie de la RDC », dans: Herdeschee J., Mukoko S.D., et Tshimenga T.M (éditeurs), Résilience d'un géant africain. Accélérer la croissance et promouvoir l'emploi en RD Congo, vol. II, Etudes sectorielles, Média st Paul, Kinshasa, 98p., 2012.

- [7] P. Ruaud, *Multiplication d'une population allogame: Comparaison de plusieurs méthodes à l'aide de marqueurs enzymatique*, Mémoire, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes pour l'obtention du diplôme d'Agronomie Approfondie, Amélioration des plantes, P.11- 20, 1984.
- [8] A. Sanou, Création et évaluation d'hybrides et de lignées de maïs dans le cadre d'une intensification de la Maïsiculture au Burkina Faso, Mémoire de master, Agronomie, Université polytechnique de Bobo - Dioulasso, (UPB), p.10, 2011.
- [9] A. Marceau, Pollinisation inter-parcellaire chez le maïs: analyse et couplage des processus conditionnant la présence du pollen viable en fonction de la distance à la source, Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (Agroparistech), Thèse de doctorat, p2-3, 2010.
- [10] M. Crabbe, *Le climat de Kinshasa d'après les observations centrées sur la période de 1931-1970*, Édition assurée par les services de l'administration Belge et de la coopération au développement, Bruxelles, Belgiumcrops, New York, NY, USA, Cambridge University press, 430p., 1980.
- [11] J.C. Dongmo, Performances des hybrides varietaux et top - cross de maïs (*Zea mays* L.) Sur sols acides de la zone forestière humide du Cameroun, Mémoire de master, université de Yaoundé, Cameroun, p.12-36, 2009.
- [12] I. Kouraoga, Amélioration variétale du maïs au Burkina Faso: Évaluation de la variabilité génétique des caractères agro - morphologiques des descendants de croisement entre hybride simple de maïs sucré (VMHI) avec une lignée fixée (FBML10) et une variété composite résistante à la sécheresse (Wari), Mémoire d'ingénieur du développement Rural, Agronomie, Burkina Faso, p.5, 2016.
- [13] Robin, *Codage génétique de la couleur du grain de maïs*, 2021. [En ligne] disponible: <https://maison-de-la-semence-paysanne-dordogne.netlify.app/post/mds-gc/publication/kernel-color/>.

A New One-Dimensional Polynomial-Sinusoidal Chaotic Map for Image Cryptography

Ahmat Mahamat Saleh¹, Kalsouabé Zoukalne², Mahamat Charfadine Nimane³, and Amir Moungache⁴

¹Multimedia and Telecommunications department, Institute of Sciences and Techniques of Abeche, Abeche, Chad

²Decentralized Digital Campus Unit, Digital University of Chad, N'djamena, Chad

³Telecommunications department, Ecole Nationale Supérieure des Technologies de l'Information et de la Communication (ENASTIC), N'Djamena, Chad

⁴Department of Technology, University of N'Djamena, N'Djamena, Chad

Copyright © 2026 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 this article, we propose a new one-dimensional discrete chaotic map, obtained by combining a polynomial logistic map and a sinusoidal map. Dynamic analysis of the proposed map shows that it has better chaotic properties, good ergodicity over a wide range of parameters, and a relatively large key space. Compared to classical logistic and sinusoidal maps, the proposed map exhibits improved ergodicity, with state variables uniformly distributed in the interval $[0,1]$, confirming the dynamic superiority of the proposed map and its suitability for cryptographic and pseudo-random generation applications. Based on these properties, we propose a new image encryption algorithm using sequences from the new chaotic map. The scheme is based on a permutation phase and two a diffusion phase driven by the chaotic sequences generated by the new discrete map. The performance of the proposed system is evaluated through sensitivity tests to initial conditions and keys, key space analysis, and differential attacks. In addition, security indicators such as information entropy, NPCR, UACI, correlation coefficients, and execution time are calculated to validate the effectiveness and robustness of the encryption algorithm.

KEYWORDS: one-dimensional chaotic map, polynomial–sinusoidal, chaotic system, chaos theory, chaotic map.

1 INTRODUCTION

Since its emergence, chaos theory has established itself as a promising area of re-search in many scientific fields [1–3]. In cryptography, chaotic systems are of particular interest due to their intrinsic properties, such as ergodicity, unpredictability, and high sensitivity to initial conditions and control parameters, which can be used to enhance the security and confidentiality of information protection algorithms [4–6]. Discrete chaotic systems are widely used for multimedia data encryption because they are easily implementable in digital environments [7]. Numerous studies have sought to improve the performance of security algorithms, reduce execution time, and increase resistance to cryptanalysis [8], relying mainly on chaotic maps or fractional order maps to improve confusion and

diffusion mechanisms [9]. In recent decades, the use of chaos in image encryption has become widespread [10–13]. Several effective schemes have been pro-posed, including algorithms based on fractional chaotic systems [14], pixel confusion and diffusion [15], and one-dimensional polynomial chaotic maps of the PWQPCM type in-corporating segmentation, substitution, and combined diffusion [16]. In [17], the authors introduced an image encryption scheme based on a logistic map whose parameters de-pend on the values of the pixels in the plaintext image, allowing image-specific pseudo-random sequences to be generated while maintaining low computational complexity. Similarly, Wen et al. showed that the integration of hybrid chaotic maps significantly improves cryptographic qualities in terms of entropy, NPCR, and UACI [18].

However, despite the many advantages of nonlinear dynamical systems, discrete logistic recurrence maps have certain disadvantages, such as restricted chaotic regions, the presence of periodic windows, and low sensitivity to parameters and initial conditions, which can render them ineffective for cryptographic applications [19-20]. In order to overcome these constraints, several new discrete chaotic maps with improved performance have been developed. For example, Yicong Zhou et al. [21] proposed a one-dimensional discrete chaotic system obtained by the parallel combination of two maps, offering good distribution uniformity and high sensitivity to initial conditions, without periodic windows on the interval [0,4]. Xie et al. [22] introduced an improved variant of the logistic map that resolves several classic limitations, although the chaotic range remains limited. Similarly, Zhongyun Hua et al. [23] proposed chaotic maps based on the cosine transform (Cosine-Transform-Based Chaotic Systems, CTBCS), characterized by complex dynamics and the absence of periodic windows. Zhang et al. [24] recently presented an encryption scheme based on new chaotic maps and a compression technique offering good performance and computational efficiency.

Motivated by research aimed at improving the dynamic qualities of logistic maps, we introduce in this article a new one-dimensional discrete chaotic map, called the polynomial-sinusoidal map. The polynomial-sinusoidal map combines a polynomial logistic map and a sinusoidal term, controlled by several independent parameters, allowing the chaotic range to be widened and unwanted periodic windows to be eliminated. It is then used to design a high-performance and secure image encryption system. Section 2 describes the classic chaotic map. Section 3 presents the mathematical definition of the polynomial-sinusoidal map and the analysis of its chaotic properties. Section 4 describes the proposed image encryption system. Finally, the last section concludes the article.

2 PRELIMINARY

2.1 POLYNOMIAL LOGISTIC MAP

The polynomial logistic map is a nonlinear dynamic system developed from the fundamental characteristics of the classical logistic map [25]. Mathematically, it is defined by the following expression:

$$x_{n+1} = r/4 x_n (1 - \frac{1}{2}x_n - \beta x_n^2) \quad (1)$$

where $r \in [0, 13]$ and $\beta \in [0.5, 1]$ are the control parameters, while $x_n \in [0, 1]$ represents the value of the chaotic sequence at iteration n . Fig. 1a and 1b show the bifurcation diagram and the Lyapunov exponent of the polynomial logistic map, respectively. As shown in this figure, the map exhibits chaotic behaviour interspersed with periodic windows in the interval $r \in [10.5, 12.5]$. This chaotic zone remains relatively narrow and limited. Furthermore, the system depends on only two control parameters, which reduces the overall dynamic complexity of the model. These drawbacks are an obstacle to its use in cryptography, where a wide chaotic parameter range and high complexity are required to guarantee a satisfactory level of security.

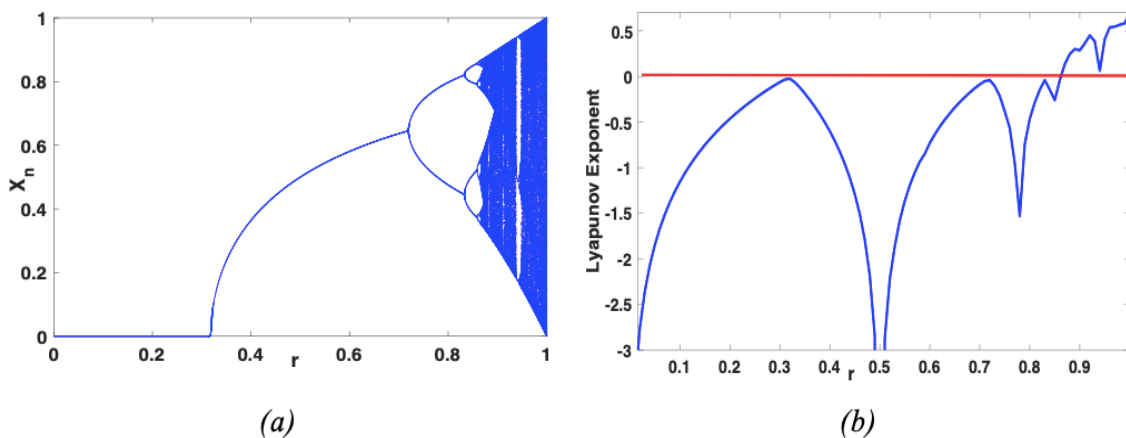


Fig. 1. Bifurcation diagram (a) and Lyapunov exponent (b) of polynomial logistic map

2.2 SINE MAP

The sine map is a non-linear, one-dimensional iterative map defined by the recurrence relation (2) [26]. It is presented as a representative example of the complexity of chaotic dynamical systems.

$$x_{n+1} = \lambda x_n \sin(\pi x_n) \quad (2)$$

In this equation, $\lambda \in [0,1]$ is a control parameter, while $x_n \in [0,1]$ represents the state variable of iteration n . The different dynamic behaviors of the sine map are illustrated by the bifurcation diagram and the Lyapunov exponent plotted in Fig. 2a and b, respectively. As indicated, the sinusoidal map exhibits similar behaviors and comparable limits to those of the classical logistic map.

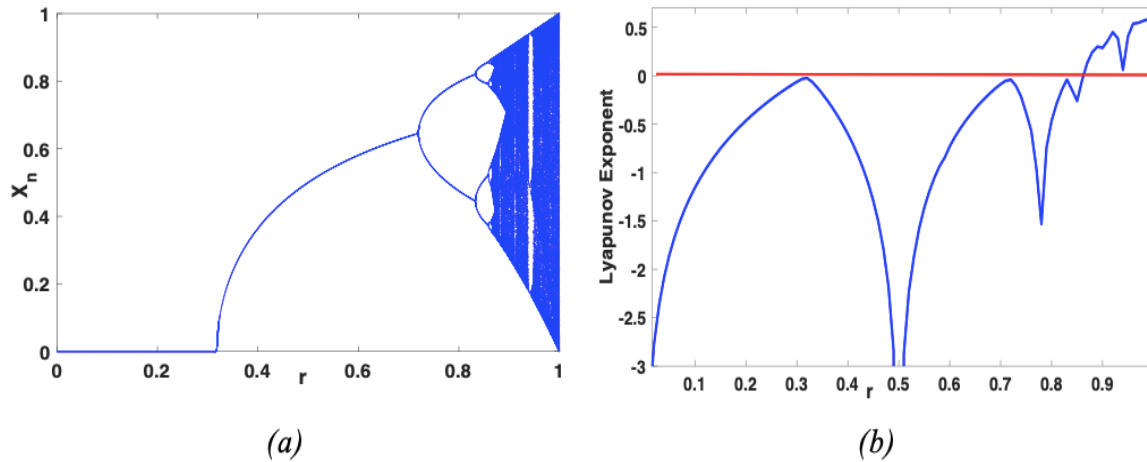


Fig. 2. Bifurcation diagram (a) and Lyapunov exponent (b) of sine map

3 NEW CHAOTIC 1D MAP

In this section, a new one-dimensional (1D) chaotic map, referred to as the polynomial–sinusoidal map, is proposed. This map is obtained by combining the polynomial logistic map and the sinusoidal map presented in the previous section. The proposed map involves a larger number of control parameters compared to the two reference maps, which enhances its dynamic complexity. The resulting nonlinear dynamical system is defined by the equation given in relation (3).

$$x_{n+1} = (r/4 x_n (1 - \frac{1}{2} x_n - \beta x_n^2) + \lambda x_n \sin(\pi x_n)) \bmod 1 \quad (3)$$

where $r \in [0, +\infty]$, $\beta \in [0.5,1]$ and $\lambda \in [0, +\infty]$ are the control parameters, x_n denotes the initial condition, and mod 1 represents the modulo operator that ensures the output of the proposed map remains within the interval $[0,1]$. The proposed map exhibits chaotic behaviour over a wide range of the parameters λ and β . To further characterize and analyze these nonlinear dynamics, the map is investigated using the principal techniques commonly employed for chaos characterization in dynamical systems.

3.1 COBWEB DIAGRAM ANALYSIS

Cobweb diagrams are graphical methods for analysing the iterative behaviour of one-dimensional discrete dynamical systems [27]. They allow the visualization of the iterative trajectories of a nonlinear mapping starting from a given initial condition.

Fig. 3a and 3b show the cobweb diagrams of the proposed map and the polynomial logistic map, respectively. It can be observed that the proposed discrete map generates a set of non-repeating and highly irregular iterative trajectories, which demonstrates its chaotic nature. Moreover, the trajectories of the proposed map fill the entire rectangular output space, unlike those of the polynomial logistic map. This result indicates that the proposed map exhibits stronger chaotic behaviour than the conventional polynomial logistic map.

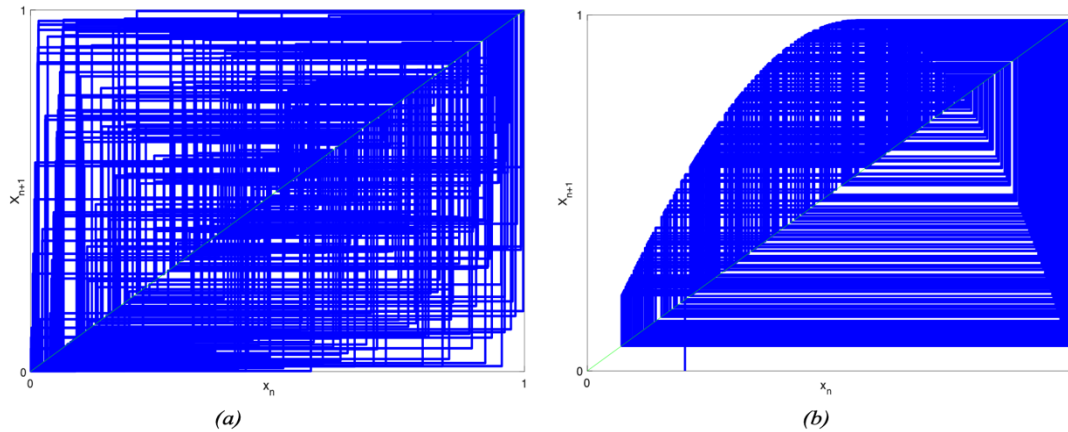


Fig. 3. Cobweb diagrams of the proposed map (a) and the polynomial logistic map (b)

3.2 BIFURCATION ANALYSIS

Figure 4 shows the bifurcation diagram of the new map as a function of the control parameters r and λ . For $r=0.5$ (Fig. 4 (a)), the proposed system exhibits periodic behaviour for low values of λ . As λ increases, a sequence of successive bifurcations appears, indicating a transition toward more complex dynamical regimes, characterized by the emergence of chaos interspersed with periodic windows. In contrast, for $\lambda=0.5$ (Fig. 4 (c)), the system displays chaotic behaviour for low values of r , and then evolves toward a periodic regime, eventually converging to a steady state when r exceeds the interval $[0.8,1]$. When the control parameters increase significantly (Fig. 4 (b) and 4 (d)), the discrete map enters a chaotic regime over the entire parameter space considered. This regime is characterized by non-periodic trajectories and a dense occupation of the interval $[0,1]$, with only a few isolated periodic windows. Furthermore, compared with the bifurcation diagrams of the polynomial logistic map (Fig. 1 (a)) and the sinusoidal map (Fig. 2 (a)), the bifurcation structure of the proposed map shows an enlarged chaotic region, a noticeable reduction in periodic windows, and a high degree of uniformity in the distribution of state variables. These results confirm a significant improvement in dynamic complexity, enhanced ergodicity, and robust pseudo-random behaviour, highlighting the suitability of the proposed system for pseudo-random sequence generation and encryption applications.

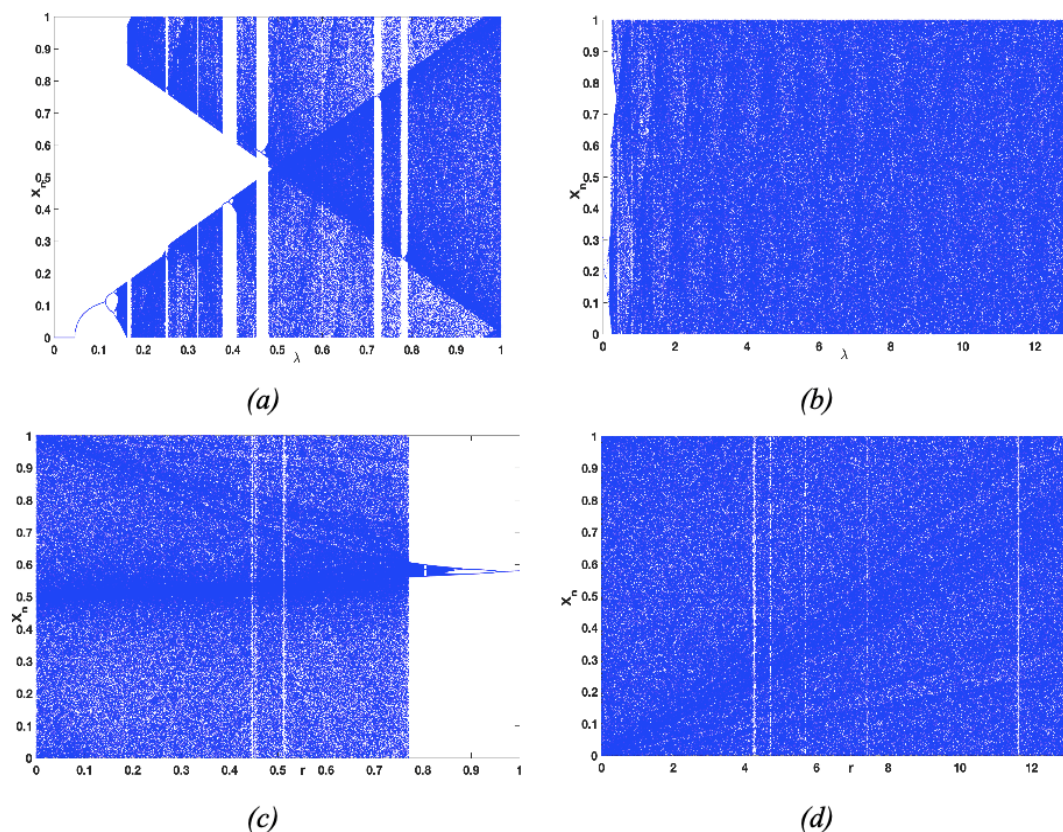


Fig. 4. Bifurcation diagrams of the proposed map as functions of the control parameters r and λ for the cases: (a) $r=0.5$, (b) $r=5$, (c) $\lambda=0.5$, and (d) $\lambda=5$

3.3 ANALYSIS OF THE LYAPUNOV EXPONENT

The Lyapunov exponent is a very important tool in chaos analysis. A positive value of the Lyapunov exponent indicates a large divergence of neighbouring trajectories and thus reflects a strong dependence on initial conditions [28]. The evolution of the Lyapunov exponent of the new map as a function of the control parameters λ and r is shown in Fig. 5. The results presented show that the new nonlinear map has strong chaotic dynamics over the entire range of control parameters, as indicated by the largely positive Lyapunov exponents. In contrast, for low parameter values, the Lyapunov exponent is negative or close to zero, which corresponds to the presence of periodic states, as noted in the bifurcation diagram. The presence of a few very small periodic windows provides information on the quality and dynamic complexity of the proposed chaotic map on the one hand, and on the high sensitivity to initial conditions and parameters on the other.

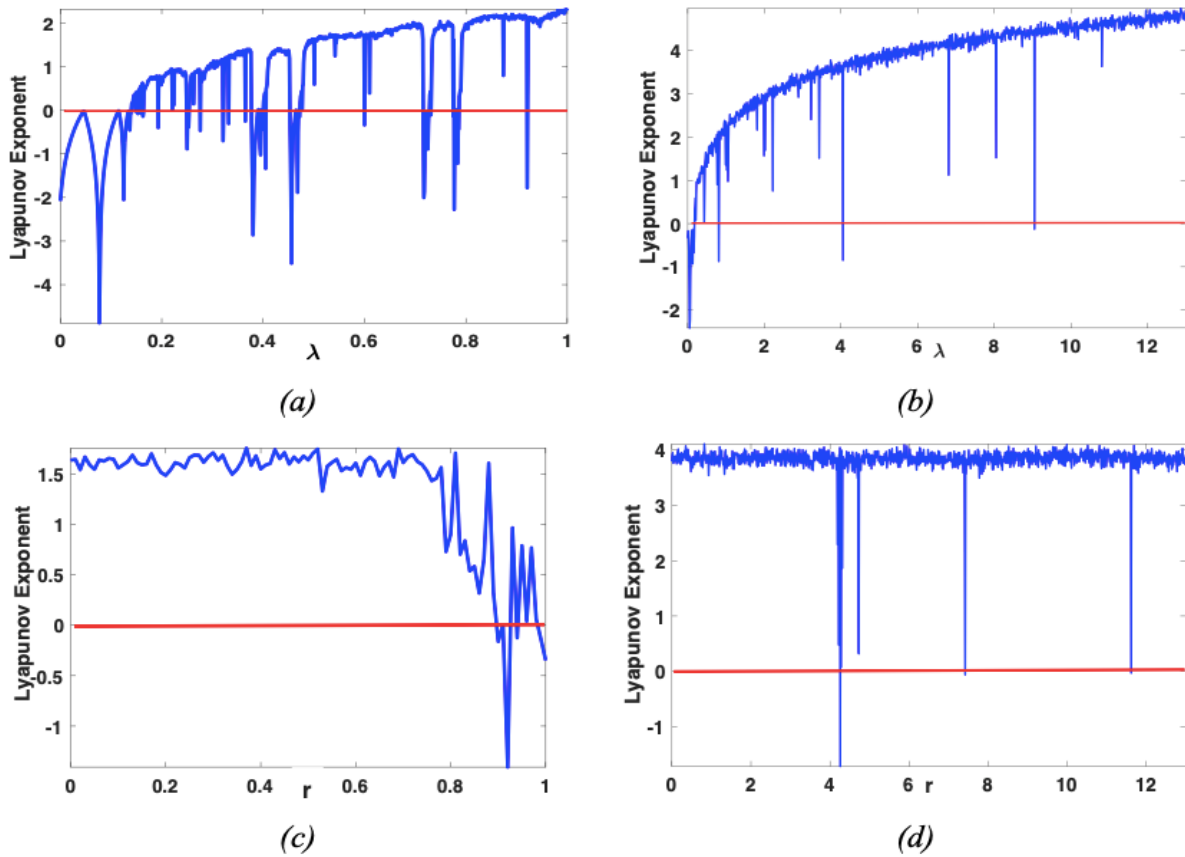


Fig. 5. Lyapunov exponent of the proposed map as a function of the control parameters r and λ in the cases: (a) $r=0.5$, (b) $r=5$, (c) $\lambda=0.5$, and (d) $\lambda=5$

3.4 ANALYSIS OF SENSITIVITY TO INITIAL CONDITIONS AND PARAMETERS

Sensitivity to initial conditions and control parameters is one of the fundamental properties of chaotic behaviour [29]. To analyze this property, time series of the proposed map are plotted by introducing a small perturbation of 10^{-16} to the initial conditions and control parameters, as shown in Fig. 6. As can be observed, infinitesimal variations of the order of 10^{-16} lead to a rapid divergence of the generated sequences, which clearly confirms the strong sensitivity of the system to both initial conditions and parameters. In addition, the high sensitivity of the control parameter λ contributes to enlarging the overall key space. These characteristics endow the proposed system with high robustness and strong resistance to cryptanalysis, making it particularly suitable for secure encryption applications.

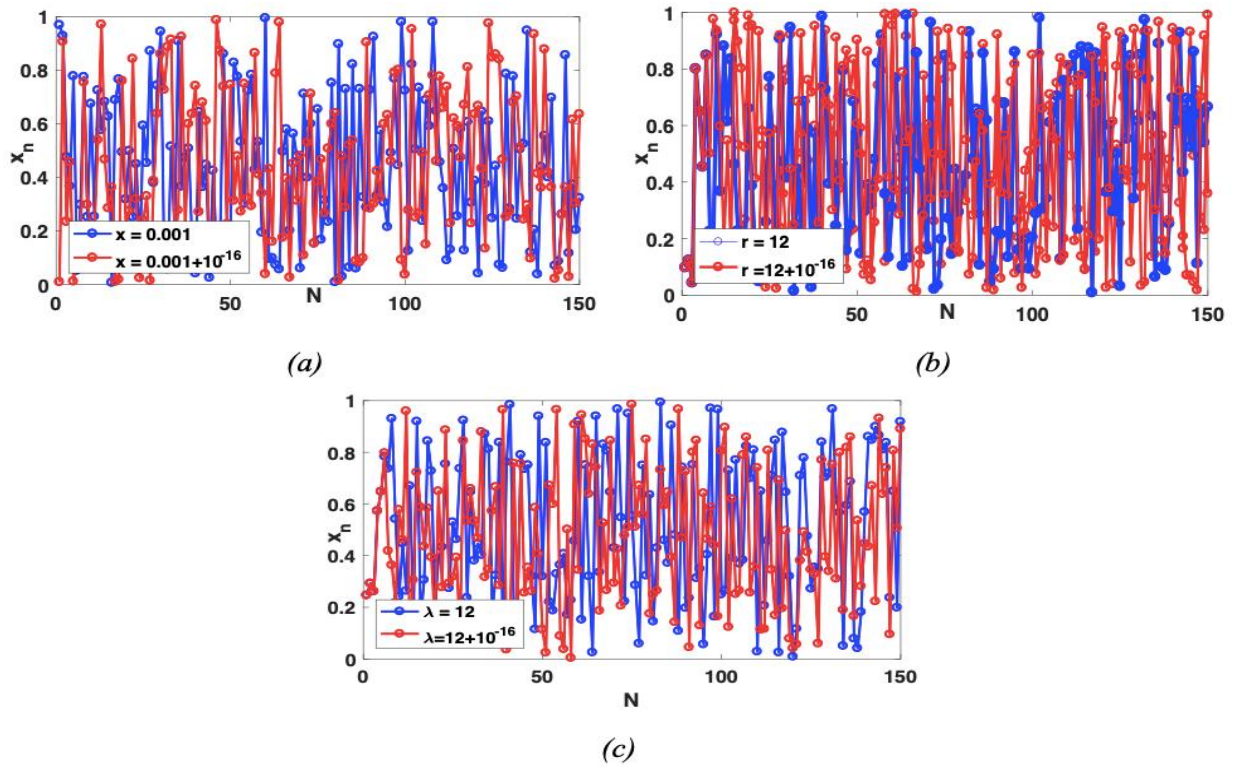


Fig. 6. (a) Sensitivity analysis with respect to initial conditions; (b) sensitivity of the proposed map to the parameter r ; and (c) sensitivity of the proposed map to the parameter λ

3.5 APPROXIMATE ENTROPY ANALYSIS

Approximate entropy measures the complexity and randomness of a time series. It is equal to zero for a periodic series and strictly positive for a chaotic series, increasing with the degree of unpredictability of the sequence [30]. Fig. 7 shows that the proposed map exhibits high and stable approximate entropy values over a wide range of control parameters, indicating strong complexity and enhanced randomness of the generated sequences. In contrast, the polynomial logistic map exhibits significant decreases in approximate entropy, revealing the presence of periodic regimes. These results confirm the superiority of the proposed map for cryptographic applications.

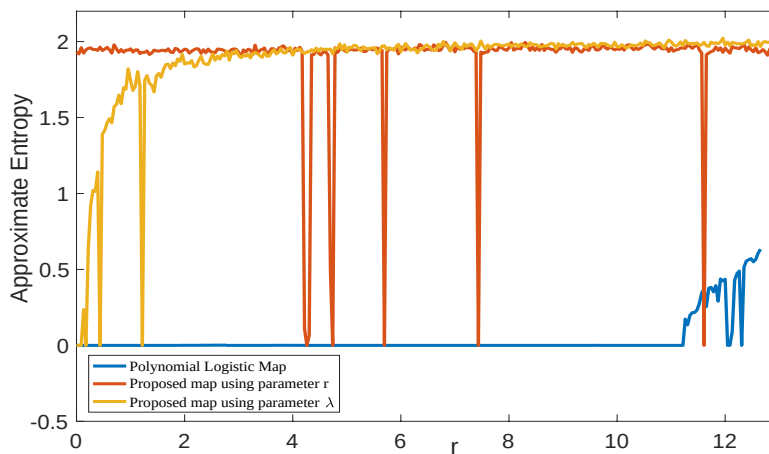


Fig. 7. Approximate Entropy Analysis

4 APPLICATION TO IMAGE CRYPTOGRAPHY

4.1 ENCRYPTION SCHEME

In this section, we propose a new image encryption algorithm based on the use of a new chaotic map, a permutation, and two diffusion processes. The synoptic diagram of the proposed image encryption algorithm is shown in Fig.8. In the permutation phase, the original image is decomposed to obtain column vectors. Next, the chaotic sequences $S1$ generated by the new map are used to determine the permutation indices of the pixels. Finally, to eliminate correlations between adjacent pixels, recurrent operations are performed to mix the positions of the pixels in the original image.

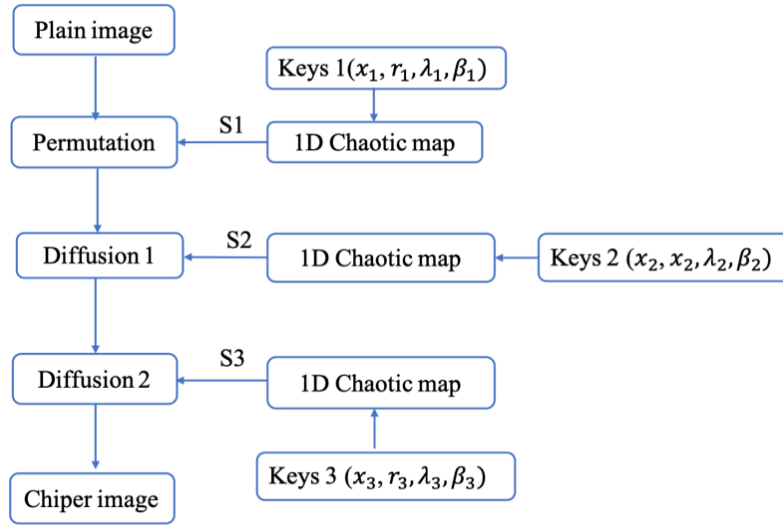


Fig. 8. Schéma synoptique de l'algorithme de cryptage d'image proposé

The diffusion is carried out in two phases. In the first phase, the chaotic sequences $S2$ generated with Keys 2 are used to encrypt the pixels. Pixel encryption is achieved by performing an XOR operation between the result of the permutation phase and the sequences $S2$. In the second phase, another diffusion is performed using the chaotic sequences $S3$. This consists of reinforcing the first diffusion by applying a new XOR operation between the pixels encrypted in the first diffusion and the elements of $S3$. Cascading the diffusion operations significantly reinforces the robustness of the algorithm in both directions. Details of the process are given in the pseudo-code below.

Algorithm Encryption algorithm

Input: Original image, I , $x_1, \beta_1, r_1, \lambda_1, x_2, \beta_2, r_2, \lambda_2, x_3, \beta_3, r_3, \lambda_3$

Output: Encrypted image C

```

1:  for  $i = 1 : M \times N$  do
2:       $S1(i) = \text{mod}\left(\frac{r_1}{4} \left( x_1(i-1) \left( 1 - \frac{1}{2} x_1(i-1) - \beta_1 x_1(i-1)^2 \right) \right. \right.$ 
         $\left. \left. + \lambda_1 x_1(i-1) \sin(\pi x_1(i-1)) \right), 1 \right)$ 
3:  end for
4:   $\text{img1} \leftarrow \text{reshape}(I, I, M \times N)$ 
5:  for  $i = M \times N$  down to 2 do
6:       $J \leftarrow \text{mod}(\text{floor}(S1(i) \cdot i), i) + 1$ 
7:       $\text{temp} \leftarrow \text{img1}(i)$ 
8:       $\text{img1}(i) \leftarrow \text{img1}(j)$ 
  
```

```

9:          $img1(j) \leftarrow temp$ 
10:     end for
11:     for  $i = 1 : M \times N$  do
12:         
$$S2(i) = mod(\frac{r_2}{4} \left( x_2(i-1) \left( 1 - \frac{1}{2} x_2(i-1) - \beta_2 x_2(i-1)^2 \right) \right. \\ \left. + \lambda_2 x_2(i-1) \sin(\pi x_2(i-1)) \right), 1)$$

13:     end for
14:      $img2(1) \leftarrow img1(1) \oplus floor(S2(1) \times 256)$ 
15:     for  $i = 2 : M \times N$  do
16:          $img2(i) \leftarrow img1(i) \oplus img2(i-1) \oplus floor(S2(i) \times 256)$ 
17:     end for
18:     for  $i = 1 : M \times N$  do
19:         
$$S3(i) = mod(\frac{r_3}{4} \left( x_3(i-1) \left( 1 - \frac{1}{2} x_3(i-1) - \beta_3 x_3(i-1)^2 \right) \right. \\ \left. + \lambda_3 x_3(i-1) \sin(\pi x_3(i-1)) \right), 1)$$

20:     end for
21:     for  $i = M \times N - 1$  downto 1 do
22:          $img3(i) \leftarrow img2(i) \oplus img2(i+1) \oplus floor(S3(i) \times 256)$ 
23:     end for
24:      $C \leftarrow reshape(img3, M, N)$ 

```

Le décryptage de l'image est l'opération inverse du cryptage. La figure 2.7 présente les principales phases du processus de décryptage.

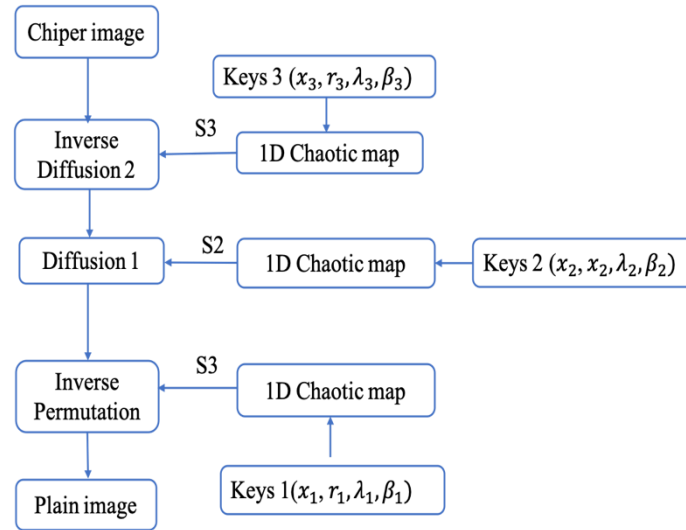


Fig. 9. Schéma synoptique du processus de décryptage d'image

4.2 EXPERIMENTAL RESULTS AND PERFORMANCE EVALUATION

The results presented in this subsection were obtained using simulations performed in MATLAB R2016b, installed on a MacBook Air (13-inch, 2017) equipped with a 2.2 GHz dual-core Intel Core i7 processor and 8 GB of 1600 MHz DDR3 RAM. The cryptosystem was tested on two images of size 256×256, namely Lena and Cameraman. Figure 10 illustrates the results of the image encryption and decryption processes. The encrypted images are visually very different from the original images, while the decryption process accurately restores the original images.



Fig. 10. Results of encryption and decryption processes

4.2.1 HISTOGRAM EVALUATION

The histogram of an image illustrates the spectral distribution of its intensity levels. To ensure the confidentiality of information, the histogram of the encrypted image must exhibit a uniform distribution, which masks repetitions present in the unencrypted image and improves the system's resistance to statistical attacks [31]. Fig. 11 shows the histograms of the original and encrypted images. In both cases, it is clear that the grey-level distribution of the encrypted images is homogeneous, whereas that of the original images is non-uniform. The histogram analysis therefore leads to the conclusion that the proposed algorithm is effective against statistical attacks.

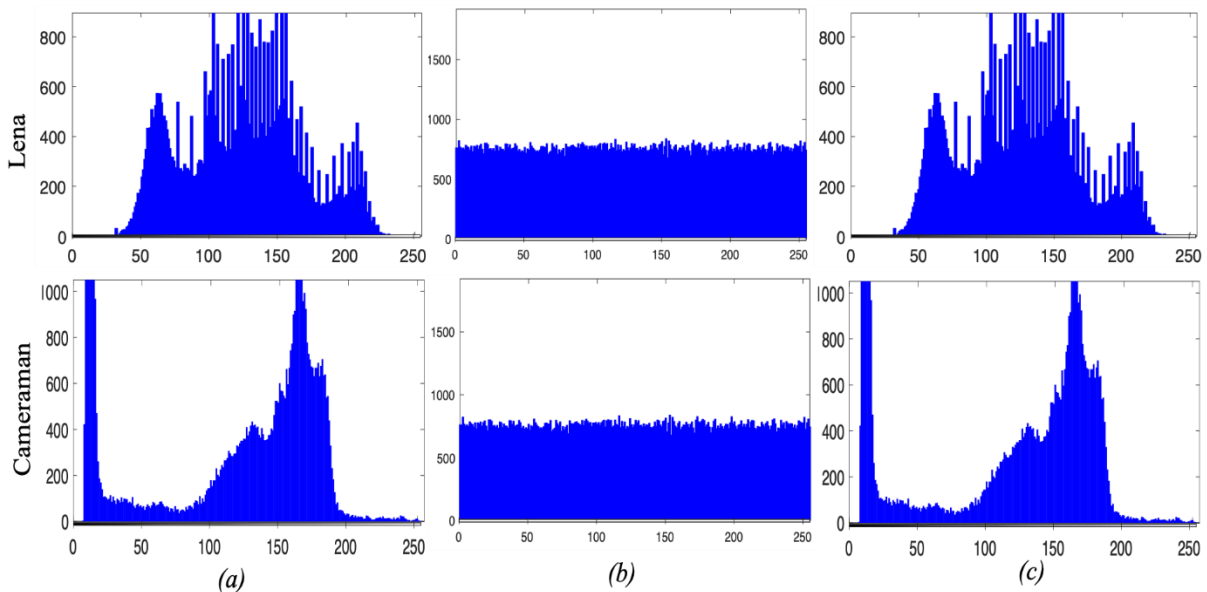


Fig. 11. Histogram analysis of clear and encrypted images

4.2.2 CORRELATION EVALUATION

In a plain image, adjacent grey levels exhibit strong correlations in the horizontal, vertical, and diagonal directions. To ensure good resistance to statistical attacks, an effective cryptosystem must significantly reduce these correlations in the encrypted image. To this end, the correlations between adjacent pixels in the plaintext and ciphertext Lena images are analyzed in all three directions, and the results are presented in Fig.12. As can be observed, the distributions of adjacent grey levels in the plaintext image are highly concentrated, reflecting a high degree of correlation. In contrast, the corresponding distributions in the encrypted image are widely dispersed, indicating that the encryption process effectively eliminates pixel correlations and produces a low-correlation encrypted image.

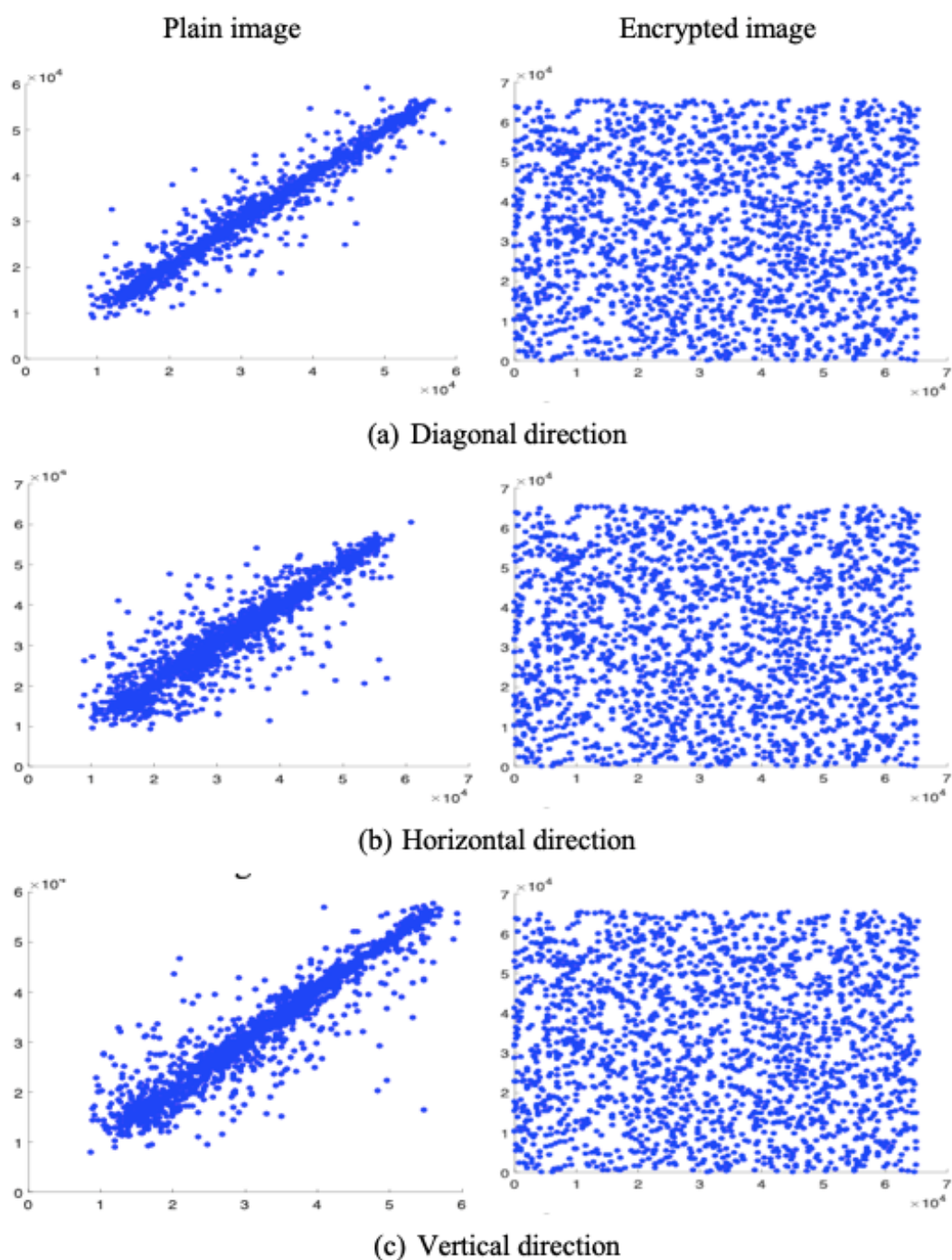


Fig. 12. Correlation graphs for the clear image and for encrypted image

In addition to the information provided by the correlation graphs, correlation coefficients were calculated for each direction and compared with existing works in the literature. Table 1 presents the obtained results. As can be observed, the correlation coefficients of the original images are very high, whereas those of the encrypted images are very low. It can also be noted that the correlation coefficients of the encrypted images are close to zero in all three directions and for both images considered. Furthermore, for all the analyzed directions, the obtained values are very close to those reported in the works of [32–34]. These results indicate that the proposed encryption system exhibits good resistance against autocorrelation attacks.

Table 1. Correlation coefficients of original and encrypted images

Images	Direction	Original	Encrypted			
			Proposed scheme	[33]	[34]	[35]
Lena	Horizontal	0.9093	0.0080	0.019732	0.0069	0.0074
	Vertical	0.9617	0.0026	0.002467	0.0479	0.0096
	Diagonal	0.8853	0.00034	0.004438	0.0075	0.0193

4.2.3 EVALUATION OF DIFFERENTIAL ATTACKS

The ability of the proposed image encryption algorithm to resist differential attacks is evaluated using the NPCR (Number of Pixels Change Rate) and UACI (Unified Average Changing Intensity) metrics. The simulation results, compared with those reported in the literature, are presented in Table 2. As can be observed, the obtained NPCR and UACI values are close to their ideal values. Moreover, these results are very similar to those reported in existing works. This observation demonstrates that the proposed algorithm exhibits high resistance to differential attacks.

Table 2. NPCR and UACI for the image simulation comparing our scheme with other literature methods

	Propose scheme		[35]		[36]		[37]	
File	NPCR	UACI	NPCR	UACI	NPCR	UACI	NPCR	UACI
Lena	99.62	33.51	99.60	33.51	-	-	99.6052	33.4561
Cameraman	99.64	33.52	99.61	33.56	99.6196	33.4153	-	-
Baboon	99.61	33.52	99.59	33.53	99.6089	33.4071	99.6125	33.4655

4.2.4 ENTROPY EVALUATION

Since entropy is an important criterion in the evaluation of a cryptosystem, we analyzed this indicator to determine the degree of disorder in the distribution of pixel values in the image. The entropy values of the original and encrypted images are shown in the Table 3. It can be seen that the entropy values of the encrypted images are close to 8, which means that the bites are uniformly distributed.

Table 3. Entropy values for encrypted and original images

Images	Original	Encrypted			
		Proposed scheme	[37]	[38]	[39]
Lena	7.7792	7.9962	-	7.999359	7.997052
Cameraman	7.0097	7.9971	7.9993	-	7.99672
Baboon	7.3596	7.9960	7.9993	7.999380	7.99742

4.2.5 KEY SENSITIVITY EVALUATION

Key sensitivity is the fundamental property of a chaotic cryptosystem. A slight modification of the original keys should give different results during encryption and/or decryption. Fig. 13 shows the sensitivity test for encryption and decryption. The results show that the use of modified keys in the encryption phase produces a visibly different image. At the decryption stage, the use of a modified key does not reconstitute the original image. The encryption algorithm presented is highly key-sensitive.

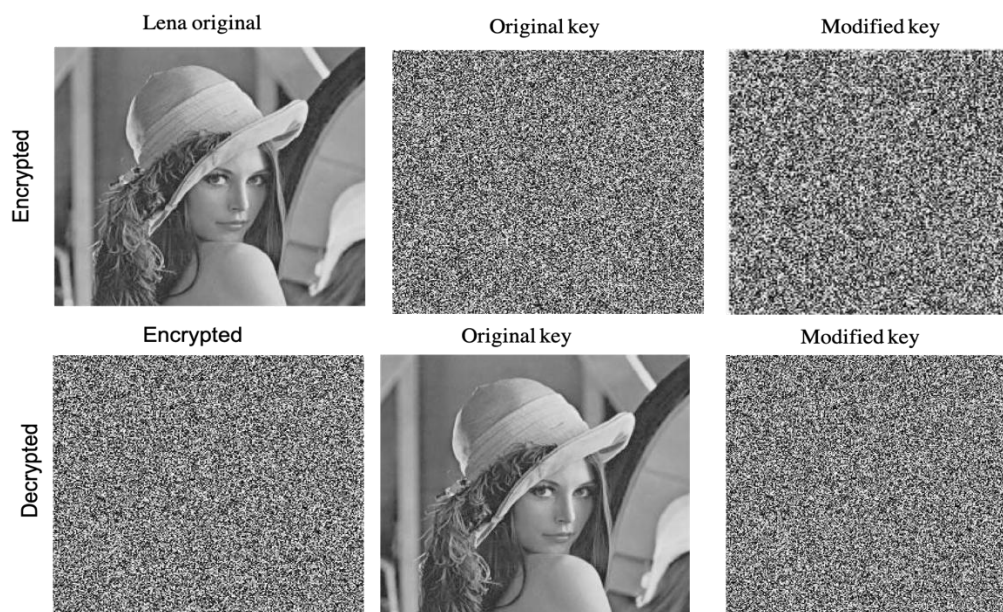


Fig. 13. Key sensitivity test for encryption and image encryption

4.2.6 EVALUATION OF KEY SPACE

To evaluate the algorithm resistance to brute-force attacks, the entire key space is determined and presented in Table 4. The proposed scheme key space consists of the set of initial conditions (x_1, x_2, x_3) and parameters $(\lambda_1, r_1, \beta_1, \lambda_2, r_2, \beta_2, \lambda_3, r_3, \beta_3)$ of the two chaotic systems. For a machine with a precision of 10^{-15} the key space is calculated as follows $\lceil (10^{15})^8 \rceil = 10^{180}$, which is sufficiently large. This situation allows us to deduce that our proposed algorithm is capable of resisting brute force attacks. In addition, a comparison of this encryption scheme with other chaotic image encryption schemes is carried out. The results shown in Table 4 indicate that the key space of this algorithm is also larger than that of other algorithms.

Table 4. Comparison of the key space of the proposed algorithm with other algorithms

Algorithm	Key space
[14]	10^{75}
[40]	10^{90}
[41]	10^{105}
Proposed scheme	10^{180}

4.2.7 EVALUATION OF IMAGE ENCRYPTION TIME

Execution time is an important measure for guaranteeing the efficiency of an encryption algorithm. By evaluating the execution time of the entire encryption process for the two images under consideration, we obtained 1.255517 seconds and 1.567479 seconds for the Lena and Cameraman images respectively. However, it should be noted that the encryption execution time for the Lena image is comparable to the work presented in the literature. The result illustrated in Table 6 shows that the proposed algorithm is faster than the authors' image encryption schemes.

Table 5. Encryption execution time analysis

Algorithm	Execution time (s)
[42]	2.792
[43]	2.9
[44]	4.601
[45]	7.788
[46]	4.821
Proposed scheme	0.99

5 CONCLUSION

In this article, we propose a new one-dimensional discrete chaotic map for enhancing the security of chaos-based encryption systems. The proposed discrete system combines a nonlinear polynomial structure with a sinusoidal term, controlled by several independent parameters, which allows for a wider chaotic range and improved dynamic complexity. A detailed analysis of its chaotic properties, including bifurcation diagrams, the Lyapunov exponent, sensitivity to initial conditions and parameters, and approximate entropy, confirms the robust chaotic nature of the proposed map. Building on the advantages of the new map, we use it to develop an image encryption algorithm. The scheme is based on a permutation operation and two diffusion operations, driven three times by the new map. Experimental results and security analyses, including the study of histograms, correlations between adjacent pixels, key sensitivity, and NPCR and UACI metrics, demonstrate that the proposed algorithm offers good performance and strong resistance to statistical and differential attacks.

REFERENCES

- [1] R. Sneyers, «Climate chaotic instability: Statistical determination and theoretical background,» *Environmetrics*, vol. 8, no. 5, pp. 517–532, 1997.
- [2] X. Zeng, R. A. Pielke, and R. Eykholt, «Chaos theory and its applications to the atmosphere,» *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 74, no. 4, pp. 631–644, 1993.
- [3] A. Serletis and P. Gogas, «Purchasing power parity, nonlinearity and chaos,» *Applied Financial Economics*, vol. 10, no. 6, pp. 615–622, 2000, doi: 10.1080/096031000437962.
- [4] M. Maqableh, A. Samsudin, and M. A. Alia, «New hash function based on chaos theory (CHA-1),» *International Journal of Computer Networks & Security*, vol. 8, no. 2, pp. 20–26, 2008.
- [5] M. S. Azzaz, C. Tanougast, S. Sadoudi, and A. Bouridane, «Synchronized hybrid chaotic generators: Application to real-time wireless speech encryption,» *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 18, no. 8, pp. 2035–2047, 2013, doi: 10.1016/j.cnsns.2012.12.018.
- [6] A. Hasheminejad and M. Rostami, «A novel bit-level multiphase algorithm for image encryption based on PWLCM chaotic map,» *Optik*, vol. 184, pp. 205–213, 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.03.065.
- [7] S. E. Borujeni and M. S. Ehsani, «Modified logistic maps for cryptographic application,» *Applied Mathematics*, vol. 6, no. 5, pp. 773–782, 2015, doi: 10.4236/am.2015.65073.
- [8] R. L. Rivest, A. Shamir, and L. Adleman, «A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems,» *Communications of the ACM*, vol. 21, no. 2, pp. 120–126, 1978.
- [9] B. Yousif, F. Khalifa, A. Makram, and A. Takieldein, «A novel image encryption/decryption scheme based on integrating multiple chaotic maps,» *AIP Advances*, vol. 10, no. 7, Art. no. 075017, 2020, doi: 10.1063/5.0009225.
- [10] X. Wang, S. Wang, N. Wei, and Y. Zhang, «A novel chaotic image encryption scheme based on hash function and cyclic shift,» *IETE Technical Review*, vol. 36, no. 1, pp. 39–48, 2018, doi: 10.1080/02564602.2017.1393352.
- [11] X. Wu, H. Shi, M. Ji'e, S. Dua, and L. Wang, «A novel image compression and encryption scheme based on conservative chaotic system and DNA method,» *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 172, Art. no. 113492, 2023, doi: 10.1016/j.chaos.2023.113492.
- [12] S. Zhu, X. Deng, W. Zhang, and C. Zhu, «Secure image encryption scheme based on a new robust chaotic map and strong S-box,» *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 207, pp. 322–346, 2023, doi: 10.1016/j.matcom.2022.12.025.

- [13] V. Patidar, N. K. Pareek, and K. K. Sud, «A new substitution–diffusion-based image cipher using chaotic standard and logistic maps,» *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 14, no. 7, pp. 3056–3075, 2009, doi: 10.1016/j.cnsns.2008.11.005.
- [14] J. Zhao, S. Wang, and Y. Chang, «A novel image encryption scheme based on an improper fractional-order chaotic system,» *Nonlinear Dynamics*, vol. 80, pp. 1721–1729, 2015, doi: 10.1007/s11071-015-1911-x.
- [15] S. Amina and F. K. Mohamed, «An efficient and secure chaotic cipher algorithm for image content preservation,» *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 60, pp. 12–32, 2018, doi: 10.1016/j.cnsns.2017.12.017.
- [16] I. Yasser, M. A. Mohamed, A. S. Samra, and F. Khalifa, «A chaotic-based encryption/decryption framework for secure multimedia communications,» *Entropy*, vol. 22, no. 11, Art. no. 1253, 2020, doi: 10.3390/e22111253.
- [17] J. Oravec, L. Ovsenik, and J. Papaj, «An image encryption algorithm using logistic map with plaintext-related parameter values,» *Entropy*, vol. 23, no. 11, Art. no. 1373, 2021, doi: 10.3390/e23111373.
- [18] W. Wen, Y. Li, and X. Zhang, «Secure image encryption scheme based on chaotic maps and bit-level permutation,» *Entropy*, vol. 25, no. 8, Art. no. 1124, 2023, doi: 10.3390/e25081124.
- [19] A. Kalso and M. Ghebleh, «A refinement of the logistic map for cryptographic applications,» *Franklin Open*, vol. 12, Art. no. 100333, 2025, doi: 10.1016/j.fraope.2025.100333.
- [20] Y. Zhou, L. Bao, and C. L. P. Chen, «A new 1D chaotic system for image encryption,» *Signal Processing*, vol. 97, pp. 172–182, 2014, doi: 10.1016/j.sigpro.2013.10.034.
- [21] A. Dinu, Image Encryption Using Chaotic Maps, 2025.
- [22] J. Xie, C. Yang, Q. Xie, and L. Tian, «An encryption algorithm based on transformed logistic map,» in *Proc. Int. Conf. Network Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, Wuhan, China, pp. 111–114, 2009, doi: 10.1109/NSWCTC.2009.201.
- [23] Z. Hua, Y. Zhou, and H. Huang, «Cosine-transform-based chaotic system for image encryption,» *Information Sciences*, vol. 480, pp. 403–419, 2019, doi: 10.1016/j.ins.2018.12.048.
- [24] X. Zhang et al., «Chaos-based color image encryption with JPEG compression,» 2025.
- [25] Z. Kalsoubé, A. H. Ahamat, Y. K. Mahamoud, and P. Wofo, «Chaos in new polynomial discrete logistic maps with fractional derivative and applications for text encryption,» *Applied Mathematics & Information Sciences*, vol. 17, pp. 807–816, 2023.
- [26] J. C. Sprott, *Chaos and Time-Series Analysis*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2003.
- [27] S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos*, 2nd ed. Boulder, CO, USA: Westview Press, 2015.
- [28] E. Ott, *Chaos in Dynamical Systems*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.
- [29] G. Alvarez and S. Li, «Some basic cryptographic requirements for chaos-based cryptosystems,» *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 16, pp. 2129–2151, 2006.
- [30] S. M. Pincus and A. L. Goldberger, «Physiological time-series analysis: What does regularity quantify?» *American Journal of Physiology*, vol. 266, pp. H1643–H1656, 1994.
- [31] X.-Y. Wang, «New chaotic encryption algorithm based on chaotic sequence and plaintext,» *IET Information Security*, vol. 8, pp. 213–216, 2014.
- [32] S. Lian, J. Sun, and Z. Wang, «A block cipher based on a suitable use of the chaotic standard map,» *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 26, pp. 117–129, 2005, doi: 10.1016/j.chaos.2004.11.096.
- [33] K. M. Hosny, S. T. Kamal, M. M. Darwish, and G. A. Papakostas, «New image encryption algorithm using hyperchaotic system and Fibonacci Q-matrix,» *Electronics*, vol. 10, Art. no. 910, 2021, doi: 10.3390/electronics10091066.
- [34] J. Wu, X. Liao, and B. Yang, «Image encryption using 2D Hénon–sine map and DNA approach,» *Signal Processing*, vol. 153, pp. 11–23, 2018, doi: 10.1016/j.sigpro.2018.06.008.
- [35] R. Subramani, B. Emin, S. T. Kingni, and A. Akgül, «Image encryption application and security analysis based on semiconductor lasers,» *Optik*, vol. 287, Art. no. 171164, 2023.
- [36] D. I. M. Setiadi and N. Rijati, «Image encryption using 2D cascaded logistic map and permutation–substitution operations,» *Computation*, vol. 11, Art. no. 178, 2023, doi: 10.3390/computation11090178.
- [37] D. S. Malik and T. Shah, «Color multiple image encryption scheme based on 3D chaotic maps,» *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 178, pp. 646–666, 2020.
- [38] X. Wang, L. Liu, and Y. Zhang, «A novel chaotic block image encryption algorithm,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 66, pp. 10–18, 2015, doi: 10.1016/j.optlaseng.2014.08.005.
- [39] B. Stoyanov and K. Kordov, «Image encryption using Chebyshev map and rotation equation,» *Entropy*, vol. 17, pp. 2117–2139, 2015, doi: 10.3390/e17042117.
- [40] H. Zhu, L. Dai, Y. Liu, and L. Wu, «A three-dimensional bit-level image encryption algorithm with Rubik’s cube method,» *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 185, pp. 754–770, 2021.
- [41] Z. Tang, Y. Yang, S. Xu, C. Yu, and X. Zhang, «Image encryption with double spiral scans and chaotic maps,» *Security and Communication Networks*, Art. ID 8694678, 2019, doi: 10.1155/2019/8694678.

- [42] A. Arab, M. J. Rostami, and B. Ghavami, «An image encryption method based on chaos system and AES algorithm,» *Journal of Supercomputing*, vol. 75, pp. 6663–6682, 2019.
- [43] G. Zhang and Q. Liu, «A novel image encryption method based on total shuffling scheme,» *Optics Communications*, vol. 284, pp. 2775–2780, 2011.
- [44] R. Parvaz and M. Zarebnia, «A combination chaotic system and application in color image encryption,» *Optics and Laser Technology*, vol. 101, pp. 30–41, 2018.
- [45] C. Zhu, G. Wang, and K. Sun, «Cryptanalysis and improvement on an image encryption algorithm using a chaos-based S-box,» *Symmetry*, vol. 10, Art. no. 313, 2018.

Facteurs psychosociaux du recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical dans la ville de Moundou au Tchad

[Psychosocial Factors Associated with the Use of Skilled Birth Attendance in Medical Settings in the City of Moundou, Chad]

Ngadandé Madjita¹ and Kamdem Kamgno Helene²

¹Doctorant et chercheur en Sciences de la population, Institut de Formation et de Recherche Démographiques (IFORD), Université de Yaoundé II, Cameroon

²Enseignant chercheur, Université de Yaoundé II, Cameroon

Copyright © 2026 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 **objective** of this study was to identify the psychosocial factors influencing the use of medically assisted childbirth by qualified personnel in the city of Moundou, Chad. Data were collected through targeted surveys conducted in Moundou, involving a sample of 542 women. The analysis was performed using STAT software, version 15. Binary logistic regression within a multivariate framework was used to determine the factors affecting the dependent variable. The use of assisted delivery by qualified personnel in a medical setting in the city of Moundou was influenced by women's perception of their ability to control their behaviour (Unfavourable: OR= 0.25; $p \leq 0.01$), the woman's level of education (secondary and above: OR= 2.34; $p < 0.01$), the woman's age (25 to 34 years: OR= 0.43; $p < 0.05$), marital status (not in a union: OR=0.50; $p < 0.10$), decision-making autonomy (spouse alone: OR = 0.46; $p < 0.05$), ethnicity (Muslim ethnicity: OR=0.19; $p < 0.05$), religion (Muslim: OR=4.87; $p < 0.05$), spouse's age (20 to 29 years old: OR=0.58; $p < 0.10$), the woman's occupation (shopkeeper/civil servant: OR=1.74; $p < 0.05$) and the man's level of education (primary: OR= 0.51; $p < 0.05$). Identifying these factors can help policymakers enhance maternal health strategies and promote equitable access to skilled birth attendance.

KEYWORDS: psychosocial factors, recourse, assisted childbirth, medical environment, Moundou, Chad.

RÉSUMÉ: Objectif: Identifier les facteurs psychosociaux du recours à l'accouchement assisté par le personnel qualifié en milieu médical dans la ville de Moundou au Tchad. Les **données** provenaient des enquêtes spécifiques réalisées dans la ville de Moundou au Tchad, auprès de 542 femmes. Les données ont été analysées avec le logiciel STAT, version 15. La régression logistique binaire dans une approche multivariée a permis d'identifier les facteurs influençant la variable dépendante. Le recours à l'accouchement assisté était influencé par la perception de la femme à contrôler son comportement (Défavorable: OR= 0,25; $p \leq 0,01$), le niveau d'instruction de la femme (Secondaire et plus: OR= 2,34; $p < 0,01$), l'âge de la femme (25 à 34 ans: OR= 0,43; $p < 0,05$), statut matrimoniale (Pas en union: OR=0,50; $p < 0,10$), l'autonomie décisionnelle (Conjoint seul: OR = 0,46; $p < 0,05$), l'ethnie (Ethnie d'obédience Musulmane: OR=0,19; $p < 0,05$), la religion (Musulmane: OR=4,87; $p < 0,05$), l'âge du conjoint (20 à 29ans: OR=0,58; $p < 0,10$), l'occupation de la femme (Commerçantes, fonctionnaires: OR=1,74; $p < 0,05$) et le niveau d'instruction de l'homme (Primaire: OR= 0,51; $p < 0,05$). L'identification de ces facteurs devrait permettre aux décideurs d'améliorer la politique de la santé maternelle.

MOTS-CLEFS: facteurs psychosociaux, recours, accouchement assisté, milieu médical, Moundou, Tchad.

1 INTRODUCTION

L'accouchement sans assistance qualifiée en milieu médical reste un problème de santé publique majeur dans de nombreux pays en développement, y compris au Tchad. La ville de Moundou, deuxième plus grande ville du pays, n'échappe pas à cette réalité. Un accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical est reconnu comme un facteur déterminant pour réduire les risques de complications lors de l'accouchement et, par conséquent, ceux de mortalité maternelle et infantile.

Selon les estimations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'Afrique est le continent où la fréquentation des structures de soins de santé maternelle reste toujours préoccupante par rapport aux autres régions du monde. L'assistance à l'accouchement par un personnel qualifié est de 65% en Afrique contre 99% aux pays à revenu élevé et 78% dans les pays à revenu intermédiaire (OMS, 2022). Selon la même source, seulement 48% des femmes ont effectué au moins 4 visites prénatales au cours de leurs dernières grossesses en Afrique subsaharienne contre 66% en Afrique du Nord, 72% aux Caraïbes et 89% en Amérique latine (OMS, 2022).

Le niveau élevé du rapport de mortalité maternelle constaté dans les pays d'Afrique subsaharienne est lié au faible recours aux services de soins pendant la grossesse et au moment de l'accouchement (Haddad & Fournier, 1993; Gauthier & Ridde, 2017), aux inégalités de sexe dans l'utilisation des services de santé (Adjiwanou & LeGrand, 2014) et aux inégalités d'accès à des services de santé maternelle de qualité (OMS, 2023).

La situation de la santé maternelle au Tchad ne diffère pas du contexte peu favorable en la matière dans d'autres pays d'Afrique subsaharienne. Les décès maternels représentent 45% des décès des femmes âgées de 15-49 ans et le ratio de mortalité maternelle est estimé à 860 décès maternels pour 100 000 naissances vivantes en 2014 (INSEED et al., 2015) contre 491 au Niger en 2015 (INS et al., 2016), 467 au Cameroun en 2018 (INS et al., 2019) et 349 au Congo Brazzaville en 2023 (INS, 2025).

Au Tchad, parmi toutes les femmes ayant effectué une à trois visites prénatales seulement 27% d'entre elles ont accouché dans une formation sanitaire en 2015 avec l'assistance médicale (INSEED et al., 2015). Parmi celles ayant réalisé au moins quatre visites prénatales, seulement 42% ont accouché dans une structure sanitaire (INSEED et al., 2015). L'annuaire statistique de 2020 montre que dans la ville de Moundou, parmi 86,07% des femmes ayant réalisé au moins une consultation prénatale (CPN), seulement 17,46% ont atteint leur quatrième visite, ce qui représente un taux d'abandon de 81,3% (DSIS - TCHAD, 2022). Au Tchad, si la situation de la santé maternelle ne change pas, il est difficile que ce pays se rapproche de sa cible 3 des ODD1 (TCHAD-MSP & ASTEBEF, 2009) et atteigne l'objectif 3 de l'agenda de l'Union Africaine pour l'horizon 2063 (Union Africaine, 2015).

On retrouve dans la littérature plusieurs travaux dans lesquels les facteurs du non recours aux soins de santé maternelle ont été identifiés. Ces travaux mettent notamment en évidence le rôle des facteurs culturels, socioéconomiques et démographiques, mais ils ne se sont pas du tout intéressés aux facteurs psychosociaux qui, pourtant, sont importants dans un contexte où les barrières socioculturelles et économiques du recours aux soins maternels sont abondantes. Les premiers agissent-ils directement sur l'accouchement assisté ou indirectement via les deuxièmes ? C'est à ces questions que cette recherche essaie d'apporter des éléments de réponse.

Les travaux antérieurs montrent que les femmes ayant un faible niveau d'éducation, appartenant à une catégorie sociale défavorisée et vivant dans le milieu rural recourent moins que les autres à l'accouchement assisté en milieu médical (Faye, 2013; Adjiwanou, 2013 et Adjiwanou & LeGrand, 2014). L'éloignement des structures sanitaires, la durée d'attente, le coût des services de soins font aussi partie des raisons évoquées (Fall & Ndoeye, 2007; Faye, 2013; Adjiwanou, 2013 & Bourtel & Coll, 2013) ainsi que la mauvaise organisation et la mauvaise qualité des services (Fall & Ndoeye, 2007 et Nikiéma, 2017). Les facteurs psychosociaux, entre autres, les relations que les femmes entretiennent avec le service d'accouchement assisté par le personnel qualifié, les connaissances qu'elles disposent les comportements qu'elles adoptent envers ce service, et les attitudes négatives des prestataires (Ajzen, 1991; Terrade & al., 2009; Nkurunziza, 2014; Myriane, 2019) n'ont pas été mentionnés. Ces facteurs renseignent sur la manière dont l'individu agit sur le contexte pour améliorer ou pas ses pratiques préventives.

Dans cette recherche, nous essayons de prendre en considération tous ces facteurs pour élucider la structure causale dans laquelle ils interviennent sur le recours à l'accouchement assisté dans la ville de Moundou. Ses objectifs spécifiques sont les suivants: i) rechercher les déterminants de ce phénomène et les hiérarchiser; ii) montrer le rôle que joue les facteurs

psychosociaux dans l'ensemble de ces déterminants; iii) élucider les mécanismes d'action de certains déterminants sur ce phénomène.

L'article est articulé comme suit: i) Brève revue de la littérature et hypothèses; ii) milieu étudié; iii) matériels et méthodes; iv) résultats; v) discussion, conclusion et recommandations.

BRÈVE REVUE DE LA LITTÉRATURE ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Notre synthèse de la littérature sur les approches et modèles théoriques du recours aux soins, nous a permis de constater que l'explication du comportement étudié dans le contexte africain est complexe. Il dépend non seulement des conditions externes (accessibilité des services de santé en termes de distance et de coût, qualité de services de santé, barrières socioculturelles, etc.) mais aussi des conditions internes (représentations, croyances, attitudes, perceptions, intentions, etc.). Ces éléments se retrouvent dans la théorie du comportement planifié (Gabrysch & Campbell, 2009), la théorie des comportements interpersonnels (Triandis, 1970), la théorie de la confirmation ou de la disconfirmation des attentes (Olivier, 1980) et la théorie de la satisfaction d'utilisateurs (Pigneur, 2010). D'où la pertinence d'une approche explicative globale ou systémique du recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical.

Dans un contexte où les conditions de vie des populations sont difficiles, considérer les caractéristiques individuelles et socioculturelles comme déterminant direct du comportement est limité. Il serait pertinent d'inclure les facteurs psychosociaux en rapport avec la demande et l'offre de soins. Ces derniers peuvent notamment médiatiser les effets d'autres variables sur le recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical.

La revue des études empiriques a permis de mettre en évidence les limites suivantes:

Primo: La synthèse de la littérature effectuée a permis de constater qu'il y'a certes des études réalisées sur les déterminants psychosociaux du recours aux soins, mais pas assez dans le domaine de l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical.

Au niveau mondial, la plupart des études antérieures examinées ont mis en évidence les facteurs psychosociaux pour expliquer les comportements des individus dans le domaine de la santé. Il s'agit des études sur l'influence des croyances des femmes infectées par le VIH sur leur intention d'avoir un enfant (Levasseur et al., 1992); de celles sur l'utilisation des condoms chez les adolescents (Joanne et al., 1991), de celles sur l'éducation à la santé (Nache & Trudeau, 2007 ; Giger, 2008) et de celles sur les comportements violents (Rondeau et al., 2006).

Nous avons aussi retrouvé des études ayant aussi inclus l'intention dans leurs modèles explicatifs de la vaccination contre le virus A (H1N1) (Langlois, 2011) et de la participation au dépistage du cancer colorectal (Le Bonniec et al., 2015), et de celles ayant inclus l'anxiété et les événements stressants de la vie pour expliquer l'accouchement avant terme (Epiney et al., 2011). L'isolement social est un autre facteur identifié dans l'ensemble des facteurs explicatifs du renoncement des femmes à l'accouchement assisté par du personnel qualifié (Ancelot et al., 2016). Il en est de même des troubles de l'adaptation à la maternité (symptômes dépressifs postpartum et burnout) en ce qui concerne les soins postnatals (Loyal, 2017).

Dans les études spécifiques aux pays d'Afrique subsaharienne, il a été observé que l'attitude négative du personnel soignant est un obstacle important à l'utilisation des services de soins de santé maternelle (Nkurunziza, 2014); ainsi, la perception positive des services des soins maternels s'est avérée être un déterminant positif de l'utilisation de ces services (Sorgho, 2017 ; Youness et al., 2018). D'autres facteurs sont la perception sociale de l'accouchement (Beninguissé et al., 2004 ; Rwege & Nguemaleu, 2011) et les croyances et les normes sociales entretenues par la communauté (Siaka, 2018).

Dans les études susmentionnées, aucune ne porte sur le Tchad et en plus la plupart d'entre elles ne se sont pas focalisées sur les facteurs psychosociaux de manière rigoureuse, c'est-à-dire dans un modèle théorique montrant bien leur niveau d'intervention et leur mécanisme d'action et en plus en distinguant bien ceux en rapport avec la demande de soins de ceux en rapport avec l'offre de soins. Cette étude comblera ces limites.

Secundo: Dans les études antérieures, les caractéristiques individuelles, économiques et culturelles n'ont pas été considérées dans un modèle théorique où l'on retrouve les caractéristiques psychosociales. L'on a notamment présumé que les premières ont des effets directs sur les comportements de santé et pourtant leurs effets et ceux des caractéristiques psychosociales peuvent être additifs, conjoints ou les deuxièmes peuvent jouer le rôle des variables intermédiaires. Il importe donc d'élucider la structure causale des facteurs du recours à l'accouchement assisté dans le milieu étudié pour mieux orienter les actions d'intervention dans ce domaine.

En plus, dans un milieu où la société exerce une pression importante sur l'individu et où les conditions de vie sont difficiles, il n'est pas pertinent de se focaliser seulement sur les caractéristiques psychosociales. Les individus peuvent bien avoir les perceptions et attitudes positives et ne pas recourir à l'accouchement assisté à cause des facteurs externes comme les pressions sociales, la distance à parcourir et les coûts de transport et services de soins (Adjiwanou, 2013 ; Adjiwanou & LeGrand, 2014). Tout cela témoigne de la complexité de notre problème de recherche et de sa pertinence scientifique.

Tertio: Une autre limite identifiée est relative à l'approche théorique privilégiée dans les études antérieures. Ces dernières se sont basées sur la théorie de l'action raisonnée et/ou du comportement planifié développée par Ajzen et ses collègues. Elles ne sont pas inscrites dans la perspective de la théorie de la représentation sociale, de celle de l'acceptabilité, de celle de la confirmation des attentes et de celle de la satisfaction des utilisateurs ou de la flexibilité qui, pourtant, peuvent bien permettre de comprendre la discontinuité du recours aux soins maternels pendant la grossesse et l'accouchement. Il serait alors davantage pertinent de considérer toutes ces théories pour mieux expliquer le comportement étudié, de s'orienter donc vers une approche systémique d'explication.

Notre étude permet par conséquent d'apporter une contribution à la connaissance de la situation à trois niveaux: le premier apport de cette étude réside dans le mécanisme d'action des facteurs psychosociaux associés au recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical en Afrique subsaharienne et notamment au Tchad. Le deuxième apport est de mesurer l'effet de la qualité des services, du degré de satisfaction et du contexte socioculturel sur le comportement individuel en matière de recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié. Et enfin, le troisième est de démontrer la pertinence des théories focalisées sur le « psychosocial » dans la compréhension du recours ou non à l'assistance à l'accouchement.

Les éléments susmentionnés nous ont permis de définir 6 hypothèses de travail suivantes:

- (H1)** Les croyances subjectives étant des états mentaux basés sur le jugement et l'expérience personnelle, dépourvus de preuves objectives, une perception négative de celle-ci par la femme, ses attitudes positives vis-à-vis de soins et une perception positive de sa capacité à contrôler ses comportements influencent directement et positivement son recours à l'accouchement assisté.
- (H2)** Les effets de ces facteurs peuvent être renforcés par une distance faible à parcourir pour atteindre les centres de santé, un nombre élevé des visites prénatales et des dépenses abordables dans le domaine de la santé.
- (H3)** Les femmes jeunes, mariées, instruites, cadres ou commerçantes et prenant conjointement avec leurs conjoints les décisions dans le domaine de la santé sont les plus enclines au recours à l'accouchement assisté par le professionnel de santé.
- (H4)** Les femmes dont les conjoints sont cadres, employés ou commerçants et vivant dans les ménages de niveau de vie élevé accouchent plus fréquemment que d'autres avec l'assistance d'un professionnel de santé.
- (H5)** L'ethnie, la religion et le degré d'exposition aux médias sont associées à l'accouchement de la femme avec l'assistance médicale. Les ethnies non ou faiblement islamisées, d'obédience religieuse chrétiennes et bien exposées aux médias sont les plus favorisées dans ce domaine.
- (H6)** Les facteurs sociaux agissent sur l'accouchement assisté directement et indirectement vis les facteurs psychosociaux.

MILIEU ÉTUDIÉ

L'étude porte sur la ville de Moundou (chef-lieu du Logone Occidental), situé environ à 500 Km de la Capitale. Elle est se retrouve au Sud-ouest du Tchad, entre deux plans d'eaux à savoir le Lac Taba au Nord et le Lac Wey à l'Ouest. Moundou s'étend sur une superficie de 317 km² avec une densité d'environ 433 habitants au km² (TCHAD-PDC, 2015)). La ville est structurée en 07 Arrondissement (dont 4 fonctionnels) et 204 carrés (TCHAD-PDC², 2015). Elle comptait 137.251 habitants en 2009 (RGPH, 2009) et atteindrait d'ici 2025, 200.000 habitants (INSEED-TCHAD, 2014)³. L'âge moyen de la population de la ville est de 19,2 ans. Soixante pourcent (60%) de la population ont moins de 25 ans et celle de moins de 30 ans représentent 73% (INSEED-TCHAD, 2012). La ville de Moundou dispose d'un (01) seul hôpital⁴ de référence régionale, d'une école de formation sanitaire

² Plan de Développement Communal.

³ Projection démographique du Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2009.

⁴ Hôpital régional de Moundou qui fait aussi office de l'hôpital de district.

publique, 12 cabinets médicaux et 12 centres de santé dont neuf (09) sont privées (DSIS-TCHAD, 2018). Le plateau technique des structures sanitaires de la commune est sous-équipé et vétuste. Ce qui ne permet pas d'offrir des soins de qualité à la population et particulièrement aux femmes enceintes (TCHAD-MSP et *al.*, 2018).

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 DONNÉES

Pour atteindre les objectifs de l'étude, nous avons utilisé les données d'une enquête spécifique à l'accouchement que nous avons réalisée dans la ville de Moundou en octobre 2021. La base de sondage utilisée est issue du dernier RGPH réalisé en 2009. Il s'agit de 125 zones de dénombrement (ZD) de cette opération. La taille moyenne d'une ZD était de 212 ménages en 2009. Un échantillon de 542 femmes de 15-49 ans résidant à Moundou et ayant accouché au cours des 2 dernières années a été constitué de manière aléatoire. A ces femmes, un questionnaire a été administré pour collecter les informations sur l'accouchement assisté, les caractéristiques individuelles des femmes et leurs conjoints ou partenaires, les caractéristiques des ménages, la santé de la reproduction, les informations liées à l'accès et la qualité des services de soins et les caractéristiques psychosociales. A partir de ces données nous avons facilement identifié les facteurs psychosociaux et comportementaux du recours à l'accouchement assisté dans le milieu étudié et montré clairement comment ils agissent.

2.2 VARIABLES D'ANALYSE

2.2.1 VARIABLE DÉPENDANTE

Le recours à l'accouchement assisté par le personnel qualifié en milieu médical est la variable dépendante de l'étude. Elle a été saisie par le lieu d'accouchement et l'assistance par un agent de santé qualifié. Cette variable dépendante a deux modalités 0=non assistés par un personnel qualifié, 1=assistée par un personnel qualifié.

2.2.2 VARIABLES INDÉPENDANTES

Dans l'ensemble des variables indépendantes nous retrouvons les variables socioculturelles suivantes: l'exposition aux médias, l'ethnie et la religion. La première a trois modalités: Faible, *Moyen et forte*, la deuxième en a aussi trois: *Ngambaye, Autres ethnies Sara et Ethnies d'obédience musulmane, la troisième en a deux: Musulmane et Chrétienne.*).

Nous y retrouvons aussi les caractéristiques individuelles de la femme et celles de son conjoint ou partenaire, à savoir l'âge de la femme, son statut matrimonial, son niveau d'instruction, son autonomie décisionnelle, l'âge du conjoint ou partenaire et son niveau d'instruction. L'âge de la femme a trois modalités: *15-24 ans, 25-34 ans et 35 – 49 ans*; celui du conjoint ou partenaire en a aussi trois: *10-29 ans, 30-44 ans et 45ans et plus*". Concernant le niveau d'instruction de la femme, il a été recodé en trois modalités 1) sans niveau, 2) primaire et 3) secondaire ou supérieur. Il en est de même du niveau d'instruction du conjoint ou partenaire. Le statut matrimonial de la femme n'a que deux modalités 1) Pas en union et 2) en union et l'autonomie décisionnelle de la femme a trois modalités 1) seule, 2) *Conjoint/partenaire* et 3) *Ensemble*.

Les variables économiques prises en compte dans l'ensemble des variables indépendantes sont l'occupation de la femme, l'occupation du conjoint ou partenaire et le niveau de vie du ménage. La première a trois modalités: 1) *Inactives*, 2) *Agricultrices/éleveuses/ouvrières/artisanes* et 3) *Commerçantes et fonctionnaire*. La deuxième en a quatre: 1) *Inactifs*, 2) *Agriculteurs/éleveurs/ouvriers/artisans*, 3) *Commerçants* et 4) *fonctionnaires*. Le niveau de vie du ménage, créé à partir des biens possédés par les ménages et du confort de l'habitat, a trois catégories: 1) faible, 2) moyen, 3) élevé.

Nous avons aussi dans l'ensemble des variables indépendante, les variables rendant compte de la façon dont les enquêtées perçoivent l'offre des services; à savoir leurs perceptions de la durée d'attente avant la prise en charge, leurs perceptions de la qualité des soins perçus et leur satisfaction vis-à-vis des soins reçus. La première a comme modalités 1) *Trop longue*, 2) *Acceptable* et 3) *Satisfaisant*. La deuxième a aussi trois modalités *Médiocre, Passable et Meilleure*. Enfin, la dernière en a aussi trois 1) *Pas satisfait*, 2) *Modérément Satisfait* et 3) *Satisfait*.

Enfin, nous retrouvons dans le même ensemble les caractéristiques psychosociales suivantes: les attitudes vis-à-vis des services d'accouchement, qui a deux modalités 1) « *Défavorable* » et 2) « *Favorable* », les normes subjectives, qui en a aussi deux 1) « *Désapprouve* » et 2) « *Approuve* » et la perception de sa capacité à contrôler ses comportemental, qui a aussi deux modalités 1) « *Défavorable* » et 2) « *Favorable* ».

D'autres variables considérées sont le nombre de visites prénatales, qui a deux modalités 1) *Moins de 4 visites* et 2) *Quatre visites et plus*, les dépenses liées aux soins, qui a trois modalités 1) *faibles*, 2) *moyennes* et 3) *élevées* et la distance parcourue entre le domicile et le centre de santé le plus proche: *Moins de 2Km,* et *"2km et Plus"*.

2.2.3 ANALYSES STATISTIQUES

La variable dépendante étant dichotomique et les variables indépendantes étant toutes qualitatives, au niveau descriptif, nous avons utilisé les distributions des fréquences, pour caractériser notre échantillon, et les tableaux croisés accompagnés des tests du chi-deux, pour évaluer le niveau du phénomène étudié et montrer comment il varie selon les catégories sociales considérées dans chacune des variables indépendantes.

Au niveau explicatif, nous avons d'abord examiné les interactions entre les différentes variables indépendantes pour résoudre le problème de multicolinéarité, en créant deux variables d'interaction, à savoir distance parcourue * qualité des soins et temps d'attente * degré de satisfaction. Ensuite, nous avons utilisé le modèle de régression logistique saturé afin d'identifier les déterminants et les inégalités sociales du phénomène étudié. Plusieurs modèles de régression logistique ont été utilisés pour hiérarchiser les déterminants à l'aide de l'écart relatif entre le Xhi-deux final et le Xhi-deux sans la variable indépendante *i* considérée. En plus de tout ça, nous avons utilisé les modèles de régression logistique à pas croissants afin d'élucider les mécanismes d'action de certains déterminants.

En bref, la méthode de régression logistique binaire repose sur le calcul des rapports de côtes par le modèle Logit. Dans ce cas, pour chaque variable indépendante, on détermine la probabilité pour un individu d'une catégorie quelconque de subir l'événement comparativement à celui d'une catégorie de référence. Par exemple, on déterminera la probabilité pour une femme du milieu étudié ayant le niveau primaire d'avoir accouché avec l'assistance d'un professionnel de santé comparativement à une femme sans niveau d'instruction.

3 RÉSULTATS

3.1 CARACTÉRISTIQUES DES ENQUÊTÉES

Le tableau 1 montre que 54,8 % de femmes enquêtées ont accouché avec l'assistance d'un personnel de santé qualifié dans la ville de Moundou. Ces femmes sont pour la plupart âgées de 15-24 ans (48,7 %) ou de 25-34 ans (42,3 %). Leurs conjoints sont pour la plupart âgés de 35-44 ans (60,2 %) ou 45 ans et plus (19,7 %). 23,8 % de femmes enquêtées sont sans niveau d'instruction, 45,6 % sont de niveau primaire d'instruction et 30 % de niveau secondaire ou supérieur. Leurs conjoints sont un peu plus instruits puisque près de deux sur dix individus sont de niveau secondaire ou supérieur.

Dans le milieu étudié, si près de 4 femmes enquêtées sur dix sont inactives, cette proportion est deux fois moins chez leurs conjoints. Ces derniers exercent pour la plupart le commerce (20 %) ou sont fonctionnaires (41 %). Presque la totalité de femmes enquêtées vivaient en union (91 %).

Tableau 1. Répartition des enquêtées selon quelques-unes de leurs caractéristiques sociodémographiques

Variables	Modalités	N	%
Variable dépendante			
Accouchement assisté	Non	245	45,2
	Oui	297	54,8
	Ensemble	542	100,0
Variables indépendantes			
Age de la femme	15-24 ans	264	48,7
	25-34 ans	229	42,3
	35 ans et +	49	9,0

	Ensemble	542	100,0
Âge du conjoint/partenaire	20-34 ans	109	20,11
	35-44 ans	326	60,15
	45 ans et +	107	19,74
	Ensemble	542	100,0
Niveau d'instruction de la femme	Sans niveau	129	23,8
	Primaire	247	45,6
	Secondaire ou +	166	30,6
	Ensemble	542	100,0
Niveau d'instruction du conjoint/partenaire	Sans niveau	125	23,1
	Primaire	140	25,8
	Secondaire ou +	277	51,1
	Ensemble	542	100,0
Activité économique de la femme	Inactives	231	42,6
	Agricultrices/éleveuses/ouvrières/artisanes	96	17,7
	Commerçantes/fonctionnaires	215	39,7
	Ensemble	542	100,0
Activité économique du conjoint/partenaire	Inactifs	106	19,56
	Agriculteurs/éleveurs/ouvriers/artisans	71	13,1
	Commerçants	141	26,01
	Fonctionnaires	224	41,33
	Ensemble	542	100
Statut matrimonial	Hors union	48	8,9
	En union	494	91,1
	Ensemble	542	100,0

La plupart de femmes enquêtées sont d'ethnie Ngambaye ou Sara (74 %), sont chrétiennes (72 %), faiblement ou moyennement exposées aux médias (82 %), vivent dans les ménages de niveau de vie faible (64 %) ou prennent conjointement avec leurs maris/partenaires les décisions dans les domaines de la santé (résultats non présentés). Concernant leurs caractéristiques psychosociales, elles ont pour la plupart des attitudes positives vis-à-vis des services d'accouchement (92 %), des perceptions positives vis-à-vis des croyances subjectives (87 %) et des perceptions positives de leur capacité à contrôler leurs comportements (64 %) (résultats non présentés).

3.2 ASSOCIATION ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES CONSIDÉRÉES ET L'ASSISTANCE À L'ACCOUCHEMENT

Dans le milieu étudié le taux du recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical varie selon l'ethnie (Tableau 2). Les femmes d'autres ethnies du groupe Sara (68,5 %) sont proportionnellement plus nombreuses à recourir à l'accouchement médicalement assisté que les femmes appartenant à des ethnies les plus islamisées (51,5 %), celles Ngambaye (54 %) se retrouvent entre les deux groupes. La religion, quant à elle, n'est pas significativement associée au phénomène étudié. Le taux du recours à l'accouchement assisté augmente significativement avec le degré d'exposition aux médias: il varie de 42,2 % au faible degré d'exposition à 69,2 % au niveau élevé d'exposition.

Dans le milieu étudié, nous observons aussi une association positive et significative entre le niveau d'instruction de la femme et le recours à l'accouchement assisté, mais l'influence de l'instruction de la femme est davantage élevée à partir du niveau secondaire/supérieur (42,6 % chez les sans niveau d'instruction, 48,2 % chez les femmes de niveau primaire et 74,1 % chez celles de niveau secondaire/supérieur).

L'occupation de la femme est aussi associée au phénomène mais au seuil de 10 %: ce sont les femmes agricultrices, éleveuses ou artisanes qui sont moins enclines (50 %) que les femmes inactives (56,3 %) ou commerçantes/fonctionnaires (55,8 %) à recourir à l'accouchement assisté. Conformément à l'attente, les femmes adolescentes ou jeunes (59,9 %), généralement moins expérimentées, sont proportionnellement plus nombreuses à se faire assistées pendant l'accouchement par du personnel qualifié que les femmes plus âgées (44,9 %).

Concernant les caractéristiques du conjoint, la relation entre le niveau d’instruction du conjoint et l’assistance de la femme à l’accouchement est, contrairement à l’attente, non linéaire: le taux d’accouchement assisté est plus élevé chez les femmes dont les conjoints sont sans niveau d’instruction (49,6 %) que chez celles dont les conjoints sont de niveau primaire d’instruction (37,1 %), chez celles dont les conjoints sont de niveau secondaire/supérieur (54,8 %), le taux est plus élevé que dans les deux premières catégories. Les femmes dont les conjoints sont inactifs (64,2 %) ou fonctionnaires (66,1 %) sont les plus concernées par l’assistance à l’accouchement. En revanche, celles d’agriculteurs, éleveurs ou artisans (40,5 %) en sont les moins concernées, celles de commerçants (53,2 %) se retrouvent entre les deux extrêmes.

Toutes les caractéristiques psychosociales, aussi bien au niveau de la demande que de l’offre, sont très significativement associées dans le sens attendu à l’assistance à l’accouchement dans le milieu étudié. Par exemple, le taux d’accouchement assisté est plus élevé chez les femmes ayant des attitudes positives vis-à-vis des services d’accouchement (52,6 %) que chez celles ayant des attitudes négatives (32,6 %). Nous observons la même chose dans le cas de la perception des croyances subjectives (56,5 % vs 43,7 %) ou de la perception de sa capacité à contrôler son comportement (66,5 % versus 33,7 %).

Tableau 2. *Proportion de femmes ayant bénéficié de l’assistance à l’accouchement selon leurs caractéristiques*

Variables et modalités	%	p-value
Variables socioculturelles		
Ethnie		
Ngambaye	54,0	***
Autres Sara	68,5	
D'origine musulmane	51,5	
Religion		
Chrétienne	54,3	ns
Musulmane	55,0	
Degré d'exposition aux médias		
Faible	42,2	***
Moyen	59,1	
Elevé	69,2	
Caractéristiques de la femme		
Niveau d'instruction		
Sans niveau	42,6	***
Primaire	48,2	
Secondaire/supérieur	74,1	
Occupation de la femme		
Inactive	56,3	*
Agricultrice/Éleveures/ouvrière/artisane	50,0	
Commerçante/Fonctionnaire	55,8	
Age de la femme		
15-24	59,9	***
25-34	51,1	
35-49	44,9	
Statut matrimonial		
En union	55,7	ns
Non en union	45,8	
Caractéristiques du conjoint		
Niveau d'instruction		
Sans niveau	49,6	**
Primaire	37,1	
Secondaire/supérieur	54,8	
Occupation du conjoint		
Inactif	64,2	***
Agriculteur/Éleveur/ouvrier/artisan	40,5	
Commerçant	53,2	
Fonctionnaire	66,1	

Age du conjoint		
20-29	52,3	
30-44	58,9	**
45+	44,9	
Caractéristique du ménage		
Niveau de vie du ménage		
Faible	60,3	
Moyen	62,4	*
Elevé	51,0	
Caractéristiques psychosociales		
Attitude vis-à-vis des services d'accouchement		
Défavorable	32,6	***
Favorable	56,7	
Perception croyances subjectives		
Désapprouve	43,7	***
Approuve	56,5	
Perception de sa capacité à contrôler son comportement		
Défavorable	33,7	***
Favorable	66,5	
Caractéristiques de l'offre		
Durée d'attente		
Trop long	30,9	
Acceptable	66,1	**
Satisfaisant	64,8	
Qualité de soins reçus		
Médiocre	33,3	
Passable	52,2	**
Meilleure	57,6	
Degré de satisfaction		
Pas satisfait	11,8	
Modérément satisfait	68,0	***
Satisfait	34,4	

Notes: Ns: non significatif; * $p \leq 0,10$; ** $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,01$

3.3 ANALYSES MULTIVARIÉES

3.3.1 DÉTERMINANTS ET LEUR HIÉRARCHISATION

Nous constatons, en examinant les résultats issus du modèle saturé que, toutes choses égales par ailleurs, les variables influençant le recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical sont l'ethnie, la religion, le niveau d'instruction de la femme et celui du conjoint, l'activité de la femme, la prise des décisions, l'âge de la femme, celui du conjoint, le statut matrimonial, la perception du temps d'attente dans les formations sanitaires, le degré de satisfaction vis-à-vis des soins, la perception de la qualité des services, la perception de sa capacité à contrôler ses comportements et l'interaction entre distance parcourue et qualité des soins.

La perception de sa capacité à contrôler ses comportements se retrouve au premier rang dans la hiérarchie des déterminants. Elle explique seule 31,22 % de la variation du comportement étudié. Elle est suivie dans l'ordre par le niveau d'instruction de la femme (9,92 %), l'âge de la femme (9,63 %), la prise des décisions (7,82 %) et l'ethnie de la femme (6,07 %). Au total, ces 5 variables expliquent 65 % de la variation du comportement étudié. C'est à elles qu'il faudrait donc accorder la priorité dans le milieu étudié.

Tableau 3. Résultats issus du modèle saturé ou complet de régression logistique sur le recours à l'accouchement assisté par du personnel qualifié en milieu médical

Variables et modalités	N	%	Effets bruts	Effets nets
Ethnie				
Ngambaye	352	64,94	1,00	1,00
Autre Sara	54	9,96	1,86**	1,02
Autre d'origine musulmane	136	25,09	0,90 ns	0,19**
Religion				
Chrétienne	389	71,77	1,00	1,00
Musulmane	153	28,23	0,97 ns	4,87**
Exposition aux médias				
Faible	192	35,42	0,51***	0,80 ns
Moyenne	259	47,79	1,00	1,00
Forte	91	16,79	1,56*	1,01 ns
Niveau d'instruction du conjoint/partenaire				
Sans niveau	125	23,06	0,51***	0,86 ns
Primaire	140	25,83	0,30***	0,51 **
Secondaire/Supérieur	277	51,11	1,00	1,00
Activité du conjoint/partenaire				
Inactif	106	19,56	1,90***	0,70 ns
Agriculteur/Éleveur	233	42,99	1,00	1,00
Commerçant	141	26,01	1,21 ns	1,01 ns
Fonctionnaire	62	11,44	2,07 **	0,56 ns
Niveau de vie				
Faible	78	14,39	1,46 ns	0,87 ns
Moyen	112	21,59	1,59**	0,58 ns
Élevé	347	64,02	1,00	1,00
Age du conjoint				
20-29	109	20,11	0,77 ns	0,58 *
30-44	326	60,15	1,00	1,00
45+	107	19,74	0,57**	0,58 ns
Niveau d'instruction de la femme				
Sans niveau	129	23,80	0,80 ns	0,79 ns
Primaire	247	45,57	1,00	1,00
Secondaire/Supérieur	166	30,63	3,08 ***	2,34 ***
Activité économique de la femme				
Inactive	231	42,62	1,00	1,00
Agricultrice/Éleveuse/Artisane	96	17,71	0,75 ns	1,13 ns
Commerçante/Fonctionnaire	215	39,67	0,98 ns	1,74 **
Age de la femme				
15-24	264	48,71	1,00	1,00
25-34	229	42,25	0,70**	0,43 **
35+	49	9,04	0,55**	0,61 ns
Situation matrimoniale				
Pas en union	48	8,86	0,67 ns	0,50*
En union	494	91,14	1,00	1,00
Prise des décisions				
Femme seul	120	22,14	0,69*	0,68 ns
Conjoint seul	97	17,90	0,60**	0,46 **
Les deux	325	59,96	1,00	1,00
Durée d'attente avant la prise en charge dans les formations sanitaires				

Longue	165	30,44	0,24***	0,19***
Acceptable	124	22,88	1,06 ns	1,67*
Satisfaisant	253	46,68	1,00	1,00
Qualité des soins reçus				
Médiocre	42	7,75	0,37 ***	2,98**
Passable	92	16,97	0,80 ns	0,89 ns
Meilleure	408	75,28	1,00	1,00
Degré de satisfaction vis-à-vis des soins reçus				
Pas satisfait	76	14,02	0,09***	0,15 ***
Modérément satisfait	75	13,84	1,38 ns	2,90 *
Satisfait	391	72,14	1,00	1,00
Perception des croyances subjectives				
Désapprouve	71	13,10	0,60**	0,79 ns
Approuve	471	86,90	1,00	1,00
Attitudes vis-à-vis du recours à l'accouchement assisté				
Favorable	499	92,07	1,00	1,00
Défavorable	43	7,93	0,37***	1,10 ns
Perception de sa capacité à contrôler son comportement				
Favorable	349	64,39	1,00	1,00
Défavorable	193	35,61	0,26***	0,25***
Distance entre le domicile et la formation sanitaire la plus proche				
Moins de 2 Km	464	85,61	1,00	1,00
2 Km et plus	78	14,39	1,47 ns	1,92 ns
Nombre de visites prénatales				
Moins de 4 visites	242	44,65	0,49*	0,86 ns
Au moins 4 visites	300	55,35	1,00	1,00
Dépenses dans le domaine de soins de santé				
Faible	345	63,65	1,00	1,00
Moyenne	109	20,11	2,07***	1,11 ns
Elevée	88	16,24	2,06***	1,37 ns
Temps d'attente * Degré de satisfaction				
Longue*Pas satisfaite	53	9,78	0,05 ***	0,05***
Longue*Moyennement satisfaite	16	2,95	0,55 ns	0,90 ns
Longue*Satisfaite	96	17,71	0,36 ***	0,19 ***
Acceptable * Pas satisfaite	14	2,58	0,22 **	0,25 **
Acceptable * Moyennement satisfaite	27	4,98	0,80 ns	1,07 ns
Acceptable * Satisfaite	83	15,31	1,62 *	1,67 ns
Satisfaite*Moyennement satisfaite	32	5,90	2,96**	2,90
Satisfaite * Satisfaite	212	39,11	1,00	1,00
Distance parcourue * Qualité de soins				
Moins de 2Km * Pas Satisfaite	69	12,73	0,08***	0,23***
Moins de 2Km * Moyennement Satisfaite	70	12,92	1,62 *	1,70 ns
Moins de 2km*Satisfaire	325	53,96	1,00	1,00
Plus de 2 Km * Satisfaite	66	12,18	1,68	1,29 ns
Xhi-deux	-	-	-	
N	542	100	542	542
Xhi-deux	-	-	-	126,11***
Pseudo R carré				0,28

Notes: Ns: non significatif; * $p \leq 0,10$; ** $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,01$

Tableau 4. Hiérarchisation des facteurs selon leur pouvoir explicatif

Variabiles (1)	XHI-DEUX FINAL (2)	XHI-DEUX SANS LA VARIABLE (3)	Ci= [1) – 2)]/(1) (4)	Fi (5)	Rang (6)
Ethnie	214,66	209,34	5,32	6,07	5
Religion	214,66	209,97	4,69	5,35	7
Exposition aux médias	214,66	213,99	0,67	0,76	
Niveau d’instruction du conjoint/Partenaire	214,66	210,28	4,38	5,00	9
Activité économique du conjoint/Partenaire	214,66	212,01	2,65	3,02	
Niveau de vie	214,66	213,49	1,17	1,34	
Age du conjoint/Partenaire	214,66	209,67	4,99	5,69	6
Niveau d’instruction de la femme	214,66	205,97	8,69	9,92	2
Activité économique de la femme	214,66	210,08	4,58	5,23	8
Age de la femme	214,66	206,22	8,44	9,63	3
Statut matrimonial	214,66	211,60	3,06	3,49	
Prise de décision	214,66	207,81	6,85	7,82	4
Perception de sa capacité à contrôler son comportement	214,66	187,30	27,36	31,22	1
CPN	214,66	214,26	0,4	0,46	
Dépenses en soins	214,66	213,89	0,77	0,88	
Temps d’attente * Degré de satisfaction	214,66	213,95	0,71	0,81	
Distance parcourue * Qualité de soins	214,66	2011,75	2,91	3,32	
TOTAL	-	-	87,64	100,00	

Notes: Ns: non significatif; * $p \leq 0,10$; ** $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,01$

3.3.2 INÉGALITÉS SOCIALES

Nous nous focalisons ici sur les déterminants les plus importants susmentionnés. Rappelons qu’il s’agit de la perception de sa capacité à contrôler ses comportements, du niveau d’instruction de la femme, de l’âge de la femme, de la prise des décisions et de l’ethnie de la femme.

Toutes choses égales par ailleurs, les femmes appartenant aux ethnies d’origine musulmane ont moins de chance de bénéficier de l’assistance d’un personnel qualifié que celles Ngambaye (OR=0,19). De même, nous constatons que les femmes de niveau secondaire ou supérieur ont plus de chance que celles de niveau primaire d’en bénéficier (OR=2,34). S’agissant de l’âge de la femme, par rapport aux femmes adolescentes ou jeunes, celles âgées de 25-34 ans ont moins de chance de faire un recours à l’accouchement assisté (OR=0,43). Conformément à l’attente, les femmes dont les conjoints prennent seuls les décisions dans le domaine de la santé ont moins de chance d’avoir un recours au personnel de santé qualifié pendant l’accouchement que celles qui prennent conjointement avec leurs maris/partenaires ces décisions (OR=0,46). Enfin, les femmes ayant une perception négative de leur capacité à contrôler leur comportement ont moins de chance que d’autres de bénéficier de l’assistance à l’accouchement (OR=0,25).

Dans cette section, nous allons vérifier les relations suivantes afin d’élucider les mécanismes d’action de certains facteurs considérés:

1. L’ethnie et la religion agissent via l’exposition aux médias;
2. Les trois variables socioculturelles susmentionnées influencent le comportement étudié via les caractéristiques socioéconomiques de l’homme et de la femme;
3. Les caractéristiques socioéconomiques de l’homme influencent le comportement étudié via celles de la femme;
4. La prise de décision médiatise l’effet des caractéristiques socioéconomiques de la femme;
5. Les caractéristiques socioculturelles et socioéconomiques influencent l’assistance médicale à l’accouchement via les caractéristiques relatives à l’offre de services et celles psychosociales.

Les résultats présentés dans le tableau 5 montrent, en passant de sa colonne M1 à sa colonne M2, que le contrôle des effets de l’ethnie et de la religion par l’exposition aux médias a fait disparaître la signification de la différence observée entre les Ngambaye et d’autres ethnies Sara. L’effet de l’ethnie passe donc par celui de l’exposition aux médias. En d’autres termes,

les autres ethnies Sara étaient plus enclines à l'accouchement assisté parce qu'elles sont plus exposées aux informations sur les bonnes pratiques en matière de santé transmises à la télévision et d'autres médias. La première relation sus-présentée va donc partiellement dans le sens attendu.

En ce qui concerne l'effet médiateur des caractéristiques socioéconomiques de l'homme, les résultats obtenus le confortent juste un peu (Modèles M1, M2 et M3). En effet, le contrôle de ces dernières a réduit la signification de l'influence de l'exposition aux médias et n'a pas eu d'effet sur d'autres caractéristiques socioculturelles. En plus, nous avons constaté que leurs influences sont toutes non significatives.

S'agissant des caractéristiques socioéconomiques de la femme, elle a fait disparaître la signification de l'exposition aux médias et a fait apparaître la différence négative de la chance d'accouchement assisté entre les femmes dont les conjoints sont de niveau primaire et celles dont les conjoints sont de niveau secondaire ou supérieur (Modèles M2, M3 et M4). Les caractéristiques socioéconomiques de la femme agissent donc partiellement comme médiatrices des effets des caractéristiques socioculturelles et partiellement comme variable inhibitrice de l'instruction de l'homme. L'aisance socioéconomique de la femme renforce donc l'effet positif du niveau élevé d'instruction de l'homme sur l'accouchement médicalement assisté.

Les résultats obtenus montrent aussi que la prise des décisions n'agit pas comme médiatrice des effets des caractéristiques socioéconomiques de la femme (Modèles M4 et M5). Par rapport aux caractéristiques relatives à l'offre des services et celles psychosociales, nous avons constaté que leur prise en compte renforce plutôt les effets des caractéristiques socioculturelles, à savoir l'ethnie et la religion, de l'âge du conjoint, de l'activité économique de la femme et de sa situation matrimoniale (M4, M5, M6, M7 et M8). Ce n'est que dans le cas de la prise des décisions qu'elles ont agi comme variables intermédiaires (M4, M5, M6, M7 et M8).

Tableau 5. *Résultats issus des modèles multivariés de régression logistique à pas croissants sur l'assistance à l'accouchement par du personnel de santé qualifié*

Variables et modalités	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Ethnie								
Ngambaye	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Autre Sara	1,83 *	1,52 ns	1,27 ns	1,28 ns	1,28 ns	1,13 ns	1,09 ns	1,02 ns
Autre d'origine musulmane	0,45 ns	0,41 ns	0,42 ns	0,60 ns	0,54 ns	0,18 **	0,17 **	0,19 **
Religion								
Chrétienne	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Musulmane	2,11 ns	2,01 ns	1,73 ns	1,81 ns	2,14 ns	7,83 **	6,86 **	4,87 **
Exposition aux médias								
Faible		0,50***	0,65 **	0,76 ns	0,79 ns	0,82 ns	0,86 ns	0,80 ns

Moyenne		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Forte		1,53 ns	1,32 ns	1,16 ns	1,19 ns	0,77 ns	0,77 ns	1,01 ns
Niveau d'instruction du conjoint/partenaire								
Sans niveau			0,68 ns	0,72 ns	0,73 ns	0,82 ns	0,87 ns	0,86 ns
Primaire			0,79 ns	0,50 ***	0,49***	0,45 ***	0,46 ***	0,51**
Secondaire/Supérieur			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Activité du conjoint/partenaire								
Inactif			1,08 ns	1,04 ns	1,05 ns	0,70 ns	0,68 ns	0,70 ns
Agriculteur/Eleveur			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Commerçant			1,03 ns	1,08 ns	1,07 ns	1,05 ns	1,01 ns	1,01 ns
Fonctionnaire			1,07 ns	1,06 ns	1,05 ns	0,70 ns	0,68 ns	0,57 ns
Niveau de vie								
Faible			1,25 ns	1,19 ns	1,19 ns	1,14 ns	1,08 ns	0,87 ns
Moyen			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Elevé			1,31 ns	1,28 ns	1,34 ns	1,55 ns	1,52 ns	1,30 ns
Age du conjoint								
20-29 ans	0,62*	0,66 ns	0,67 ns	0,68 ns	0,69 ns	0,67 ns	0,66 ns	0,58 *
30-44 ans	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
45 ans et +	0,70 ns	0,75 ns	0,71 ns	0,66 ns	0,66 ns	0,56 *	0,59 *	0,58 ns
Niveau d'instruction de la femme								
Sans niveau				0,82 ns	0,90 ns	0,80 ns	0,79 ns	0,79 ns
Primaire				1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Secondaire/Supérieur				2,08 ***	2,21 ***	3,03***	2,80 ***	2,34 ***
Occupation de la femme								
Inactive				1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Agricultrice/Eleveuse/Artisane				1,09 ns	1,11 ns	1,19 ns	1,17 ns	1,13 ns
Commerçante/Fonctionnaire				1,35 ns	1,32 ns	1,65 **	1,65 **	1,74 **
Age de la femme								
15-24 ans	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
25-34 ans	0,63**	0,64*	0,61 **	0,64 *	0,62 *	0,48 **	0,48**	0,43 ***
35 ans et Plus	0,63 ns	0,54 ns	0,56 ns	0,63 ns	0,59 ns	0,64 ns	0,62 ns	0,61 ns
Statut matrimonial								
Pas en union	0,79 ns	0,71 ns	0,69 ns	0,63 ns	0,65 ns	0,49 *	0,45 **	0,50 *
En union	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Prise des décisions								
Femme seul					0,61 **	0,80 ns	0,80 ns	0,68 ns
Conjoint seul					0,52 ***	0,54**	0,55 **	0,46 **
Les deux					1,00	1,00	1,00	1,00
Durée d'attente avant la prise en charge dans les formations sanitaires								
Longue						0,24 ***	0,23 ***	0,19***
Acceptable						1,50 ns	1,53 ns	1,67 ns
Satisfaisant						1,00	1,00	1,00
Qualité des soins reçus								
Médiocre						1,52 ns	1,78 ns	2,98 *
Passable						0,93 ns	0,92 ns	0,89 ns
Meilleure						1,00	1,00	1,00
Degré de satisfaction vis-à-vis des soins reçus								
Pas satisfait						0,13 ***	0,14 ***	0,15 ***
Modérément satisfait						2,14 ns	2,21 ns	2,90 ns

Satisfait						1,00	1,00	1,00
Perception des croyances subjectives								
Désapprouve								0,79 ns
Approuve								1,00
Attitudes vis-à-vis du recours à l'accouchement assisté								
Favorable								1,00
Défavorable								1,10 ns
Perception de sa capacité à contrôler son comportement								
Favorable								1,00
Défavorable								0,25***
Distance entre le domicile et la formation sanitaire la plus proche								
Moins de 2 Km						1,00	1,00	1,00
2 Km et plus						2,36 **	2,18 *	1,92 ns
Nombre de visites prénatales								
Moins de 4 visites							1,00	1,00
Au moins 4 visites							0,72 ns	0,86 ns
Dépenses liées aux soins de santé								
Faible							1,00	1,00
Moyenne							1,29 ns	1,11 ns
Elevée							1,36 ns	1,37 ns
Durée d'attente * Degré de satisfaction								
Longue*Pas satisfaite						0,05 ***	0,03 ***	0,08 ***
Longue*Moyennement satisfaite						0,90 ns	0,87 ns	0,85 ns
Longue*Satisfaite						0,19 ***	0,17 ***	0,15 ***
Acceptable * Pas satisfaite						0,25 **	0,20 **	0,18 **
Acceptable * moyen nement satisfaite						1,07 ns	1,05 ns	1,05 ns
Acceptable * Satisfaite						1,67 ns	1,62 ns	1,60 ns
Satisfaite*Moyennement satisfaite						2,90**	2,75**	2,70**
Satisfaite * Satisfaite						1,00	1,00	1,00
Distance parcourue * Qualité de soins								
Moins de 2Km * Médiocre						0,23 ***	0,21 ***	0,20 ***
Moins de 2Km * Passable						1,70 ns	1,66 ns	1,64 ns
Moins de 2km*Meilleure						1,00	1,00	1,00
Plus de 2 Km * Meilleure						1,29 ns	1,22ns	1,20ns
N	542	542	542	542	542	532	532	532
Xhi-deux	10,01**	36,36***	54,12 ***	63,88 ***	72,84 ***	127,74 ***	129,57***	131,79***
Pseudo R carré	0,03	0,05	0,08	0,10	0,11	0,25	0,26	0,29

Notes: Ns: non significatif; * $p \leq 0,10$; ** $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,01$

4 DISCUSSION

Les données de notre enquête ont révélé que 54,8% des femmes enquêtées dans la ville de Moundou ont accouché avec l'assistance d'un personnel qualifié. Etant donné qu'à l'enquête MICS de 2019, le taux d'accouchement assisté était estimé à 63,8% dans la région de Logone Occidentale et que nous savons que la ville de Moundou est son chef-lieu, nous pouvons dire que le niveau de cet indicateur a été sous-estimé dans notre enquête (INSEED & UNICEF, 2020). Ceci n'a cependant pas eu d'impact sur notre recherche des différentiels et déterminants du phénomène étudié et, ce, surtout que les données qualitatives ont conforté les résultats obtenus.

Les déterminants les plus importants identifiés sont dans l'ordre: la perception de sa capacité à contrôler son comportement, le niveau d'instruction de la femme, l'âge de la femme, la prise des décisions, l'ethnie, la religion, l'âge du conjoint, l'activité de la femme et le niveau d'instruction du conjoint. Nous avons constaté que ces variables expliquent environ 80% de la variation du comportement étudié.

Les résultats relatifs à l'ethnie et la religion confortent l'idée selon laquelle il existe des barrières socioculturelles importantes à l'accouchement médicalement assisté au Tchad, dans la ville de Moundou en particulier. Les femmes d'ethnies musulmanes se distinguent des autres par un recours moins fréquent à l'accouchement assisté parce qu'elles sont plus favorables aux inégalités de genre. Les données qualitatives ont notamment révélé que les femmes musulmanes ont une perception négative des prestataires de sexe masculin et des prestataires de sexe féminin plus jeunes qu'elles. Elles estiment notamment, en se référant à leur religion, qu'elles ne peuvent pas être vues nues par ces derniers. Par ailleurs, comme le souligne Akoto (1993), les missionnaires, pour la plupart des chrétiens, encourageaient les femmes à fréquenter les structures modernes de santé (Akoto Eliwo, 1993). Les travaux de Beninguissé et al. (2004) et Rwenge (2007) ont aussi bien montré le rôle clé de l'ethnie dans la différenciation du recours aux soins à l'accouchement dans d'autres contextes (Beninguissé et al., 2004; Rwenge, 2007).

L'existence des barrières socioculturelles fait que les femmes qui les surmontent facilement sont plus enclines à accoucher avec l'assistance médicale que d'autres. Ce qui justifie les effets déterminants de la perception de sa capacité à contrôler son comportement, de l'instruction et de la prise des décisions. Les femmes ayant une opinion positive vis-à-vis de leur capacité à adopter des comportements autres que ceux valorisés par la tradition ont plus de chance d'accoucher avec l'aide des prestataires qualifiés. Ce résultat est novateur puisque la capacité de sa capacité à contrôler son comportement n'a pas été prise en compte dans d'autres travaux sur le sujet. Il conforte plutôt les résultats issus des recherches sur l'utilisation des préservatifs, en particulier ceux de Bandura (1986) et Babalola et Quénium-Renaud (2002) (Bandura, 1986; Babalola, & Quénium-Renaud, 2002). Ainsi, la manière dont l'individu s'auto-estime, évidemment en comparant ses attitudes, sentiments et comportements à ceux des autres, détermine son engagement dans les pratiques sociales à risque. En ce qui concerne l'instruction de la femme, sa relation positive avec l'accouchement médicalement assisté est justifiée par le fait qu'elle permet à l'individu d'être en contact avec les nouvelles idées, dites modernes, et, partant, de remettre en question les traditions qu'il a intériorisées dans l'enfance. Siaka (2018) et Nadjihoroum (2007) ont aussi abouti au résultat observé dans le cas de l'instruction de la femme, respectivement au Mali et au Tchad (Nadjihoroum Ndigadet, 2007; Siaka, 2018). Nous avons de même observé que l'instruction du conjoint est associée positivement à l'accouchement médicalement assisté mais seulement à son niveau le plus élevé. Les femmes dont les conjoints sont de niveau primaire d'instruction se sont avérées être moins enclines à ce comportement que celles dont les conjoints sont sans niveau d'instruction. Ce résultat est justifié par l'interaction entre l'homme et son épouse: les bonnes pratiques en matière de santé peuvent donc aussi être transmises à la femme via son conjoint, mais c'est au plus haut niveau d'instruction de ce dernier qu'il en a davantage connaissance. Le résultat obtenu ici est en contradiction avec celui de Kamiya (2011), où l'instruction du conjoint a été non significativement associée à tous les comportements de santé maternelle (Kamiya, 2011). Toutefois, nous avons bien remarqué, comme Gabrysch and Campbell (2009), que le rôle de l'instruction du conjoint dans le recours à l'accouchement assisté est, dans le milieu étudié, moins prépondérant que celui de l'instruction de la femme.

L'effet positif sur l'accouchement assisté du fait que la femme travaille comme commerçante ou fonctionnaire est justifié par ce que permettent ces activités dans la liberté de la femme de disposer de ses revenus et, partant, de pouvoir prendre en charge les dépenses relatives à son accouchement. Et, dans le milieu étudié, nous avons remarqué que c'est l'occupation d'une activité par la femme qui lui permet vraiment de faire face aux coûts de recours aux services dans le milieu étudié, puisque celle du conjoint ainsi que le niveau de vie n'ont pas eu d'effets significatifs sur le comportement étudié. Ces résultats confortent ceux de Miles-Doan et Brewster (1998) dans le cas de l'activité de la femme (Miles-Doan, & Brewster, 1998) et contredit ceux de Beninguissé (2004) dans le cas de l'activité du conjoint et du niveau de vie (Beninguissé et al., 2004).

Contrairement à ce que Blanc (2001), Norman and Conner (2005) et Ahmed et al. (2010) ont observé dans d'autres contextes, à savoir l'autonomie décisionnelle de la femme influence positivement son recours à l'accouchement assisté (Ahmed et al., 2010; Blanc, 2001; Normand & Ducharme, 2003), dans la ville de Moundou, où la plupart des sociétés sont patriarcales, donc favorables aux inégalités de genre, c'est la prise conjointe des décisions qui a été positivement associée à ce comportement.

Enfin, le Tchad étant un pays où la fécondité est très élevée et la contraception très faiblement utilisée, les femmes âgées de 25-34 ans ont été moins enclines à l'accouchement médicalement assisté que celles de 15-24 ans. Ce résultat traduit certainement l'effet de l'expérience en maternité: les premières ont notamment eu un grand nombre d'enfants, alors que les dernières sont en début de leur cycle de vie féconde.

5 CONCLUSION

En conclusion, les résultats de l'étude montrent l'intérêt d'améliorer la demande et l'offre de soins maternels pour augmenter le taux d'accouchement assisté par un professionnel de santé qualifié dans la ville de Moundou. Enlever les barrières socioculturelles par la sensibilisation et l'éducation des leaders traditionnels et religieux et des individus, améliorer la qualité des services de santé maternelle à tous les niveaux et rendre de plus en plus effectif la gratuité des soins à l'accouchement sont les actions qui devraient être renforcées au Tchad par le Gouvernement de ce pays et ses partenaires pour réduire le taux d'accouchements à domiciles et, partant, la mortalité maternelle.

REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer nos sentiments de gratitude aux femmes qui ont accepté de participer à cette enquête, aux autorités de la Commune de la ville de Moundou et la Délégation Provinciale du Logone Occidental pour l'appui nous apporté au cours de l'enquête. Mes remerciements vont aussi à Madame le professeur KAMDEM KAMGNO Hélène ainsi qu'à l'Institut de Formation et de Recherche Démographiques (IFORD) qui m'ont facilité la réalisation de ces travaux, sans lesquels, cette recherche n'aurait pu aboutir.

REFERENCES

- [1] Adjiwanou, V. (2013). Contexte de genre, autonomie des femmes et utilisation des services de santé maternelle en milieu rural africain : Analyse par modèles d'équations structurelles [Thèse présentée à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (PhD) en Démographie]. Université de Montréal, Département de Démographie Faculté des Arts et des Sciences.
- [2] Adjiwanou, V., & LeGrand, T. (2014a). Inégalité des sexes et utilisation des services de santé maternelle dans la zone rurale d'Afrique subsaharienne. *Santé et Lieu de vie*, 65-87.
- [3] Adjiwanou, V., & LeGrand, T. (2014b). Inégalité des sexes et utilisation des services de santé maternelle dans la zone rurale d'Afrique subsaharienne. *Santé et Lieu de vie*, 23.
- [4] Ahmed, S., Creanga, A. A., Gillespie, D. G., & Tsui, A. O. (2010). Economic status, education and empowerment : Implications for maternal health service utilization in developing countries. (*Public Library of Science (PloS)*), Vol. 5, p. 1-11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011190>.
- [5] Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human, Decision Processes*, 50 (2), Article 2.
- [6] Akoto Eliwo, M. (1993). Déterminants socio-culturels de la mortalité des enfants en Afrique Noire. Hypothèses et recherche d'explication. Louvain- La- Neuve, Académia, 269.
- [7] Ancelot, L., Bonnal, L., & Depret, M.-H. (2016). Déterminants du renoncement aux soins des femmes durant leur grossesse. *Revue française d'économie* 4, 31 (4), 63-107.
- [8] Babalola, S., & Quenum-Renaud, B. (2002). Influence of media messages on sexual and reproductive health behaviour in Côte d'Ivoire. *African Journal of Reproductive Health*, 19-33.
- [9] Bandura, A. (1986). *Social foundations of thought and action: A social cognitive theory*. (Englewood Cliffs). NJ: Prentice-Hall.
- [10] Beninguissé, G., Nikiéma, B., Fournier, P., & Haddad, S. (2004). L'accessibilité culturelle : Une exigence de la qualité des services et soins obstétricaux en Afrique. *Études de la Population Africaine*, 19, 243-266.
- [11] Blanc, A. (2001). The effect of power in sexual relationships on sexual and reproductive health: An examination of the evidence. *Studies in Family Planning*, 3 (32), 189-213.
- [12] Bourtel, K., & Coll. (2013). La santé des femmes au Tchad, entre urgence et développement. *Savoirs Communs*, 104.
- [13] DSIS - TCHAD. (2022). *Annuaire des Statistiques Sanitaires 2020 (Tome A, 34ème Edition; p. 252)*. Ministère de la Santé Publique.
- [14] DSIS-TCHAD. (2018). *Annuaire statistique sanitaire du 19ème au 32ème éditions [Rapport final]*. Ministère de la Santé Publique.
- [15] Epiney, M., Boulvain, M., & Irion, O. (2011). Facteurs de risque psychosociaux et accouchement avant terme. *Rev Med Suisse*, 7, 2066-2069.
- [16] Fall, A. S., & Ndoeye, T. (2007). La demande de soins et l'accès aux services de santé dans les régions centrales du Sénégal. In *Le Sénégal Face aux Défis de la Pauvreté*. Paris : Consortium pour la Recherche économique et sociale, Karthala (p. 109-127). Centre de Recherches sur les Politiques sociales.

- [17] Faye, S. (2013). Amélioration de la santé maternelle et néonatale au Tchad : Etude socio-anthropologique au Sahel (p. 37) [Rapport enquête qualitative]. Ministère de la santé publique.
- [18] Gabrysch, S., & Campbell, O. M. (2009). Still too far to walk : Literature review of the determinants of delivery service use. *BMC Pregnancy Childbirth*, 9 (34), 37.
- [19] Gauthier, L., & Ridde, V. (2017). Les politiques visant la couverture sanitaire universelle et les perceptions de la qualité des soins de santé. Risquer la mort pour donner la vie. Politiques et programmes de santé maternelle et infantile en Afrique, 978 (2), 93.
- [20] Giger, J. C. (2008). Examen critique du caractère prédictif, causal et falsifiable de deux théories de la relation attitude-comportement : La théorie de l'action raisonnée et la théorie du comportement planifié. *L'année psychologique*, 108 (1), 107-131.
- [21] Haddad, S., & Fournier, P. (1993). Initiative de Bamako, systèmes de paiement et utilisation du médicament position du problème, aspects conceptuels et méthodologiques pour une recherche multicentrique [Rapport de recherche soumis au Programme des Médicaments Essentiels de l'OMS].
- [22] INS. (2025). Troisième Enquête Démographique et de Santé au Congo. INS-Congo. <https://ins-congo.cg>.
- [23] INS, Ministère de la Santé Publique, & ICF International. (2016). Enquête Démographique et de Santé et à Indicateurs Multiples (EDS-MICS 2014-2015). Rockville, Maryland, USA : INSEED, MSP et ICF International.
- [24] INS, Ministère de la Santé Publique, & ICF International. (2019). Enquête Démographique et de Santé du Cameroun 2018 – Indicateurs clés. INS et ICF. <https://ins-cameroun.cm>.
- [25] INSEED, ICF, & UNICEF. (2015). Enquête Démographique et de Santé et à Indicateur Multiples (EDS-MICS) du Tchad 2014-2015 (p. 623) [Rapport final]. Ministère de l'Economie, du Plan et de de la Coopération.
- [26] INSEED, & UNICEF. (2020). Enquête par grappes à indicateurs multiples (MICS) -Tchad, 2019 (p. 813) [Rapport final]. Ministère de l'Economie, du Plan et de de la Coopération.
- [27] INSEED-TCHAD. (2012). Deuxième recensement Général de la population et de l'Habitat de 2009 (Principaux indicateurs globaux issus de l'analyse thématique, p. 93) [Rapport de synthèse]. Ministère de l'Economie, du Plan et de de la Coopération.
- [28] INSEED-TCHAD. (2014). Deuxième recensement General de la population et de l'habitat, 2009 (Rapport final: Projections Démographiques Régionales, Tome 2: Niveau régional, p. 90). Ministère de l'Economie, du Plan et de de la Coopération.
- [29] Joanne, O., Gaston, G., & Robert, P. (1991). Étude des déterminants psychosociaux de l'utilisation du condom chez les adolescents et adolescentes de cinquième secondaire : Rapport de recherche. Régie régionale de la santé et des services sociaux de la Montérégie. Direction de la Santé Publique, 300.
- [30] Kamiya, Y. (2011). Women's autonomy and reproductive health care utilization : Empirical evidence from Tajikistan. *Health Policy*, 2-3 (102), 304-313. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2011.04.001>
- [31] Langlois, M. (2011). Étude sur les déterminants psychosociaux de la vaccination contre le virus A (H1N1) auprès des parents d'enfants qui fréquentent des services de garde éducatifs de Montréal [Mémoire présenté à la Faculté des Études Supérieures en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc) en santé communautaire Ph.D en Démographie]. Université de Montréal.
- [32] Le Bonniec, A., Djoufelkit, K., & Cousson-Gélie, F. (2015). Quels sont les facteurs psychosociaux déterminant la participation au dépistage du cancer colorectal ? Intérêt de la théorie du comportement planifié et du concept de coping. *Psycho-Oncol*, 9, 108-114.
- [33] Levasseur, C., Pineault, R., & Hankins, C. (1992). Facteurs psychosociaux influençant l'intention des femmes infectées par le VIH d'avoir un enfant : Étude de douze cas. *Santé mentale au Québec*, 17 (1), 177-194.
- [34] Loyal, D. (2017). Déterminants Psychosociaux et Culturels du Burnout Maternel et des Symptômes Dépressifs Périnataux. [Psychologie]. Université de Bordeaux.
- [35] Miles-Doan, R., & Brewster, K. L. (1998). The impact of type of employment on women's use of prenatal-care services and family planning in urban Cebu, the Philippines. *Studies in Family Planning*, 1 (29), 69-78.
- [36] Myriane, S.-P. (2019). Relations entre le stress Psychosocial et les comportements liés à la santé durant la grossesse [Mémoire de maîtrise en kinanthropologie].
- [37] Nache, C. M., & Trudeau, F. (2007). Déterminants psychosociaux des comportements de santé : Approches théoriques et opérationnalisation en éducation pour la santé. *SPIRALE-Revue de recherches en Éducation*, 25, 91-107.
- [38] Nadjihoroum Ndigadet. (2007). Pauvreté et accès aux soins de santé obstétricaux au Tchad [Mémoire de DESS en démographie]. IFORD.
- [39] Nikiéma, B. (2017). Les Inégalités de l'accès aux soins en milieu urbain à Ouagadougou. 26.
- [40] Nkurunziza, M. (2014). Analyse du recours aux soins obstétricaux au Burundi : Déterminants et motivations [Thèse de doctorat en Démographie, Faculté des sciences économiques, sociales, politiques et de communication]. Université Catholique de Louvain.

- [41] Normand, C., & Ducharme, F. (2003). Les approches prédictives et explicatives dans l'étude de l'utilisation des services : Exemple de la gérontologie sociale. *Ruptures, Revue trans-disciplinaires en santé*, 9 (2), 112-116.
- [42] Olivier, R. L. (1980). A Cognitive Model of the Antecedents and Consequences of Satisfaction Decisions. *Journal of Marketing Research*, 17 (4), Article 4.
- [43] OMS. (2022). Santé des adolescents et des jeunes adultes (p. 22) [Principaux faits]. Organisation mondiale de la Santé.
- [44] OMS. (2023). Mortalité maternelle : Inégalité d'accès aux services de santé (p. 9) [Rapport de synthèse]. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/maternal-mortality>.
- [45] Pigneur, Y. (2010). Satisfaction des utilisateurs, protection de la vie privée, connaissances et innovation sous la loupe des chercheurs. 5.
- [46] Rondeau, G., Lindsave, J., Brochu, & Brodeur. (2006). Application du modèle Trans théorique du changement à une population de conjoints aux comportements violents. *Centre de recherche interdisciplinaire sur la violence familiale et la violence faite aux femmes*, 35, 91.
- [47] Rwenge, M. (2007). La qualité des soins obstétricaux au Cameroun. *Travaux et documents Publiés par l'IFORD*, 29, 206.
- [48] Rwenge, M., & Nguemaleu, T. (2011). Facteurs Sociaux de l'utilisation des Services de soins Obstétricaux parmi les Adolescentes Camerounaises. *African Journal of Reproductive Health*, 15 (3), 81-92.
- [49] Siaka, C. (2018). Inégalités de recours aux soins de santé maternelle à l'aune des capacités : Le cas du Mali [Thèse de doctorat en Démographie]. Université de Genève.
- [50] Sorgho, E. (2017). Les déterminants de non-recours aux services des soins postnatals : Cas du centre de santé et promotion sociale du district sanitaire de Ziniaré [Mémoire de Master II en Science Maïeutiques et Santé de la Reproduction]. Institut de Formation et de Recherche Interdisciplinaires en Science de la Santé et de l'Éducation (IFRISSE).
- [51] TCHAD-MSP, & ASTEBEF. (2009). Feuille de Route Nationale pour l'accélération de la réduction de la Mortalité Maternelle Néonatale et Infantile (p. 61) [Document final]. Ministère de la Santé Publique.
- [52] TCHAD-MSP, UNICEF, MUSKOKA, Union Européenne, & OMS. (2018). Enquête sur la disponibilité et capacités opérationnelles des services de santé (p. 170) [Rapport final]. Ministère de la Santé Publique.
- [53] TCHAD-PDC, M. (2015). Plan Régional de Développement Communal de 2015 -2019 (p. 161) [Rapport final]. Mairie de la ville de Moundou.
- [54] Terrade, F., & al. (2009). L'acceptabilité sociale : La prise en compte des déterminants sociaux dans l'analyse de l'acceptabilité des systèmes technologiques. *Presses Universitaires de France*, 383-395.
- [55] Triandis, C. (1970). Attitude et changement d'attitude. *fondements de la psychologie sociale*. Hoboken, New Jersey.
- [56] Union Africaine, C. (2015, avril). Agenda 2063 : L'Afrique que nous voulons. Edition finale; Disponible l'adresse : https://au.int/sites/default/files/pages/3657-file-agenda2063_popular_version_en.pdf.
- [57] Youness, J., Houda, L., & Hicham, O. (2018). Dépenses et utilisation de soins de santé : Une revue de littérature théorique et empirique. In *European Scientific Journal* (Vol. 14, p. 1857-1881).

Contamination des sols et risque écotoxicologique associés aux herbicides en zones céréalières de l'Ouest du Burkina Faso

[Soil contamination and ecotoxicological risk associated with herbicides in cereal-growing areas of western Burkina Faso]

Bazoma Bayili¹, Koama Bayili², Bernard Koursangama³, Tédébouaouga Bazongo⁴, Hyacinthe Dipina Ki⁴, Bazoumana Sow⁴, Roch Kounbobr Dabire⁴, and Abdoulaye Diabate⁴

¹Programme Aménagement et Suivi des Ecosystème, Département Environnement et Forêts, Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (INERA, CNRST), Burkina Faso

²Centre Universitaire de Banfora, Université Nazi Boni (CUB, UNB), Burkina Faso

³Laboratoire de Recherche et d'Enseignement en Santé et Biotechnologies Animales (LARESBA), Ecole Doctorale-Sciences Naturelles et Agronomies, Université Nazi Boni, Burkina Faso

⁴Unité de Recherche Paludisme et Maladies Tropicales Négligées, Département de Biologie Médicale et Santé Publique, Institut de Recherche en Sciences de la Santé, Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (IRSS, CNRST) Burkina Faso

Copyright © 2026 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: Rising herbicide use in the cereal-growing zones of western Burkina Faso has raised concerns about soil contamination and associated ecotoxicological risks. This study assesses soil contamination by thirteen herbicides commonly used in cereal cultivation across twelve localities in four regions of western Burkina Faso during a single agricultural season. Soil samples were collected in two phases: the first during herbicide applications and the second three months later. Residues were extracted using an adapted QuEChERS method and quantified by high-performance liquid chromatography (HPLC). Results indicate spatiotemporally heterogeneous contamination, with maximum concentrations reaching 6,967 µg/kg for nicosulfuron and 1,027 µg/kg for mesotrione. Comparison with maximum allowable concentrations / predicted no-effect concentrations for soil (MAC/PNEC_{soil}) shows notable exceedances by factors of 10–700—signaling high risk for soil organisms and sensitive crops. Certain compounds, such as atrazine, terbutylazine and bensulfuron-methyl, exhibit high persistence, whereas others, including nicosulfuron and prometryn, dissipate more rapidly. These findings underscore the urgency of tighter stewardship of phytosanitary practices, the implementation of sustainable management measures, and the integration of international benchmark thresholds into agricultural soil monitoring frameworks.

KEYWORDS: Herbicide residues; soil contamination; MAC/PNEC_{soil}; cereal agroecosystems; Burkina Faso.

RESUME: L'augmentation de l'utilisation des herbicides dans les zones céréalières de l'Ouest du Burkina Faso suscite des inquiétudes quant à la contamination des sols et aux risques écotoxicologiques associés. La présente étude évalue le niveau de contamination des sols par treize herbicides couramment utilisés en culture céréalière dans douze localités réparties dans quatre régions de l'Ouest du Burkina Faso au cours d'une campagne agricole. Des échantillons de sol ont été prélevés en deux phases: la première pendant les applications d'herbicides, et la seconde trois mois après. L'extraction des résidus a été réalisée selon une méthode adaptée de QuEChERS, suivie d'une analyse par chromatographie liquide à haute performance (HPLC). Les résultats révèlent une contamination hétérogène dans l'espace et dans le temps, avec des concentrations maximales

atteignant 6967 µg/kg pour le nicosulfuron et 1027 µg/kg pour le mésotrione. La comparaison avec les concentrations maximales admises (CMA/PNEC_sol) montre des dépassements notables, parfois supérieurs de 10 à 700 fois les valeurs de référence, traduisant un risque élevé pour les organismes du sol et les cultures sensibles. Certaines molécules, telles que l'atrazine, la terbutylazine et le bensulfuron-méthyle, présentent une forte persistance, tandis que d'autres, comme le nicosulfuron et la prométryne, disparaissent plus rapidement. Ces résultats soulignent l'urgence d'un encadrement plus rigoureux des pratiques phytosanitaires, la mise en place de mesures de gestion durable et l'intégration des seuils de référence internationaux dans les dispositifs de surveillance des sols agricoles.

MOTS-CLEFS: Résidus d'herbicides, contamination des sols, CMA/PNEC_sol, agroécosystèmes céréaliers, Burkina Faso.

1 INTRODUCTION

La production agricole dans les régions tropicales, notamment en Afrique de l'Ouest, est confrontée à de nombreux défis, parmi lesquels les bioagresseurs responsables de pertes de rendement pouvant atteindre 40 % par an [1]. Pour faire face à ces pertes, les agriculteurs ont recours massivement aux pesticides chimiques de synthèse, dont l'utilisation est en constante augmentation dans les systèmes agricoles intensifs [2].

Dans les zones céréalières, notamment à l'ouest du Burkina Faso, les herbicides représentent la principale catégorie de pesticides utilisée, en raison de leur efficacité dans la lutte contre les adventices et de leur capacité à compenser la pénurie de main-d'œuvre agricole ainsi que le coût élevé du désherbage mécanique [3], [4].

Cette dépendance croissante aux herbicides se traduit par une importation massive de ces produits, qui constituent désormais la majorité des produits phytosanitaires utilisés au Burkina Faso [5]. Toutefois, l'utilisation intensive et souvent inappropriée de ces produits soulève des préoccupations environnementales majeures [6], [7], [8], [9]. Plusieurs études ont documenté les mauvaises pratiques agricoles dans l'application de ces produits, notamment la gestion inadéquate des emballages, la préparation non contrôlée de la bouillie, les mélanges de produits, ou encore le non-respect des doses et fréquences d'application recommandées [10], [11]. Ces pratiques augmentent considérablement le risque de contamination des sols.

Par ailleurs, les propriétés physico-chimiques des substances actives contenues dans les herbicides, notamment leur persistance et leur mobilité dans le sol, accentuent leur impact écologique [12], [13]. On estime que plus de 99 % des pesticides appliqués peuvent entrer en contact avec les compartiments environnementaux, en particulier les sols et les eaux, en raison de la dérive, du ruissellement ou de la lixiviation [14]. Cette situation est d'autant plus préoccupante dans le cas des herbicides dont la rémanence est souvent élevée, favorisant leur accumulation dans les sols au-delà des seuils de tolérance environnementale [15], [16].

Malgré l'ampleur de leur utilisation, les données sur la contamination des sols par les herbicides au Burkina Faso restent extrêmement limitées. Les rares études disponibles se concentrent essentiellement sur les résidus de pesticides dans les cultures de coton, incluant généralement les insecticides et les fongicides [17], [18], [19]. Il existe donc un déficit de connaissances scientifiques concernant l'évaluation spécifique des résidus d'herbicides dans les agroécosystèmes céréaliers, qui sont pourtant caractérisés par des régimes phytosanitaires très distincts et dominés par ces substances [11], [20].

En outre, les caractéristiques environnementales locales, telles que le type de sol, le climat et les pratiques culturales, influencent la dynamique des résidus d'herbicides, ce qui justifie l'importance de données localisées et contextualisées [21], [22].

Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer le niveau de contamination des sols par les herbicides utilisés dans les zones de production céréalière de l'ouest du Burkina Faso.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITES DE L'ÉTUDE

L'étude a été menée dans l'ouest du Burkina Faso, plus précisément dans les régions de Guiriko (ex Hauts-Bassins), de Bankui (ex Boucle du Mouhoun), de Tannounyan (ex Cascades) et du Djôrô (ex Sud-Ouest). Ces régions se caractérisent par une utilisation massive de pesticides, en particulier des herbicides, pour accroître la production céréalière et les cultures de rente [23]. Trois localités ont été sélectionnées dans chaque région pour les prélèvements de sol dans les champs céréaliers

PRÉPARATION DES STANDARDS ANALYTIQUES

La méthode d'étalonnage externe à l'aide d'une droite a été utilisée. Pour ce faire, 25 mg de chaque standard avec une pureté de 99,98 % ont été introduits dans une fiole jaugée de 25 mL, puis le volume a été complété au trait de jauge avec de l'acétonitrile. L'ensemble a été agité et homogénéisé par ultrasons. Les solutions obtenues représentent les solutions mères de chaque standard. À partir de chaque solution mère, six solutions secondaires de concentrations 5 ppm, 2,5 ppm, 1,25 ppm, 0,625 ppm, 0,3125 ppm et 0,15625 ppm ont été préparées et injectées afin de construire la droite d'étalonnage. Elle a été obtenue à l'aide de la courbe d'étalonnage $y = f(x)$ (concentration) des six points de chaque standard après injection.

EXTRACTION

La technique d'extraction a été adaptée de la méthode QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe) décrite par [24], [25]. Cette méthode simple, rapide, et idéale pour l'analyse multi-résidus de pesticides a été validée par la norme européenne EN 15662. La variante de la méthode QuEChERS utilisée est celle validée par la norme européenne EN 15662. En effet, un kit de sels constitué de 1 g de citrate trisodique déshydraté, 0,5 g de citrate disodique sesquihydraté, 1 g de chlorure de sodium (NaCl) et 4 g de sulfate de magnésium anhydre ($MgSO_4$) a été utilisé pour optimiser l'extraction (kit d'extraction). Un kit constitué de 0,15 g d'amine primaire et secondaire (PSA) et de 0,9 g de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) a été utilisé pour optimiser la purification (kit de purification).

Une extraction solide/liquide a été réalisée sous une hotte en mélangeant 5 g de chaque sol avec 10 mL d'eau ultrapure, 10 mL d'acétonitrile et un kit d'extraction dans un tube à centrifuger de 50 mL. Ils ont été ensuite agités vigoureusement pendant une minute à l'aide d'un agitateur vortex, avant d'être centrifugés à 3 000 tr/min pendant 5 minutes.

PURIFICATION ET CONCENTRATION

Elle a consisté à introduire 6 mL du surnageant organique dans un tube à centrifuger de 15 mL contenant un kit de purification constitué de 0,15 g d'amine primaire et secondaire (PSA) et de 0,9 g de sulfate de magnésium ($MgSO_4$). L'ensemble a été agité vigoureusement pendant une minute à l'aide d'un agitateur vortex, puis centrifugé à 3 000 tr/min pendant 5 minutes. Pour concentrer l'extrait purifié, une aliquote de 5 mL du surnageant a été introduite dans un tube à hémolyse, puis évaporée à sec par un évaporateur sous flux d'azote. L'échantillon est ensuite récupéré avec 50 μ L d'acétonitrile de grade HPLC et mis en vials pour le dosage multi-résidus.

ANALYSE CHROMATOGRAPHIQUE

Le dosage des résidus a été effectué au moyen d'un chromatographe HPLC-UV (Agilent 1100 séries) équipé de quatre pompes à solvant, couplé à un détecteur UV à barrette de diode (DAD) et à un injecteur automatique. L'ensemble est contrôlé par un ordinateur complet muni du logiciel d'exploitation et d'acquisition des données Chemstation version 32. Le volume d'injection a été de 10 μ L et une colonne à phase inverse C18 (4,6 x 450 mm) de marque ZORBAX® a été utilisée. La température de la colonne a été maintenue à 34 °C. L'élution a été effectuée en mode isocratique avec une phase mobile constituée d'un mélange d'acétonitrile et d'eau ultrapure en volume égal. Le débit de la phase mobile était de 1 mL.min⁻¹. Avant leur quantification, les molécules détectées ont été identifiées grâce à leur temps de rétention et confirmées par comparaison de leur spectre UV à celui des standards correspondants.

2.3.2 FORMULE DE CALCUL

Pour augmenter la probabilité de détection des pesticides à l'état de traces, les extraits ont été concentrés. En effet, 5 mL de chaque extrait a été concentrée à 50 μ L, ce qui correspond à un facteur de concentration $f = 100$. De plus, l'ordinateur a présenté les résultats en μ g/ μ L de volume d'extrait alors que les prises d'essai étaient de 5 g de sol.

La teneur finale T (exprimée en μ g/kg) est obtenue à partir de la teneur mesurée par l'appareil T_m (en ng/ μ L), puis corrigée pour tenir compte du volume de solvant utilisé pour l'extraction V_s (10 mL), du facteur de concentration f (100) et de la prise d'essai PE (5 g). Le facteur 1000 sert à convertir les unités afin d'exprimer le résultat final en μ g/kg. Ainsi, la valeur fournie par la machine est convertie et ramenée à la masse d'échantillon analysée pour donner la teneur T .

3 RÉSULTATS

Les concentrations de résidus d'herbicides mesurées lors des prélèvements sont présentées dans le tableau 1. Au total, treize molécules ont été analysées. Elles ont été toutes détectées dans les échantillons de la première phase de prélèvement au moins une fois. En revanche, seules sept molécules ont été retrouvées dans les échantillons de la seconde phase de prélèvement c'est-à-dire trois mois plus tard.

Les herbicides les plus détectés au cours de la première phase étaient l'atrazine, le bensulfuron-méthyle, l'haloxyfop-R-méthyle, la pendiméthaline et l'émamectin benzoate, chacun ayant été identifié dans au moins trois localités. Durant la seconde phase, les molécules les plus retrouvées étaient l'atrazine, la terbuthylazine, l'haloxyfop-R-méthyle, le mésotrione et le 2,4-D, toutes présentes dans au moins trois localités.

L'atrazine a été détectée dans cinq localités lors de la première phase (0,02 µg/Kg à 12,38 µg/Kg), puis dans neuf autres lors de la seconde, avec une concentration maximale de 15,22 µg/kg à Ouarkoye. La terbuthylazine a été initialement détectée dans une localité, soit à Founzan à une concentration de 844,91 µg/kg. Trois mois plus tard, elle était présente dans trois localités: Douna, Ouarkoye et Safané à des concentrations allant de 12,89 µg/Kg à 126,06 µg/Kg. Lors de la première phase, la mésotrione a atteint une concentration exceptionnelle de 1027,36 µg/kg à Safané. Bien qu'elle ait été détectée durant la seconde phase, ses concentrations ont fortement diminué avec une concentration maximale de 41,96 µg/kg à Safané. Le nicosulfuron a été observé à des niveaux très élevés (> 6 600 µg/kg) dans deux localités (Douna et Ouarkoye) lors de la première phase, mais n'a pas été détecté lors de la seconde.

Le diuron, détecté uniquement à Kankalaba lors de la première phase (10,67 µg/kg), n'a pas été retrouvé trois mois plus tard. À l'inverse, le 2,4-D, initialement détecté uniquement à Dano (0,27 µg/kg), a été retrouvé dans quatre localités lors de la seconde phase, avec une concentration maximale de 4,30 µg/kg à Dano. Enfin, plusieurs molécules présentes uniquement lors de la première phase n'ont pas été détectées lors de la seconde: le diuron, le métolachlore, le nicosulfuron, la prométryne, l'émamectin benzoate et le bispiribac-sodium.

Le tableau 2 compare les concentrations maximales mesurées avec les valeurs de référence (CMA/PNEC_sol). Le nicosulfuron (6967 µg/kg) et le mésotrione (1027 µg/kg) dépassent respectivement d'environ 700 et 10 fois les valeurs de référence. La terbuthylazine (845 µg/kg), l'émamectin benzoate (833 µg/kg), la prométryne (595 µg/kg) et le bensulfuron-méthyle (53 µg/kg) excèdent également les seuils admis de manière significative. À l'inverse, les concentrations d'herbicides tels que l'atrazine, le diuron, la pendiméthaline, le 2,4-D et le métolachlore demeurent proches ou en dessous des valeurs de référence.

Tableau 1. Teneur (µg/Kg) des 13 molécules dosées dans les échantillons de sol des différentes localités (P1 et P2)

Molécules recherchées	Douna		Kankalaba		Loumana		Koumbia		Founzan		Banzon		Ouarkoye		Safané		Fara		Dano		Diébougou		Bouroum Bouroum	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Atrazine	0,03	1,8	1,52	0,07	0,27	-	-	-	-	-	-	0,26	-	15,22	12,38	0,6	-	0,46	0,02	0,11	-	0,81	-	0,46
Diuron	-	-	10,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bensulfuron- méthyle	14,01	23,54	-	-	-	-	-	-	52,81	-	-	-	-	-	-	-	11,27	38,01	-	50,77	-	-	-	-
Terbuthylazine	-	31,06	42,08	-	-	-	-	-	844,91	-	-	-	-	126,08	-	12,89	-	-	-	-	-	-	-	-
Haloxypop-R- méthyle	-	-	36,26	-	-	-	-	0,80	-	0,019	-	0,082	0,88	-	4,5	-	0,57	-	-	0,52	-	-	-	-
Mésotrione	-	-	-	39,21	-	-	-	2,27	-	0,60	-	4,48	30,75	-	1027,36	41,96	-	-	-	-	-	-	-	-
Pendiméthaline	-	-	10,25	-	-	-	-	-	-	-	-	0,077	1,04	-	-	-	0,91	-	-	-	-	0,76	-	-
Métolachlore	-	-	4,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,4-D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	-	-	1,82	0,27	4,30	-	-	-	-	4,05
Nicosulfuron	6681,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6966,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Prométryne	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	595,07	-	-	-	-	-
Emamectin benzoate	767,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	832,57	-	-	-	21,61	-	-	-	-	-
Byspiribac- sodium	-	-	-	-	32,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,46	-	-	-	-	-	-	-

(-): non déterminé

Tableau 2. Concentrations maximales mesurées (Concentration maximale mesurée) par rapport aux valeurs de référence (CMA/PNEC_sol)

Molécule	Concentration maximale mesurée (µg/kg)	Valeurs de référence sol (CMA/PNEC_sol*)	Rapport C/CMA
Nicosulfuron	6967	PNEC_sol ≈ 10 µg/kg	~700×
Mésotrione	1027	PNEC_sol ≈ 100 µg/kg	~10×
Terbuthylazine	845	CMA sol (MPC NL) ≈ 50 µg/kg	~17×
Emamectin benzoate	833	PNEC_sol ≈ 200 µg/kg	~4×
Prométryne	595	CMA sol ≈ 100 µg/kg	~6×
Bensulfuron-méthyle	53	PNEC_sol ≈ 5 µg/kg	~10×
Haloxypop-R-méthyle	36	PNEC_sol ≈ 100 µg/kg	<1×
Bispyribac-sodium	32	Référence EPA cPAD 100 µg/kg/j	–
Atrazine	15	CMA sol (MPC NL) ≈ 20 µg/kg	~0,7×
Diuron	11	CMA sol (MPC NL) ≈ 20 µg/kg	~0,5×
Pendiméthaline	10	PNEC_sol ≈ 50 µg/kg	~0,2×
2,4-D	4,3	PNEC_sol ≈ 100 µg/kg	<0,1×
Métolachlore	4,1	PNEC_sol ≈ 50 µg/kg	~0,1×

*Sources: RIVM (MPC/SRCeco), EFSA PNEC_sol, CCME guidelines

PNEC = Predicted No-Effect Concentration (sol); MPC/SRCeco = Maximum Permissible Concentration/ Serious Risk Concentration for ecosystems; C/CMA = rapport Concentration mesurée / Concentration Maximale Admissible; EPA cPAD = Environmental Protection Agency chronic Population-Adjusted Dose; MPC NL = Maximum Permissible Concentration Netherlands; RIVM = National Institute for Public Health and the Environment – Pays-Bas; EFSA = European Food Safety Authority; CCME = Canadian Council of Ministers of the Environment.

4 DISCUSSION

L'analyse multi-résidus des sols agricoles de l'Ouest du Burkina Faso met en évidence une contamination diffuse mais spatialement hétérogène par les herbicides, avec des différences marquées entre localités. Les sites de Douna, Ouarkoye, Founzan et Safané se distinguent par des concentrations particulièrement élevées, tandis que d'autres substances n'ont été détectées que localement, confirmant les observations faites dans d'autres contextes par Šunjka et al. (2024) [26]. Cette hétérogénéité reflète à la fois la diversité des pratiques d'application, orientées selon les cultures et les mauvaises herbes ciblées [11], et les propriétés physico-chimiques des molécules qui conditionnent leur rémanence, leur mobilité et leur devenir [27].

Les triazines, notamment l'atrazine et la terbuthylazine, apparaissent comme les composés les plus persistants, détectés dans plusieurs localités même plusieurs mois après application. Leur faible biodégradabilité et leur forte affinité pour la matière organique du sol sont bien documentées [28], [29], [30]. Stipičević et al. (2015) [31] ont montré que la terbuthylazine pouvait persister jusqu'à 17 mois dans le sol, contre moins de 5 mois pour l'atrazine. Dans notre étude, les concentrations maximales atteignent 845 µg/kg, soit près de 17 fois la valeur de référence néerlandaise (≈50 µg/kg), indiquant un risque élevé de transfert vers les eaux souterraines [32].

Le mésotrione, bien que moins fréquemment rapporté dans les sols d'Afrique de l'Ouest [33], atteint des niveaux de 1027 µg/kg, soit dix fois sa PNEC_sol. Ses métabolites AMBA et MNBA, connus pour être plus toxiques que la molécule mère, représentent une menace pour la microflore du sol [34]. Des travaux antérieurs soulignent également une forte rémanence initiale suivie d'une décroissance rapide liée à la biodégradation ou au lessivage [35].

Le cas du nicosulfuron illustre une dynamique inverse: détecté à des niveaux extrêmement élevés lors du premier échantillonnage (près de 7 mg/kg, soit environ 700 fois la PNEC_sol pour les plantes non-cibles), il disparaît totalement lors du second, suggérant une dégradation rapide sous conditions pédoclimatiques favorables [36], [37], [38]. Ce comportement met en lumière un risque aigu de phytotoxicité pour les cultures en rotation à court terme [39], [40].

D'autres molécules comme le 2,4-D ont vu leur fréquence de détection augmentée entre les deux phases, passant d'une à quatre localités, traduisant soit un usage tardif en post-levée, soit une dispersion locale par ruissellement ou transport éolien. L'emamectin benzoate, quant à elle, atteint 833 µg/kg, excédant quatre fois la PNEC_sol estimée et représentant un danger

pour les invertébrés du sol et les arthropodes auxiliaires, malgré sa faible mobilité [41]. La prométryne affiche également des niveaux préoccupants (595 µg/kg), dépassant six fois les valeurs de référence et confirmant son potentiel d'impact chronique sur la microflore et la végétation non-cible [42].

En revanche, les concentrations d'atrazine, de diuron, de pendiméthaline, de 2,4-D et de métolachlore demeurent relativement faibles (<20 µg/kg), proches ou en dessous des seuils de référence [43]. Cela peut traduire un risque écotoxicologique limité, bien qu'un suivi reste nécessaire compte tenu de leur potentiel de transfert hydrique. La variabilité observée entre localités (ex. pics de terbuthylazine à Founzan ou de mésotrione à Safané) souligne l'importance des conditions édaphiques locales (perméabilité, activité microbienne) dans le devenir des herbicides.

Au-delà des teneurs ponctuelles, la détection simultanée de plusieurs molécules dans un même sol indique des expositions cumulatives, encore peu documentées dans les agroécosystèmes tropicaux. Ces mélanges peuvent perturber le microbiome du sol [44], altérer le cycle des nutriments ou l'activité des vers de terre [45] et induire des effets phytotoxiques sur les cultures suivantes, avec des implications directes pour la durabilité agricole et la sécurité alimentaire [46]. L'ensemble de ces constats plaide pour la mise en place d'une surveillance intégrée, la diversification des modes d'action et la réduction des usages excessifs afin de préserver la fertilité des sols et limiter les transferts vers les ressources en eau.

5 CONCLUSION

L'étude du niveau de contamination des sols dans la zone céréalière de l'Ouest du Burkina Faso met en évidence une pollution généralisée mais variable, avec treize substances actives identifiées au cours des deux phases de prélèvement. Parmi elles, l'atrazine, la terbuthylazine et le mésotrione se distinguent par leur persistance et leur prévalence élevées, tandis que d'autres molécules comme le nicosulfuron présentent des concentrations initialement très fortes suivies d'une disparition rapide. La comparaison des niveaux mesurés aux concentrations maximales admises (CMA/PNEC_sol) révèle des dépassements considérables, atteignant parfois 10 à 700 fois les valeurs de référence, traduisant un risque écotoxicologique préoccupant pour les organismes du sol et les cultures sensibles. Ces résultats soulignent l'impact environnemental potentiel des pratiques phytosanitaires actuelles, notamment en lien avec la rémanence de certaines molécules et le risque de transfert vers les milieux aquatiques. Ils appellent à une meilleure régulation de l'usage des herbicides, à la sensibilisation des producteurs et à l'intégration des seuils de référence internationaux dans les dispositifs nationaux d'évaluation et de surveillance, afin de concilier productivité agricole et protection des écosystèmes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les autorités administratives, coutumières et les producteurs de céréales des 12 localités pour leur collaboration. Ils remercient aussi le LNSP (actuel ANSSEAT) pour la plateforme d'analyse de pesticides mise à notre disposition.

FINANCEMENT

Cette recherche n'a bénéficié d'aucune subvention spécifique de la part d'un organisme de financement. Les auteurs déclarent n'avoir aucune relation financière ou personnelle susceptible d'influencer de manière inappropriée les travaux rapportés dans cet article.

CONFLITS D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent aucun conflit d'intérêts.

REFERENCES

- [1] I. Mahmood, S. R. Imadi, K. Shazadi, A. Gul, and K. R. Hakeem, «Effects of Pesticides on Environment,» in *Plant, Soil and Microbes: Volume 1: Implications in Crop Science*, M. S. Akhtar and S. N. A. Abdullah, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 253–269. doi: 10.1007/978-3-319-27455-3_13.
- [2] E. S. Bernhardt, E. J. Rosi, and M. O. Gessner, «Synthetic chemicals as agents of global change,» *Front. Ecol. Environ.*, vol. 15, no. 2, pp. 84–90, Mar. 2017, doi: 10.1002/fee.1450.
- [3] L. P. Gianessi, «The increasing importance of herbicides in worldwide crop production,» *Pest Manag. Sci.*, vol. 69, no. 10, pp. 1099–1105, Oct. 2013, doi: 10.1002/ps.3598.

- [4] J.-P. Olin Bassala, P. Dugué, A.-M. Granié, and M. Vunyingah, «Pratiques agricoles et perceptions paysannes de l'usage des herbicides dans les champs familiaux au Nord-Cameroun,» *Int. J. Adv. Stud. Res. Afr.*, 2015, Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://agritrop.cirad.fr/579836/>.
- [5] MAAH, «Tableau de bord statistique de l'agriculture,» SP-CPSA. Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.spcpsa.bf/download/tableau-de-bord-statistique-de-lagriculture-2018/>.
- [6] R. A. Almeida, P. Lemmens, L. De Meester, and K. I. Brans, «Differential local genetic adaptation to pesticide use in organic and conventional agriculture in an aquatic non-target species,» *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 288, no. 1963, Nov. 2021, doi: 10.1098/rspb.2021.1903.
- [7] GRAAD, « (PDF) Coût des mauvaises pratiques dans l'usage des produits chimiques dans le secteur agricole,» ResearchGate. Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/379575744_Cout_des_mauvaises_pratiques_dans_lusage_des_produits_chimiques_dans_le_secteur_agricole_Koudougou.
- [8] N. Ngameni, D. Brice, D. B. Nkontcheu Kenko, and E. Djomo Nana, «Évaluation des facteurs de risques environnementaux liés à la mauvaise utilisation des pesticides par les maraîchers au Cameroun : le cas de Balessing à l'Ouest Cameroun,» vol. 13, pp. 91–100, Jan. 2017.
- [9] G. Soro, W. S. Amao, A. O. Adjiri, and N. Soro, «Risques sanitaires et environnementaux liés à l'usage des produits phytosanitaires dans l'horticulture à Azaguié (Sud Côte d'Ivoire),» *J. Appl. Biosci.*, vol. 138, pp. 14072–14081, Sep. 2019, doi: 10.4314/jab.v138i1.7.
- [10] H. Compaore, S. Ilboudo, A. D. B. Nati, and M. M. B. Dama, «Les risques sanitaires liés à l'utilisation des pesticides dans les bas-fonds rizicoles de la commune de Dano, Province du Loba Burkina Faso,» *Afr. Crop Sci. J.*, vol. 27, no. 4, pp. 557–569, Nov. 2019, doi: 10.4314/acsj.v27i4.2.
- [11] B. Bayili, B. Koursangama, K. Bayili, H. D. Ki, B. Sow, E. Bilgo, A. A. Kinda, T. Bazongo, A. Ouattara, R. K. Dabire, A. Diabate, «Characterization of herbicide use practices in cereal agroecosystems in western Burkina Faso,» *J. Exp. Biol. Agric. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 248–256, May 2024, doi: 10.18006/2024.12 (2).248.256.
- [12] L. Padovani, «A calculation procedure to assess potential environmental risk of pesticides at the farm level,» *Ecol. Indic.*, Jan. 2004, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2004.01.002.
- [13] R. Calvet, *Les pesticides dans le sol: conséquences agronomiques et environnementales*. France Agricole Editions, 2005.
- [14] H. M. G. van Der Werf, «Evaluer l'impact des pesticides sur l'environnement,» *Courr. Environ. INRA*, vol. 31, no. 31, pp. 5–22, Aug. 1997.
- [15] R. Jeannot, B. Lemièrre, and S. Chiron, «Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués».
- [16] A. P.K. Gomgnimbou, P. W. Savadogo, A. J. Nianogo, and J. Millogo-Rasolodimby, «Usage des intrants chimiques dans un agrosystème tropical : diagnostic du risque de pollution environnementale dans la région cotonnière de l'est du Burkina Faso,» *BASE*, Jan. 2009, Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=4524>.
- [17] S. Paré, B. Kaboré, C. Stechert, M. Kolb, M. Bahadir, and L. Y. Bonzi-Coulibaly, «Agricultural Practice and Pesticide Residues in Soils and Pool Sediments from the Pendjari Biosphere Reserve Area in Benin, West Africa,» *CLEAN – Soil Air Water*, vol. 42, no. 11, pp. 1593–1603, Nov. 2014, doi: 10.1002/clen.201200371.
- [18] N. Ondo Zue Abaga, P. Alibert, S. Dousset, P. W. Savadogo, M. Savadogo, and M. Sedogo, «Résidus d'insecticides dans les sols cotonniers du Burkina Faso et effets des insecticides sur l'asymétrie fluctuante chez les abeilles mellifères (*Apis mellifera* Linnaeus),» *Chemosphere*, vol. 83, no. 4, pp. 585–592, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.12.021.
- [19] A. S. Hien, D. D. Soma, O. Hema, B. Bayili, M. Namountougou, O. Gnankine, T. Baldet, A. Diabate, K. R. Dabire, «Evidence that agricultural use of pesticides selects pyrethroid resistance within *Anopheles gambiae* s.l. populations from cotton growing areas in Burkina Faso, West Africa,» *PLoS One*, vol. 12, no. 3, p. e0173098, 2017.
- [20] R. Kumar, P. K. Sharma, P. S. Slathia, and N. Sharma, «Pesticide Use in Cereals: An Analysis of Farmers' Perception and Knowledge in Jammu District,» *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 10, pp. 2411–2419, Oct. 2017, doi: 10.20546/ijcmas.2017.610.284.
- [21] C. Froger, C. Jolivet, H. Budzinski, M. Pierdet, G. Caria, N. P. A. Saby, D. Arrouays, A. Bispo, «Pesticide Residues in French Soils: Occurrence, Risks, and Persistence,» *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 20, pp. 7818–7827, May 2023, doi: 10.1021/acs.est.2c09591.
- [22] J. Colquhoun, «Herbicide persistence and carryover».
- [23] A. M. Toe, M. Ouedraogo, R. Ouedraogo, S. Ilboudo, and P. I. Guissou, «Pilot study on agricultural pesticide poisoning in Burkina Faso,» *Interdiscip. Toxicol.*, vol. 6, no. 4, pp. 185–191, Dec. 2013, doi: 10.2478/intox-2013-0027.
- [24] M. Anastassiades, S. J. Lehotay, D. Štajnbaher, and F. J. Schenck, «Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and 'dispersive solid-phase extraction' for the determination of pesticide residues in produce,» *J. AOAC Int.*, vol. 86, no. 2, pp. 412–431, 2003.

- [25] J. Beaumont, S. Godin, N. Riem, and F. Lestremau, «Application de la methodologie quechers sur l'extraction des pesticides et des polybromodiphenylethers (pbde) dans les sediments», Accessed: Jan. 04, 2026. [Online]. Available: [https://www.aquaref.fr/system/files/2012_IIB\(9\)_Quechers_V3_0.pdf](https://www.aquaref.fr/system/files/2012_IIB(9)_Quechers_V3_0.pdf)
- [26] D. Šunjka, M. Pucarević, S. Lazić, N. Stojić, L. Milošević, H. El Bilali, D. Bošković, S. Vuković, «Monitoring of Herbicide Residues in Agricultural Soils in Vojvodina Province (Northern Serbia),» *Land*, vol. 13, no. 9, Aug. 2024, doi: 10.3390/land13091347.
- [27] A. D. Carter, «Herbicide movement in soils: principles, pathways and processes.,» *Weed Res.*, vol. 40, no. 1, p. 113, Feb. 2000, doi: 10.1046/j.1365-3180.2000.00157.x.
- [28] J. Chang, W. Fang, L. Chen, P. Zhang, G. Zhang, H. Zhang, J. Liang, Q. Wang, W. Ma, «Toxicological effects, environmental behaviors and remediation technologies of herbicide atrazine in soil and sediment: A comprehensive review,» *Chemosphere*, vol. 307, p. 136006, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136006.
- [29] S. Rostami, S. Jafari, Z. Moeini, M. Jaskulak, L. Keshtgar, A. Badeenezhad, A. Azhdarpoor, M. Rostami, K. Zorena, M. Dehghani, «Current methods and technologies for degradation of atrazine in contaminated soil and water: A review,» *Environ. Technol. Innov.*, vol. 24, p. 102019, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.102019.
- [30] S. Stipičević, G. Mendaš, M. Dvorščak, S. Fingler, N. Galzina, and K. Barić, «Dissipation dynamics of terbuthylazine in soil during the maize growing season,» *Arch. Ind. Hyg. Toxicol.*, vol. 68, no. 4, pp. 336–342, Dec. 2017, doi: 10.1515/aiht-2017-68-3063.
- [31] S. Stipičević, N. Galzina, N. Udiković-Kolić, T. Jurina, G. Mendaš, M. Dvorščak, I. Petrić, K. Barić, V. Drevenkar, «Distribution of terbuthylazine and atrazine residues in crop-cultivated soil: The effect of herbicide application rate on herbicide persistence,» *Geoderma*, vol. 259–260, pp. 300–309, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.geoderma.2015.06.018.
- [32] N. D. Jablonowski, A. Schäffer, and P. Burauel, «Still present after all these years: persistence plus potential toxicity raise questions about the use of atrazine,» *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 18, no. 2, pp. 328–331, Feb. 2011, doi: 10.1007/s11356-010-0431-y.
- [33] K. Georges and B. Mounkuy Cyprien, «Biological efficiency of mesotrione 480 g/l against sugar cane weeds (bidens pilosa, ageratum conyzoides, cyperus spp.), in burkina faso,» *Int. J. Agric. Environ. Bioresearch*, vol. 04, no. 05, pp. 01–15, 2019, doi: 10.35410/IJAEB.2019.4426.
- [34] L. Carles, M. Joly, F. Bonnemoy, M. Leremboure, F. Donnadiou, I. Batisson, P. Besse-Hoggan, «Biodegradation and toxicity of a maize herbicide mixture: mesotrione, nicosulfuron and S-metolachlor,» *J. Hazard. Mater.*, vol. 354, pp. 42–53, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.04.045.
- [35] L. Carles, M. Joly, and P. Joly, «Mesotrione Herbicide: Efficiency, Effects, and Fate in the Environment after 15 Years of Agricultural Use,» *CLEAN – Soil Air Water*, vol. 45, no. 9, p. 1700011, Sep. 2017, doi: 10.1002/clen.201700011.
- [36] C. Ashburn Poppell, R. M. Hayes, and T. C. Mueller, «Dissipation of Nicosulfuron and Rimsulfuron in Surface Soil,» *J. Agric. Food Chem.*, vol. 50, no. 16, pp. 4581–4585, Jul. 2002, doi: 10.1021/jf020172a.
- [37] Q. Wu, X. Chen, Y. Xu, and L. Han, «Dissipation and Residues of Nicosulfuron in Corn and Soil Under Field Conditions,» *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 85, no. 1, pp. 79–82, Jul. 2010, doi: 10.1007/s00128-010-0041-x.
- [38] S. Mitrić, A. Sunulahpašić, D. Šunjka, S. Vuković, M. Žabić, S. Hamidović, B. Kelečević, «Dissipation dynamic of nicosulfuron in different types of agricultural soils,» *Plant Soil Environ.*, vol. 70, no. 4, pp. 245–251, Mar. 2024, doi: 10.17221/503/2023-PSE.
- [39] D. Son, I. Somda, A. Legrève, and B. Schiffers, «Pratiques phytosanitaires des producteurs de tomates du Burkina Faso et risques pour la santé et l'environnement,» *Cah. Agric.*, vol. 26, no. 2, 2017, doi: 10.1051/cagri/2017010.
- [40] EFSA, «Conclusion on the peer review of nicosulfuron Scientific Report 120, 1-91, 2007.»
- [41] J. A. Lasota and R. A. Dybas, «Avermectins, a novel class of compounds: implications for use in arthropod pest control,» *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 36, pp. 91–117, 1991, doi: 10.1146/annurev.en.36.010191.000515.
- [42] J. Zhou, F. Hu, J. Jiao, M. Liu, and H. Li, «Effects of bacterial-feeding nematodes and prometryne-degrading bacteria on the dissipation of prometryne in contaminated soil,» *J. Soils Sediments*, vol. 12, no. 4, pp. 576–585, Apr. 2012, doi: 10.1007/s11368-012-0473-5.
- [43] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), «Canadian Soil Quality Guidelines (CSQG) for the Protection of Environmental and Human Health Summary Tables. Updated September, 2007. In Canadian Environmental Quality Guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), Winnipeg, 1-9. - References - Scientific Research Publishing.» Accessed: Dec. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2728700>.
- [44] S. Ruuskanen, B. Fuchs, R. Nissinen, P. Puigbò, M. Rainio, K. Saikkonen, M. Helander, «Ecosystem consequences of herbicides: the role of microbiome,» *Trends Ecol. Evol.*, vol. 38, no. 1, pp. 35–43, Jan. 2023. Doi: 10.1016/j.tree.2022.09.009.

- [45] M. T. Rose, T. R. Cavagnaro, C. A. Scanlan, T. J. Rose, T. Vancov, S. Kimber, I. R. Kennedy, R. S. Kookana, L. V. Zwieten, «Impact of Herbicides on Soil Biology and Function,» in *Advances in Agronomy*, vol. 136, Academic Press, 2016, pp. 133–220. doi: 10.1016/bs.agron.2015.11.005.
- [46] K Wang, Y Ren, X Pan, X Wu, J Xu, Y Zheng, F Dong, «Insights on persistent herbicides in cropland soils in northern China: Occurrence, ecological risks, and phytotoxicity to subsequent crops,» *J. Hazard. Mater.*, vol. 490, p. 137794, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jhazmat.2025.137794.

Management of available phosphorus in tropical ferruginous soils through the application of « Neyma » compost in the northern Sudanese zone of Burkina Faso

Jacques Bazemon^{1,2}, Mamoudou Traoré^{1,2}, and Hassan Bismarck Nacro¹

¹Nazi BONI University of Bobo-Dioulasso, Institute for Rural Development, Laboratory for Studies and Research on Soil Fertility and Production Systems, 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

²National Centre for Scientific and Technological Research, Institute for the Environment and Agricultural Research, Department of Natural Resource Management and Production Systems, Soil-Water-Plant Laboratory, 03 BP 7047 Ouaga 03, Burkina Faso

Copyright © 2026 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 lack of available phosphorus in Burkina Faso's tropical ferruginous soils led us to produce an organic fertiliser called «Neyma compost» using local materials. The Fischer block system of 4 treatments with 3 replicates was implemented during the 2023 growing season at the Kamboinsé Centre for Environmental, Agricultural and Training Research to evaluate the performance of compost on the availability of assimilable phosphorus in cowpea crops. The treatments were the control (T0); 2 t/ha of Neyma compost incorporated during ploughing (T1); 2 t/ha of Neyma compost applied to the seed holes 15 days after sowing (T2) and 1 t/ha of Neyma compost incorporated during ploughing followed by 1 t/ha applied to the seed holes 15 days after sowing (T3). The objectives of the study were to evaluate the rate of available phosphorus in soils according to application methods, determine the most efficient application method in terms of available phosphorus content, and determine the soil properties that control phosphorus availability. The results showed that the assimilable phosphorus content was improved by approximately 21% overall through the application of Neyma compost, with the assimilable phosphorus content varying from 3.5 ppm to 6.1 ppm under the different compost application methods. The greatest improvement in assimilable phosphorus content (56%) was achieved with the T1 application method. The availability of phosphorus varied according to the physical and chemical parameters of the soil. The methods of application and doses of Neyma compost were the main factors influencing the availability of phosphorus in the soil. Neyma compost may be a promising alternative for sustainable soil management in Burkina Faso by small-scale producers.

KEYWORDS: Neyma compost, management, available phosphorus, Burkina Faso.

1 INTRODUCTION

In tropical soils, like nitrogen and potassium, phosphorus plays a crucial role in plant nutrition and agricultural productivity. It is involved in several physiological functions and promotes nitrogen fixation by plants ([1], [2]). However, the soils of Burkina Faso, dominated by leached tropical ferruginous soils ([3], [4], [5]) are deficient in available phosphorus, as are tropical soils in general ([6], [7], [8]). Phosphorus has variable chemical speciation ([9], [10]), which can influence its accessibility to crops. According to [11], the proportion of phosphorus in its chemical forms that can be assimilated by crops is not widely available in soils, due to its strong interactions with soil colloids and the low solubility of phosphate minerals ([12]). According to [13], up to 98% of total phosphorus is inaccessible to plants. This deficiency is a constraint likely to limit the agricultural productivity of tropical soils ([14], [15]). This limiting factor may influence food security, which is the main challenge targeted by many leaders in semi-arid countries.

In order to correct the deficiency of assimilable phosphorus in tropical soils, phosphate soil improvers and/or synthetic phosphate fertilisers have been used, usually in combination ([6], [16]). Numerous studies have shown that natural phosphates

have low solubility ([17], [18]), which limits their direct application by many growers. They are often incorporated into composting substrates to improve their solubility ([19]). Research has shown that adding rock phosphate to basic composting substrates improves the phosphorus content of the compost, but influences the quality of the organic matter [18]. Enriching mature compost with natural phosphate can be an alternative way of obtaining high-quality organic compost capable of improving the soil's assimilable phosphorus content.

On the other hand, high-solubility phosphate fertilisers have been used to improve soil fertility in terms of available phosphorus ([20]), but can lead to a long-term deterioration in soil fertility. A variety of composts have also been used in Burkina Faso to improve the soil's pool of available phosphorus by many farmers, but with limited available phosphorus quality ([21]).

It is therefore necessary to find an ecological intensification alternative to improve phosphorus availability in tropical ferruginous soils in Burkina Faso for sustainable agricultural production. As a result, compost from the biodigester has been enriched with rock phosphate to enhance the value of these two local products and to produce an improved organic fertiliser known as « Neyma » compost for the efficient management of tropical soils in general and Burkina Faso in particular. Several methods of applying this compost will be applied in order to assess their performance in improving the assimilable phosphorus content of soils. The general objective of this study is to understand the dynamics of assimilable phosphorus in tropical soils under the effect of different methods of applying « Neyma » compost to cowpea crops. Specifically, the aim was (i) to assess the rate of assimilable phosphorus as a function of the different methods of applying « Neyma » compost to the soil, (ii) to determine the most efficient method of applying « Neyma » compost in terms of the availability of assimilable phosphorus in the soil and (iii) to determine the edaphic properties controlling assimilable phosphorus in the soil.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 SITE DESCRIPTION

The study was conducted during the 2023 agricultural season at the Centre de Recherches Environnementales, Agricoles et de Formation de Kamboinsé of the Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles. The centre is located in Kamboinsé on the Ouagadougou-Kongoussi axis on National Road No. 22, north of the Ouagadougou municipality in the Centre region. The geographical coordinates of the site are latitude: 12° 27'10.26"N and longitude: 1° 32'10.88"W.

Its climate is North Sudanian, characterised by a long dry season and a short rainy season. A total of 737.4 mm of rainfall spread over 47 days was received during the 2023 wet cropping season. The area is characterised by heterogeneous soils, dominated by leached tropical ferruginous soils ([22]). At a depth of 0-30 cm, the soils have a silty-sandy texture (52% sand, 31% silt and 17% clay), a slight acidity (6.8), a low bulk density (1.5) and a low level of organic matter (0.5%). In addition, they are on average low in assimilable phosphorus (5 ppm), nitrogen (434 ppm), available potassium (56 ppm) and average cation exchange capacity (11 meq/100 g) ([23]). The physico-chemical characteristics are presented in Table 1. Their interactions can influence the availability of assimilable phosphorus in the soil.

Table 1. Physicochemical characteristics of cowpea-grown soils

	Parameters	Average	Extents
Physics	Bulk density (g/cm ³)	1,5±0,1	1,4-1,6
	Clay (%)	17±10	6-39
	Silt (%)	31±17	14-63
	Sand (%)	52±25	10-76
Chemicals	Organic matter (%)	0,5±0,2	0,3-0,8
	pH	6,8±0,3	6,3-7,3
	Total nitrogen (ppm)	434±125	285-680
	Available phosphorus (ppm)	5±1	2-7
	Available potassium (ppm)	56±17	18-79
	Total iron (ppm)	4329±3414	1087-10760
	Cation exchange capacity (meq/100 g)	11±5	6-20

Source: Field data; BAZEMON, 2023

2.2 EXPERIMENTAL SET-UP

The experimental set-up was a completely randomised Fisher block design covering an area of 210 m² (15 m x 14 m) and consisting of 4 treatments with 3 replications. The individual plots covered an area of 12 m² (4 m x 3 m). The aisles between the blocks and treatments were 1 m. The different treatments were T0: Absolute control; T1: 2 t/ha of « Neyma » compost added during plowing; T2: 2 t/ha of « Neyma » compost applied to the holes 15 days after sowing and T3: 1 t/ha of « Neyma » Compost ploughed in followed by 1 t/ha planted 15 days after sowing. These doses were chosen on the basis of previous work.

2.3 PLANT MATERIAL AND FERTILISATION

The plant material used was the cowpea "Komcallé", with a sowing-maturity cycle of 60 days and an upright plant habit, with a potential grain yield ranging from 1.5 to 2 t/ha. The fertiliser used was « Neyma » compost. The « Neyma » compost was made by enriching 900 kg of compost from the biodigester with 100 kg of Burkina phosphate, which was homogenised, moistened, windrowed and covered with a plastic sheet for 10 days, with periodic turning for 3 days. After the 10 days of covering, the compost was air-dried in the shade for a week, then sieved using a 5 cm mesh sieve. A sample was analysed, and its agronomic characteristics are presented with international standards in Table 2.

Table 2. Chemical characteristics of « Neyma » compost

Parameters	Units	Values	FAO standard	AFNOR standard NFU 44- 051
pHeau	-	7,3	7-8	6-8
Organic matter	%	41,5	10-30	>20
Rapport C/N	-	17,5	10-15	>8
Total nitrogen	%	1,4	0,4-0,5	< 3
Total phosphorus	%	1,3	0,1-1,6	< 3
Total potassium	%	1,5	0,4-2,3	< 3

2.4 CULTURAL OPÉRATIONS

The experimental plot underwent shallow ploughing using a 20-horsepower sprayer before the trial was set up. Ploughing was followed by harrowing to level the plot. After harrowing, a wedge plough was used to mark out the rows of seedlings, which were planted at a distance of 80 cm between rows and 40 cm between seedpots at a rate of three (3) seeds per seedpot. One week after sowing, a weeding operation was carried out to keep 2 vigorous plants per stake, followed by an initial weeding. Given the 60-day sowing-maturity cycle of cowpeas, a second weeding was carried out 5 weeks after sowing.

2.5 SOIL SAMPLING AND CHEMICAL ANALYSIS

A total of 12 composites soil samples for all treatments were taken from a depth of 0-30 cm using a hand auger, 4 samples before planting, 4 samples 45 days after sowing and 4 samples after harvesting. Composite samples were taken from replicates of the same treatments. Analyses were carried out at the laboratory of the National Soil Office (BUNASOLS) in Burkina Faso to determine the following physico-chemical parameters:

- pHwater was measured using an electronic pH meter ([24]);
- 3 fraction particle size distribution based on the international method adapted to the "Robinson Khöln" pipette ([25]);

Cation exchange capacity was determined using the silver thiourea centrifugation method, based on the extraction of cations with a silver thiourea solution. After centrifugation, the cation exchange capacity (CEC) was measured directly by atomic absorption spectrophotometer. Organic carbon by [26] method, which consists of oxidising the soil sample with a mixture of potassium dichromate and sulphuric acid, assuming that the oxygen consumed is proportional to the carbon to be measured. And the rate of matter was determined by the following formula: Organic matter= C (%) x 1.72;

Available phosphorus using the Bray-I method. This combines the extraction of phosphorus in an acid medium with the complexation, by ammonium fluoride, of the aluminium bound to the phosphorus [27]; the determination was carried out by colorimetry with a spectrophotometer.

Available potassium was determined using the method of [28], which involves measuring potassium in a suspension of 1g of soil per 15 ml of ammonium acetate using a flame photometer.

2.6 STATISTICAL ANALYSIS

The various data obtained were entered using Excel 2019 and subjected to analysis of variance (ANOVA). The Fischer test was used to separate the means when there was a significant difference at the 5% probability threshold, using XLSTAT 2025 software. The correlation matrix was used to determine the various soil factors correlated with soil available phosphorus.

3 RESULTS

3.1 EFFECT OF « NEYMA » COMPOST APPLICATION METHODS ON THE AVAILABILITY AND VARIATIONS IN THE LEVELS OF ASSIMILABLE PHOSPHORUS IN SOILS.

Figure 1 shows that, on average, the use of « Neyma » compost (CN) improved the availability of assimilable phosphorus by around 21% compared with the level in soils without « Neyma » compost (SCN).

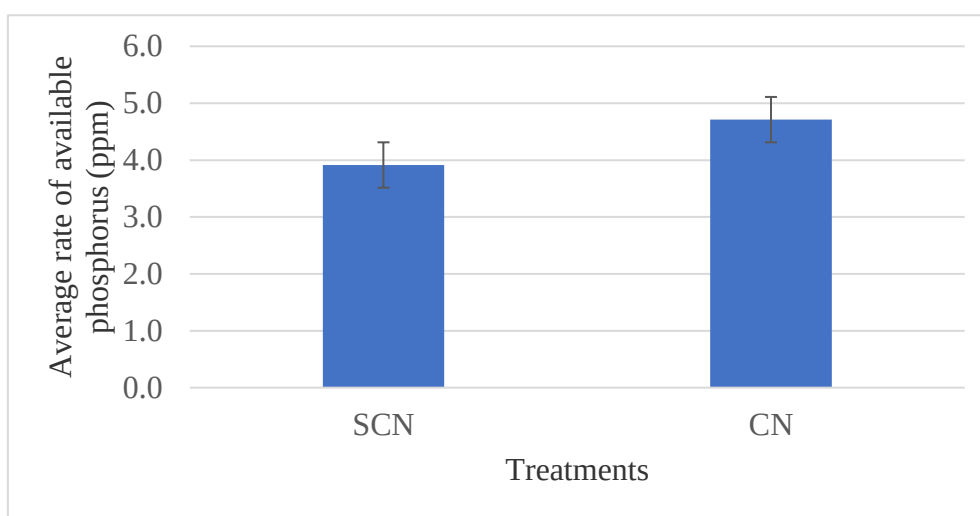


Fig. 1. Effect of « Neyma » compost on the average assimilable phosphorus content of the soil

Legend: SCN: without « Neyma » compost; CN: « Neyma » compost and ppm: parts per million.

Figure 2 shows that in soils without the addition of « Neyma » compost (SCN), the assimilable phosphorus content fell progressively under cultivation. On the other hand, with the addition of « Neyma » compost, the assimilable phosphorus content of the soil fell by around 34% 45 days after sowing and 27% after harvesting, compared with the initial soil level (5.9 ppm).

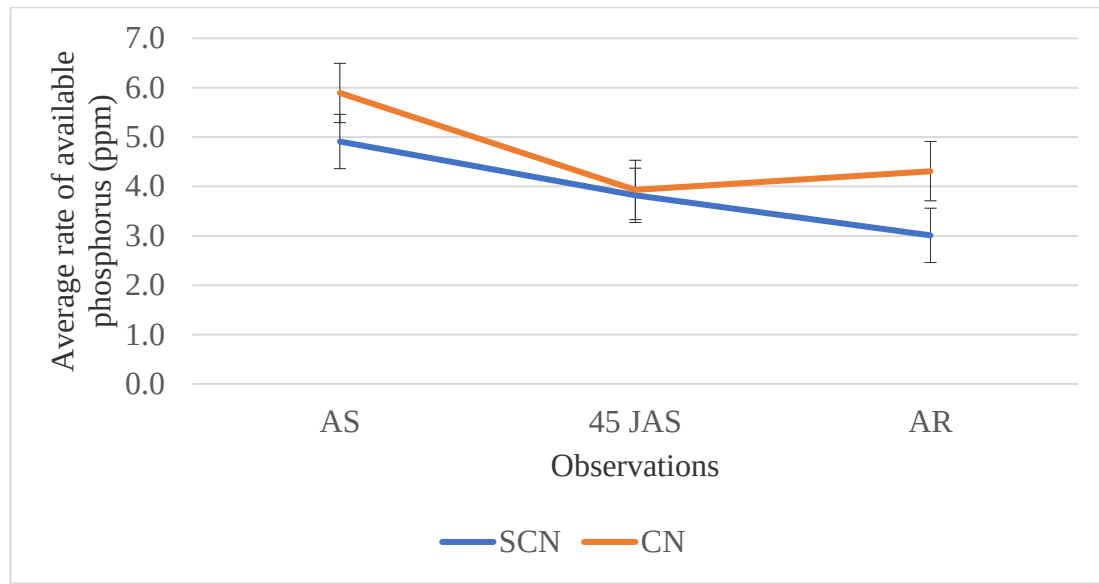


Fig. 2. Variation in the average level of assimilable phosphorus in the soil under cultivation

Legend: AS: before sowing; JAS: days after sowing; AR: after sowing; SCN: without « Neyma » compost; CN: « Neyma » compost and ppm: parts per million.

The results (Figure 3) showed that the average level of assimilable phosphorus in the soil varied from 3.5 ppm when « Neyma » compost was applied at a rate of 2 t/ha to the stakes 15 days after sowing (T2) to 6.1 ppm when it was applied at a rate of 2 t/ha spread uniformly during ploughing (T1). Only the average content of available phosphorus under the application of compost at a rate of 2 t/ha to the stakes 15 days after sowing (T2), was lower than that of the control soils (T0). In fact, the application of « Neyma » compost at a rate of 2 t/ha during ploughing (T1) improved the soil's assimilable phosphorus content by an average of around 56% compared with control soils (T0). In addition, the fractioned application of « Neyma » compost at a rate of 1 t/ha spread uniformly during ploughing, followed by 1 t/ha in the poquets 15 days after sowing, increased the level of assimilable phosphorus in the soils by around 15% compared with the level in the control soils (T0).

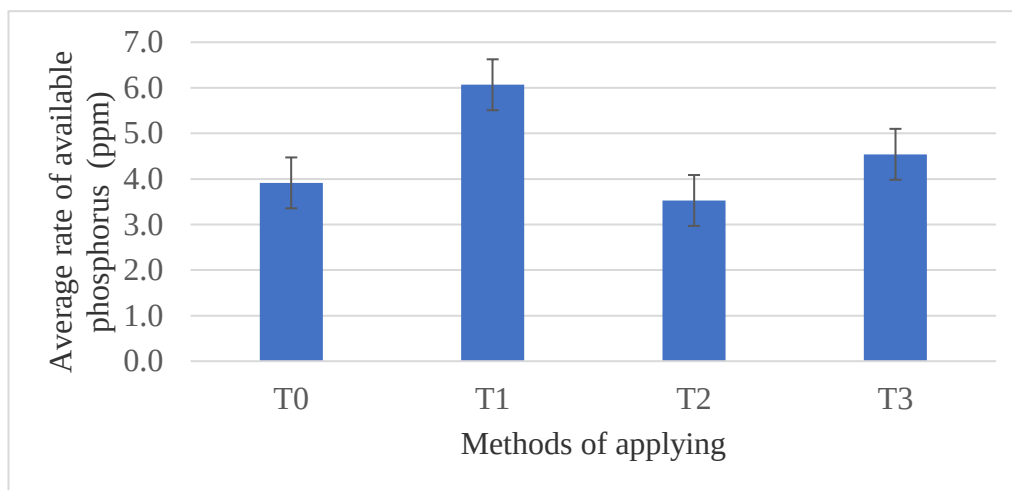


Fig. 3. Effect of « Neyma » compost on the average assimilable phosphorus content of the soil

Legend: T0: Absolute control; T1: 2 t/ha of « Neyma » compost added during ploughing; T2: 2 t/ha of « Neyma » compost applied to the holes 15 days after sowing and T3: 1 t/ha of « Neyma » Compost ploughed in followed by 1 t/ha planted 15 days and ppm: parts per million

During the observations, the analysis of variance (Table 3) revealed no significant difference in the level of available phosphorus in the soils before sowing ($p=0.57$), 45 days after sowing ($p=0.32$) and after harvesting ($p=0.54$). Assimilable phosphorus levels were relatively higher before sowing (6.5 ppm), 45 days after sowing (5.6 ppm) and after harvest (6.1 ppm) when 2 t/ha of « Neyma » compost was spread uniformly during ploughing (T1). In addition, the low level of assimilable phosphorus in the soil varied relatively according to the input methods used during the soil sampling periods. It was obtained in the control soils (T0) before sowing (4.9 ppm), under the application of « Neyma » compost at a dose of 2t/ha to poquets 15 days after sowing (T2) for soil sampling 45 days after sowing (2.1 ppm); then treatments T0 and T2 for soil sampling after harvesting (3.0 ppm).

It can be seen that the sharp drop in the level of assimilable phosphorus in the soil under cultivation was observed under the T2 application method; on the other hand, the slight drop in the level of assimilable phosphorus was observed under the T1 application method. However, the assimilable phosphorus content of the soil was intermediate under the split application of « Neyma » compost at a rate of 1 t/ha spread uniformly during ploughing, followed by 1 t/ha in the stakes 15 days after sowing (T3).

Table 3. Effect of « Neyma » compost application methods on variations in soil phosphorus levels

Input methods	Rate of available phosphorus before sowing (ppm)	Assimilable phosphorus level 45 days after sowing (ppm)	Post-harvest assimilable phosphorus levels (ppm)
T0	4,9	3,8	3,0
T1	6,5	5,6	6,1
T2	5,5	2,1	3,0
T3	5,7	4,1	3,9
Probability	0,57	0,32	0,54
Meaning	I	I	I

Legend: ppm: parts per million; I: insignificant; T0: Absolute control; T1: 2 t/ha of « Neyma » compost added during plowing; T2: 2 t/ha of « Neyma » compost applied to the holes 15 days after sowing and T3: 1 t/ha of « Neyma » Compost ploughed in followed by 1 t/ha planted 15 days

3.2 EDAPHIC PROPERTIES CONTROLLING THE AVAILABILITY OF ASSIMILABLE PHOSPHORUS IN SOILS

The physico-chemical characterisation of the soils showed that the availability of assimilable phosphorus is controlled by numerous edaphic properties (Table 4). Two groups of soil properties were found to control variations in available phosphorus. Firstly, those properties for which an increase in their values leads to a decrease in the level of assimilable phosphorus in the soil, and vice versa.

These interactions are indicated by relatively high negative correlation coefficients. Among these edaphic properties, assimilable phosphorus shows a strongly negative correlation with apparent density ($r = -0.61$), sand content ($r = -0.59$) and cation exchange capacity ($r = -0.69$). On the other hand, there are soil properties for which an increase in their values leads to an increase in the level of assimilable phosphorus in the soil.

These interactions were indicated by highly positive correlation coefficient values. Assimilable phosphorus, however, shows a strong positive correlation with clay ($r = 0.65$), silt ($r = 0.50$), organic matter ($r = 0.55$), pH ($r = 0.57$) and available potassium ($r = 0.80$).

Table 4. Correlation between soil physicochemical properties and available phosphorus

Properties	Da (g/cm ³)	A (%)	L (%)	S (%)	MO (%)	pH	N (ppm)	Pa (ppm)	Kd (ppm)	Fe (ppm)	CEC (méq/ 100 g)
Da (g/cm ³)	1	-0,92	-0,94	0,99	-0,92	-0,43	-0,21	-0,61	-0,51	-0,38	0,70
A (%)	-0,92	1	0,75	-0,90	0,77	0,41	0,30	0,65	0,54	0,23	-0,54
L (%)	-0,94	0,75	1	-0,97	0,92	0,40	0,04	0,50	0,44	0,43	-0,66
S (%)	0,99	-0,90	-0,97	1	-0,92	-0,43	-0,14	-0,59	-0,51	-0,38	0,66
MO (%)	-0,92	0,77	0,92	-0,92	1	0,57	0,32	0,55	0,41	0,54	-0,77
pH	-0,43	0,41	0,40	-0,43	0,57	1	0,41	0,57	0,35	0,43	-0,55
N (ppm)	-0,21	0,30	0,04	-0,14	0,32	0,41	1	0,47	0,30	0,69	-0,30
Pa (ppm)	-0,61	0,65	0,50	-0,59	0,55	0,57	0,47	1	0,80	0,35	-0,69
Kd (ppm)	-0,51	0,54	0,44	-0,51	0,41	0,35	0,30	0,80	1	0,32	-0,36
Fe (ppm)	-0,38	0,23	0,43	-0,38	0,54	0,43	0,69	0,35	0,32	1	-0,364
CEC(méq/100 g)	0,70	-0,54	-0,66	0,66	-0,77	-0,55	-0,30	-0,69	-0,36	-0,36	1

Legend: Pa: available phosphorus; Da: bulk density; OM: organic matter; pH: hydrogen potential; N: total nitrogen; Kd: available potassium; CEC: cation exchange capacity; A: clay; L: silt; S: sand; Fe: total iron; ppm: parts per million; meq: milliequivalent and %: percentage

4 DISCUSSION

4.1 EFFECT OF « NEYMA » COMPOST APPLICATION METHODS ON THE AVAILABILITY AND VARIATIONS IN THE LEVELS OF ASSIMILABLE PHOSPHORUS IN SOILS

The improvement in the soil's assimilable phosphorus content by approximately 21% through the addition of 'Neyma' compost can be explained by its quality and agronomic performance. The work of [29] also found a significant availability of assimilable phosphorus in the soil under the application of compost alone at an average rate of 6.22 ppm which is much higher than that found under the application of « Neyma » compost alone, which is 4.7 ppm. This difference could be explained by the quality of the composts and the doses applied. Some authors have shown that inputs of organic resources can improve soil fertility in terms of available phosphorus ([30], [31]). For [32], the characteristics of phosphorus transfer kinetics from organic compounds to the soil solution can explain the level of available phosphorus in soils. According to [33], assimilable phosphorus is one of the chemical indicators of soil fertility that can vary rapidly over time.

Many authors have also noted that compost is an essential resource for improving the flow of available phosphorus in soils ([34], [29]). The nature of fertilisers and soil management methods are important factors likely to influence soil assimilable phosphorus levels ([35], [36]). According to [34], several mechanisms can explain the availability of assimilable phosphorus in the soil, including the intensity of mineralisation of organic matter, the fixation mechanisms for this element, the nature and quality of the compost used, as well as the nature of the soil and climatic conditions. Similarly, the work of [37] adds that the dose of fertilisers applied contributes to fluctuations in the assimilable phosphorus content of soils.

In soils where no « Neyma » compost has been added, the gradual fall in the level of assimilable phosphorus over time can be explained by continuous export of phosphorus by the cowpea. These results show that the use of tropical soils without exogenous phosphorus sources contributes to their continuous degradation in assimilable phosphorus. However, with the addition of « Neyma » compost, the decrease in the average level of available phosphorus 45 days after sowing, followed by a slight increase after harvesting, can be explained by the use of phosphorus during the intense activity of the microorganisms for the synthesis of their ATP molecules and the release of phosphorus after the death of certain microorganisms after harvesting. Cowpea is a legume capable of fixing atmospheric nitrogen in the soil through its roots, which are equipped with rhizobacteria ([38]; this can create acidic conditions in the soil that can lead to phosphorus precipitation and adsorption by metal oxides in the soil. The very low level of assimilable phosphorus (5.6 ppm) can be a limiting factor for crop growth ([39]). In Burkina Faso soils, many authors have found assimilable phosphorus levels below 15 ppm ([29], [2], [40]). These low levels of assimilable phosphorus can be explained by the nature of the soils and the reactivity of their mineralogical components to fertilisers. For many authors, these soils are deficient in assimilable phosphorus ([41], [42]).

[43] explains the low level of assimilable phosphorus in tropical soils by its energetic adsorption by iron and aluminium oxides, which are present in very large quantities in these soils. However, [32] found 26 ppm of assimilable phosphorus in a soil before cultivation. This difference can be explained by the way the soil was previously used in Côte d'Ivoire soils, studies have found assimilable phosphorus levels ranging from 12 ppm to 71 ppm in soils without any inputs ([44], [45]). Similarly, [46] found assimilable phosphorus levels ranging from 5 to 13 ppm in Benin soils. This difference is thought to be linked to the

nature of the soil and the type of climate likely to favour the alteration and solubility of phosphate materials capable of releasing assimilable phosphorus into the soil solution. It was found that the level of assimilable phosphorus in the soil fell continuously over time under cultivation. This continuous drop in the soil's assimilable phosphorus content could be explained by its continuous uptake by cowpeas, as well as by the mechanisms of fixation by colloids and metallic elements in the soil.

Under cowpea cultivation, the level of available phosphorus in the soil was improved by about 56% by applying « Neyma » compost at a rate of 2 t/ha spread uniformly during ploughing (T1), followed by a split dose of 1 t/ha spread uniformly during ploughing and 1 t/ha applied in patches 15 days after sowing (T3), which increased the soil's available phosphorus by about 15%. This difference shows that the compost dose is an essential factor in improving the level of available phosphorus in the soil. The application of compost at a rate of 2 t/ha to the pots 15 days after sowing (T2) caused a reduction in the level of available phosphorus of less than 10%. This loss of assimilable phosphorus can be explained by the time and intensity of mineralisation of the « Neyma » compost, which would be linked to its quality. Authors have demonstrated that soils contain phosphorus-solubilising bacteria capable of improving the content of assimilable phosphorus in soils ([47]). The application of 2 t/ha of « Neyma » compost during ploughing (T1) and the timing of its application can promote the development of large population of phosphorus-solubilising bacteria, which can improve the flow of available phosphorus in the soil. Furthermore, for compost fractionation (T3), the dose of 1 t/ha at ploughing may be insufficient to stimulate the intense activity of phosphorus-solubilising bacteria. However, the application time for the 2 t/ha dose of compost to the seed holes 15 days after sowing (T2) may be too short to promote the intensity of these bacteria's activity. This may explain the low content of assimilable phosphorus under the T2 application method.

The variable availability of assimilable phosphorus in soils, depending on how compost is added, may also be linked to the intensity of activity of living soil organisms, capable of promoting the decomposition of organic forms of phosphorus ([31]). [48] have shown that soil macrofauna contribute to the improvement of soil richness in assimilable phosphorus. This improvement may be linked to the degradation of organic matter by these living soil organisms, releasing the phosphorus trapped and adsorbed by the latter. The « Neyma » compost has a C/N ratio of 17.5, which complies with international standards (Table 2). « Neyma » compost can be applied as a bottom dressing to take full advantage of its performance in improving the flow of assimilable phosphorus in soils. Numerous studies have shown the effect of organic fertiliser doses on soil phosphorus bioavailability ([48], [49]), but there is still a lack of studies on application dates. Among the input methods, the evaluation of the assimilable phosphorus content of the soils under cowpea cultivation during the observations showed that the available phosphorus rate remained higher before the soils were cultivated and after the harvests in the soils that had received « Neyma » compost at a dose of 2 t/ha spread uniformly during ploughing (T1). On the other hand, it was lower in soils that had received a dose of 2 t/ha in pots 15 days after sowing (T2) during cultivation; then intermediate under the fractionated application of « Neyma » compost (T3). The time and dose at which compost is incorporated into the soil can affect the quality of the soil's organic matter, which can lead to hydration of the soil, which can encourage the dissolution of phosphates. These results show that the availability of assimilable phosphorus in tropical soils can be influenced by the natural richness of these soils in this valuable fertiliser. Fractioning organic fertilisers can help mitigate the decline in soil fertility in terms of available phosphorus. Numerous authors have shown that fluctuations in soil assimilable phosphorus levels reflect land use patterns ([47]). The content of available phosphorus in the soil varied relatively depending on the methods used to apply « Neyma » compost, but no significant differences were found. These results can be explained by the small number of samples.

4.2 EDAPHIC PROPERTIES CONTROLLING THE AVAILABILITY OF ASSIMILABLE PHOSPHORUS IN SOILS

Physico-chemical characterisation of soils has shown that the level of assimilable phosphorus depends on edaphic physico-chemical properties. According to [47], variations in the availability of assimilable phosphorus reflect soil properties and use patterns. The results showed that increasing the bulk density, sand content and cation exchange capacity of the soil leads to low availability of assimilable phosphorus in the soil, and vice versa. A high bulk density and a high sand content in the soil can make the availability of assimilable phosphorus in the soil vulnerable. A high bulk density can reduce the activity of living soil organisms likely to mineralise organic matter to make available assimilable phosphorus. Work by [50] has shown that the level of assimilable phosphorus varies according to the value of bulk density. Similarly, a high sand content can encourage the loss of assimilable phosphorus through leaching or run-off in the event of high rainfall in the agro-ecological zone.

On average, the soil contains a high sand content of 52%. Soil with a high sand content has a high porosity ([51], which is likely to affect the availability of available phosphorus. Work by [6] has shown that a soil with a high sand content is low in available phosphorus. Cation exchange capacity corresponds to the soil's ability to retain exchangeable cationic elements such as potassium, sodium, calcium and magnesium. The results showed a strong negative correlation between cation exchange

capacity and assimilable phosphorus. In fact, a high value for cation exchange capacity resulting in low availability of assimilable phosphorus can be explained by the presence of a large quantity of Ca^{2+} and Mg^{2+} ions, which can precipitate with the available phosphorus in the form of calcium and magnesium phosphates respectively, which are insoluble forms of phosphorus.

The work of many authors has shown that low values of cation exchange capacity lead to high levels of available phosphorus ([52], [46]). Furthermore, work by [53] in western Burkina Faso has shown that low cation exchange capacity values lead to low available phosphorus levels. This difference can be explained by the type of climate, where heavy rainfall can lead to the leaching of exchange bases and the loss of labile phosphorus through run-off. However, there is a strong positive correlation between the levels of clay, silt, organic matter, pH and available potassium, respectively, and the amount of available phosphorus in the soil. High values for these parameters increase the soil's available phosphorus content, and vice versa. Authors have shown that pH is essential for the availability or poverty of assimilable phosphorus in the soil ([54]). A pH close to neutrality leads to maximum availability of assimilable phosphorus in soils ([54]). On the other hand, an acid pH reduces the availability of available phosphorus by increasing phosphorus fixation by metal oxides ([55]). There is a strong positive correlation (0.56) between organic matter and assimilable phosphorus, showing that a high level of organic matter in the soil favours the significant availability of assimilable phosphorus. The same observation has been made in the work of numerous authors ([56]). This correlation can be explained by the capacity of organic matter to adsorb phosphorus and make it available in the soil solution after mineralisation. According to [34], the rate of assimilable phosphorus varies according to the mineralisation of organic matter. In addition to organic matter, numerous studies have shown that the level of available phosphorus in the soil increases with the level of clay and silt ([57], [58], [59]). This correlation could be explained by the capacity of these fine soil particles to adsorb assimilable phosphorus. The cultivation of these soils can lead to a strong fixing power of these particles when the soils contain high levels of clay and silt. It should be noted that this effect can vary depending on the type of clay. Clay and silt can contain iron and aluminium sesquioxides that can bind assimilable phosphorus, where an increase in pH can favour the availability of phosphorus in the soil solution. It can be seen that the level of available phosphorus in the soil also increases with the level of available potassium. This correlation can be explained by the fact that assimilable phosphorus and available potassium are almost equally important for plant nutrition. Similarly, the availability of these two macroelements in the soil can be controlled by the same soil factors. [2] have shown that this correlation increases with depth.

However, other authors have not found a correlation between the rate of available phosphorus and that of available potassium [60]. This difference is thought to be linked to the nature of the fertilisers applied, which are likely to have a variable influence on soil properties.

5 CONCLUSION

The fixation of assimilable phosphorus in soils by metal oxides and the low solubility of phosphate minerals are the main causes of the deficiency of assimilable phosphorus in tropical soils. But the nature, quality and methods of fertiliser application can also affect the availability of assimilable phosphorus. Improving the management of assimilable phosphorus in soils would require fertilisation techniques based on methods of supplying organic sources capable of provoking interactions between soil particles and its phosphorus-fixing capacity, in order to improve its availability. The general objective of this study was to understand the dynamics of assimilable phosphorus in tropical soils as a result of the use of « Neyma » compost, made from biodigester compost enriched with Burkina phosphate under cowpea cultivation. The use of Burkina phosphate and biodigester compost in the production of « Neyma » compost, made from these local substrates, improved the average level of assimilable phosphorus by around 21%. In addition, soil cultivation without the use of « Neyma » compost has led to a steady decline in the assimilable phosphorus content of the soil.

However, the assimilable phosphorus content of the soil was influenced by the way the compost was added. The greatest improvement (56%) in soil available phosphorus was obtained when « Neyma » compost was applied at a rate of 2 t/ha, spread uniformly during ploughing (T1). The assimilable phosphorus content of the soil was higher when the « Neyma » compost was applied at a rate of 2 t/ha during ploughing (T1) and lower when the same rate was applied to the poquets 15 days after sowing. The small number of soil samples affected the significance of the results for the different methods of application under crops. In addition, the study showed that an increase in clay, silt, organic matter, pH and available potassium leads to an increase in the level of assimilable phosphorus in the soil. On the other hand, bulk density, sand and cation exchange capacity are the edaphic parameters whose increased content leads to a decrease in the soil's assimilable phosphorus content, and vice versa. Organic soil fertilisation strategies using plough inputs and managing the degradation of tropical soils would make it possible to improve the availability of assimilable phosphorus and the performance of phosphate fertilisers. The T1 fertilisation method, which improved the soil's assimilable phosphorus content the most, can be used by small and medium-sized producers for sustainable soil management. Indeed, repeating the trial and applying these different fertilisation techniques based on « Neyma » compost to other crops is necessary to better understand the agronomic performance of this organic fertiliser.

DECLARATION OF COMPETING INTERESTS

No competing interests have been reported.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Dr. Mamoudou TRAORE, Mr. Oumarou GJEGUEMDE and Mr. Serge SOMDA; the various focal points respectively of structures such as the Institute of Environment and Agricultural Research of Kamboinsé, the Phosphate Exploitation Company of Burkina and the National Biodigester Program of Burkina for facilitating the acquisition of the basic substrates for 'Neyma' compost. We thank once again Dr. Mamoudou TRAORE for his critical review of the intellectual content of the article; as well as Professor Hassan Bismarck NACRO for his constructive comments.

REFERENCES

- [1] G. Barroin, «Phosphore, azote et prolifération des végétaux aquatiques,» *Courr. l'Environnement l'INRA*, vol. 48, pp. 13–25, 2003.
- [2] Z. SEGDA, P. L. YAMEOGO, A. MANDO, S. KAZUKI, M. C. S. WOPEREIS, and M. P. SEDOGO, «Le phosphore limite-t-il la production intensive du riz dans la plaine de Bagré au Burkina Faso ?,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 8, no. 6, pp. 2866–2878, 2014, doi: 10.4314/ijbcs.v8i6.43.
- [3] M. Yoni, V. Hien, L. Abbadie, and G. Serpantié, «Dynamique de la matière organique du sol dans les savanes soudaniennes du Burkina Faso,» *Cah. Agric.*, vol. 14, no. 6, pp. 525–532, 2005.
- [4] Z. Bassolé, I. P. Yanogo, and F. T. Idani, «Caractérisation des sols ferrugineux tropicaux lessivés et des sols bruns eutrophes tropicaux pour l'utilisation agricole dans le bas-fond de Goundi-Djoro (Burkina Faso),» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 17, no. 1, pp. 247–266, 2023, doi: 10.4314/ijbcs.v17i1.18.
- [5] V. Zoma, F. Kaboré, and A. Kindo, Endogène des Sols du Village de Safané au Burkina Faso Geography Caractérisation Morpho-pédologique et Perception Endogène des Sols du Village de Safané au Burkina Faso. 2023.
- [6] V. Kotchi, K. A. Yao, and S. Diatta, «Réponse de cinq variétés de riz à l'apport de phosphate naturel de Tilemsi (Mali) sur les sols acides de la région forestière humide de Man (Côte d'Ivoire),» *J. Appl. Biosci.*, vol. 31, pp. 1895–1905, 2010.
- [7] D. Dakouo, «Effets des types de sol et de la topographie sur l'absorption des ions K⁺ par le cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) dans les agro-systèmes soudano-sahéliens de l'Ouest du Burkina Faso.,» *Thèse Dr. en Agro-pédologie (Nutrition des plantes) l'Université Félix Houphouët-Boigny Cocody la République Côte d'Ivoire*, p. 249 p., 2012.
- [8] C. MULAJI, P. DISA-DISA, I. KIBAL, and M. CULOT, «Diagnostic de l'état agropédologique des sols acides de la province de Kinshasa en république démocratique du Congo (RDC),» *Comptes Rendus Chim.*, vol. 19, no. 7, pp. 820–826, 2016, doi: 10.1016/j.crci.2015.08.010.
- [9] M. Taoufik, S. Kemmou, L. L. Idrissi, and J. E. Dafir, «Comparaison de deux méthodes de spéciation du phosphore dans des sédiments de la partie aval du bassin Oum Rabiaa (Maroc) Comparison of Two Methods for the Fractionation of Phosphorus from Sediments of the Lower Oum Rabiaa Basin (Morocco),» *Water Qual. Res. J. Canada*, vol. 39, no. 1, pp. 50–56, 2004.
- [10] W. K. Chouti, W. Atchichoe, L. Tometin, and M. Daouda, «Biodisponibilité et mobilité du phosphore des sédiments de la lagune de Porto-Novo,» *J. Appl. Biosci.*, vol. 114, pp. 11276–11288, 2017, doi: 10.4314/jab.v114i1.1.
- [11] FAO, «Standard operating procedure for soil available phosphorus, Bray I and Bray II method. Rome.,» 2021.
- [12] P. M. Vitousek, S. Porder, B. Z. Houlton, and O. A. Chadwick, «Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions,» *Ecol. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 5–15, 2010, doi: 10.1890/08-0127.1.
- [13] M. Cheng and J. Jin, «KINETICS OF POTASSIUM ADSORPTION IN SELECTED SOILS FROM NORTHERN CHINA [J],» *J. Plant Nutr. Fertil.*, vol. 5, no. 3, pp. 214–220, 1999, doi: DOI: 10.11674/zwylf.1999.0303.
- [14] J. E. OHAERI and E. T. ESHETT, «Phosphorus Forms and Distribution in Selected Soils Formed Over Different Parent Materials in Abia State of Nigeria,» *Agro-Science J. Trop. Agric. Food, Environ. Ext.*, vol. 10, no. 3, pp. 28–37, 2011, doi: 10.4314/as.v10i3.4.
- [15] M. KVAKIC *et al.*, «Quantifying the limitation to world cereal production due to soil phosphorus status,» *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 32, pp. 143–157, 2018, doi: 10.1002/2017GB005754.
- [16] S. A. A. E. Kouakou, A. J. Bongoua-Devisme, K.-K. H. Kouadio, A. D. Bi Gouze, and F. M. L. Bahan, «Effets combinés de la roche phosphatée du Maroc et de fertilisants chimiques sur la dynamique du phosphore dans le sol : cas des parcelles rizicoles de Man, Ouest de la Côte d'Ivoire,» *Afrique Sci.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–13, 2024.

- [17] E. Compaoré, J.-Y. Grimal, J.-L. Morel, and J.-C. Fardeau, «Efficacité du phosphate naturel de Kodjari (Burkina Faso),» *Cah. Agric.*, vol. 6, no. 5, pp. 251–255, 1997.
- [18] F. Lompo, Z. Segda, Z. Gnankambary, and N. Ouandaogo, «Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de pailles de maïs,» *Tropicultura*, vol. 27,2, pp. 105–109, 2009.
- [19] M. S. Ousmane, A. Zanguina, S. Tchegueni, S. Laouali, N. Dan Lamso, and I. Natatou, «Étude de la solubilisation des phosphates naturels de Tahoua (Niger) au cours de la biodégradation des résidus agroalimentaires,» *Afrique Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 179–189, 2017, [Online]. Available: <http://www.afriquescience.info>.
- [20] J. Sawadogo, P. J. d'Arc Coulibaly, B. Traore, J. P. Ouedraogo, A. Diarra, and J. B. Legma, «Caractérisations physico-chimiques d'un sol hydromorphe amendé par un biofertilisant dans un système de culture à base de cucurbitacées au Burkina Faso,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 16, no. 5, pp. 2457–2469, 2022, doi: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v16i5.50>.
- [21] M. Blanchard, K. Coulibaly, S. Bognini, P. Dugué, and É. Vall, «Diversité de la qualité des engrais organiques produits par les paysans d'Afrique de l'Ouest : quelles conséquences sur les recommandations de fumure ?,» *Biotechnol. Agron. Société Environ.*, vol. 18, no. 4, pp. 512–523, 2014.
- [22] L. ZERBO, «Caractérisation Des Sols Des Station de Recherche de l'INERA. INERA, Cellule de Teledetection et SIG.,» p. 195 p., 1995.
- [23] BUNASOLS, «État de connaissance de la fertilité des sols au Burkina Faso,» *Doc. Tech.*, vol. N° 1, 1985.
- [24] AFNOR, «Determination of pH. AFNOR Soil quality : Paris.,» pp. 339–348, 1999.
- [25] AFNOR, «Standardisation files, - ISSN 0297-4827, ISBN 2-12-484221-8 : 130,85 F HT.,» p. 159 p., 1987.
- [26] A. Walkley and I. A. Black, «An Examination of the Degtjareff Method for determining soil organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method.,» *Soil Sci.*, vol. 37, p. 29–38., 1934. doi: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
- [27] R. H. Bray and L. T. Kurtz, «Determination of Total Organic and Available Forms of Phosphorus in Soils., '» *Soil Sci.*, vol. 59, pp. 39–45, 1945, doi: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>.
- [28] I. Walinga, W. Van Vark, V. J. G. Houba, and J. J. Van der Lee, «Soil and plant analysis, part 7: Plant analysis procedures. Wageningen, the Netherlands: Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen, Agricultural University.,» p. 263 p., 1989.
- [29] J. Ouedraogo, H. B. Nacro, E. Ouedraogo, S. Youl, and M. P. Sedogo, «Amélioration de la disponibilité du phosphore par la gestion de la macrofaune du sol : cas d'un lixisol en zone semi-aride du Burkina Faso,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 8, no. 4, pp. 1838–1846, 2014, doi: 10.4314/ijbcs.v8i4.41.
- [30] Y. U. Sikuzani, T. M. Mwamba, J. Lwalaba, and M. Assani, «Amélioration de la qualité des sols acides de Lubumbashi (Katanga, RD Congo) par l'application de différents niveaux de compost de fumiers de poules,» no. March 2022, 2014, doi: 10.4314/jab.v77i1.3.
- [31] A. Sanon *et al.*, «Caractéristiques chimiques d'un lixisol sous les effets synergiques de biodéchets et de fertilisants minéraux dans la zone Sud- Soudanienne du Burkina Faso,» *Int. J. Dev. Res.*, vol. 11, no. 7, pp. 48668–48673, 2021, doi: <https://doi.org/10.37118/ijdr.21950.07.2021>.
- [32] F. Lompo *et al.*, «Effets à long terme des fumures minérales et organo-minérales sur la dynamique du phosphore dans un lixisol au Burkina Faso.,» *Agron. Africaine*, vol. 20, no. 2, pp. 165–178, 2008.
- [33] L. Levard, M. Bertrand, and P. Masse, «Mémento Pour L'Évaluation De L'Agroécologie,» p. 133, 2019, [Online]. Available: <https://www.gret.org/publication/memento-pour-levaluation-de-lagroecologie/>.
- [34] A. Etsè *et al.*, «Etude de la disponibilité du phosphore assimilable des composts de déchets urbains dans deux sols différents,» *Eur. Sci. J. ESJ*, vol. 10, no. 6, pp. 156–167, 2014.
- [35] J. Ouedraogo, «Impacts de la macrofaune et de modes de gestion de la fertilité des sols sur quelques propriétés du sol et le rendement des cultures en zone semi-aride,» *Thèse Dr. en Sci. du Sol l'Université Polytech. Bobo-Dioulasso*, p. 138 p., 2015.
- [36] B. Traore, M. Traore, S. Birba, H. B. Nacro, P. S. Sarr, and B. Ouattara, «Short-term effect of calcined phosphate rock on soil macrofauna diversity and abundance in lixisol in a semi-arid area of Burkina Faso,» *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol. 39, no. 2, pp. 655–666, 2023.
- [37] B. B. Somda *et al.*, «Détermination des doses optimales de fumures organo-minérales en microdose dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 670–683, 2017, doi: 10.4314/ijbcs.v11i2.11.
- [38] I. Y. Dugje, L. O. Omoigui, F. Ekeleme, A. Y. Kamara, and H. Ajeigbe, «Farmers' Guide to Cowpea Production in West Africa. IITA, Ibadan, Nigeria.,» p. 20 p., 2009.
- [39] S. Vanek, S. Fonte, Z. Mawusi, I. Amsellem, and J. Abt, «Manuel d'évaluation de la santé des sols Projet transversal sur les sols Communauté de pratique d'Afrique de l'Ouest. Fondation McKnight. Version 6.4,» 2020.
- [40] K. Coulibaly, «Perception Paysanne des Techniques de Conservation des Eaux et des Sols et de Défense et Restauration des sols (CES / DRS) en Afrique de l'Ouest : cas du Burkina Faso et du,» 2022, doi: 10.19044/esj.2022.v18n27p121.

- [41] F. Bearnart and D. Bitondo, «A simple and Practical Method to Evaluate Analytical Data of Soil Profiles. CUDs, Soil Science Department. Belgia Cooperation Dschang Cameroon,» p. 65p., 1992.
- [42] P. Dugué, E. Roose, and L. Rodriguez, «L 'aménagement de terroirs villageois et l 'amélioration de la production agricole au Yatenga (Burkina Faso): Une expérience de recherche-développement,» *Cah. Orstom, Série Pédologie*, vol. XXVIII, no. 2, pp. 385–402, 1993.
- [43] B. Dabin, «Application des dosages automatiques à l'analyse des sols,» *Cah. ORSTOM série Pédologie*, vol. 5, no. 3, p. 286 p., 1967.
- [44] POTASSIUM AND PHOSPHORUS : FERTILISATION EFFECT. 2000.
- [45] W. H. Kpan *et al.*, «Combined effect of phosphate rock and chemical fertilizers on agronomic parameters of rainfed rice in three agro-ecological zones of Côte d'Ivoire,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 17, no. 7, pp. 2984–2997, 2023, doi: 10.4314/ijbcs.v17i7.29.
- [46] I. Amonmide, G. Dagbenonbakin, C. E. Agbangba, and P. Akponikpe, «Contribution à l'évaluation du niveau de fertilité des sols dans les systèmes de culture à base du coton au Bénin,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 1846–1860, 2019.
- [47] A. A. Khan, G. Jilani, M. S. Akhtar, S. S. M. Naqvi, and M. Rasheed, «Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their Role in Crop Production,» *J. Agric. Biol. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 48–58, 2009.
- [48] J. OUEDRAOGO, H. B. NACRO, E. OUEDRAOGO, S. YOU, and M. P. SEDOGO, «Amélioration de la disponibilité du phosphore par la gestion de la macrofaune du sol : cas d 'un lixisol en zone semi-aride du Burkina Faso,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 8, no. 4, pp. 1838–1846, 2014, doi: DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i4.41>.
- [49] B. B. SOMDA *et al.*, «Détermination des doses optimales de fumures organo-minérales en microdose dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 670–683, 2017, doi: 10.4314/ijbcs.v11i2.11.
- [50] A. Kangela Matazi, W. Zirhahwakingwa Munyahali, L. Cizungu Ntaboba, and B. Rukiranuka, «Adsorption du phosphore dans les sols plus exploités dans le territoire de Walungu à l'Est de la République Démocratique du Congo,» *Afrique Sci.*, vol. 18, no. 3, pp. 155–170, 2021.
- [51] J. Chretien and G. Pedro, «Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques Cas des terrasses alluviales de la Saône,» *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. 23, no. 1, pp. 43–54, 1987.
- [52] D. Bambara, D. B. Ouédraogo, H. B. Nacro, and M. P. Sedogo, «Evaluation de la productivité céréalière des sols en zone semi-rurale: cas des villages de la zone du projet aéroportuaire de Donsin, Burkina Faso,» *Afrique Sci.*, vol. 13, no. 5, pp. 197–209, 2017.
- [53] B. Bacye, H. S. Kambire, and A. S. Some, «Effets des pratiques paysannes de fertilisation sur les caractéristiques chimiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé en zone cotonnière à l'Ouest du Burkina Faso,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 13, no. 6, pp. 2930–2941, 2019.
- [54] P. Ryant, P. Škarpa, L. Detvanová, and L. Taušová, «The Effect of Limestone and Stabilized Nitrogen Fertilizers Application on Soil pH Value and on the Forage Production of Permanent Grassland,» *Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun.*, vol. 64, no. 4, pp. 1239–1244, 2016, doi: 10.11118/actaun201664041239.
- [55] D. Corbett, D. P. Wall, M. B. Lynch, and P. Tuohy, «The influence of phosphorus application and varying soil pH on soil and herbage properties across a range of grassland soils with impeded drainage,» *J. Agric. Sci.*, vol. 160, pp. 516–527, 2022, doi: 10.1017/S0021859622000363.
- [56] B. Dume, D. Ayele, A. Regassa, and G. Berecha, «Improving available phosphorus in acidic soil using biochar,» *J. Soil Sci. Environ. Manag.*, vol. 8, no. 4, pp. 87–94, 2017, doi: 10.5897/jssem2015.0540.
- [57] E. Frossard, M. Brossard, C. Feller, and J. Rouiller, «Pouvoir fixateur vis à vis des ions phosphate de sols tropicaux à argile 1: 1,» *Can. J. Soil Sci.*, vol. 72, pp. 135–143, 1992.
- [58] E. Temgoua, H. Ntangmo Tsafack, H.-R. Pfeifer, and T. Njine, «Teneurs en éléments majeurs et oligoéléments dans un sol et quelques cultures maraîchères de la ville de dschang, cameroun,» *African Crop Sci. J.*, vol. 23, no. 1, pp. 35–44, 2015.
- [59] Y. A. Hamoud *et al.*, «Increasing soil clay content increases soil phosphorus availability and improves the growth, physiology, and phosphorus uptake of rice under alternative wetting and mild drying irrigation,» *Environ. Technol. Innov.*, vol. 35, p. 103691, 2024, doi: 10.1016/j.eti.2024.103691.
- [60] B. Traore *et al.*, «Effet de micronutriments et de nutriments secondaires sur la production du mil et du sorgho en Zone nord soudanienne du Burkina Faso,» *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 15, no. 5, pp. 1902–1913, 2021. doi: 10.4314/ijbcs.v15i5.17.

From Plastic Waste to Employment Opportunities for Youth and Urban Sanitation in Bukavu

Benjamin Aganze Marhegane¹, Josias Aganze Kaneza¹, Irène Furaha Kangu², Mireille Mugaliya Bulonza¹, Clarisse Mubagwa Bachunve³, and Jean-Pierre Cirimwami Kashangabuye³

¹Regional Planning Department, Institut Supérieur de Développement Rural de Bukavu, Bukavu, RD Congo

²Faculty of Economics and Management Sciences, Université Catholique de Bukavu, Bukavu, RD Congo

³Social Organization Department, Institut Supérieur de Développement Rural de Bukavu, Bukavu, RD Congo

Copyright © 2026 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 examines the sustainability of local initiatives for the valorization of plastic waste in Bukavu and their impact on youth employment creation as well as urban sanitation. For several decades, the city has faced major challenges related to poor plastic waste management, undermining urban quality of life and threatening aquatic ecosystems. In a context where plastic waste is increasingly perceived as a resource, the study draws on 34 semi-structured interviews and observations conducted with stakeholders involved in the plastic recycling value chain. The findings reveal that many youth-led organizations and enterprises are engaged in the collection, disposal, and transformation of plastic waste. Their initiatives range from manufacturing utilitarian products from recycled materials to offering training on waste management and sanitation. These efforts have led to the creation of several green jobs, thereby contributing to the improvement of the city's cleanliness. However, these initiatives remain fragile due to multiple challenges hindering their long-term sustainability. Grounded in the theory of the circular economy, the study recommends the establishment of an innovative ecosystem that fosters collaboration among all stakeholders in the sector. Such a framework would help optimize the benefits of plastic waste valorization, create more green jobs for young people, and sustainably improve urban sanitation in Bukavu.

KEYWORDS: valorization, plastic waste, green jobs, youth, urban sanitation, circular economy, Bukavu.

1 INTRODUCTION

Over the past ten decades, many countries have recorded remarkable progress in socio-cultural and economic development on the African continent [1, 2]. Nevertheless, the issue of waste management and sanitation in urban areas remains a pressing challenge. Very often linked to the inefficiency of urban sanitation public policies, the existing institutional framework, as well as limited access to financing [3], this issue constitutes one of the major obstacles to sanitation and the development of African cities. Furthermore, rapid urbanization, population growth, increasing economic activity, and the lack of waste management strategies at national and local levels [4] highlight the urgency of adopting sustainable solutions to improve quality of life.

However, over the past twenty years, numerous waste valorization initiatives have been developed and implemented across the African continent. The objective has been to promote entrepreneurship, combat youth unemployment, improve urban sanitation, and strengthen resilience to environmental concerns. Although African youth entrepreneurship is perceived as a driver for job creation, several challenges remain to be addressed to achieve this, notably access to financing, adequate training, and regulatory obstacles [5]. Analyses conducted by numerous regional and international organizations on employment and youth trends in African countries present entrepreneurship as a viable alternative for their socio-professional integration [6, 7, 8]. However, this requires a favorable environment, including improved public policies, capacity building for youth, and facilitation of their access to markets [5].

In many African cities, numerous young entrepreneurs, through their startups, are engaged in the plastic waste value chain. Since then, plastic waste has become a concern that interests almost everyone. Previously perceived as a threat to human health and aquatic ecosystems [9], their valorization now constitutes a real lever for youth employment opportunities and sustainable sanitation in African urban areas. In Cameroon, Côte d'Ivoire, and other African countries, young people and their startups play a decisive role in creating green jobs. In addition to implementing different waste management methods [10], they revalue it, notably through recycling and transforming it into useful products [11]. Therefore, proper training for young people enabling them to access new opportunities [12] as well as support for their initiatives through economic incentives and favorable public policies [10], prove necessary to develop a competitive market.

In the Democratic Republic of Congo, various initiatives led by youth startups and supported by public and private institutions have been implemented in several cities in response to urban unsanitary conditions and the challenges young people face in accessing employment. Thus, in 2018, three innovative plastic waste recycling projects, including Congo Clean, I-Bopeto, and Wastcycl, were awarded by the United Nations Development Programme [13]. Furthermore, many other ongoing initiatives led by young people in cities across the Democratic Republic of Congo illustrate the potential of youth entrepreneurship in sustainable waste management and the creation of green jobs. In the city of Bukavu, nearly 900 tons of waste are produced daily, half of which consists of plastic waste [14, 15]. Due to the lack of adequate recycling infrastructure and effective urban sanitation public policies, this plastic waste has exacerbated urban unsanitary conditions. Therefore, to address institutional gaps in urban sanitation and youth professional integration, the involvement of local associations as well as youth startups in plastic waste recycling appears timely [16]. In the context of the city of Bukavu, this approach has enabled young entrepreneurs, through their startups, to create green job opportunities while improving urban cleanliness.

Yet, the initiatives of young people in Bukavu regarding waste valorization and urban sanitation, although significant, are not sustainable given the financial, institutional, and training-related challenges. This study aims to evaluate how the transformation of plastic waste can be optimized to create more sustainable employment opportunities for young people and improve urban sanitation in the city of Bukavu. Drawing on the theoretical framework of the circular economy, the study provides an overview of the waste management issue in Bukavu. It describes innovative initiatives that transform plastic waste into green job opportunities for young people while contributing to the sanitation of the city. It also highlights the challenges faced by the actors of plastic waste valorization initiatives and proposes strategic levers to ensure the sustainability of these initiatives.

2 STUDY AREA AND METHOD

2.1 STUDY AREA

The study was conducted in the city of Bukavu, located in the eastern part of the Democratic Republic of Congo, between 2°28' and 2°32' South latitude and 28°48' and 28°52' East longitude. Officially recognized as a city by ordinance-law No. 12/357 of September 6, 1958, Bukavu covers an area of 60 km² [17] and shares its boundaries with Lake Kivu to the north, the Kabare territory to the south and west, as well as with Rwanda through the Ruzizi River in its eastern part [18].

Bukavu benefits from a temperate tropical climate thanks to its mountainous relief, with an average temperature of 20°C. The city of Bukavu is administratively divided into three communes: Kadutu, Ibanda, and Bagira (figure 1). Over the past few decades, its population, mainly composed of the Bashi tribe, has increased dramatically. Between 2015 and 2022, it is estimated to have grown from 1 million to 1.5 million inhabitants [19]. Over the years, this rapid and uncontrolled population growth has generated numerous social, economic, and environmental challenges for the city.

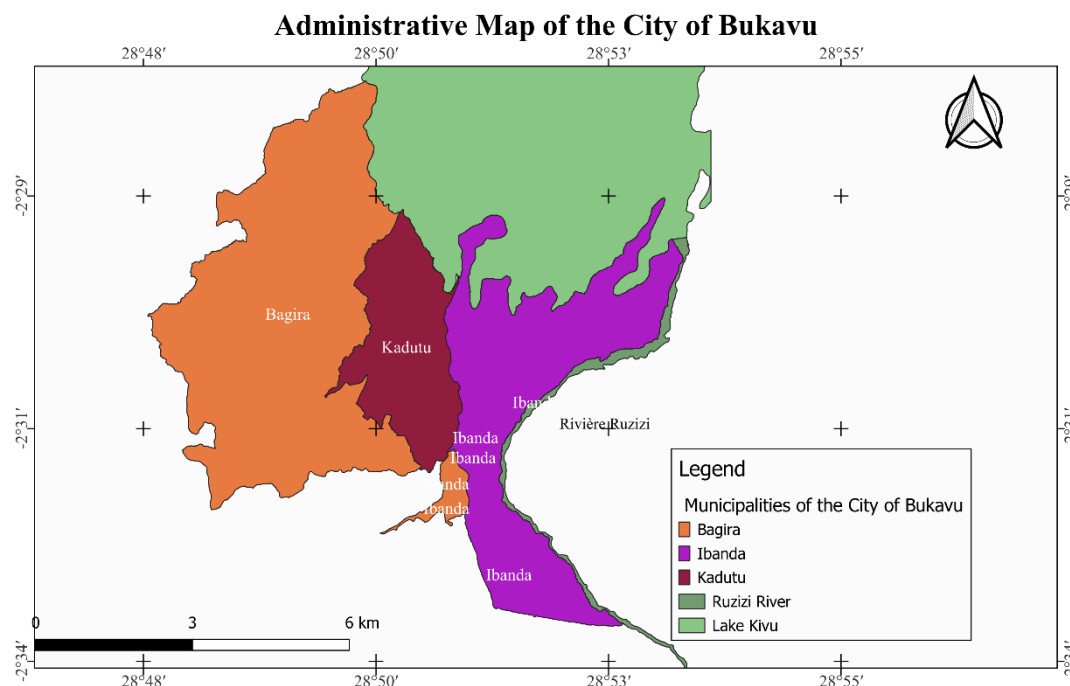


Fig. 1. Map of the City of Bukavu and Its Administrative Boundaries

Source: Authors, 2025

2.2 DATA COLLECTION AND ANALYSIS

To achieve its objectives, the study used a qualitative approach. This approach, through the experiences and perspectives of the participants, allowed for a better understanding and explanation of the studied topic [20]. In addition, it facilitated the development of concepts to grasp the sustainable opportunities for plastic waste valorization in the context of the city of Bukavu.

Indeed, using an interview guide, semi-structured interview sessions were conducted with various actors involved in the plastic waste value chain in Bukavu, notably the managers and members of companies and associations specialized in the collection and valorization of plastic waste, young plastic waste collectors, as well as municipal authorities and civil society actors. The selection of participants for the interview sessions was based on three main criteria: (i) residing in Bukavu for more than 5 years, (ii) being involved in one of the links of the plastic waste value chain in Bukavu, (iii) being a public or civil society actor participating in urban sanitation efforts in Bukavu. Each interview lasted an average of 30 minutes, conducted at the participants' workplaces, and primarily focused on themes related to local initiatives implemented by young entrepreneurs and their startups to transform plastic waste into green job opportunities, the challenges faced in implementing these initiatives, as well as strategic levers to optimize the benefits of these initiatives for sustainable urban sanitation in Bukavu.

A total of 36 semi-structured interviews were conducted in the three communes of the city of Bukavu: 4 representatives of municipal authorities (one per commune: Kadutu, Ibanda, and Bagira) as well as one at the Bukavu City Hall, 23 representatives of companies and associations involved in the collection and valorization of plastic waste in Bukavu, 5 young plastic waste collectors, and 4 civil society actors from the city of Bukavu.

In addition to the semi-structured interviews, observations were carried out at several sites in the three communes of Bukavu. Accompanied by photographs, the observations primarily focused on habits and urban policies regarding plastic waste management in Bukavu.

After recording and transcribing the interviews using Microsoft Word 2019, the data were systematically cross-checked. Based on these elements, information regarding the current issues of waste management in Bukavu, local initiatives transforming waste into green job opportunities for young people in Bukavu, as well as the challenges faced by young entrepreneurs in implementing these initiatives, were evaluated. Finally, the strategic levers to optimize the benefits of these

initiatives for green jobs and urban sanitation in Bukavu were interpreted based on the responses of the actors in the plastic waste value chain interviewed in Bukavu. Their opinions were summarized in the form of verbatim quotes

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 THE ISSUE OF WASTE MANAGEMENT IN BUKAVU

To address urban unsanitation and the challenges related to the provision of basic services, several initiatives have been undertaken in the city of Bukavu.

Interviews conducted with representatives of urban authorities at the City Hall and in the different communes of Bukavu (Kadutu, Ibanda, and Bagira) revealed that the challenges in urban sanitation faced by the city of Bukavu have existed for several decades. These challenges are fueled by the population's irresponsible habits regarding waste management and the low involvement of urban authorities. In this regard, a municipal authority representative stated: "...it is easy to say today that we have already become accustomed to living with waste, in an environment that exposes us to health risks and threatens the environment due to our non-ecological habits in managing the waste we produce..."

In the same vein, he added: "...certainly, some decisions have been made at the Bukavu City Hall, and actions have been carried out on the ground by the Urban Authority to sanitize the city, notably through the installation of trash bins on urban streets, facilitating household waste collection by associations operating in this sector and assigning them according to the respective communes, neighborhoods, and avenues, establishing partnerships with private companies for the evacuation of waste produced in Bukavu, as well as imposing community work known as "Salongo" every Saturday. Nevertheless, all these actions have not effectively solved the issue of unsanitation, as they have either been resisted by the population or not followed up over the long term by public authorities,..."

Furthermore, at the commune level in the city of Bukavu, several other actions aimed at city sanitation have been undertaken. According to the representatives of the commune authorities interviewed: "...at the commune level, we follow the guidance of the City Hall and work directly with local authorities, notably the neighborhood and avenue chiefs as well as other leaders. Regarding sanitation, we engage in daily discussions with them, and their views have always been taken into account. Nevertheless, actions such as the imposition of community work still lack accompanying measures to encourage households to comply,..."

Indeed, the issue of solid waste management arises in several cities of the Democratic Republic of Congo. In 2015, the daily production of solid waste was estimated at 10,000 tons in the city of Kinshasa. This high production of waste was exacerbated by the lack of adequate infrastructure, rapid urban growth, and a very weak organization of the system for collecting and recycling the solid waste produced in the city [21].

According to the environmental civil society actors interviewed: "...the issue of unsanitary conditions in Bukavu, which has persisted for several decades, particularly that caused by plastic waste, is mainly linked to the lack of will on the part of urban authorities, who fail both to establish favorable conditions for the creation of waste management infrastructure and to organize the actors, notably associations and companies, involved in the collection, disposal, and valorization of waste in the city. It should be noted that, currently, in many African cities, waste constitutes a source of job creation. However, in Bukavu, this sector is not yet seriously exploited, and its opportunities are not seized because, to a large extent, urban authorities themselves constitute an obstacle to initiatives in this direction,..." Furthermore, they added: "...several associations and companies involved in the collection, disposal, and even transformation of waste in Bukavu still escape the control of the City Hall and the communes. As a result, many of these companies, through their practices, such as the absence of proper landfills to sustainably dispose of collected waste, further reinforce the unsanitary conditions in the city,..."

All these combined factors have led to a vicious cycle with no solution regarding waste management and urban sanitation in Bukavu. Despite the efforts undertaken by the City Hall and the communes, the city of Bukavu currently produces approximately 900 tons of waste each day [14]. Caritas Development Bukavu estimates that half of this waste consists of plastic waste [15]. In response to this issue, and in addition to the efforts of the City Hall and the communes, several associations and companies in Bukavu are involved either in the collection and disposal or in the valorization of waste. The table below presents a non-exhaustive list of these associations:

Table 1. Associations and companies involved in waste collection and disposal in Bukavu

No.	Acronyms	Names
1	AJAPE	Association des Jeunes pour l'Assainissement et la Protection de l'Environnement
2	AJAPDC	Association des Jeunes Engagés au Projet de Collecte des Déchets
3	AEPCO Asbl	Association pour l'Encadrement des Paysans au Congo
4	AFRISEL	Afrique Solidarité
5	AGDD Services Sarl	Action Global pour le Développement Durable
6	CAPG	Centre Africain de Paix et Gouvernance
7	CUDA Asbl	Communauté Unie pour le Développement et l'Assainissement
8	GCO	Groupe Ciel Ouvert
9	Elikya Group Sarl	Elikya Group Sarl
10	FAWEL Sarl	First African Company for Well Being
11	FSDD	Femme et Environnement Sain pour le Développement Durable
12	HYANI	HYANI
13	Les Bons Samaritains	Les Bons Samaritains
14	PGDM - PEMEPHEA	Programme de Gestion des Déchets Ménagers / Ville de Bukavu
15	Plastycor	Plastycor
16	SAV	Sauvons Notre Avenir
17	TGS	Groupe Ciel Ouvert
18	SMAM	Service Médical pour l'Accompagnement des Malades
19	GAT	Groupe Avenir pour Tous

Source: Synergy of Sanitation Organizations / Synergie des Organisations d'Assainissement en RDC (SOA-DRC), 2025

In addition to these associations and companies grouped within the Synergy of Sanitation Organizations in the Democratic Republic of Congo (SOA-DRC), several others such as Briquette du Kivu, Agruni, Kivu Tech, Charity, Groupe Ebene, FESDO, GASD, PAFEV, SATCD, REDC, VPGC, Kasongo Service, Wa Kongo, SOS Déchet, FDA Group, SJD, Bukavu Safi, Kivu Innova, Dynamique Femmes de Bagira, Service poubelles, etc. also operate in the collection, removal, and valorization of waste in Bukavu, thereby contributing to job creation for youth and improving urban sanitation.

3.2 INITIATIVES TRANSFORMING PLASTIC WASTE INTO EMPLOYMENT OPPORTUNITIES AND SANITATION IN BUKAVU

Many organizations are involved in urban sanitation in Bukavu, notably through the collection, removal, and valorization of waste. Some of these organizations are primarily responsible for collecting waste from households in neighborhoods and avenues, as well as transporting it to landfills. Other associations and companies focus on the collection and valorization of this waste. The table below presents a non-exhaustive list of companies involved in the valorization of plastic waste in Bukavu.

Table 2. Associations and Companies Involved in Plastic Waste Valorization in Bukavu

No.	Acronyms	Names
1	Plastycor	Plastycor
2	FAD Group	Full Developpement Agency
3	Kivu Tech	Kivu Tech
4	SAV	Sauvons Notre Avenir
5	Briquette du Kivu	Briquette du Kivu
6	BYL	Bright Young Leaders
7	CDJP	Commission Diocésaine Justice et Paix
8	SOS Déchet	SOS Déchet
9	OFAC	Once For All Company
10	Bukavu Safi	Bukavu Safi

Source: List prepared by the authors based on the impact of companies in the city of Bukavu

Many initiatives transforming plastic waste into employment opportunities and urban sanitation, led by youth startups, are visible in Bukavu. These initiatives have led to the implementation of local technologies that valorize previously neglected plastic waste by transforming it into useful products for the population.

Indeed, according to interviews conducted with young entrepreneurs, managers, and members of these startups, it was observed that for many young people, plastic waste represents raw material, gold in the trash, which currently attracts great interest. According to a company manager: "...based on the experience gained in West African countries, my colleagues and I quickly realized that Bukavu offers numerous opportunities for creating green jobs that can help support large numbers of unemployed youth. The residents of Bukavu produce hundreds of tons of plastic waste every day. Effective management of this waste would improve urban sanitation and youth support..." Continuing his reflection, he added: "...due to the lack of public policies for urban waste management in Bukavu, about two-thirds of this daily-produced waste ends up in Lake Kivu. The rest is easily visible on the streets and in drainage channels. Yet all this waste should be properly managed and valorized. It was based on this observation that the idea of establishing our company was born, in order to transform part of this waste into construction materials, and it works..."

Another entrepreneur stated: "...plastic waste recycling in Bukavu is an opportunity (Kop) that only those who have tried it are exploiting and benefiting from. Personally, after my studies, I ventured into plastic waste recycling, and after a few years, I became a supplier of clean plastic bottles for several entrepreneurs producing local beverages in Bukavu and its surroundings. Initially, I did not invest much money: it was a small, even negligible investment to get started. But currently, my company employs nine young people. It has the capacity and ability not only to provide these services but also to transform plastic waste into decorative items such as pots and flower bouquets, bracelets, and various types of seats made from plastic bottles..."

Other actors noted: "...currently, many young people in the city of Bukavu have become aware of the gold contained in our trash and the employment and urban sanitation opportunities it offers. That is why many no longer wait for funding from NGOs or public institutions to launch their startups in the plastic waste valorization sector..."

According to interview participants, the initiatives enabling the transformation of plastic waste into employment opportunities and urban sanitation in Bukavu can be grouped into two categories: those related to valorizing plastic waste into useful products and those concerning support for Bukavu's population in terms of education and capacity building. Indeed, thanks to the valorization of plastic waste into useful products, young entrepreneurs in Bukavu and their startups have succeeded in bringing to the local market a wide range of products derived from the transformation of plastic waste.

Just like in many African cities, plastic waste valorization offers opportunities across various sectors. In construction, valorizing plastic waste mixed with by-products from the wood industry improves the performance of produced materials, opening the way for new applications in building [22]. In addition, low-density plastic waste, through a simple recycling method, can be transformed into a binder for the manufacture of road and flooring materials [23].

In Bukavu, some youth-led startups specialize in transforming plastic waste into construction materials, such as eco-friendly paving stones and prefabricated walls. Other entrepreneurs convert them into utility and decorative products, offering on the local market plastic trash bins, flower pots and bouquets, seating, particularly stools, as well as various other decorative items. The images below (Figures 2, 3, 4, 5, 6, and 7) illustrate the main types of products resulting from the transformation of plastic waste into useful products, currently available on the local market in Bukavu



Fig. 2. Flower pots and bouquets for decoration



Fig. 3. A model of eco-friendly paving block made from plastic waste



Fig. 4. Eco-friendly paving blocks



Fig. 5. Trash bins made from plastic bottles



Fig. 6. Plastic pots repurposed for urban agriculture



Fig. 7. Prefabricated walls made from plastic waste

Photos collected from SOA-DRC, Plastycor, Briquette du Kivu

In addition to plastic waste valorization, the young entrepreneurs participating in this study indicated that they also provide capacity-building training to other youth organizations and the population of Bukavu on waste management. One company representative explained: "...with the support of our partners, we have already organized three training sessions for the youth of Bukavu on plastic waste valorization. During these sessions, we train them on the waste valorization process and raise awareness about adopting responsible behavior in managing their waste. We have also participated in training workshops for young entrepreneurs on waste valorization in Bukavu and other cities in the sub-region..." These initiatives also provide both environmental and socio-economic solutions for the city of Bukavu, as the recycling sector offers sustainable employment opportunities linked to the green economy [12].

The various initiatives implemented by young entrepreneurs in Bukavu's plastic waste value chain have significantly contributed to job creation and urban sanitation. According to civil society actors: "...to date, several organizations are involved in plastic waste valorization in Bukavu. These organizations bring together many young people who work collaboratively, and their activities are increasingly visible because their finished products, notably eco-friendly paving blocks and trash bins made from plastic waste, are accessible..." Furthermore, a young entrepreneur stated: "...waste valorization is an opportunity that offers many others to the youth of Bukavu. Our company consists of 13 full-time employees, including 9 young people (5 boys and 4 girls) and 4 women. We all depend on this company. But, in the coming years, I believe the plastic waste valorization sector in Bukavu will reveal further opportunities that will benefit not only the youth but the entire population..."

In the same vein, young plastic waste collectors interviewed noted: "...we are based on Lake Kivu, as almost all the plastic waste produced in Bukavu ends up in the lake. Regularly, we collect several bags of waste that we sell to companies that valorize them. Other plastic waste, after cleaning (rinsing and drying), we sell to entrepreneurs producing local beverages who use them as packaging. Our plastic waste collection capacity depends on rainfall and motivation. That is why we do not earn much, but what we earn is enough..." Another young collector explained: "...I have contacts with managers of event halls and hotels in Bukavu. I only collect clean plastic and glass bottles, which I then resell. Often, I buy these empty bottles at a low price compared to the resale price. This system works well because it allows me to earn a living..."

Alongside waste valorization associations and companies, numerous local structures composed of university students, church members, youth council members, and non-governmental organizations engaged in environmental concerns are active, such as Ekoy Maji, Solidarité Villages RDC, SEED, Vijaana Shujaa, Conseil Communal de la Jeunesse d'Ibanda, ATD, Club des Amis de la Nature, ISDR-Bukavu, UCB, Ekagri Innovation, CYNESA, YALI Sud-Kivu, BYL DRC, among others. During their activities, particularly those related to protecting aquatic ecosystems from plastic pollution, raising public awareness, and organizing community work projects (Salongo), these youth structures collaborate with startups involved in plastic waste valorization. At the end of their activities, these young people share the collected plastic waste with the startups for its transformation into useful products.

3.3 CHALLENGES FACED BY YOUNG ENTREPRENEURS IN PLASTIC WASTE VALORIZATION IN BUKAVU

The various initiatives led by young entrepreneurs and their startups in plastic waste valorization demonstrate that plastic waste is no longer seen as a problem, but as a resource that, when properly managed, can generate economic and employment opportunities for youth while improving urban sanitation in Bukavu. However, many young entrepreneurs and their startups face diverse challenges in valorizing plastic waste and providing community support and capacity-building services.

Interviews with civil society actors and municipal authority representatives in the communes of Kadutu, Ibanda, and Bagira revealed that young entrepreneurs and their startups already offer products derived from plastic waste transformation on the local market. Nevertheless, they encounter several challenges, as one civil society actor noted: "...there are many youth associations producing paving blocks, trash bins, and other utility items from plastic waste. These are efforts that need to be encouraged at the city level to help them contribute to urban sanitation and youth employment. However, many businesses involved in either the collection and disposal or the valorization of plastic waste into other products have ceased to exist in Bukavu due to lack of coordination with other businesses operating in the city or the absence of financial support from public and private partners..."

A municipal authority representative from Ibanda stated: "...of course, many young people are currently involved in plastic waste valorization in Bukavu. These young people and their companies do an exceptional job by giving a second life and new importance to waste that would otherwise pose health risks to the population. But in reality, many of these companies face numerous difficulties, as they do not yet receive sustained support from public authorities. Sometimes these young entrepreneurs are demotivated due to fiscal requirements they face, particularly when marketing their finished products..."

Not only in Bukavu but also in many African cities, young entrepreneurs face challenges related to access to adequate training, modern equipment, and financial support to sustain their plastic waste valorization initiatives, making these initiatives increasingly fragile and less sustainable. In Algeria, significant progress has been achieved through local plastic waste valorization initiatives because of their impact on job creation and reducing landfill waste. However, these initiatives remain socially and environmentally fragile [24].

Additionally, some leaders of companies valorizing plastic waste explained: "...the process of transforming waste into useful products is not easy. We must say that the techniques we currently use expose us to several life-threatening risks. Those who transform plastic waste into plastic bins, for example, perform many maneuvers and use sharp tools that, if misplaced or slipped, can cause injuries. For us producing ecological paving blocks, the process is even more laborious because we lack modern protective tools and devices. We proceed using traditional methods, sometimes very risky. We are exposed to toxic fumes and intense heat..."

In the same vein, another young entrepreneur noted: "...listen ! My team and I do our best. We have the capacity to produce many ecological paving blocks, but we sometimes face difficulties in selling them on the market due to competition from other paving blocks made from mortar and water, Breton, or directly carved from stone, which are often sold at lower prices locally. Other entrepreneurs face similar challenges, as most of the population does not support youth-led initiatives. Moreover, state services often burden us on the market with taxes..."

To date, as one interviewed young entrepreneur pointed out, some companies operate clandestinely to avoid certain fiscal requirements, which largely constitute a major destabilizing challenge for local plastic waste valorization initiatives in Bukavu: "...we do not yet have all the legal authorizations to operate as a recognized company to avoid certain bureaucratic hurdles. Our transformation site is on the outskirts of Bukavu, where we specialize in converting plastic waste into ecological paving blocks and items that allow households using charcoal to light fires easily. This latter product is effective because it burns slowly without producing much smoke when used. However, it is still little known on the market..."

The images below (Figures 8, 9, 10, 11, 12, and 13) illustrate the working conditions of young entrepreneurs transforming plastic waste into utility products



Fig. 8. Plastic waste transformation site: preparation



Fig. 9. Melted plastic waste mixed with sand



Fig. 10. Exposure to fumes during the preparation of the melted plastic mixture



Fig. 11. Exposure to fumes during the molding of melted plastic



Fig. 12. Risk of burns during the molding of melted plastic for paving block production



Fig. 13. Manufacturing a trash bin from plastic bottles.

Source: CYNESA – DRC, BYL DRC and Authors, 2025

Given the multiple challenges faced by young entrepreneurs in Bukavu in transforming plastic waste into useful products, it is imperative to provide support across various aspects to enhance the sustainability of their initiatives, particularly regarding green jobs generated from plastic waste valorization and urban sanitation. Nevertheless, the transition towards a circular economy in plastic waste management, according to some researchers, requires the establishment of a specific regulatory framework, an adequate institutional system, and an innovative structure involving various stakeholders [25].

4 CONCLUSION

This study explored the opportunities and challenges related to transforming plastic waste into jobs for young people and urban sanitation solutions in Bukavu. Waste management remains a persistent problem for several decades due to the lack of adequate infrastructure, coordination, and institutional support for stakeholders in the sector. Nevertheless, the city now hosts several associations and companies engaged in the collection, disposal, and valorization of plastic waste, thereby contributing to the creation of green jobs and the improvement of urban sanitation.

However, these young entrepreneurs face numerous obstacles that hinder the sustainability of their initiatives. To address this, the study proposes the establishment of an innovative and collaborative ecosystem bringing together all involved actors: young entrepreneurs, public authorities, private institutions (microfinance, NGOs), and the local population. Such a framework would facilitate access to financing, implement incentive-based fiscal measures, and strengthen entrepreneurs' capacities through tailored training. The adoption of this approach would thus promote the sustainability of plastic waste valorization initiatives and enhance their impact on both the local economy and Bukavu's urban environment.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the representatives of the municipal authorities of the city of Bukavu, as well as young entrepreneurs and the managers of companies and associations involved in the collection and valorization of plastic waste in Bukavu, for their availability and for the valuable data they provided for this study.

REFERENCES

- [1] CNUCED, «Développement économique en Afrique,» Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement, Genève, 2024.
- [2] BAD, «Performances et perspectives macroéconomiques de l'Afrique,» Groupe de la Banque Africaine de Développement, Abidjan, 2025.
- [3] E. Ngnikam and É. Tanawa, *Les villes d'Afrique face à leurs déchets*, Belfort: Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2006.
- [4] S. Ibrahim, «Wastes Management in African Cities,» *Smart Economy in Smart African Cities*, 2019.
- [5] A. I. Kouagou, «L'entrepreneuriat des jeunes en Afrique: Note de l'administrateur,» Groupe de la Banque Mondiale, Washington, 2022.
- [6] OIT, «Emploi et chômage des jeunes en Afrique: l'entrepreneuriat comme option majeure,» Organisation internationale du Travail, Genève, 2020.
- [7] UA, «Promouvoir l'entrepreneuriat des jeunes en Afrique,» Union Africaine, Addis-Abeba, 2020.
- [8] BAD, «La jeunesse africaine sur le marché du travail,» Banque africaine de développement, Abidjan, 2015.
- [9] A. R. Koumi, F. S. Ouattara-Soro, Y. Quéré, Y. Louault, A. J. Y. N'Cho, S. Coulibaly, K. M. Yao, B. C. Atsé, Y. Sankare and P. Cecchi, «Les déchets plastiques dans l'océan au cœur de l'Aquathon d'Abidjan, Côte d'Ivoire,» *Natures Sciences Sociétés*, pp. 29 (4), 458-468, 2021.
- [10] F. F. Kinie, «La gestion des déchets au Cameroun,» In O. C. Ruppel & E. D. K. Yogo (Eds.), *Environmental law and policy in Cameroon - Towards making Africa the tree of life | Droit et politique de l'environnement au Cameroun - Afin de faire de l'Afrique l'arbre de vie*, pp. 397-417, 2018.
- [11] G. Soro, O. Lazenin and S. Nagnin, «Analyse du potentiel de création d'emplois verts dans la filière de gestion des déchets solides ménagers en Côte d'Ivoire,» *Colloque International Eau, Déchets et Développement Durable (E3D)*, pp. 157-161, 2018.
- [12] M. C. Youcef, «Emplois verts: Une nouvelle opportunité pour les jeunes en Algérie,» *Lancomnet*, vol. 2, pp. 93-117, 2015.
- [13] PNUD, «Apport des technologies numériques dans la gestion des déchets plastiques dans les milieux urbains en RDC: Trois projets innovants de recyclage des déchets plastiques primés par le PNUD/RDC,» *Programme des Nations Unies pour le développement*, Kinshasa, 2018.
- [14] PNUD, «Employabilité des jeunes et assainissement des villes: leçons apprises du pilote d'économie circulaire »L'or dans nos poubelles«,» *Programme des Nations Unies pour le développement*, Kinshasa, 2023.
- [15] CDB, «Etude de Base sur la gestion de déchets ménagers dans la ville de Bukavu / document non publié,» Caritas Développement Bukavu, Bukavu, 2023.
- [16] J. R. Ngambi, «Les pratiques populaires à la rescousse de la salubrité urbaine: la pré collecte, un service alternatif aux insuffisances du système formel de gestion des déchets à Yaoundé,» *Cybergeog: European Journal of Geography*, pp. 1-33, 2016.
- [17] S. Ndyababo, I. Vandecasteele, J. Moeyersons, A. Ozer, P. Ozer, K. Dunia and B. Cishugi, «Développement de la ville de Bukavu et cartographie des vulnérabilités, R.D. Congo,» *Annales Sci. Sci. Appl. U.O.B.*, vol. 2, pp. 120-127, 2010.
- [18] M. H. Many, F. Keymeulen, J. Ngezahayo, A. S. Bakari, M. E. Kalonda, B. J. Kahumba, P. Duez, C. Stévigny and S. J.-B. Lumbu, «Antimalarial herbal remedies of Bukavu and Uvira areas in DR Congo: An ethnobotanical survey,» *Journal of ethnopharmacology*, vol. 249, pp. 1-14, 2020.
- [19] B. A. Marhegane, E. A. Ndagano, H. A. Ntasma, I. B. Wilondja and S. Byombuka, «Défis de la planification urbaine dans la ville de Bukavu,» *IOSR Journal of Humanities and Social Science (IOSR-JHSS)*, pp. 27 (09), 53-63, 2022.
- [20] G. Claude, «Étude qualitative: définition, techniques, étapes et analyse,» *Scribbr*, pp. Disponible sur <https://www.scribbr.fr/methodologie/etude-qualitative/>, 2019.
- [21] J. K. Ngur-Ikone, «La gestion des déchets plastiques à Kinshasa: un autre défi environnemental à relever dans la conception des villes durables,» *Environnement, changement climatique et sécurité alimentaire*, pp. 5 (131-154), 2015.
- [22] T. A. Amadji, G. Jean, A. Codjo, G. Daniel and D. K. Valéry, «Valorisation de déchets plastiques et d'industrie du bois en composite moule à froid: effet des paramètres de fabrication sur les propriétés mécaniques,» *Environnement, Ingénierie & Développement*, vol. 84, pp. 33-43, 2021.

- [23] C. P. Ndepete, R. Zaguy-Guerembo, A. M. D. Gbongo, L. M.-P. Regakouzou, V. O. N. Namndouta and J. Kpeou-Kolengue, «Valorisation des déchets plastiques en matériaux de construction,» *European Scientific Journal, ESJ*, pp. 18 (21), 317, 2022.
- [24] N. Dorbane-Nasri, La valorisation des déchets plastiques en Algérie comme stratégie durable. Approche en termes du triptyque acteurs/activités/ressources au niveau de la wilaya de Tizi -Ouzou, Tizi-Ouzou: Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2023.
- [25] M. Benjilali and M. Zenasni, «L'économie circulaire des déchets plastiques au Maroc: Défis et perspectives,» *alternatives Managériales et Economiques*, vol. 3, pp. 394-408, 2021.

Analyse de la classification des déchets hospitaliers dans les hôpitaux du territoire de Lubao: Conformités aux normes et défis de gestion

[Analysis of hospital waste classification in Lubao territory hospitals: Compliance with standards and management challenges]

Alexandre Munkindji Kabemba¹, Bonaventure Lele Niami², Alphonse Kambi Dibaya Okito Longo³, Elie Fuamba Ngoyi⁴, and Godefroid Kalonda Kabemba⁵

¹Assistant Senior à l'Institut Supérieur des Techniques Médicales de Tshofa et Apprenant à l'université de Kinshasa en gestion des Ressources naturelles Renouvelables, RD Congo

²Enseignant-chercheur à l'Université de Kinshasa, RD Congo

³Enseignant-Chercheur à l'Institut Supérieur Pédagogique de Mbujimayi, RD Congo

⁴Assistant Senior à l'Institut Supérieur de Techniques Médicales de Tshofa, RD Congo

⁵Assistant Senior à l'Institut Supérieur des Techniques Médicales de Tshofa, RD Congo

Copyright © 2026 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: Hospital waste management is a major public health concern. This study analyzes the classification practices of hospital waste in the health facilities of Lubao Territory, Democratic Republic of Congo, assessing compliance with national and international standards, and identifying key challenges. Using a mixed-methods approach—surveys, direct observation, and interviews—the study finds that classification practices are often empirical and poorly aligned with regulatory standards. Key issues include lack of training, inadequate equipment, and absence of monitoring mechanisms. Recommendations are offered to improve environmental governance in healthcare facilities.

KEYWORDS: hospital waste, classification, standards, management, Lubao, DRC.

RESUME: La gestion des déchets hospitaliers constitue un enjeu majeur de santé publique. Cette étude vise à analyser les pratiques de classification des déchets hospitaliers dans les hôpitaux du territoire de Lubao, province de Lomami en République Démocratique du Congo, en évaluant leur conformité aux normes nationales et internationales et en identifiant les défis rencontrés compromettant une gestion efficace. À travers une approche méthodologique mixte, combinant les enquêtes, les observations ainsi que les entretiens, les données recueillies révèlent une classification souvent empirique, peu conforme aux standards, en raison de multiples contraintes (manque de formation, équipements inadéquats, absence de suivi). Des recommandations sont proposées pour renforcer la gouvernance environnementale en milieu hospitalier.

MOTS-CLEFS: déchets hospitaliers, classification, norme, gestion, Lubao, RDC.

1 INTRODUCTION

A l'ère du 21^{ème} siècle la production croissante de déchets hospitaliers représente un danger pour la santé humaine et l'environnement, en particulier dans les pays en développement. Etant donné que ces déchets comprennent des éléments infectieux, toxiques et radioactifs qui nécessitent un tri rigoureux selon leur nature. Pourtant, dans de nombreuses zones rurales telles que le territoire de Lubao, les pratiques de gestion sont encore rudimentaires. Cette recherche s'interroge sur la conformité des pratiques locales aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et du Programme National de Développement Sanitaire (PNDS) de la RDC, et cherche à identifier les obstacles majeurs rencontrés. Selon [1], environ 15 % des déchets produits par les établissements de santé sont considérés comme dangereux, car potentiellement infectieux, toxiques ou radioactifs.

La classification adéquate des déchets hospitaliers est une étape cruciale pour leur gestion sécurisée. Elle permet de distinguer les déchets à risque (infectieux, anatomiques, chimiques, etc.) des déchets non dangereux, facilitant ainsi leur collecte, leur traitement et leur élimination selon les normes en vigueur. En RDC, des directives nationales, inspirées des recommandations internationales, encadrent cette classification, notamment à travers le Guide national de gestion des déchets biomédicaux [2].

Cependant, dans plusieurs structures sanitaires du territoire de Lubao, province de Lomami, l'application effective de ces normes reste problématique. Les défis sont multiples: insuffisance de formation du personnel, manque de matériels de tri, absence d'infrastructures adaptées pour le stockage et le traitement des déchets, ou encore faiblesse de la réglementation locale. Cette situation expose les agents de santé, les patients et l'environnement à des risques considérables, mettant en évidence un écart entre les textes et la réalité de terrain.

Cette étude vise ainsi à analyser le niveau de conformité des hôpitaux du territoire de Lubao aux normes en matière de classification des déchets hospitaliers, tout en identifiant les principaux défis qui entravent une gestion efficace et durable de ces déchets.

La problématique de la gestion des déchets hospitaliers est particulièrement critique dans les zones rurales et semi-urbaines de la République Démocratique du Congo, où les systèmes de santé sont souvent sous-financés, mal équipés et faiblement régulés. Dans le territoire de Lubao, bien que les structures sanitaires génèrent quotidiennement divers types de déchets biomédicaux, la majorité d'entre elles ne disposent pas de dispositifs adéquats de tri et de classification conforme aux standards nationaux et internationaux. Ce déficit compromet non seulement la santé du personnel et des patients, mais aussi la sécurité environnementale de la communauté.

L'absence de classification rigoureuse des déchets hospitaliers contribue à la manipulation inappropriée des déchets à risque, tels que les seringues usagées, les pansements contaminés ou les produits chimiques, augmentant ainsi les risques d'infections nosocomiales, d'accidents d'exposition au sang et de pollution environnementale [1]. Par ailleurs, plusieurs études réalisées en RDC ont mis en évidence un écart significatif entre les directives nationales et les pratiques réelles dans les structures sanitaires, notamment en matière de tri à la source, d'étiquetage, de conditionnement et de traitement final des déchets [3; 4].

Il est donc essentiel de documenter et d'analyser la situation spécifique des hôpitaux du territoire de Lubao afin d'identifier les insuffisances, proposer des recommandations réalistes et orienter les politiques locales de santé publique. Une telle étude contribuera à améliorer la conformité aux normes en vigueur, renforcer les capacités du personnel soignant et limiter les impacts sanitaires et écologiques liés à une mauvaise gestion des déchets hospitaliers.

La gestion des déchets hospitaliers constitue une composante essentielle de la qualité des soins et de la sécurité sanitaire dans les établissements de santé. Elle repose notamment sur une classification rigoureuse des déchets, qui permet de distinguer ceux qui présentent des risques biologiques, chimiques ou radioactifs, des déchets non dangereux. En République Démocratique du Congo, le Guide national de gestion des déchets biomédicaux [2] recommande une classification en plusieurs catégories (déchets infectieux, anatomiques, piquants/coupants, pharmaceutiques, chimiques, radioactifs et déchets généraux), conformément aux standards de l'OMS [1].

Cependant, dans plusieurs structures sanitaires du territoire de Lubao, cette classification reste insuffisamment appliquée ou totalement absente. Les déchets sont souvent mélangés dans des contenants non adaptés, sans codage couleur, sans étiquetage et sans tri préalable, ce qui empêche leur gestion sécurisée. Cette situation s'explique par plusieurs facteurs: manque de formation du personnel, absence de dispositifs de tri, faiblesse du suivi réglementaire, ainsi que le manque de sensibilisation sur les risques liés aux déchets dangereux. En outre, le contexte de sous-équipement chronique dans cette zone rurale aggrave les lacunes existantes.

Cette inadéquation entre les normes de classification prescrites et les pratiques réelles dans les hôpitaux du territoire de Lubao soulève une question centrale: dans quelle mesure les structures sanitaires du territoire de Lubao appliquent-elles les normes nationales et internationales de classification des déchets hospitaliers, et quels sont les principaux défis qui entravent cette mise en œuvre ?

Répondre à cette question, il est crucial de renforcer la sécurité sanitaire, améliorer la gestion des risques infectieux et promouvoir une gestion durable des déchets de soins dans cette région.

Cet article poursuit comme objectif général d'évaluer la conformité des pratiques de classification des déchets hospitaliers dans les hôpitaux du territoire de Lubao par rapport aux normes en vigueur et identifier les principaux défis liés à leur gestion.

De manière spécifique, il s'agit d'examiner les méthodes actuelles de tri et de classification des déchets dans les hôpitaux du territoire de Lubao; analyser la conformité de ces pratiques aux normes nationales (Ministère de la Santé RDC) et internationales (OMS); identifier les principales contraintes techniques, institutionnelles et financières liées à la gestion des déchets hospitaliers.

2 MILIEU, MATERIELS ET METHODES

Le territoire de Lubao est situé dans la province de Lomami, en République démocratique du Congo. Il comprend la Zone de santé de Lubao y inclus le centre de santé de référence de Kisengwa, zone de santé de Kamana et zone de santé de Tshofa qui font partie du réseau sanitaire du pays. Ces zones sont intégrées dans le système de gestion des 519 zones de santé de la RDC. Le questionnaire d'enquête a constitué notre matériel et les personnels sanitaires: agents hospitaliers, personnels d'entretien, responsables administratifs de ces 3 zones de santé et une aire de santé de référence du territoire de Lubao dont ont fait l'objet de la population cible.

Dans cette étude nous avons utilisé 2 approches: l'approche qualitative et l'approche quantitative. L'approche qualitative a consisté à l'entretien avec les responsables des hôpitaux, médecins, techniciens sanitaires et experts en gestion des déchets. Par contre l'approche quantitative quant à elle nous a permis à collecter de données sur les volumes et catégories de déchets produits; analyser des pratiques de tri et d'élimination en place. Ces approches ont été accompagnées par une observation directe en visitant de terrains dans les hôpitaux pour examiner les installations de gestion des déchets et enfin faire la comparaison des pratiques observées avec les normes réglementaires [5].

Les données recueillies (qualitative et quantitative) ont été encodées sur Excel. Les calculs de la fréquence et de la moyenne ont été effectués.

3 RESULTATS

Tableau 1. Classification des déchets hospitaliers par type

TYPE DE DÉCHETS	QUANTITÉ MOYENNE MENSUELLE (KG)	POURCENTAGE (%)
Déchets infectieux	280	32 %
Déchets anatomiques	75	9 %
Déchets piquants/coupants	110	13 %
Déchets pharmaceutiques	60	7 %
Déchets chimiques	40	5 %
Déchets généraux (non dangereux)	315	36 %
Total	880	100 %

Source: descente sur terrain

INTERPRÉTATION

Il sied de démontrer que les déchets généraux et infectieux représentent la majorité des déchets produits par nos établissements sanitaires. En effet, la proportion relativement élevée de déchets piquants/coupants indique un risque significatif pour la santé du personnel, exigeant ainsi des pratiques rigoureuses de tri et de gestion pour une bonne promotion de la santé publique et celle de notre maison commune l'environnement.

Tableau 2. Conformité des hôpitaux aux normes nationales et internationales

ÉTABLISSEMENT DE SANTÉ	TRI À LA SOURCE	CODE COULEUR RESPECTÉ	FORMATION DU PERSONNEL	DISPOSITIF DE STOCKAGE SÉCURISÉ	CONFORMITÉ GÉNÉRALE (%)
Hôpital Général de Lubao	Oui	Partiellement	Oui	Partiellement	60 %
Hopital General de Kamana	Non	Oui	Oui	Non	40 %
Hôpital General de Tshofa	Oui	Oui	Oui	Oui	80 %
Centre de santé de référence de Kisengwa	Non	Non	Oui	Non	20 %
Moyenne générale	-	-	-	-	55 %

Source: Descente sur terrain

INTERPRÉTATION

La conformité moyenne dans les structures de sanitaires ciblées reste faible (55 %), avec des lacunes majeures dans le respect du code couleur et la sécurisation du stockage des déchets hospitaliers tant liquide que solides. Seul un hôpital atteint la pleine conformité, ce qui souligne la nécessité de renforcer les capacités des autres établissements.

Tableau 3. Défis majeurs identifiés dans la gestion des déchets hospitaliers

DÉFIS IDENTIFIÉS	FRÉQUENCE DE CITATION (%)
Manque de moyens financiers	85 %
Absence de formation spécifique	70 %
Inexistence de plan de gestion des déchets hospitaliers	60 %
Manque de matériel de tri (poubelles codées)	75 %
Faible sensibilisation du personnel	65 %
Absence d'unité de traitement (incinérateur)	90 %

Source: Descente sur terrain

INTERPRÉTATION

Il découle de ce tableau que les défis les plus cités sont le manque d'équipement de traitement ainsi que l'insuffisance des ressources financières. Et aussi l'absence de planification et de formation montre une gestion encore réactive et peu structurée des déchets.

4 DISCUSSION

Les données obtenues (Tableau 1) stipulent que les milieux hospitaliers produisent les déchets de sorte Ces résultats confirment que les hôpitaux sont des lieux de production considérable de déchets, présentant un danger permanent de transmission de maladies à un grand nombre de personnes qui s'y rendent, ainsi qu'à leur entourage [5].

Les résultats obtenus dans notre étude démontrent qu'il existe la non-conformité dans la gestion des déchets. Ces résultats pourraient s'expliquer par plusieurs facteurs: Manque de formation continue: les agents de santé ne sont pas initiés aux principes de tri et de gestion différenciée; Insuffisance des moyens: absence de sacs codés, de bacs de tri, ou d'incinérateurs adaptés; Laxisme administratif: faible application des textes légaux et absence de mécanismes de contrôle (. Ces constats corroborent avec les études menées dans d'autres zones de santé rurales du pays et d'Afrique subsaharienne, où les systèmes de santé souffrent d'un déficit structurel et organisationnel [6].

En ce qui concerne le défis dans la gestion des déchets, 90% des enquêtés ont démontré que le manque d'équipement de traitement ainsi que l'insuffisance des ressources financières constitue une contrainte majeure dans la gestion des déchets dans les milieux hospitaliers dans le territoire de Lubao. Nos résultats obtenus sont en relation parfaite avec ceux obtenus par [7] stipulant que l'absence des matériels appropriés dans la gestion et stockage des déchets hospitaliers constitue un facteur limitant pour un assainissement idéal à l'environnement.

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Il sied pour cette étude de révéler qu'une gestion peu structurée et non conforme des déchets hospitaliers dans les hôpitaux du territoire de Lubao en occurrence: hôpital de Kamana, Lubao, Tshofa et Kisengwa, expose les patients, le personnel et l'environnement à des risques graves et mortels. C'est alors pensé à une réforme progressive et rigoureuse, axée sur la formation, l'équipement et le contrôle, s'avère indispensable pour améliorer durablement la gestion des déchets hospitaliers dans ces établissements dans le but de protéger les êtres vivants ainsi que leur environnement.

Eu égard des résultats obtenus, nous recommandons aux structures sanitaires du territoire de Lubao pour l'amélioration de la gestion des déchets ce qui suivent:

- Renforcer la capacité du personnel hospitalier à travers des formations continues;
- Disponibiliser les équipements conformes (sacs codés, gants, masques, bacs spécifiques);
- Elaboration et affichage de protocoles clairs de tri des déchets dans chaque service;
- Suivi régulier et audit interne sur la gestion des déchets dans les structures sanitaires et,
- Sensibiliser les agents chargés de l'insalubrité sur la prise de conscience des enjeux de santé publique liés aux déchets médicaux.

REFERENCES

- [1] Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2018). Gestion sûre des déchets provenant des établissements de soins de santé – Manuel pratique. 2e édition. Genève.
- [2] Ministère de la Santé Publique, RDC. (2020). Guide national de gestion des déchets biomédicaux en République Démocratique du Congo. Kinshasa.
- [3] Programme National Multisectoriel de Lutte contre le Sida (PNMLS). (2020). Rapport national sur l'hygiène hospitalière et la gestion des déchets biomédicaux en RDC. Kinshasa.
- [4] Kabamba, M., Ilunga, J. & Kasongo, L. (2021). Évaluation des pratiques de gestion des déchets hospitaliers dans les hôpitaux de la province du Kasai-Oriental. *Revue Congolaise de Santé Publique*, 6 (2), 45–58.
- [5] Bari Ndoy, Nemen Ngwakoyo Eugénie, Colette Mitshondo Punga, Richard Kumulumbondji Ngwahongo, 2024. Facteurs Associés à la mauvaise gestion et au traitement des déchets biomédicaux dans les établissements de santé: étude de cas dans la Zone de Santé de Kikwit Nord pour un environnement de qualité. *Revue Internationale de la Recherche Scientifique*, Vol. 2, (5), 2507-2513pp.
- [6] Mulaji, C. (2020). Impact de la gestion des déchets biomédicaux sur la santé publique. 1re éd. Matadi: Éditions de l'Environnement, 160 pages.
- [7] Tumba Tshibanda, P., & Mukendi Kayembe, A. (2022). Défis de la gestion des déchets biomédicaux dans les hôpitaux publics en milieu rural: cas de la province de Lomami. *Revue Africaine d'Environnement et Agriculture*.

Sensibilisation à une gestion durable des ressources en eau dans un lycée francevillois au Gabon

[Raising awareness of sustainable water resource management at a high school in Franceville, Gabon]

Madi Guirema Abaker, Donald Romarick Rotimbo Mbourou, Estelle Dumont, Davy Silas Mbadinda, and Eléonore Mounques

Laboratoire de Recherche Multidisciplinaire en Environnement (LARME), Université des Sciences et Techniques de Masuku (USTM), Franceville, Gabon

Copyright © 2026 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: L'eau est essentielle à la survie l'Homme. Pourtant elle n'est pas assez préservée. Une eau impropre est difficile à recycler. Consommer une eau impropre est un danger sanitaire. Nous avons souhaité évaluer les habitudes de consommation de l'eau des élèves d'un lycée gabonais. Nous avons créé un formulaire, l'avons distribué aux élèves en même temps que nous leur faisons une 1ère session de sensibilisation. Après la collecte de données, les résultats statistiques ont été obtenus et fournis aux élèves lors d'une 2ème session de sensibilisation. Les élèves consommaient surtout l'eau du robinet. Malheureusement, ils gaspillaient l'eau à la maison. Leur manière de stocker l'eau restait à désirer. Leur établissement devrait faire des efforts sensibles en termes d'hygiène à proximité des points d'eau. Davantage de mesures doivent être mise en place pour sensibiliser les jeunes sur la nécessité de gérer durablement l'eau.

KEYWORDS: Eau douce, gestion durable, enquête de terrain, analyse de données, sensibilisation.

RESUME: Water is essential for human survival. Yet it is not sufficiently protected. Unsafe water is difficult to recycle. Consuming unsafe water is a health hazard. We wanted to assess the water consumption habits of students at a high school in Gabon. We created a questionnaire and distributed it to the students during our first awareness-raising session. After collecting the data, we obtained statistical results and shared them with the students during a second awareness session. The students mainly consumed tap water. Unfortunately, they wasted water at home. Their water storage methods left much to be desired. Their school should make significant efforts to improve hygiene around water sources. More measures need to be put in place to raise awareness among young people about the need for sustainable water management.

MOTS-CLEFS: Fresh water, sustainable management, field survey, data analysis, awareness raising.

1 INTRODUCTION

Pour son développement et son épanouissement, l'Homme doit satisfaire ses besoins vitaux. L'accès à l'eau est l'un de ces points indispensables. 97% de l'eau présente sur Terre est salée et ne peut être consommée telle quelle. Chercher à rendre potable une telle eau aurait un coût faramineux [1]. L'eau douce représente quant à elle les 3% restants et a une faible teneur en sel. Elle est la principale alternative aux traitements l'eau qu'il implique l'usage de l'eau salée. Seule 0,4% de l'eau douce (eau de surface) est véritablement consommable, avec un coût d'exploitation technologique et financier accessible [2].

Le renouvellement de l'eau de surface suit un mécanisme complexe. Tout d'abord, il faut savoir que l'eau existe sous 3 formes que sont la forme liquide (pluie, mer,...), la forme solide (grêlons, neige,...) et la forme gazeuse (air). A travers le grand cycle de l'eau, l'eau douce se transforme en vapeur, issue du phénomène d'évapotranspiration des plantes [3]. Ainsi, par le biais de leurs racines, les arbres puisent l'eau du sol. Une partie de cette eau sert à la croissance des arbres. La seconde est rejetée sous forme de vapeur d'eau au niveau des feuilles des arbres. Arrivée dans l'atmosphère, cette vapeur accroît l'humidité de l'air, stabilise le climat et assure un taux suffisant de précipitations. Ce taux suffisant de précipitations permet ainsi à l'Homme de pratiquer diverses activités agricoles nécessaires à son alimentation et donc à sa survie [4]

Malgré une quantité insuffisante sur la Terre, l'eau douce n'est pas toujours consommée de façon durable. La population mondiale ne cesse d'augmenter au fil des années (8 milliards en novembre 2022) et donc la consommation en eau aussi [5]. Peu de gens sont conscients de la nécessité d'utiliser l'eau douce à bon escient et se permettent de la gaspiller. De plus, l'usage de pesticides et autres engrais chimiques en Agriculture complexifient la possibilité de la recycler. D'autres causes inhérentes à chaque pays sont à mettre dans la balance. Dans des pays en développement comme le Gabon, des politiques locales encouragent la natalité. L'immigration incontrôlable et l'exode rural sont autant de phénomènes qui contribuent à la recrudescence de la population, notamment citadine. Cette population, qui se renouvelle sans cesse, doit être logée et cela entraîne une croissance urbaine désordonnée, ayant elle-même pour conséquence des difficultés dans le déploiement optimal des réseaux d'adduction d'eau [6]. Depuis la crise pétrolière de 2015 [7], de plus en plus de familles gabonaises se sont beaucoup appauvries. Par conséquent, payer un abonnement en eau auprès des services compétents n'est plus une éventualité. Nombreuses se tournent naturellement vers d'autres moyens d'accéder à l'eau telles que les fontaines publiques [8].

La consommation non durable de l'eau a des conséquences sur les populations. Lorsque l'eau n'est pas bien utilisée, sa qualité peut baisser. Une eau de mauvaise qualité est source de nombreuses maladies car la santé de l'Homme est tributaire à 70% de l'eau qu'il consomme [9]. Déverser une eau impropre dans la nature participe aussi à polluer les nappes phréatiques [10]. Plus une eau est polluée, plus dure est son recyclage.

Lors de la Journée Mondiale de l'Eau 2023, nous avons souhaité réaliser une étude sur la manière dont l'eau était consommée par une certaine catégorie de la population gabonaise pour plusieurs raisons. D'abord, il existe peu d'éléments bibliographiques dans ce contexte au Gabon et même à l'échelle africaine. De plus, La catégorie de la population choisie est pertinente car elle est majoritaire dans le pays (idem en Afrique). Ainsi, vérifier les habitudes de consommation d'une telle population peut être un bon indicateur pour les politiques locales autant que les acteurs de la santé publique, connaissant l'importance de l'eau dans la vie quotidienne de l'Homme. Enfin, le contexte actuel est en adéquation avec ce qui se passe dans ce pays où les coupures quotidiennes d'eau mais aussi de courant sont légion. Notre étude avait quatre objectifs principaux. Tout d'abord, nous voulions collecter des données auprès de la population cible. Le second objectif visait à profiter de la collecte pour réaliser simultanément une opération de sensibilisation. La troisième étape devait permettre d'analyser statistiquement les données collectées. Dans la dernière étape, nous comptons revenir vers les populations afin de leur restituer les informations essentielles tirées de l'analyse statistique. Dans la suite, nous présentons ainsi notre stratégie de travail.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 CADRE D'ETUDE ET POPULATION CONCERNEE

La Journée Mondiale de l'Eau 2023 avait pour thème « Soyez le changement que vous voudriez pour le monde ». A cette occasion, nous avons souhaiter mettre en place une action de sensibilisation en direction des populations, visant à protéger les ressources en eau. Notre étude a été menée dans le Haut-Ogooué, province située au sud-est du Gabon (Fig.1)



Fig. 1. Franceville (Haut-Ogooué), notre zone d'étude [compilation d'images tirée d'internet]

Le Haut-Ogooué est la seconde province la plus peuplée du pays, après l'Estuaire. Cette province connaît pour principales activités économiques l'Agriculture et l'Exploitation minière. Le fleuve Ogooué est le plus représentatif de la province. Ce fleuve ainsi que la Mpassa desservent la ville de Franceville (chef-lieu provincial).

La population cible choisie était celle de Franceville. Nous nous sommes tout particulièrement intéressés aux élèves lycéen.ne.s de l'établissement d'enseignement secondaire public appelé le Lycée Eugène Marcel AMOGHO (LEMA). Le LEMA a été sélectionné pour diverses raisons dont l'ancienneté (existant depuis plus de 30 ans), la renommée (généralement bons résultats scolaires en classe d'examen) et l'important effectif (environ 2.000 élèves/an). Nous nous sommes concentrés sur les classes de premières et terminales, notamment pour garantir une certaine qualité dans les réponses apportées. Au Gabon et en Afrique en générale, les jeunes sont une catégorie de population majoritaire [11] et étudier leurs habitudes de consommation pourrait être riche en informations.

2.2 STRATEGIE DE SENSIBILISATION

La Journée Mondiale de l'Eau 2023 a eu lieu le 22 mars 2023. Notre travail de sensibilisation s'est donc organisé en conséquence telle que décrit dans la suite.

LES 2 SEMAINES AYANT PRECEDE LE 22 MARS 2023: CREATION ET IMPRESSION DU FORMULAIRE DE COLLECTE DE DONNEES AU FORMAT PAPIER

Avec le logiciel de traitement de texte Microsoft Word, nous avons créé l'ensemble des questions à poser aux élèves des classes de première et terminale du LEMA. La majeure partie de ces questions ont été proposées par chaque membre du laboratoire, en exploitant en particulier d'anciens formulaires internes de sensibilisation. Les figures 2 et 3 présentent la version finale du formulaire de sensibilisation. La 1^{ère} partie de ce formulaire montre les initiateurs de l'enquête (le LARME). La 2^{ème} partie est un ensemble de questions autour du.de lycéen.ne. La 3^{ème} partie se résume aux questions 01 à 21, dans lesquelles nous interrogeons les élèves sur sa manière dont elle gère l'eau dans un cadre privé. Les questions de 21 à 23 s'enquière de l'usage dans un cadre scolaire. La dernière partie est plutôt une rubrique « le saviez-vous », avec les questions allant de 24 à 30. Alors que les parties précédentes avaient pour but principal la collecte de données, la dernière partie se veut éducative afin de pousser les interrogé.e.s à se poser des questions sur les manières de faire. Le formulaire (numérique) a donc été imprimé en plusieurs versions papiers, au format A4;

DU 22 AU 25 MARS 2023: DISTRIBUTION PUIS RECUPERATION DES FORMULAIRES PAPIERS

Au sein du LEMA, nous sommes allés de classe en classe, parmi celles de notre choix: première et terminale. Tout d'abord, nous avons expliqué aux élèves ce qu'était la Journée Mondiale de l'Eau, avant de rappeler la thématique de 2023. Nous les

avons sensibilisés sur l'intérêt de préserver l'eau, sans jamais la considérer comme un bien inépuisable. Puis, nous leur avons présenté notre formulaire, en indiquant comment y répondre au mieux. Enfin, nous avons distribué un formulaire par personne. Trois jours plus tard, nous sommes revenus récupérer les formulaires papiers dûment remplis.

DU 26 MARS AU 6 AVRIL 2023: NUMERISATION DES FORMULAIRES PAPIERS, TRAITEMENT STATISTIQUE ET PRODUCTION DES DOCUMENTS DE RESULTATS

Après la récupération des formulaires papiers dûment complétés, nous avons créé un fichier gabarit sous Microsoft Excel. Les réponses à une question spécifiques étaient toutes réunies dans une même colonne. Pour éviter les erreurs de saisie, nous avons ajouté des listes déroulantes avec des choix prédéfinis, lorsque cela était possible. Sur la figure 4 (a), nous pouvons constater que la question portant sur la classe de l'élève (colonne C) ne peut avoir que 2 possibilités: l'élève est soit en première ou en terminale. Les listes déroulantes avec choix prédéfinis visaient donc à limiter au maximum les erreurs lors de la numérisation des résultats et par conséquent d'améliorer sensiblement la qualité de l'analyse statistiques qui a suivie. La figure 4 (b) est une vue préremplie du fichier. Nous étions des enseignants-chercheurs collaborant avec des doctorants et étudiants. L'ensemble des documents papiers ont ainsi été répartis en 5 à 6 lots, produisant chacun un fichier de gabarit préremplis. Les 5 à 6 fichiers ont été fusionnés pour obtenir le fichier Microsoft Excel unique regroupant tous les résultats numérisés. L'analyse statistique a pu démarrer sous Microsoft Excel, via les tableaux croisés dynamiques. L'essentiel des résultats statistiques sont ainsi compilés dans la figure 4.

LORS D'UNE MATINEE EN MI-AVRIL 2023: RESTITUTION DES RESULTATS STATISTIQUES

Après le traitement statistique des données, nous avons créé 2 types de documents de résultats. La figure 5 présente une grande affiche (format A3) exhibant les résultats statistiques généraux. Les émojis permettent de tout de suite voir les bonnes ou mauvaises pratiques. Quelques affiches ont été placardées un peu partout dans les couloirs du LEMA, afin de s'adresser au plus grand nombre. De plus des résultats de la figure 5, nous avons remis des résultats individuels aux participants à l'enquête. La taille du document choisi avait le format A6, les résultats étant plus détaillés et classés comme dans la section Résultats et Discussions de ce document.

Université des Sciences
et Techniques de Masuku



Sensibilisation à une gestion durable des ressources en eau à l'occasion de la Journée Mondiale de l'Eau 2023 (22 mars 2023)





Site : <http://www.larme-ustm.ga>
Email : contact@larme-ustm.ga
Tél. : +241 76 275 162

Etablissement :

Classe :

Quartier d'habitation :

Nombre de personnes dans le foyer familial :

Sexe : ☐ Masculin, ☐ Féminin ☐

Tranches d'âge : ☐ - de 14 ans, ☐ 15 à 18 ans, ☐ 19 à 21 ans, ☐ plus de 21 ans

01 D'où provient l'eau que vous consommez et quelle est la fréquence d'utilisation ?
(un choix unique par proposition, le plus probable)

- Robinet : ☐ Au moins 1 fois/jour, ☐ Au moins 1 fois/semaine, ☐ Au moins 1 fois/mois, ☐ Jamais

- Eau en bouteille : ☐ Au moins 1 fois/jour, ☐ Au moins 1 fois/semaine, ☐ Au moins 1 fois/mois, ☐ Jamais

- Fontaine publique : ☐ Au moins 1 fois/jour, ☐ Au moins 1 fois/semaine, ☐ Au moins 1 fois/mois, ☐ Jamais

- Autre (à préciser) : ☐ Au moins 1 fois/jour, ☐ Au moins 1 fois/semaine, ☐ Au moins 1 fois/mois, ☐ Jamais

02 Avez-vous déjà ressenti une différence entre l'eau du robinet, en bouteilles, en sachet ou de la fontaine publique ?
☐ Oui, ☐ Non
Si oui, à quel niveau? ☐ Couleur, ☐ Odeur, ☐ Goût, ☐ Autre (à préciser) _____

03 Si vous consommez de l'eau en bouteille, avez-vous une marque préférée ? ☐ Oui, ☐ Non
(Si oui, à préciser) _____
Si oui, quelle est la raison du choix de cette marque ? ☐ Prix, ☐ Couleur, ☐ Odeur, ☐ Goût,
☐ Autre (à préciser) _____

04 En général, quel principal usage faites-vous de l'eau consommée ? (un seul choix possible)
☐ Boisson, ☐ Cuisine, ☐ Vaisselle, ☐ Ménage, ☐ Lessive, ☐ Douche, ☐ WC, ☐ Potager.

05 Laissez-vous régulièrement les robinets ouverts pour faire la vaisselle ou vous laver les dents par exemple ? ☐ Oui, ☐ Non

06 Combien de douches prenez-vous par jour ? ☐ 1, ☐ 2, ☐ 3, ☐ Plus de 3

07 Quel est votre temps moyen passé sous la douche ? ☐ Au moins 5 min, ☐ Entre 5 et 10 min, ☐ Plus de 10 min, ☐ Ne sais pas

08 De quelle manière vous douchez-vous régulièrement ? ☐ Avec une douchette de salle de bain, ☐ Avec un gobelet/bol/cope et un seau rempli d'eau, ☐ Avec les mains et un seau d'eau ☐ Autre (à préciser) _____

09 Quelle quantité d'eau buvez-vous par jour ? ☐ Moins de 1 L, ☐ Environ 1 L, ☐ Environ 2 L, ☐ Plus de 2 L, ☐ Ne sais pas

10 Quelle quantité d'eau utilisez-vous par jour pour faire la cuisine ? ☐ Moins de 1 L, ☐ Environ 1 L, ☐ Environ 2 L, ☐ Plus de 2 L, ☐ Ne sais pas

11 Quelle quantité d'eau utilisez-vous par semaine pour la lessive ? ☐ Moins de 10 L, ☐ Environ 10 L, ☐ Environ 20 L, ☐ Environ 50 L, ☐ Plus de 50 L, ☐ Ne sais pas (NB : en général, 1 seau d'eau équivalent à 10 L, 1 bassine à 35 L, 1 machine à laver à 120 L)

12 Quelle quantité d'eau utilisez-vous pour le nettoyage de votre habitation par semaine ? ☐ Moins de 10 L, ☐ Environ 10 L, ☐ Environ 20 L, ☐ Environ 50 L, ☐ Plus de 50 L, ☐ Ne sais pas (NB : en général, 1 seau d'eau équivalent à 10 L, 1 bassine à 35 L)

Fig. 2. Formulaire de recueil des avis des lycéens du LEMA (face avant)

- 13 Récupérez-vous de l'eau de pluie pour l'utiliser par la suite ? ☐ Oui, ☐ Non
Si oui, pour quel(s) usage(s) ? (plusieurs choix possibles) ☐ Boisson, ☐ Cuisine, ☐ Vaisselle, ☐ Ménage, ☐ Lessive, ☐ Douche, ☐ WC, ☐ Potager.
- 14 Entrez-vous de l'eau dans des récipients de stockage? ☐ Oui, ☐ Non
Si Oui, de quel type? ☐ Bouteilles ou bidons en plastique, ☐ Bouteilles en verre, ☐ Seaux ou bassines, ☐ Fûts en plastique, ☐ Fûts métalliques, ☐ Autre (à préciser) _____
Si Oui, à quel endroit? ☐ À l'intérieur du lieu d'habitation, ☐ À l'extérieur du lieu d'habitation
Si Oui, dans quel type d'éclairage ? ☐ A la lumière, ☐ À l'obscurité
- 15 Savez-vous que laisser vos récipients de stockage (bouteille, seau, fût, ...) ouverts et à l'air libre peut vous rendre malade ? ☐ Oui, ☐ Non
- 16 Savez-vous que laisser le lieu d'entreposage de l'eau exposé à la lumière peut vous rendre malade? ☐ Oui, ☐ Non
- 17 Savez-vous que chauffer de l'eau à 100 °C pendant 8 à 10 min est le moyen le plus sûr et le plus sain de la purifier, surtout en cas d'entreposage par la suite ? ☐ Oui, ☐ Non
- 18 Chez vous, y a-t-il des fuites d'eau, robinets cassés ou tuyaux percés ? ☐ Oui, ☐ Non
- 19 Chez vous, y a-t-il une fosse septique pour récupérer les eaux usées ? ☐ Oui, ☐ Non
- 20 Chez vous, existe-t-il des toilettes indigènes à proximité d'une rivière ? ☐ Oui, ☐ Non
- 21 Consommez-vous l'eau de votre établissement scolaire ? ☐ Oui, ☐ Non
Si oui, à quelle fréquence? (choix unique par proposition, le plus probable)
- Quotidien : ☐ Au moins 1 fois/jour, ☐ Au moins 2 fois/jour, ☐ Plus de 2 fois/jour ;
- Hebdomadaire : ☐ Au moins 1 fois/semaine, ☐ Au moins 2 fois/semaine, ☐ Plus de 2 fois/semaine ;
- Mensuel : ☐ Au moins 1 fois/mois, ☐ Au moins 2 fois/mois, ☐ Plus de 2 fois/mois.
- 22 Êtes-vous satisfait de la qualité de l'eau de votre établissement scolaire ? ☐ Oui, ☐ Non
Si non :
- apportez-vous de l'eau de chez vous ? ☐ Oui, ☐ Non
- achetez-vous de l'eau sur place ? ☐ Oui, ☐ Non
- 23 Pourquoi ne consommez-vous pas l'eau de votre établissement scolaire (un choix unique par proposition, le plus probable)
- Je n'ai pas confiance à l'eau distribuée dans mon établissement scolaire ;
- Je n'aime pas le goût, l'odeur ou/et la couleur de cette eau ;
- L'hygiène autour des robinets n'est pas bonne ;
- Autre (à préciser) _____
- 24 Savez-vous que l'eau est essentielle à la vie ? ☐ Oui, ☐ Non
- 25 Savez-vous que l'eau est meilleure pour la santé que les jus, les boissons gazeuses ou l'alcool ? ☐ Oui, ☐ Non
- 26 Avez-vous l'habitude de jeter les eaux usées (lessive, vaisselle, cuisine...) dans la nature ? ☐ Oui, ☐ Non
- 27 Savez-vous que les déchets laissés dans la nature ont de très fortes chances de se retrouver dans les rivières et les polluer ? ☐ Oui, ☐ Non
- 28 Savez-vous que la SEEG et les populations utilisent l'eau de ces mêmes rivières ? ☐ Oui, ☐ Non
- 29 Savez-vous que le goût, l'odeur ou la couleur des boissons sucrées (bissap, gingembre...), du lait caillé ou autres préparés à la maison peut changer à cause du contenant (bouteille plastique, sachet) et de la manière dont il a été stocké, surtout dans les pays chauds ? ☐ Oui, ☐ Non
- 30 Savez-vous que lorsqu'un récipient (bouteille, marmite, saladier, glacière...) est mal lavé, son contenu peut être dangereux pour la santé ? ☐ Oui, ☐ Non

Fig. 3. Formulaire de recueil des avis des lycéens du LEMA (face arrière)

Questionnaire_LEMA_JMEau2023__2023_03_1

Fichier Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Aide Rechercher

Calibri 11 A A

Coller Presse-papiers Police Alignement Nombre

C2

	A	B	C	D	E
1	Ecole	Niveau	Classe	Sous-classe	QuartierHabitation
2					
3			1ere		
4			Terminale		
5					
6					
7					
8					
9					

(a)

Questionnaire_LEMA_JMEau2023__2023_03_31

Fichier Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Aide Rechercher des outils

Calibri 11 A A

Coller Presse-papiers Police Alignement Nombre

J6

	A	B	C	D	E
1	Ecole	Niveau	Classe	Sous-classe	QuartierHabitation
2	LEMA - Lycée Eugène Marcel AMOGHO	Lycée	1ere	1ere B1	
3	LEMA - Lycée Eugène Marcel AMOGHO	Lycée	1ere	1ere B1	Potos
4	LEMA - Lycée Eugène Marcel AMOGHO	Lycée	1ere	1ere B1	Centre
5	LEMA - Lycée Eugène Marcel AMOGHO	Lycée	1ere	1ere B1	Franceville 2
6	LEMA - Lycée Eugène Marcel AMOGHO	Lycée	1ere	1ere B1	Mbaya
7	LEMA - Lycée Eugène Marcel AMOGHO	Lycée	1ere	1ere B1	
8	LEMA - Lycée Eugène Marcel AMOGHO	Lycée	1ere	1ere B1	Sogafric
9	LEMA - Lycée Eugène Marcel AMOGHO	Lycée	1ere	1ere B1	Maboukou

(b)

Fig. 4. Numérisation des résultats des formulaires papiers remplis via un fichier gabarit Microsoft Excel préalablement contenant de nombreux champs à liste déroulante prérempli (a). Remplissage progressif dudit gabarit (b).

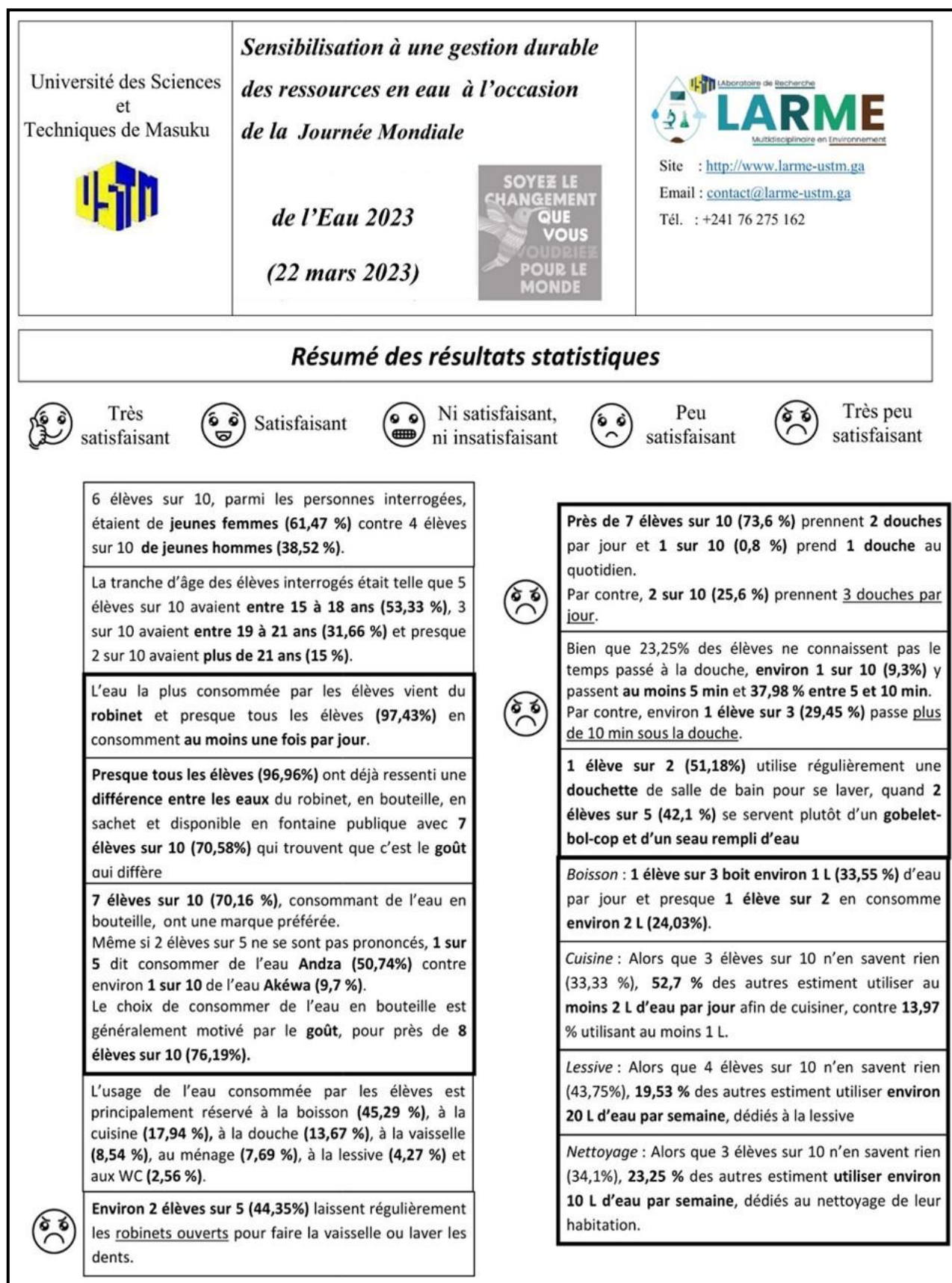


Fig. 5. Affiche au format A3, collée au sein du LEMA, qui présentent aux élèves les résultats statistiques sommaires de l'étude

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 RESULTATS

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus par thématique.

A. POURCENTAGE DES PARTICIPANTS

L'étude a ainsi montré que parmi les participants à l'enquête, sur 10 élèves, environ 5 étaient de jeunes femmes (56,39 %, soit 75 personnes), à peu près 3 de jeunes hommes (35,33 %, soit 47 personnes) et environ 1 ne souhaitait pas indiquer son sexe (8,27 %, soit 11 personnes). En ce qui concerne la tranche d'âge, 5 élèves sur 10 avaient entre 15 à 18 ans (53,33 %), 3 sur 10 avaient entre 19 à 21 ans (31,66 %) et presque 2 sur 10 avaient plus de 21 ans (15 %).

B. TYPE D'EAU CONSOMMÉE

Il s'est avéré que l'eau la plus consommée par les participants venait du robinet et presque. La majeure partie des élèves (97,43%) la consomment au moins une fois par jour. Qu'est-ce que les élèves font-ils de l'eau consommée ? Principalement réservé à la boisson (45,29 %), à la cuisine (17,94 %), à la douche (13,67%), à la vaisselle (8,54 %), au ménage (7,69 %), à la lessive (4,27 %) et aux WC (2,56 %). Ils sont également majoritaires, ces élèves (96,96%) qui ont déjà ressenti une différence entre les eaux du robinet, en bouteille, en sachet et de la fontaine publique. Nous avons quand même 70,58% des élèves (7 élèves sur 10) considérant que la différence constatée est surtout liée au goût.

C. GASPILLAGE D'EAU

L'étude a démontré qu'environ 62,3% (à peu près 3 élèves sur 5) n'a pas remarqué de fuites d'eau, de robinets cassés ou de tuyaux percés, dans son habitation. Malheureusement, 44,35% (soit environ 2 élèves sur 5) se permettent régulièrement de laisser les robinets ouverts en permanence, au moment de se brosser les dents ou en faisant la vaisselle.

D. CONSOMMATION D'EAU AU QUOTIDIEN À LA MAISON

Nous avons environ 7 élèves sur 10 (73,6 %) qui prennent la douche 2 fois/jour contre 1 sur 10 (0,8 %) qui ne se lave qu'une seule fois quotidiennement. Toutefois, il est à constater que 25,6% (2 élèves sur 10) se lavent 3 fois par jour. Pratiquement un quart des élèves (23,25%) ne surveille pas le temps passé sous la douche, un dixième environ (9,3%) sait qu'il y passe au moins 5 min contre deux cinquièmes d'entre eux (37,98 %) y passé entre 5 et 10 min. Environ 1 élève sur 3 (29,45 %) passe plus de 10 min sous la douche. 1 élève sur 2 (51,18%) utilise régulièrement une douchette de salle de bain pour se laver, quand 2 élèves sur 5 (42,1 %) se servent plutôt d'un gobelet-bol-cop et d'un seau rempli d'eau. Boisson: 1 élève sur 3 boit environ 1 L (33,55 %) d'eau par jour et presque 1 élève sur 2 en consomme environ 2 L (24,03%).

Cuisine: Alors que 3 élèves sur 10 n'en savent rien (33,33 %), 52,7 % des autres estiment utiliser au moins 2 L d'eau par jour afin de cuisiner, contre 13,97 % utilisant au moins 1 L. Lessive: Alors que 4 élèves sur 10 n'en savent rien (43,75%), 19,53 % des autres estiment utiliser environ 20 L d'eau par semaine, dédiés à la lessive. Nettoyage: Alors que 3 élèves sur 10 n'en savent rien (34,1%), 23,25 % des autres estiment utiliser environ 10 L d'eau par semaine, dédiés au nettoyage de leur habitation.

E. CONSOMMATION D'EAU AU QUOTIDIEN À L'ÉTABLISSEMENT SCOLAIRE

Près d'1 élève sur 2 (52,34 %) consomme l'eau de son établissement scolaire. 4 élèves sur 5 (80 %) ne consomment pas l'eau de leur établissement scolaire à cause de la mauvaise hygiène à proximité des robinets. Parmi les élèves consommant l'eau de l'établissement, environ 1 élève sur 2 (56 %) la consomme au moins 2 fois/jour, seulement 3,75 % la consomment au moins 2 fois/semaine, 3 % à ne la consomment qu'au moins 2 fois/mois. Près de 4 élèves sur 5 (81,51 %) sont insatisfaits de la qualité de l'eau de leur établissement. Environ 1 élève sur 2 (54,36 %) apporte de l'eau de chez lui, étant insatisfait de la qualité de l'eau de leur établissement. Environ 9 élèves sur 10 (87,61 %) des élèves achètent de l'eau sur place car ils sont insatisfaits de la qualité de l'eau de leur établissement.

F. UTILISATION DE L'EAU DE PLUIE

Alors que 3 élèves sur 10 n'en savent rien (33,33 %), près d'1 élève sur 2 (51,53 %) récupère de l'eau de pluie pour l'utiliser par la suite. Parmi les principaux usages de l'eau de pluie, 15 % des élèves s'en servent pour la lessive, 14,55 % pour la vaisselle, 12,67 % pour les WC et 8,9 % pour le potager.

G. STOCKAGE DE L'EAU ET CONSOMMATION

9 élèves sur 10 (90 %) entreposent de l'eau dans des récipients de stockage, dans leur lieu d'habitation. Près d'1 élève sur 2 (52,66 %) entrepose son eau dans des bouteilles ou bidons en plastique. Un peu moins de 7 élèves sur 10 (68,51 %) entreposent leur eau à la lumière, dans leur lieu d'habitation. Environ 4 élèves sur 5 (83,59 %) sont conscients qu'ils ne doivent pas laisser leurs récipients de stockage (bouteille, seau, fût,...) ouverts et à l'air libre (risque de maladie). Environ 4 élèves sur 5 (85,15%) savent qu'il ne faut pas laisser l'eau entreposée à la lumière. Consommer une telle eau peut rendre malade. Près de 3 élèves sur 5 (58,59 %) estiment qu'un contenant et son lieu de stockage peuvent influencer le goût, l'odeur ou la couleur des boissons sucrées (bissap, gingembre,...), du lait caillé ou autres préparations fait maison, en particulier en pays chauds. Environ 4 élèves sur 5 (77,34 %) des élèves savent que le contenu d'un récipient mal lavé (bouteille, marmite, saladier, glacière,...) peut être dangereux pour la santé.

H. UTILITÉ DE LA RÉCUPÉRATION D'EAU USÉE

Environ 3 élèves sur 5 (63,84 %) sont conscients que l'eau des rivières est utilisée par la SEEG et les populations.

I. CONSOMMATION DE L'EAU ACHETÉE

7 élèves sur 10 (70,16 %), consommant de l'eau en bouteille, ont une marque préférée. Même si 2 élèves sur 5 ne se sont pas prononcés, 1 sur 5 dit consommer de l'eau Andza (50,74%) contre environ 1 sur 10 de l'eau Akéwa (9,7 %). Le choix de consommer de l'eau en bouteille est généralement motivé par le goût, pour près de 8 élèves sur 10 (76,19%).

J. GESTION DE L'EAU USÉE

Près d'1 élève sur 2 (51,96 %) n'a pas de fosse septique de récupération des eaux usées, dans son habitation. Ils sont environ 4 élèves sur 5 (84,25 %) à ne pas jeter habituellement leurs eaux usées (lessive, vaisselle, cuisine,...) dans la nature.

K. GESTION DES EAUX NATURELLES

3 élèves sur 4 (75,96 %) sont conscients que les déchets laissés dans la nature pourraient se retrouver dans les rivières et les polluer. 4 élèves sur 5 environ (86,4 %) n'ont pas remarqué, dans leur voisinage, la présence de toilettes indigènes installées à proximité d'une rivière.

3.2 DISCUSSION

Notre étude était riche en informations. Les participants à l'enquête étaient au nombre de 133, avec environ 60 % d'élèves en classe de premières et 40% en classe de Terminale.

Parmi les points à retenir, il est à noter que les élèves consomment principalement l'eau du robinet. Ceci avait déjà été observé dans d'autres travaux de recherche sur la population gabonaise mais à Libreville [12]. Ces mêmes travaux viennent aussi corroborer le fait que la différence entre l'eau provenant des diverses sources est à rechercher dans la saveur. A la maison, l'eau sert en premier lieu comme boisson, constat déjà réalisé dans un autre contexte [8].

Dans de nombreux pays en développement, l'eau n'est pas disponible à tout moment au robinet, même si on en possède un. Une des stratégies est donc de remplir des récipients par anticipation [13]. Notre étude a montré qu'un élève sur deux stocke son eau dans des récipients, dans son lieu d'habitation mais qu'environ 7 élèves sur 10 laissent ledit récipient à la lumière. Pourtant, ils sont conscients du risque de maladies lorsque l'on garde le récipient ouvert et exposé à l'air libre. Cela vient valider des résultats initiaux sur les mauvaises habitations de stockage de l'eau pouvant entraîner des problèmes de santé chez les consommateurs [14].

En ce qui concerne l'eau achetée en bouteille, les élèves se sont surtout orientés sur les marques traditionnelles, celles-ci leur inspirant certainement plus confiance que les nouvelles venues sur le marché. Ce constat est fidèle à d'autres études ayant montré qu'en matière d'eau, le consommateur accorde plus sa confiance à un produit qui existe depuis longtemps [15].

Sur la gestion à proprement dite de l'eau, même si un.e élève sur deux n'a pas de système spécifique de récupération de ses eaux usées, la majorité des élèves s'abstient de s'en débarrasser dans la nature. Ceci est certainement la preuve de leur niveau de sensibilisation sur les dangers encourus lorsque des eaux de mauvaise qualité sont déversées n'importe où et pourraient à la longue atteindre des cours d'eau. Cet aspect a été étudié dans des travaux de recherche insistant sur l'importance de l'assainissement et de l'hygiène [16].

Nous pouvons tirer divers constats sur la préservation de l'eau par les élèves. Un.e élève sur quatre prend 3 douches par jour et le même pourcentage environ ne sait pas le laps de temps écoulé. Pour ceux qui connaissent le temps passé sous la douche, notons que 30% reconnaît y rester plus de 10 mn. Moins d'un.e élève sur deux est capable de contrôler la quantité d'eau utilisée durant son bain, notamment en se servant de gobelet et seau pour se laver. 45 % des élèves ont avoué laisser ouverts les robinets en continu pendant la vaisselle ou en se lavant les dents. Nos résultats viennent en partie valider ce qui a été remarqué chez les apprenant.e.s, peu sensibilisé.e.s sur la gestion durable de l'eau [17].

L'influence de l'établissement scolaire sur la manière de consommer l'eau est non négligeable. Notre étude a montré que 52,4 % des élèves boivent l'eau accessible dans leur établissement et parmi eux, 81,51 % en sont tout de même insatisfaits. C'est certainement pourquoi certain.e.s choisissent de ramener de l'eau de chez eux quand d'autres préféreront en acheter sur place (87,61 %). Parmi les élèves que ne consommant pas l'eau de leur établissement scolaire, c'est le manque d'hygiène à proximité des points d'eau qui les rebute. Des travaux antérieurs ont mis en lumière le comportement des apprenant.e.s, dont l'hygiène personnelle a un impact certain et peut être responsable de problèmes sanitaires en société [18].

Nous avons rencontré quelques difficultés techniques pour mener à bien notre étude. Il n'était pas facile de se mettre d'accord sur le contenu du formulaire d'enquête. Fallait-il seulement collecter des données ? Pouvait-on en même faire de la sensibilisation ? L'autre difficulté est apparue sur le format du formulaire. Numérique ou papier ? Un formulaire numérique, malgré ses avantages, avait quand même des limites. Faillait-il le publier en ligne impliquant de s'assurer que les élèves aient une connexion internet pour y accéder ? Faillait-il plutôt le déployer sur un téléphone ou une tablette et donc mettre cet équipement à disposition des élèves ou devrions-nous faire interface entre le formulaire numérique et l'enquêté.e [19] ? Le formulaire papier était moins contraignant et pouvait facilement être distribué, puis récupérer après remplissage par les élèves. Malheureusement, bon nombre d'élèves n'ont pas ramené leur formulaire complété. La numérisation des formulaires papiers a demandé une grande logistique ainsi que du temps et c'est bien là la principale limite de ce format.

4 CONCLUSION

L'eau, que l'Homme peut consommer sans trop de traitement, est une denrée rare. L'eau est un élément de base permettant au corps humain de vivre mais aussi de se nourrir. Diverses conditions peuvent entraîner la pollution de cette eau (surpopulation, usage de pesticides,...) qui rend difficile son recyclage. Consommer une eau de mauvaise qualité est dangereux pour la santé. Ainsi, nous devons préserver l'eau comme la prunelle de nos yeux.

Au LEMA, un lycée francilien gabonais, nous avons décidé de mener une étude de terrain destinée aux élèves de 1^{ère} et Terminale. Elle avait pour objectif de connaître les habitudes de consommation de l'eau et de sensibiliser cette population cible. Plusieurs résultats sont à retenir. Il y a eu 133 enquêté.e.s.

Les enquêté.e.s consommaient surtout l'eau du robinet. En buvant d'autres type d'eau, une différence notable apparaissait dans le goût. L'eau consommée à la maison servait surtout comme boisson. Pour éviter la recrudescence de maladies liées à la consommation d'une eau impropre, des efforts considérables restent à faire dans la manière de stoker l'eau dans les foyers gabonais où les coupures d'eau sont courantes. Lorsque les enquêté.e.s consommaient une autre eau que celle du robinet, les vendeurs d'eau traditionnels cristallisaient tous les regards.

Même s'il n'existait pas réellement une stratégie pertinente de récupération des eaux usées, les élèves savaient au moins qu'il ne fallait pas les déversées dans la nature. Toutefois, éviter de gaspiller l'eau n'est pas un point d'honneur à respecter chez nos interrogé.e.s: nombre de douches quotidiennes anormales, temps passé à la douche excessif, robinet ouvert tout au long de la vaisselle,... Lorsque les points d'accès à l'eau, dans l'établissement scolaire, sont peu hygiéniques, cela repousse les élèves. D'ailleurs, un bon nombre n'apprécie pas vraiment l'eau accessible aux robinets de leur établissement. Il y a des élèves qui, ne souhaitant pas la consommer, emmèneront leur propre eau depuis la maison quand d'autres en achèteront sur place.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement les responsables du Lycée Eugène Marcel AMOGHO (LEMA). Nous avons une pensée vive pour son proviseur, M. Justin ETELE et son censeur Hermann BEBONGA. Ils ont bien voulu nous accueillir. Ils ont pris de leur temps afin que nous rencontrions les élèves. Nous tenons également à remercier les élèves, pour la bonne volonté dont ils ont fait preuve, malgré les conditions du moment, pour les classes en examen notamment.

REFERENCES

- [1] Eau de France, «Le service public d'information sur l'eau». [Online] Available: <https://www.eaufrance.fr> (Date d'accès: 09/12/2025).
- [2] D. R. Rotimbo Mbourou, «Proposition d'une méthodologie de surveillance et de diagnostic de l'eau douce (plan et cours d'eau) via une bouée intelligente», *Journée Mondiale de l'Eau, thème Sécuriser l'eau douce pour un développement durable*, Université des Sciences et Techniques de Masuku (USTM), 22 mars 2025, Franceville, Gabon. [Online] Available: <https://hal.science/hal-05002132v1>.
- [3] C. De Wasseige, M. Tadoum, R. Eba'a Atyi, C. Doumenge, «Les forêts du Bassin du Congo-Forêts et Changements climatiques», *Neufchâteau: Weyrich*, pp.127, 2015, ISBN: 978-2-87489-356-8.
- [4] D. Ellison, C. E. Morris, B. Locatelli, D. Sheil, J. Cohen, D. Murdiyarso, V. Gutierrez, M. van Noordwijk, I. F. Creed, J. Pokorný, D. Gaveau, D. V. Spracklen, C. A. Sullivan, «Trees, forests and water: Cool insights for a hot world», *Global Environmental Change*, 43, 51–61, 2017.
- [5] Nations Unies, «2022 - Division de la Population», *World Population Prospects: the 2022 Revision*. [Online] Available: <https://population.un.org/wpp>.
- [6] G. O. Bigoumou Moundounga, «Mobilité et accès à l'eau potable dans les quartiers périphériques de Libreville (Gabon): de la défaillance du réseau d'adduction d'eau à l'importance des transports ?», *Djiboul*, N°002, Vol.4, pp.482-495, 2021. [Online] Available: <https://djiboul.org/wp-content/uploads/2021/12/Guy-Obain-Bigoumou-MOUNDOUNGA.pdf>
- [7] Fonds Monétaire International, «Consultations de 2015 au titre de l'article IV – communiqué de presse; rapport des services du FMI et déclaration de l'administrateur pour le Gabon», *Rapport du FMI NO. 16/86*, Mars 2016. [Online] Available: <https://www.imf.org/-/media/websites/imf/imported-publications-loe-pdfs/external/french/pubs/ft/scr/2016/cr1686f.pdf>
- [8] D. R. Rotimbo Mbourou, «Etude statistique sommaire sur la consommation d'eau au niveau de quelques fontaines publiques du quartier Mbaya», *Journée Mondiale de l'Eau, thème La place de l'eau dans nos sociétés et comment la protéger*, Laboratoire de Recherche Multidisciplinaire en Environnement (LARME), Université des Sciences et Techniques de Masuku (USTM), 20 mars 2021, Franceville, Gabon. [Online] Available: <https://hal.science/hal-04209372v1>.
- [9] UNECE, «The protocol on water and health: driving action on water, sanitation, hygiene and health», *World Health Organization Europe*, 2021. [Online] Available: https://unece.org/sites/default/files/2022-01/ProtocolBrochure_E_ECE_MP.WH_21_WEB.pdf
- [10] A. Abraham, L. Aja, T. Muhammad, M. Lubega, «Water pollution: causes, impacts and current efforts to address the issues of water pollution along river Meizimera-kihihi, Kanugu District, Uganda», *F1000Research*, 13: 1298, November 2024. <https://f1000research.com/articles/13-1298/v1>.
- [11] PNUD, «Les Jeunes en Afrique: un Impératif Démographique pour la Paix et la Sécurité Corne de l'Afrique, Grands Lacs et région du Sahel», *Centre de services régional pour l'Afrique*, 2023. [Online] Available: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-05/undp-africa-youth-in-africa-2023-FR_0.pdf
- [12] P. Soulounganga, M. Ndjeri-Ndjouhou, F. E. Ngohang, «Habitudes de consommation des eaux de boisson et perception de la qualité organoleptique de l'eau de robinet par les populations du Grand Libreville (Gabon)», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17 (3): 1117-1130, April 2023. [Online] Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/314f/bc90180ae2a091ffca7a22fad5425f068c3f.pdf>
- [13] A. Zunuo Dongdem, B. Sarfo, A. Addo-Lartey, D. Nana Adjei, G. Boateng, W. Takramah, M. Afetor, G. Ababio, G. Kye-Duodu, B. Kwasi Offei, S. Owusu-Agyei, F. Anto, «Bacteriological quality of household drinking water and cholera risk in the Greater Accra Region, Ghana», *Pan African Medical Journal*, December 2025,. 2025; 50 (39). [Online] Available: <https://www.panafrican-med-journal.com/content/article/50/39/pdf/39.pdf>
- [14] C. B. Nkum, M. S. Fopa, L. Beyala, K. H. Tchio-Nighie, E. Guenou, A. Nanfak, C. Nangue, J. Ateudjieu, «Mapping water sources and access to drinking water in the Lake Chad region of Cameroon: a cross-sectional study», *Pan African Medical Journal*, December 2023, 8; 46: 98. [Online] Available: <https://www.panafrican-med-journal.com/content/article/46/98/full>.

- [15] M. Falilu Jalloh, A. Rhoderick Williams, M. Bailor Jalloh, P. Sengeh, G. Saquee, J. Bartram, «Consumer perceptions and purchasing of packaged water products in Sierra Leone», *Pan African Medical Journal*, 2018, 30: 262. Online Available: <https://www.panafrican-med-journal.com/content/article/30/262/pdf/262.pdf>
- [16] M. P. Schlegelmilch, A. Lakhani, L. Duncan Saunders, G. Singh Jhangri, «Evaluation of water, sanitation and hygiene program outcomes shows knowledge behavior gaps in Coast Province, Kenya», *Pan African Medical Journal*, 2016, 23: 145. Online Available: <https://www.panafrican-med-journal.com/content/article/23/145/pdf/145.pdf>
- [17] M. Msawenkosi, «Water wastage in secondary schools: a case of secondary schools in esikhaleni circuit, King Cetshwayo District, KwaZulu-Natal», *Technium Social Sciences Journal*, 24, 89-98, 2021.
[Online] Available: <https://ideas.repec.org/a/tec/journal/v24y2021i1p89-98.html>.
- [18] Y. Çelik, Y. Zeynep, «Investigation of the Awareness and Habits of Secondary School Students about Cleanliness and Hygiene from Various Variables», *International Education Studies*, 12, 173-173, 2019.
[Online] Available: <https://ccsenet.org/journal/index.php/ies/article/view/0/38918>.
- [19] D. R. Rotimbo Mbourou, «Collecte de données offline via KoBoToolbox», *Workshop of Organic Matter in Africa 2024 (WOMA 2024)*, 12 décembre 2024, Hôtel Heliconia, Franceville, Gabon.
[Online] Available: <https://hal.science/hal-05002138v1>.

Incidence des écotaxes sur la gestion rationnelle des déchets ménagers et assimilés dans une entité territoriale décentralisée: Cas de la ville de MBUJIMAYI (RDC)

[Impact of eco-taxes on the rational management of household and similar waste in a decentralized territorial entity: The case of the city of MBUJIMAYI (DRC)]

Muya Mulumba Sammy

Assistant, Département des sciences Agrovétérinaires, Institut supérieur Pédagogique de KABEYA KAMWANGA, RD Congo

Copyright © 2026 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: Following the numerous negative externalities resulting from the absence of a rational waste management system for household waste in several cities of the DRC, a study was organized in the city of MBUJIMAYI. The objectives of this study were to identify the waste disposal Profile, to verify the degree of application of eco-taxes in waste management and to present the revenue management protocol for these eco-taxes once they are implemented in decentralized territorial entities.

To this end, a KAP survey was conducted with 477 households, in order to assess the implementation of selective sorting, the responsible behavior of different actors involved in sanitation and to take stock of application of polluter-pays principle via eco-taxes. We used analytical techniques and chi-square statistics.

The harmful effects of household wastes are unknown to 83,2% (397 out of 477 subjects surveyed), selective sorting is not respected (53,2 % or 254 out of 477 cases have only one bin), over 80 % (459 out of 477) acknowledge that they have never been subject to waste eco-taxes by their local authorities; over 80 % (452 out of 477) agree with these eco-taxes, and 45,2% propose paying a monthly amount not exceeding \$5 as the fee eco-tax fee.

KEYWORDS: eco-taxes, rational management, household and similar waste, decentralized territorial entity.

RESUME: Suite aux multiples externalités négatives que présente l'absence d'un système de gestion rationnelle des déchets générés par les ménages dans plusieurs villes de la RDC, une étude a été organisée dans la ville de MBUJIMAYI. Cette étude avait pour objectifs d'identifier le profil d'évacuation des déchets, de vérifier le degré d'application des écotaxes dans la gestion des déchets et de présenter le protocole de la gestion des revenus de ces écotaxes une fois qu'elles sont mises en place dans les entités territoriales décentralisées.

Pour ce faire, une enquête CAP a été menée auprès de 477 ménages, afin de se situer quant à la réalisation du tri sélectif, au comportement responsable de différents acteurs devant s'impliquer dans l'assainissement et effectuer un état de lieu sur l'application du principe pollueur-payeur via les écotaxes. Nous nous sommes servis de la technique analytique et du statistique Khi-deux.

Les effets néfastes de déchets ménagers sont méconnus de 83,2% (397 cas sur 477 enquêtés), le tri sélectif n'est pas respecté (53,2% soit 254 cas sur 477 n'ont qu'une seule poubelle), plus de 80% soit 459 cas sur 477 reconnaissent qu'ils n'ont jamais été soumis au paiement des écotaxes sur les déchets par les responsables de leurs entités territoriales décentralisées, plus de 80% soit 452 sur 477 sont d'accord de payer ces écotaxes et 45,2 % proposent de payer moins de 5 \$ comme tarif mensuel de ces écotaxes.

MOTS-CLEFS: écotaxes, Gestion rationnelle, Déchets ménagers et assimilés, Entité territoriale décentralisée.

1 INTRODUCTION

A l'instar d'autres villes de pays en voie de développement, la ville de MBUJIMAYI se trouve sous l'emprise d'une multiplicité des dépotoirs sauvages, un phénomène allant jusqu'à transformer les divers caniveaux et certaines artères en décharges publiques. Cette situation est engendrée notamment par la myopie écologique de différents acteurs résidentiels sur les externalités négatives des déchets

ménagers, l'absence d'une implémentation juridique incitative en matière de déchets [19], le manque d'infrastructures [4] ainsi que des moyens financiers [12] et l'inexistence d'un système adéquat de la gestion des déchets tant solides que liquides dans cette entité territoriale décentralisée.

Les statistiques démontrent que 3,5 milliards de personnes, constituant la moitié de la population mondiale n'ont pas accès à des services de traitement des déchets et le rejet des ordures à l'air libre reste leur principale méthode d'évacuation [12], et la production annuelle des déchets connaîtra un taux d'accroissement de 70% d'ici 2050 [3]. Les travaux de K.N. SEGBEAYA ont confirmé la présence des bacilles et entérobactéries dans les ordures ménagères et des lixiviats [9]. Plusieurs recherches ont démontré que la décomposition des déchets organiques exerce un pouvoir attractif sur les insectes vecteurs (moustiques, mouches, cafards, phlébotomes, simulies), les rongeurs pouvant être porteurs de multiples germes pathogènes imposant la santé humaine aux troubles tels que la typhoïde, la leptospirose, la salmonellose, la trichinose, l'histoplasmose, la tularémie, le Paludisme, la fièvre jaune, les filarioses, la dengue, la shigellose, la dysenterie, la dermatose, le virus de Zika et autres maladies infectieuses [1], [6], [13], [21]. Le rôle de l'environnement dans la morbidité et la mortalité d'origine respiratoire a été démontré par les chercheurs du programme de nations unies pour l'environnement (PNUE), attestant qu'entre 400 000 et 1 millions de personnes meurent chaque année de suite des maladies liées à une mauvaise gestion des déchets, notamment la diarrhée, le Paludisme, les maladies cardiovasculaires et le cancer, et que les déchets rejetés sur terre peuvent entraîner une pollution à long terme des ressources d'eau douce, cela par des agents pathogènes, des métaux lourds, des perturbateurs endocriniens et d'autres composés dangereux [18].

La combustion incontrôlée des déchets peut entraîner des émissions de polluants atmosphériques, notamment les dioxines, les furanes, le carbone noir, les métaux lourds et bien d'autres particules toxiques à la santé humaine, un facteur aggravant les pathologies tels que l'asthme, les allergies et la broncho-pneumopathie obstructive [6], [8]. L'impact négatif de l'inefficacité de stratégies d'assainissement a été mis en évidence par les travaux de Mohamadou AMADOU, identifiant les bactéries pathogènes comme *Bacillus cereus*, *Mycobacterium spp*, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus* et les germes fongiques dans l'air inspiré au tour de décharges ainsi que dans les eaux de puits situés à côté de ces dernières, ce qui expose les habitants vivant à proximité et ceux qui y travaillent à des énormes pollutions microbiologiques [14], [29].

Ainsi pour remédier à ce fléau et faire face aux multiples défis environnementaux, tous les pays membres de l'OCDE ont opté pour une intégration de la fiscalité environnementale dans leurs politiques, en adoptant à des degrés divers, une forme ou une autre des textes liés à l'environnement, des écotaxes obéissant non seulement au principe << Pollueur-payeur >> [15], [24], mais également à tous les cinq (05) principes de la gestion durable des déchets [17], soulignant que les coûts des externalités d'un agent économique ou Pollueur doivent être supportés par les producteurs [5], [20], tout en promouvant l'application correcte du principe << Pollueur-payeur >> dans les quatre domaines de la politique environnementale: la pollution industrielle, les déchets, l'eau et les sols [23]. Cependant, plusieurs nations ont joui de l'efficacité manifeste des écotaxes dans la réduction des dommages causés sur l'environnement comme le Québec, le Japon, la France, le Pays-Bas, la Corée du Sud, le Maroc, le Togo et la Tunisie.

A cette heure où la gestion des déchets ménagers et assimilés est devenue un enjeu sanitaire ainsi qu'environnemental majeur, il sied de se demander << **Quel est l'impact des écotaxes sur la gestion rationnelle des déchets ?**>>.

La présente étude se veut la mission d'analyser les connaissances, attitudes et pratiques des acteurs résidentiels vis-à-vis de la gestion de leurs déchets. Spécifiquement, cette étude vise à:

- Identifier le profil d'évacuation des déchets dans les ménages de la ville de MBUIJIMAYI;
- Vérifier l'existence des écotaxes liées à la gestion des déchets dans la ville de MBUIJIMAYI;
- Proposer un protocole de gestion des revenus des écotaxes au sein de l'entité territoriale décentralisée.

Au regard de la question principale de recherche, nous estimons à priori que << les écotaxes seraient non collectées dans la ville de MBUIJIMAYI>>; ensuite, nous avons pensé que << la légifération des écotaxes résoudrait les difficultés de la gestion des déchets dans nos entités territoriales>>.

2 CADRE CONCEPTUEL

2.1 GESTION RATIONNELLE DES DECHETS

La prévention aux risques de la mauvaise gestion des déchets provenant de producteurs multiples: Producteurs résidentiels (Écoles, Universités, Établissements médicaux, prisons), Producteurs industriels (Industries, entreprises de construction, fermes agricoles) et Producteurs commerciaux (Immeubles de bureau, centres commerciaux, hôtels, aéroports, restaurants, marchés, Boutiques d'alimentation et de divers, Pharmacie, Entrepôts, Transports automobiles,...) [6] réside dans une gestion rationnelle de ces produits résiduels, une approche comprenant cinq phases hiérarchisées [3], [13].

La phase de pré-collecte, qui regroupe un ensemble des opérations soutenat le recueil, le rassemblement et le stockage ou la conservation des déchets par les habitants ou producteurs ainsi que les éboueurs ou personnels de l'entreprise, une étape s'effectuant au moyen des caissons métalliques, poubelles individuelles, sacs poubelles en plastiques, bacs roulants, les pelles et ramassettes.

La phase de Collecte, correspondant à la récupération des Déchets présentés dans les récipients par des services municipaux ou privés, en vue de les acheminer aux centres de traitement. Cette phase se réalise au moyen des outils tels que les camions de collecte, les bennes à ordures, les compacteurs des déchets, les déchiqueteurs, les camions ramasseurs des déchets et la grue de relevage.

La phase de transport, consistant à porter les déchets, du lieu de collecte jusqu'aux installations de traitement et pouvant également se réaliser à l'aide des engins automobiles (remorques tractées, camions, bennes à compression, charrettes, tricycles).

La phase de traitement, une étape au cours de laquelle les déchets sont soumis à un tri sélectif ainsi qu'à des opérations devant permettre leur transformation ou valorisation (Biométhanisation, Compostage, Recyclage, Incinération à valorisation énergétique, Pyrolyse) [13], [25], cela au moyen des outils tels que le digesteur des déchets, la machine à compostage, le four-incinérateur, le malaxeur et le compacteur des déchets.

La phase d'élimination, une phase ultime consistant à se débarrasser des déchets qui ne peuvent pas être recyclés ou traités (Enfouissement Écologique).

2.2 IMPACT DES ECOTAXES

L'efficacité des écotaxes dans la gestion rationnelle des déchets au sein d'une entité territoriale décentralisée nécessite premièrement l'élaboration des dispositions légales, qui fixent le taux ou le tarif devant être perçu auprès de chaque producteur des déchets, et secondairement la fixation d'un plan de gestion des revenus qui découleront de l'application de cette réglementation. Néanmoins, les travaux de l'agence américaine de protection de l'environnement (U.S.EPA) ont démontré que les élus (Députés nationaux, Députés provinciaux, Conseillers Municipaux,...) de nombreuses villes hésitent à adopter des politiques qui imposeront des frais de service de collecte des déchets à leurs électeurs [6].

Les mêmes études attestent que les villes ayant adopté les politiques d'écotaxes rencontrent des difficultés engendrées par l'insuffisance de ressources administratives et financières, permettant de contrôler les frais de gestion des Déchets ainsi que d'autres revenus.

Ainsi pour pallier à la deuxième difficulté, nous trouvons que la solution durable réside dans l'intégration des écotaxes au sein du plan comptable et dans une estimation du coût de la gestion des déchets.

Pour ce faire, une facture proforma doit être établie, afin de trouver le coût nécessaire à la mise en place effective d'une brigade d'assainissement.

2.3 GESTION DES DECHETS EN LEGISLATION DE LA RDC

Deux textes législatifs analysés permettent de nous situer au regard de la problématique de gestion rationnelle des déchets dans notre pays la RDC [34], [36].

Le droit à un environnement sain et la responsabilité de l'État sont garantis par la constitution de la République, stipulant en son article 53 que << **Toute personne a droit à un environnement sain et propre à son épanouissement, elle a le devoir de le défendre et l'État veille à la protection de l'environnement ainsi qu'à la santé des populations** >>.

Ceci traduit le droit à la protection contre les pollutions sous toutes leurs formes ainsi que les déchets nuisibles.

Les travaux réalisés au ministère national du plan de notre pays ont dégagé les responsables de différentes structures devant s'occuper de l'environnement dans les entités territoriales décentralisées [33]:

- Les gouverneurs de provinces nomment un coordonnateur provincial de l'environnement, qui devra constituer un Bureau devant posséder une main mise sur 8 domaines (conservation de la nature, reboisement, **Assainissement**, établissements humains, services généraux, contrôle & inspection, cadastre forestier, chasse), tout en veillant que ce bureau comprenant une diversité scientifique et en excluant tout recrutement formelitaire des prestataires ;
- Le maire de la ville doit désigner un coordonnateur urbain de l'environnement, qui devra aussi créer un bureau qui aura les 8 domaines d'actions cis-mentionnés en sa charge, une approche qu'appliqueront tous les bourgmestres ainsi que chefs de quartiers ;
- Au niveau de chaque territoire, l'administrateur devra à son tour désigner un coordonnateur territorial de l'environnement, qui organisera une Cellule dont le pouvoir sera exercé sur 3 domaines (Établissements humains, gestion des forêts, **assainissement**).

Cette vision de la gestion des Déchets dans chaque entité territoriale est appuyée par la loi N°11/009 du 09 Juillet 2011 [34], portant principes fondamentaux relatifs à la protection de l'environnement, stipulant dans sa section 4, couvrant les articles 56,57 et 58, qui sont relatifs à la gestion des déchets, que l'État, la province et l'entité territoriale décentralisée s'assurent de la gestion rationnelle des déchets de manière à préserver la qualité de l'environnement et la santé. Cette loi interdit notamment la détention, le dépôt ou l'abandon à des

endroits non appropriés des déchets de toute nature susceptibles de provoquer des odeurs incommodantes, de causer des nuisances et des dommages à l'environnement, à la santé et à la sécurité publique ainsi que l'immersion, l'incinération ou l'élimination, par quelque procédé que ce soit des déchets dangereux ou radioactifs dans les eaux continentales et/ou maritimes sous juridictions congolaises ainsi que l'enfouissement dans le sol ou le sous-sol.

Cette loi stipule également que, toute personne physique ou morale publique ou privée, produisant ou détenant les déchets domestiques, industriels, artisanaux, médicaux, biomédicaux ou pharmaceutiques est tenue d'en assurer la gestion conformément aux dispositions légales; et propose également une série de sanctions à l'endroit de tout responsable.

Ainsi, nous trouvons que cette loi constitue un cadre propice à une gestion rationnelle des déchets, cela dans le sens qu'elle soutient une approche intégrée qui combine la protection de l'environnement, la responsabilité des producteurs, mais la mise en application de ces lois et la sensibilisation des populations restent des défis importants pouvant faciliter la gestion efficace des déchets ménagers dans nos entités.

Néanmoins, les deux textes législatifs précités sont muets en ce qui concerne la mise en place des écotaxes, alors qu'ils s'inspirent de principes fondamentaux et universels dont le principe de la précaution ainsi que celui du Pollueur-payeur.

2.4 BRIGADE D'ASSAINISSEMENT

La monture d'une brigade scientifique d'assainissement peut à priori se réaliser au moyen de l'achat des outils figurant sur le tableau ci-après, provenant d'une facture proforma adressée à la maison de vente ALIBABA:

N°	Libellés	Quantité	Prix unitaire en FC	Prix total en FC
1	Benne à ordures	2	45 649 123	91 298 246
2	Camion ramasseur	2	81 479 573	162 959 074
3	Camion aspirateur	2	36 813 809	73 627 618
4	Broyeur des déchets	1	36 813 809	36 813 809
5	Poubelle à roulette	250	39 269	9 817 250
6	Tricycle électrique	50	2 454 254	122 712 700
7	Mini-tracteur chargeur	2	12 271 270	24 542 540
8	Combinaison de protection	250	73 505 FC	18 376 250
9	Bottes de travail en PVC	250 paires	10 554	2 638 500
10	Gants de travail en Nitrile	250 paires	3 976	994 000
11	Masque à gaz facial	250	9 376	2 344 000
12	Pelle à broche	250	20 150	5 037 500
13	Casque de protection	250	24 543 la	6 135 750
14	Compacteur des déchets plastiques	1	46 630 825	46 630 825
15	Four d'incinération	1	12 271 270	12 271 270
16	Machine à compostage	1	18 652 330	18 652 330
17	Gel antibactérien	50 flacons	5 179	258 950
18	Poubelle industrielle à roulettes de 660 ml	5	540 722	2 703 610
19	Déchiqueteurs de déchets	1	19 634 032	19 634 032
20	Unité de traitement des eaux usées	1	4 908 508	4 908 508
TOTAL	-	-	-	662 356 762

En effet, cette facture constitue à ce stade une base pouvant permettre aux différentes structures environnementales d'estimer le coût total approximatif de la gestion des déchets ménagers et assimilés.

3 METHODOLOGIE

Une enquête CAP a été effectuée dans 477 ménages de la ville de MBUJIMAYI, cela grâce à un questionnaire auto-administré comportant un préambule et deux sections, A de renseignements sur l'enquête et B de pratiques relatives à la gestion des Déchets.

Les données issues de notre enquête ont été analysées au moyen d'un calcul de pourcentage et du test khi-deux.

4 RESULTATS

4.1 SITUATION DES ENQUETES

A la lecture de ce tableau, il sied de comprendre que la plus grande proportion de nos enquêtés est de 35,00% équivalant 167 cas sur 477 et se trouvant dans la commune de Diulu, suivie de la commune de Kanshi présentant 24,50% d'enquêtés, soit 117 sujets sur 477.

Tableau 1. Commune résidentielle

Commune	Effectif	SEXE		%
		MASCULIN	FÉMININ	
BIPEMBA	72	45	25	15,10
DIBINDI	68	36	32	14,30
DIULU	167	93	74	35,00
KANSHI	117	51	66	24,50
MUYA	53	27	26	11,10
TOTAL	477	254	223	100

Le tableau ci-dessous démontre que 53,2% soit 254 cas sur 477 de nos enquêtés étaient du sexe masculin, alors que le sexe féminin n'était représenté qu'à 46,8 %, soit 223 sujets sur 477.

Tableau 2. Ratio Homme-Femme

Sexe	Effectif	%
MASCULIN	254	53,2
FÉMININ	223	46,8
TOTAL	477	100

Tableau 3. Profession des enquêtés

Réponse	Effectif	%
FREELANCE	355	74,4
FONCTIONNAIRE	122	25,6
TOTAL	477	100

Ce tableau démontre que 74,4 % de nos enquêtés soit 355 cas sur 477 évoluent dans le secteur libéral, alors que les agents de l'État n'étaient qu'à 25,6 % soit un total de 122 enquêtés sur 477.

Tableau 4. Connaissance de conséquences néfastes de ses déchets

Appréciation	Effectif	%
Oui	80	16,8
Non	397	83,2
TOTAL	477	100

Il ressort de ce tableau que 16,8 % de nos enquêtés soit 80 cas sur 477 éprouvent une connaissance sur les effets néfastes de leurs déchets, alors que 83,2 % de nos enquêtés, un équivalent de 397 sujets sur 477 enquêtés n'a aucune idée sur les externalités négatives de leurs déchets.

Tableau 5. Nombre de Poubelles

Réponse	Effectif	%
0	118	24,7
1	254	53,2
2	69	14,5
> 2	36	7,6
TOTAL	447	100

Ce tableau indique que 24,7 % d'enquêtés soit 118 cas sur 477 ne possèdent aucune poubelle, 53,2% soit 254 cas sur 477 ont une poubelle, 14,5 % soit 69 sujets utilisent plus de deux poubelles et 7,6 % soit 36 enquêtés sur 477 détiennent plus de deux poubelles.

Le tableau ci-après traduit que 3,8% soit 18 enquêtés sur 477 attestent payer des taxes relatives à l'évacuation des déchets, alors que 459 enquêtés soit 96,2 % de 477 affirment aucune taxe sur les déchets ménagers ne leur est exigée par le représentant de l'État dans leur entité territoriale.

Tableau 6. Assujettissement à l'écotaxe des déchets

Réponse	Effectif	%
OUI	18	3,8
NON	459	96,2
TOTAL	477	100

Tableau 7. Mode d'évacuation des déchets

Réponse	Effectif	%
Abonnement Privé	102	21,4
Enfouissement	24	5,0
Incinération	120	25,2
Rejet de la rue	136	28,5
Rejet dans le ravin	95	19,9
TOTAL	477	100

À la lumière de ce tableau, nous constatons que 28,5% de nos enquêtés soit 136 cas sur 477 abandonnent leurs déchets sur la rue, 25,2% soit 120 cas brûlent les déchets à l'air libre, 102 cas soit 21,4% d'enquêtés se sont abonnés à des services privés de collecte de déchets (BACO SARL, GLOBAL), 19,9% d'enquêtés déversent les déchets ménagers dans les ravins et 5,0 % procèdent à l'enfouissement.

4.2 PREFERENCE ECOFICALE SUR LES DECHETS

Les données du tableau ci-contre montrent que 94,8% de ménages enquêtés soit 452 cas sur 477 sont favorables au paiement des écotaxes liées aux déchets ménagers, alors que 5,2 % soit 25 cas ne sont pas d'accord de payer ces taxes pigouviennes.

Tableau 8. Adhésion aux écotaxes sur les déchets

Avis	Effectif	%
OUI	452	94,8
NON	25	5,2
TOTAL	477	100

Tableau 9. Commune résidentielle et montant préféré pour le paiement des écotaxes

Commune	Montant < 5 \$	Montant 5-10\$	Montant > 10\$	TOTAL
BIPEMBA	43 (32,6)	21 (29,7)	8 (9,6)	72
DIBINDI	46 (30,7)	9 (28,0)	13 (9,1)	68
DIULU	61 (75,6)	91 (48,3)	15 (22,4)	167
KANSHI	41 (52,9)	53 (48,3)	23 (15,6)	117
MUYA	25 (24)	23 (21,8)	5 (7,1)	53
TOTAL	216	197	64	477

Les résultats de ce tableau d'incidence indiquent que 45,2% d'enquêtés soit 216 personnes sur 477 sont d'accord de payer moins de 5 \$ le mois, 41,2% soit 197 proposent de payer entre 5 et 10 \$ le mois, 13,4 % d'enquêtés trouvent bon de payer plus de 10 \$ comme tarif mensuel. En outre, ces données insinuent l'existence d'une association significative entre la commune résidentielle et le montant préféré pour le paiement mensuel des écotaxes, étant donné que $X^2 \text{ cal} = 48,04 > X^2 \text{ tab} = 15,507$ au ddf = 8 au seuil de 0,05.

Tableau 10. Sexe et Adhésion au paiement des écotaxes

Sexe	Adhésion (OUI)	Adhésion (NON)	TOTAL
MASCULIN	243 (240,6)	11 (13,3)	254
FÉMININ	209 (211,4)	14 (11,7)	223
TOTAL	452	25	477

Au seuil de signification de 0,05 et au ddl=1, les données de ce tableau démontrent que les hommes ont plus exprimé leur volonté de payer les écotaxes, étant donné que $X^2 \text{ cal} = 0,941 < X^2 \text{ tab} = 3,841$, traduisant qu'il n'existe pas de relation significative entre le sexe et l'adhésion au paiement des écotaxes.

Tableau 11. Profession et Mode d'évacuation des déchets

Profession	Abonnement	Enfouissement	Incinération	Rejet/Rue	Rejet/Ravin	TOT
Fonctionnaire	14 (26)	15 (17,8)	36 (30,6)	37 (34,7)	26 (24,2)	122
Freelance	88 (75,9)	15 (17,8)	84 (89,3)	99 (101,2)	69 (70,7)	355
TOTAL	102	24	120	136	95	477

Il s'avère que 74,4 % d'enquêtés soit 355 cas sur 477 sont des freelances, 25,6% soit 122 cas sur 477 sont fonctionnaires et que la hiérarchie de la dominance de modes d'évacuation des déchets est tel que le rejet sur la rue > l'incinération (25,1%) > l'abonnement au service privé (21,3%) > le rejet dans le ravin (19,9 %) > l'enfouissement (5,0 %). Ainsi au ddl= 4 et au seuil de 0,05, ces données traduisent l'existence d'une association significative entre le mode d'évacuation de déchets et la profession, $X^2 \text{ cal} = 10,88 > X^2 \text{ tab} = 9,488$.

4.3 GESTION DE REVENUS DES ÉCOTAXES

La réussite de la gestion rationnelle des déchets dans nos entités territoriales décentralisées ne repose pas seulement sur l'instauration des écotaxes, mais aussi sur la gestion de revenus générés par ces dernières.

De ce fait, la comptabilité des écotaxes perçues devra faire correspondre leurs différentes charges et les comptes référencés dans le plan comptable OHADA [36] de la manière suivante :

TYPE DE CHARGE	DESCRIPTION	N°DE COMPTE	MONTANT EN U.M
Coûts de collecte et de traitement	Frais pour la collecte, le transport et le traitement des déchets.	611: Services extérieurs	X
Investissement en infrastructures	Coûts d'acquisition ou d'amortissement des équipements	213: Immobilisations corporelles. 681: Amortissement	X
Frais administratifs	Coûts de gestion relatifs à la mise en œuvre des écotaxes (Salaires, Loyer, ...)	641: Charges de personnel. 604: Charges locatives	X
Frais de communication et Sensibilisation	Dépenses liées aux campagnes de sensibilisation et d'information du public.	623: Publicité et Communication	X
Frais de fonctionnement	Coûts généraux associés aux activités de traitement et recyclage (Électricité, Maintenance, Logistique, Désinfection, carburant,...)	606: Fournitures et Services	X
Coûts de formation	Dépenses engagées pour former le personnel sur les pratiques liées aux déchets et au traitement.	606: Formation professionnelle	X
PRODUIT DES ECOTAXES	-	707: Ventes de biens et Services	X

5 DISCUSSIONS DES RESULTATS

Ce travail s'est basé sur l'analyse de connaissances, attitudes et pratiques des acteurs résidentiels de 477 ménages dans la gestion rationnelle de leurs déchets avec comme objectifs, l'identification du profil d'évacuation des déchets, l'évaluation du niveau d'application des écotaxes liées aux déchets et l'élaboration d'un protocole de gestion de revenus issus de ces taxes environnementales au sein d'une entité territoriale décentralisée.

Les connaissances de toutes les externalités dues aux Déchets ménagers et assimilés, des outils d'évacuation des déchets ainsi que l'identification de divers Producteurs de déchets devra permettre aux autorités et / ou responsables de diverses structures environnementales, de mettre en place une brigade durable et scientifique d'assainissement [29], [30], [32].

Les résultats obtenus montrent que 83,2% d'enquêtés ignorent les effets néfastes de leurs déchets ménagers, 74,4 % sont des Freelances, 53,2% ne font usage que d'une poubelle et 24,7 % ne possèdent aucune poubelle.

Nos résultats montrent également que 96,2 % de ménages n'ont jamais été sommés de payer une taxe pour l'évacuation de déchets, alors que 21,4% seulement se sont abonnés à des entreprises privées de pré-collecte déversant nuitamment à leur tour ces déchets dans les ravins, caniveaux et que les rues de certains quartiers.

Nos résultats montrent aussi que 94,8 % de ménages ont accepté de payer une taxe environnementale sur les déchets, le montant proposé varie d'une commune à l'autre, 45,2% sont d'accord de payer moins de 5 \$ le mois et 41,2 % estiment que ces taxes soient payées à un prix oscillant entre 5 et 10\$ le mois, et que ce sont plus les hommes qui ont manifesté la volonté d'adhérer au paiement de ces taxes (au ddl =1 et au seuil $\alpha = 0,05$, $X^2_{cal} = 0,941 < X^2_{tab} = 3,841$).

Nos résultats confirment ceux du Dr Roch GOBINLO, issus de ses recherches sur la ville de Cotonou (Bénin), selon lesquels 53,6% des ménages acceptent une tarification liée au volume de déchets rejetés; et que 67,7 % de ménages enquêtés acceptent de payer pour participer au programme d'amélioration de la qualité du service d'élimination des déchets [31] ainsi que ceux de la CERN/CENCO, montrant que 68 % des ménages n'ont pas l'idée sur les taxes environnementales [29].

6 CONCLUSION

Ce travail a permis d'identifier les freins et les opportunités liés à l'application des écotaxes sur la gestion rationnelle des déchets ménagers et assimilés au sein de l'entité territoriale.

Par conséquent, nous suggérons ce qui suit:

- Les organes législatifs (assemblées nationales, assemblées provinciales, conseils urbains, conseils communaux, cours et tribunaux) doivent voter des lois mettant en place les écotaxes relatives aux déchets sous toutes leurs formes tel que présenté dans ce travail;
- Les responsables de chaque entité territoriale doivent identifier les différents contribuables aux écotaxes liées aux déchets et qui sont répartis en 3 catégories de producteurs des déchets présentées dans cette recherche;
- Les structures responsables de l'environnement doivent mettre en place une Agence dédiée à la collecte des écotaxes ainsi qu'à la gestion des déchets, en arrêtant des dispositions garantissant la réussite, la transparence et la traçabilité des fonds qui seront générés;

- La Création d'un panel constitué de Biologistes, Environnementalistes, Médecins, Chimistes, Juristes, Comptables et Politiques dont la mission sera de définir le protocole de gestion des Déchets à différents niveaux;
- L'organisation de campagnes d'information sur l'importance des écotaxes pour la gestion des déchets;

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'endroit de Léon Didas MUKANYA BEYA, auditeur à l'école doctorale de L'ISP BUKAVU et assistant au département de sciences commerciales à l'ISP DE KABEYA KAMWANGA, pour toutes ses orientations ayant permis de finaliser notre recherche.

REFERENCES

- [1] Alain PIRAS (1993), Nuisances pour l'environnement et la santé, et maîtrise des risques liés aux Déchets solides et liquides ménagers: La gestion de ces déchets dans l'agglomération Grenobloise, Sciences Pharmaceutiques, HAL -DUMAS, Thèse de Doctorat, Université de JOSEPH FOURIER.
- [2] Alfred PFALLER (2013), Les écotaxes en Europe: Quels paramètres de politique économique pour éclairer le débat, Analyses & Documents, Bureau de Paris.
- [3] Antoine BUGÉ & Al. (2021), La gestion des Déchets solides: Comprendre pour mieux agir, FOCUS, Agence Française de Développement, Paris.
- [4] David ASCHER (2014), Quels outils pour optimiser la collecte des Déchets ? Environnement et techniques, éd.ACTU-ENVIRONNEMENT.
- [5] DGE-GEODE (2015), Financement de la gestion des Déchets selon le principe de causalité, Bureau d'information & Communication (B.I.C), Canton de Vaud, Suisse.
- [6] EPA (2020), Meilleures Pratiques de gestion des Déchets solides: Guide destiné aux décideurs dans le pays en voie de développement, Bureau de Conservation & de Récupération des ressources.
- [7] Hager TRABELSI CHAÏBI (2023), Promouvoir la fiscalité environnementale en Tunisie, POLICY BRIEK, Tunis.
- [8] Jacques AMEILLE & Al. (2005), Santé - Environnement et Santé - Travail: nouvelles perspectives de recherches, Agence Nationale de la Recherche, Paris.
- [9] Kwamivi N.SEGBEAYA (2012), Évaluation de l'impact des déchets ménagers sur la ville de Kara (Togo) sur la qualité de la rivière de Kara, Thèse de Doctorat, Université de Lomé en Co-tutelle à l'université de LIMOGES.
- [10] Lahcen ETTAHIRI & al. (2024), The ecotaxes for environmental protection in the light of sustainable development goals: Evidence from Morocco, E3S web of conference 477, 00071, Ibn, Tofail University.
- [11] Laurence ROCHER (2006), Gouverner les déchets: Gestion territoriale des déchets ménagers et participation publique, Thèse de Doctorat, Université de Tours.
- [12] Mark HYMAN (2013), Directives pour établir des stratégies nationales de gestion des déchets: Passer de défis aux opportunités, PNUE, Unitar.
- [13] Melhyas KPLE (2015), Étude des voies de valorisation des Déchets ménagers au Bénin: cas de la ville d'Abomey-Calavi, Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi & université de LORRAINE.
- [14] Mohamadou AMADOU (2021), Caractérisation des ordures ménagères et risques microbiologiques potentiels associés aux décharges situés à proximité des habitations à Bamako, Thèse de Doctorat, Université des sciences, Techniques et technologiques de Bamako.
- [15] OCDE (2001), Les taxes liées à l'environnement dans les pays de l'OCDE: Problèmes et Stratégies, Service de publication de l'OCDE, Paris.
- [16] OECD (1999), Environmental taxes: Recent development in China and OECD countries, OECD Publication Service, Paris.
- [17] Paul DEFONTAINE (2003), Pour une gestion durable des Déchets, Cercle National de Recyclage, LILLE.
- [18] PNUE (2024), Global waste management Outlook 2024: Beyond an age of waste-turning rubbish into a resource, Nairobi.
- [19] Prince KIFWANISU & al. (2022), Fiscalité en République Démocratique du Congo et taxation environnementale: Mouvements et Enjeux sociaux, 122, 140-149, SSOAR.
- [20] Renaud NOUGAROL (2023), La tarification incitative des déchets ménagers comme Processus d'économisation ? Sociologie de recadrage et de débordement d'une politique publique, Sociologie, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.
- [21] Swati SRIVASTANA & al. (2015), Impact of Solid waste on health and the environment, International Journal of sciences and research (IJSR), volume 4, issue 9, September.
- [22] Thi Thuy Linh NGUYEN (2016), Analyse économique de la gestion des déchets ménagers au Vietnam: Le Cas des villes de Hanoi et d'Hochiminh, Economies & Finances, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux.
- [23] UE (2021), Principe du pollueur-payeur: une application incohérente dans les différentes politiques et actions environnementales de l'UE, Curia Rationum, Paris.

- [24] Alexandre TURGEON & al. (1998), Les instruments économiques & la protection de l'environnement: Version préliminaire pour consultation.
- [25] Verdieu PIERRE GEORGES (2020), Les émissions de Biogaz issus de décharges à ciel ouvert; et la réduction des impacts par un schéma de valorisation et de traitement des Déchets solides: cas particuliers Port-au-Prince, Thèse de Doctorat, Université des Antilles, Haïti.
- [26] Katia SADI OUFELLA & al. (2020), La gestion des déchets ménagers: cas de la commune de de TIZI OUZOU, Mémoire de Master, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZ-OUZOU.
- [27] Julien CARRETIER & al. (2012), Effets sanitaires liés à la gestion des Déchets ménagers et assimilés, ORS Rhône-Alpes.
- [28] Henri MUHIYA MUSABATE (2019), Environnement et taxes dans la commune de Lemba à Kinshasa, CERN/CENCO, Kinshasa.
- [29] Mebratu DESTA & al. (2022), La Combustion des déchets à ciel ouvert en Afrique: Défis et opportunités, Engineering X et les champions de haut niveau des Nations unies (UNHLC).
- [30] Roch GBINLO (2010), Organisation et financement des déchets ménagers dans les villes de l'Afrique Subsaharienne: le cas de la ville de Cotonou au Bénin, HAL, Paris, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans.
- [31] Christophe Le JALLÉ & al. (2004), Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain, Groupe Agence Française de Développement, Paris.
- [32] Adel Azzedine BENRAMDANE & al. (2018), Valorisation des Déchets par incinération: Déchets ménagers et assimilés, Mémoire de Master, Centre universitaire de Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, ALGER.
- [33] MINISTÈRE DU PLAN (2006), Évaluation de l'impact environnemental et social de puspres: Plan cadre de gestion environnementale et sociale des composantes urbaines 4 et 5, Volume 2, International Consultants in environmental Management, RP410.
- [34] JOURNAL OFFICIEL (2011), Loi N°11/009 du 09 juillet 2011 portant principes fondamentaux relatifs à la protection de l'environnement, Numéro Spécial, 52 ème année, Kinshasa.
- [35] OHADA (2017), Système comptable OHADA: Guide d'application, SYSCOHADA.
- [36] RDC (2011), Constitution de la République Démocratique du Congo, modifiée par la loi N° 11/002 du 20 Janvier 2011 portant révision de certains articles de la constitution du 18 février 2006, Journal officiel, Numéro Spécial, 52 ème année, kin.

Etude ethnobotanique et évaluation in vitro des activités antifongiques des extraits aqueux et hydro-éthanoliques de trois plantes médicinales ivoiriennes sur des germes fongiques responsables de mycoses superficielles en Côte d'Ivoire

[Ethnobotanical study and in vitro evaluation of the antifungal activities of aqueous and hydro-ethanolic extracts of three Ivorian medicinal plants on fungal germs responsible for superficial mycoses in Ivory Coast]

KOUASSI Kouassi Germain¹, BOLOU Gbouhoury Eric-Kevin², KONAN Gbé Kouakou N'Dri Ange², YAPO Yomeh Cynthia Viviane³, AKA ANY-GRAH Adjoua Sandrine Armelle⁴, and ZIRIHI Guédé Noël¹

¹Ecole Doctorale, Biologie-Environnement-Santé (ED-BES), Laboratoire des Milieux Naturels et Conservation de la Biodiversité, UFR Biosciences. Université Félix HOUPHOUËT- BOIGNY (UFHB), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Laboratoire de Biologie et Santé, UFR Biosciences. Université Félix HOUPHOUËT- BOIGNY (UFHB), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Département des Sciences et Technologie, Université Alassane OUATTARA (UAO), BPV 18 Bouaké 01, Côte d'Ivoire

⁴Laboratoire des Sciences du Médicament, Sciences Analytiques et Santé Publique, UFR de Sciences Pharmaceutiques et Biologiques (SPB), Université Félix HOUPHOUËT- BOIGNY (UFHB), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2026 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: *Background:* Following ethnobotanical surveys, *Combretum paniculatum* Vent (Combretaceae); *Trema orientalis* (L.) (Cannabaceae) and *Duguetia staudtii* (Diels & Engl) (Annonaceae) were the plants most cited and recommended in the treatment of various dermatoses, including superficial mycoses. Fungal infections, which are a frequent reason for consultation in dermatology, often have enormous consequences for victims, especially immunocompromised individuals.

Objectives: To evaluate the in vitro antifungal activities of aqueous and hydro-ethanolic extracts of these plants on two dermatophytes (*Trichophyton mentagrophytes*^R; *Trichophyton rubrum*^R) and a yeast *Candida albicans*^R 479 in order to confirm their use in traditional medicine and contribute to the fight against superficial mycoses which are on the rise in Ivory Coast.

Methodology and results: Extracts from each plant were incorporated into Sabouraud agar using the double dilution method in tilted tubes. Dermatophytes (*Trichophyton mentagrophytes*^R; *Trichophyton rubrum*^R) and the yeast *Candida albicans*^R 479 were sensitive to both aqueous and hydro-ethanolic extracts in 70% of the plants studied. However, it was the 70% hydro-ethanolic extracts that were the most active on all fungal strains with lower MICs (between 01.56 and 50 mg/ml); IC50 values ranging from (0.78 to 03.125 mg/ml).

Conclusion and application of results: These results justify the traditional use of these medicinal plants and show that they would constitute a renewable and innovative source of therapeutic molecules that can be used to produce effective antifungals for the treatment of fungal dermatoses.

KEYWORDS: ethnobotanical investigations, antifungal activities, medicinal plants, superficial mycoses.

RESUME: *Contexte:* Suite à des enquêtes ethnobotaniques, *Combretum paniculatum* Vent (Combretaceae); *Trema orientalis* (L.) (Cannabaceae) et *Duguetia staudtii* (Diels & Engl) (Annonaceae) ont été les plantes, les plus citées et recommandées dans le traitement de diverses dermatoses, dont les mycoses superficielles. Constituant un motif fréquent de consultation en dermatologie, les mycoses présentent souvent d'énormes conséquences chez les victimes, surtout les immunodéprimés.

Objectifs: Evaluer les activités antifongiques in vitro des extraits aqueux et hydro-éthanoliques de ces plantes sur deux dermatophytes (*Trichophyton mentagrophytes*^R, *Trichophyton rubrum*^R) et une levure *Candida albicans*^R 479 afin de confirmer leur usage en médecine traditionnelle et contribuer à la lutte contre les mycoses superficielles à forte recrudescence en Côte d'Ivoire.

Méthodologie et résultats: Les extraits de chaque plante ont été incorporés à la gélose Sabouraud Agar selon la méthode de double dilution en tubes penchés. Les dermatophytes (*Trichophyton mentagrophytes*^R, *Trichophyton rubrum*^R) et la levure *Candida albicans*^R 479 ont été sensibles aux extraits aqueux aussi bien que ceux hydro-éthanoliques 70% des plantes étudiées. Cependant, ce sont les extraits hydro-éthanoliques 70% qui ont été les plus actifs sur toutes les souches fongiques avec des CMI plus faibles (compris entre 01,56 et 50 mg/ml); des valeurs de la CI₅₀ allant de (0,78 à 03,125.mg/ml).

Conclusion et application des résultats: Ces résultats permettent de justifier l'utilisation traditionnelle de ces plantes médicinales et montrent qu'elles constitueraient une source renouvelable et innovante des molécules thérapeutiques pouvant servir à la production d'antifongiques efficaces pour le traitement des dermatoses fongiques.

MOTS-CLEFS: investigations ethnobotaniques, activités antifongiques, plantes médicinales, mycoses superficielles.

1 INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, nous avons observé une recrudescence des pathologies infectieuses humaines, exacerbée par les infections à VIH et les maladies opportunistes [1]. Parmi ces infections, les viroses, les bactérioses et les mycoses se distinguent par leur fréquence croissante. Les mycoses superficielles, en particulier, représentent environ 10 % de toutes les maladies de la peau et touchent 20 à 25 % de la population mondiale [2]. Elles incluent principalement les dermatophytoses et les candidoses, dont la fréquence a augmenté en raison de divers facteurs environnementaux et génétiques [2].

Les dermatophytoses sont causées par trois genres de dermatophytes: *Trichophyton*, *Microsporum* et *Epidermophyton*, qui dégradent les tissus kératinisés chez l'homme et les animaux domestiques [3]. Les infections causées par *Trichophyton mentagrophytes* et *Trichophyton rubrum* sont particulièrement courantes et représentent un problème de santé majeur dans la région de la M  , avec une prévalence de 35,68 % [4]. Les personnes les plus vulnérables à ces infections sont souvent les individus défavorisés, les adultes en activité, les personnes immunodéprimées, ainsi que celles dont l'hygiène corporelle est insuffisante [5], [6]. Les candidoses, causées par le champignon opportuniste *Candida albicans*, sont également fréquentes, surtout chez les jeunes enfants et dans les zones de plis cutanés [7]. Ce pathogène est particulièrement virulent chez les personnes immunodéprimées, comme celles atteintes du VIH [8], et peut entraîner des infections graves telles que des mycoses cutanées, muqueuses, phan  riennes, septicémiques et viscérales [7].

Face à l'inefficacité croissante des antifongiques synthétiques, leur coût élevé, et la résistance croissante des agents pathogènes [9], la recherche de traitements alternatifs devient essentielle. En Afrique de l'Ouest, où plus de 80 % de la population a recourt à la médecine traditionnelle pour les soins de santé primaires [10], les plantes médicinales jouent un rôle crucial. Actuellement, environ 35,41 % des traitements sont basés sur ces remèdes traditionnels [11]. Plusieurs études menées en Côte d'Ivoire ont confirmé l'efficacité de diverses plantes médicinales contre les dermatophytoses [12] et les candidoses [13], [14]. Malheureusement, ces travaux n'ont pas été étendus dans toutes les régions; notamment dans la M   (Sud-Est, Côte d'Ivoire).

Dans ce contexte, notre équipe de recherche a entrepris une étude ethnobotanique dans la région de la M   pour répertorier des plantes utilisées localement contre les mycoses. Nous avons sélectionné trois espèces végétales: *Combretum paniculatum* Vent (Combretaceae), *Trema orientalis* (L.) (Cannabaceae) et *Duguetia staudtii* (Eng & Diels) (Annonaceae), connues pour leurs vertus thérapeutiques multiples. Après avoir préparé des extraits aqueux et hydro-éthanoliques de ces plantes, nous avons évalué leurs activités antifongiques in vitro sur *Trichophyton mentagrophytes*, *Trichophyton rubrum* et *Candida albicans*. Cette recherche vise à fournir de nouvelles alternatives de traitement pour les mycoses superficielles et les candidoses humaines, accessibles et économiques pour les populations locales.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MATÉRIEL

Le matériel biologique était constitué des feuilles sèches de *Combretum paniculatum* et de *Trema orientalis*; d'écorces sèches de la tige de *Duguetia staudtii*.

Ces organes récoltés à l'état frais, respectivement à Mont  zo, un village du département d'Al  p   et à B  c  di-Brignan, une sous-préfecture du département d'Adzopé au Sud-Est de la Côte d'Ivoire, ont permis d'identifier ces espèces végétales en comparaison à l'herbier du Centre National de Floristique (CNF) de Côte d'Ivoire conformément aux spécimens existants.

L'authentification botanique de chaque plante médicinale a été effectuée au CNF de l'Université Félix-Houphouët-Boigny. Ces organes végétaux ont été utilisés pour la préparation des extraits.

Des micro-organismes fongiques cliniques résistantes font partis du matériel biologique utilisé. Ce sont deux dermatophytes: *Trichophyton mentagrophytes* (Fluconazole^R; Itraconazole^R) et *Trichophyton rubrum* (Itraconazole^R) et une levure saprophyte: *Candida albicans* 479 (Fluconazole^R Itraconazole^R et Voriconazole^R). Ces trois souches sont disponibles dans le Laboratoire de Biologie et Santé de l'UFR Biosciences de l'Université Félix-Houphouët-Boigny. *Trichophyton mentagrophytes* (Fluconazole^R; Itraconazole^R) a été isolé de la racine des cheveux d'un malade souffrant de teigne tondante; *Trichophyton rubrum* (Itraconazole^R) a été isolé du pus du pied d'athlète d'un malade et *Candida albicans* 479 (Fluconazole^R Itraconazole^R et Voriconazole^R) a été prélevé du pus d'otite d'un malade. Ces souches ont été toutes cultivées sur gélose de Sabouraud Agar contenant du chloramphénicol (Ref: M1067-500G, lot: 0000215703) produit par Himedia Laboratories.

Elles ont été utilisées pour l'évaluation des activités antifongiques de ces trois plantes médicinales étudiées.

2.2 MÉTHODES

2.2.1 ENQUÊTES ETHNOBOTANIQUES

Dans le cadre de cette étude, plusieurs acteurs de la pharmacopée traditionnelle de la zone d'étude ont accepté de donner leurs connaissances thérapeutiques sur ces plantes médicinales les plus sollicitées. La collecte des données a été possible grâce aux enquêtes ethnobotaniques, basées sur la méthode d'entretien semi-directif utilisée par [15].

Le guide d'entretien (fiche d'enquête) comportait des questions sur le nom local de l'espèce, les organes ou parties de la plante utilisée, leurs modes de préparation et d'administration des recettes, l'état d'utilisation des drogues, le type d'infection traité, etc. Les questions ont été posées en général dans la langue locale « l'Akyé. ». Dans cette étude, la nomenclature des espèces de plantes a suivi celle de [16].

2.2.2 SÉCHAGE D'ORGANES VÉGÉTAUX, BROYAGE ET EXTRACTIONS

Chaque organe (feuilles de *Combretum paniculatum*, de *Trema orientalis* et de l'écorce de tige de *Duguetia staudtii*) séché a été broyé et pulvérisé à l'aide du broyeur à hélice de marque Retch GM 300. Après broyage, chaque poudre végétale obtenue est passée au fin tamis permettant d'obtenir une poudre fine qui servira aux extractions.

Les extraits obtenus à partir de poudres végétales ont été préparés selon trois procédés classiques de préparation d'extraits dont deux utilisés en milieu villageois: la décoction et la macération. Ensuite, un autre procédé par macération en utilisant le mélange de l'eau osmosée à 30% et de l'éthanol 96°C à 70%. Au total neuf (9) extraits ont été obtenus dont trois extraits pour chaque plante étudiée.

DÉCOCTION

Pour extraire par décoction les différents composés chimiques de chaque plante, la méthode de [17] a été utilisée pour la décoction. 200 g de poudre d'organes de chaque plante ont été portés séparément à ébullition à 100°C pendant 30 minutes dans une casserole contenant 2 litres d'eau osmosée à l'aide d'un gaz. L'homogénat laissé refroidi pendant environ 1 heure a été d'abord essoré dans un carré de tissu, puis filtré à l'aide de deux tamis fins de diamètre différents (200 µm et 100 µm).

Ensuite, les filtrats ont été filtrés par un tissu blanc (popeline) afin de se débarrasser des impuretés plus fines et enfin par du coton hydrophile contenu dans un entonnoir posé sur un bidon.

MACÉRATION

200 g de poudre fine d'organes de chaque plante ont été utilisées en macération dans 2 litres d'eau osmosée pendant 24 h à l'aide d'un agitateur à hélice [18]. L'homogénat obtenu a été filtré successivement à l'aide de différent support comme décrit dans le procédé d'extraction précédent.

EXTRACTION HYDRO-ÉTHANOLIQUE 70%

L'extraction hydro-éthanolique 70% a été effectuée suivant la méthode de [19]. 200 grammes de poudre de drogue ont été macérés dans 2 litres d'un mélange (eau-éthanol, avec 600 ml d'eau osmosée et 1400 ml d'éthanol 96°C) contenu dans un bocal pendant 24 h sous agitation permanente.

SÉCHAGE DES DIFFÉRENTS FILTRATS

Les filtrats des extraits ont été mis dans des assiettes en porcelaine puis séché pendant 72 heures par évaporation dans une étuve de type Memmert à 55 °C. Chaque extrait végétal sec a été gratté puis pesé et conservé dans un bocal fermé hermétiquement au réfrigérateur à 4 °C jusqu'à utilisation pour les tests antifongiques.

2.2.3 EVALUATION DES ACTIVITÉS ANTIFONGIQUES IN VITRO SUR LES SOUCHES FONGIQUES

2.2.3.1 PRÉPARATION DU MILIEU DE CULTURE

La gélose a été préparée selon les indications du fabricant. En effet, 09,17 grammes de gélose en poudre du milieu Sabouraud Chloramphénicol Agar (SCA) ont été solubilisés jusqu'à homogénéisation complète dans 140 mL d'eau distillée, sur un agitateur magnétique IKA-MAG RCT. La solution obtenue constitue le milieu de culture. Le milieu ainsi préparé est coulé dans des tubes numérotés de 1 à 9 à raison de 20 mL dans le tube T1 et de 10 mL dans les autres tubes (allant du T2 à T9).

Deux tubes témoins contenant chacun 10 mL du milieu de culture avec l'un des tubes servant de témoin de contrôle de la croissance des germes (TC) et l'autre de témoin de contrôle de la stérilité (TS) du milieu de culture.

2.2.3.2 INCORPORATION DES EXTRAITS VÉGÉTAUX À LA GÉLOSE

L'incorporation des extraits végétaux à la gélose a été réalisée selon la méthode de la double dilution en tubes penchés en référence aux travaux de [20].

Les tubes tests contiennent des gammes de concentrations décroissantes des extraits allant de 100 à 0,39 mg/mL. Pour réaliser la double dilution, 2g d'extrait végétal a été homogénéisé dans 20 ml de gélose Sabouraud préalablement préparé dans le tube T₁ (portant la plus forte concentration: 100 mg/ml). Puis la moitié du volume de ce mélange homogène a été transférée dans le tube suivant (T₂), contenant au préalable 10 ml de gélose Sabouraud et homogénéisée.

Cette opération est répétée successivement pour les autres tubes jusqu'au tube T₈, comportant la plus faible concentration (0,39 mg/mL). Enfin, dans ce dernier tube (T₈), la moitié du volume du mélange est rejetée (Figure 1).

Les tubes ainsi préparés ont été stérilisés à 121 °C à l'autoclave pendant 30 mn et inclinés avec petit culot à la température du laboratoire (24°C) pour permettre le refroidissement et la solidification de la gélose [20].

2.2.3.3 PRÉPARATION DE L'INOCULUM

Cette préparation a été faite selon la méthode de [21] en homogénéisant une oeuse calibrée à 2 mm de diamètre de chaque espèce fongique prélevée dans 10 ml d'eau distillée stérilisée. Cela a donné la suspension mère dite suspension 10⁰ ayant une charge de 10⁶ cellules/mL. La suspension 10⁻¹ a été ensuite préparée par dilution de la suspension mère au 10^{ème} (1/10), en transférant 1 ml de cette dernière dans 9 ml d'eau distillée stérilisée, réduisant ainsi la charge à 10⁵ cellules/ml. C'est cette dernière suspension servant d'inoculum a été utilisée pour les tests antifongiques.

2.2.4 RÉALISATION DES TESTS ANTIFONGIQUES

Après la solidification de la gélose et la préparation de l'inoculum, tous les tubes (T₁ à T₈ et le témoin de contrôle de la croissance) sauf le témoin de contrôle de la stérilité ont été ensemencés en stries transversales avec 10 µL d'une suspension contenant environ 1000 cellules. Pour chaque série, les tests sont répétés 3 fois, pour plus de fiabilité, puis les tubes ainsi préparés ont été incubés à 30 °C [20] pendant 72 heures pour *Candida albicans* 479 et 5 jours pour *Trichophyton mentagrophytes*^R et *Trichophyton rubrum*^R.

2.2.5 DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES ANTIFONGIQUES (CMI ET CMF) DES EXTRAITS DE PLANTES

La concentration du tube expérimental n'ayant pas de croissance visible (pas de colonies visibles) correspond à la CMI. Une subculture à partir du tube identifié comme la CMI est réalisée dans une gélose neuve sans extrait de plante. La surface de la gélose est raclée avec l'anse et ensemencée dans cette gélose. Après 72 h ou 3 jours (*Candida albicans*), 5 jours (*Trichophyton mentagrophytes*) et (*Trichophyton rubrum*) d'incubation, la CMF (Concentration Minimale Fongicide) ont été lues.

Ainsi le tube ne comportant aucune croissance, est évalué comme la CMF, l'extrait est dit fongicide. Dans le cas contraire le tube correspond à la CMFs, l'extrait est dit fongistatique [20].

2.2.6 DÉTERMINATION DES POUVOIRS ANTIFONGIQUES DES EXTRAITS VÉGÉTAUX

L'effet antifongique des extraits végétaux testés a été déterminé en vue juger fongicide ou fongistatique chaque extrait végétal testé en fonction du rapport CMF/CMI [22].

Ainsi, si le rapport: $CMF/CMI \leq 4$, l'extrait végétal est dit fongicide;

$CMF/CMI > 4$, l'extrait végétal est dit fongistatique.

Un extrait végétal fongicide est une substance ayant la capacité de tuer des champignons microscopiques. Par contre, un extrait végétal (ou substance) fongistatique est une substance ayant la capacité d'inhiber la croissance des champignons microscopiques sans les tuer [21].

3 RESULTATS

3.1 ETUDE BOTANIQUE ET CARACTÈRES ETHNOBOTANIQUES DES PLANTES MÉDICINALES ÉTUDIÉES

3.1.1 PLANTE MÉDICINALE 1: COMBRETUM PANICULATUM VENT. (COMBRETACEAE)

- **Synonyme:** *Combretum abbreviatum* Engl.
- **Noms locaux:** En Attié, il est appelé: Yatandza; Ouandjouédjoué; en Baoulé, c'est Todah; en Guéré, la plante est appelée Zoha-m'bèhè; Soui-manga, etc.
- **Description botanique**

Combretum paniculatum Vent. (Combretaceae) est une liane arbustive ou un arbuste ligneux sarmenteux à long rameaux feuillé décombrant ou volubile. Il peut s'élever au-dessus de la végétation adjacente et atteindre plus de 15 m de long [22].

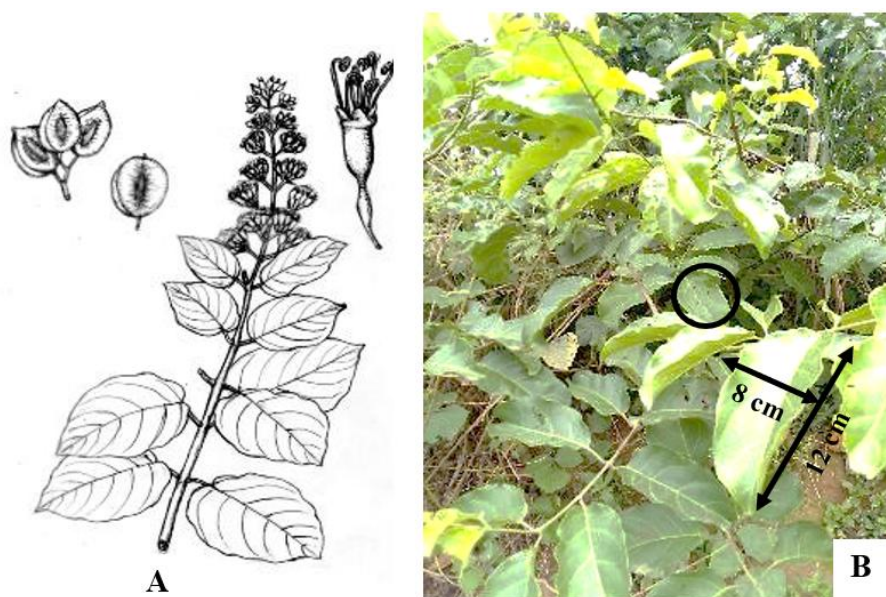


Fig. 1. Aspect général de *Combretum paniculatum* Vent (Combretaceae)
A: Planche; B: Rameau feuillée (Photo de terrain; Kouassi Germain, Alépé, Février 2023).

Le feuillage de cette plante est dense, vert-foncé avec des feuilles opposées, simples, entières qui renferment souvent des domaties sur la face inférieure [23] (Figure 1 B).

Ces domaties se développent en général pendant la croissance de la plante et deviennent des gallées visibles à la surface du limbe (Figure 1 B).

Le limbe étant variable, presque circulaire à oblong-elliptique ou ovale-oblong, peut atteindre 10 à 12 cm de long sur 6 à 8 cm de large (Figure 1 B). Les stipules sont absentes. Le pétiole, atteignant 3 cm de long, a une base souvent persistante et épineuse. L'écorce de la plante est grise ou gris noirâtre.

Les inflorescences sont en panicules (Figure 1 A) avec des fleurs à corolle et étamines de couleur rouge vif. Les fleurs sont bisexuées, régulières et presque sessiles [24].

- Utilisation thérapeutique de la plante dans la pharmacopée ivoirienne

En Côte d'Ivoire, les feuilles de *Combretum paniculatum* portant des galles sont broyées avec du sel et la pâte obtenue s'applique dans la bouche des enfants souffrant de stomatite, de mycoses buccales. Le décocté de feuilles à galles est utilisé en toilette vaginale pour traiter les hémorroïdes et candidoses vaginales [25].

Les racines de la plante sont broyées avec du piment et utilisées en lavement dans le même but. Les galles des feuilles sont broyées (ou malaxer) dans de l'eau et le liquide filtré est absorbé comme boisson pour prévenir les vomissements [24]. Le décocté de l'écorce des racines de *Combretum paniculatum* est utilisée traditionnellement par le peuple « Abbey » en boisson contre le Diabète [26].

Dans la région de la Mé (au Sud-Est de la Côte d'Ivoire), le décocté des feuilles est utilisé pour des toilettes intimes par les femmes « Akyé » qui souffrent de candidoses vaginales; démangeaisons et d'hémorroïdes vaginales et pertes blanches. Il est aussi employé par voie orale en boisson contre les douleurs abdominales et les troubles menstruels. Ensuite, les feuilles fraîches de la plante sont pétries (associées à du piments secs) et la pâte obtenue est utilisée pour faire un lavement dans le même but. Par ailleurs, le décocté des feuilles fraîches est utilisé en bain simple ou en pansement contre les dermatoses (teignes, pieds d'athlètes, furoncles, etc.). Les feuilles sèches pétries simplement ou additionnées de de l'huile palmiste; ou du jus de citron ou du kaolin blanc donne une pâte que les Akyé appliquent localement sur le corps pour soigner efficacement les hémorroïdes externes, les boutons hémorroïdaires et les dermatoses [27].

3.1.2 PLANTE 2: TREMA ORIENTALIS (L) BLUME (CANNABACEAE)

- **Synonyme:** *Trema guineensis* (Schumach. Et Thonn.); *Celtis orientalis* L.
- **Noms locaux:** En Attié (Anacha; Anachia); Agni (Assian); Baoulé (Azisian; Essien); Bété (Bronei); Malinké (Sokalo); Ebré (Blansénékia); Gouro (Fouéfoué).
- **Description botanique:**

Trema orientalis est un arbuste atteignant 8 m de haut, à cime tabulaire et dont les feuilles alternes, distiques, tronquée ou arrondies à la base sont dentées sur les bords [28], [29] (Figure 2).

Par ailleurs, selon [30], c'est un arbuste à croissance rapide atteignant 4 à 5 m de haut en 5 à 6 années.

Selon les conditions naturelles du milieu lui étant favorable, il peut aller jusqu'à 18 m de hauteur. Le limbe des feuilles étant de forme allongée, peut atteindre 7 à 10 cm de long sur 4 à 6 cm de large suivant l'âge et les conditions édaphiques du milieu (Figure 2).

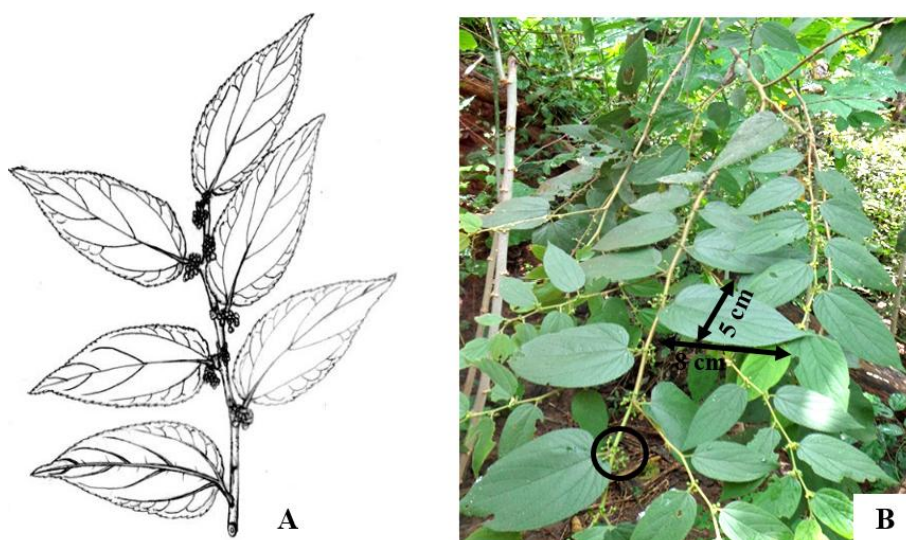


Fig. 2. Aspect général de *Trema orientalis* (L) Blume (Cannabaceae)
A: Planche; B: Aperçu des rameaux feuillés et florifères (Photo de terrain Kouassi G, Adzopé, Août 2023).

Cette plante appartenant à la famille des Cannabaceae selon [31], est généralement trouvée dans les endroits modifiés par l'homme: parcelle de culture en jachère, près des habitations, le long des routes mais aussi dans les forêts secondaires à travers l'Asie et l'Afrique

tropicale [32]. Les inflorescences sont des courtes cymes axillaires pubescentes, comportant de très petites fleurs polygames verdâtres [33] (Figure 2 B).

Selon [34], les fleurs sont petites, vertes ou blanches-verdâtres, unisexuées (Figure 2 B). Les fruits sont de petites drupes globuleuses ou rondes et charnues, vertes puis noire à maturité [35].

- Utilisation thérapeutique de la plante dans la pharmacopée ivoirienne et dans la région de la Mé

En Côte d'Ivoire, il s'agit d'une plante d'accès facile et d'utilisation maîtrisée dans le contexte socioculturel ivoirien [32]. Pour calmer les démangeaisons générales du corps, les Malinkés conseillent le décocté des feuilles en boisson ou / et en bains [36].

Ensuite, les feuilles sont utilisées dans le traitement de la gale [37]. La plante est également utilisée pour traiter le paludisme [38] et l'hypertension [39]. La plante « *Trema Orientalis* », est comptée parmi les plantes médicinales antimicrobiennes sollicitées en médecine traditionnelle par les populations ivoiriennes pour soigner les dermatoses. Par ailleurs, les feuilles fraîches triturées et le jus est consommé comme une boisson et permet de traiter le paludisme et l'hypertension artérielle dans la région du Haut-Sassandra [40].

En ce qui concerne son usage dans la région de la Mé (au Sud-Est de la Côte d'Ivoire), le peuple « Akyé » utilisent le décocté des feuilles contre la fatigue; le paludisme, les ulcères gastriques, le diabète et les dermatoses microbiennes (gale; pieds d'athlètes, etc.) [27]. En effet, les feuilles fraîches de *Trema Orientalis* pétries avec du jus de citron ou du poivre long ou du poivron donne une pâte (solide) qui est utilisée en application locale par voie cutanée contre les dermatoses.

De plus les feuilles fraîches de la plante sont malaxées ou pétries avec le nid de la guêpe ou du beurre de karité utilisée en massage ou par application locale par voie cutanée pour traiter efficacement les maux de cou et les enflures corporelles.

3.1.3 PLANTE 3: DUGUETIA STAUDTII (ENGL & DIELS) (ANNONACEAE)

- **Synonyme:** *Pachypodanthium staudtii* (Engl. & Diels).

- **Noms locaux:** en Attié (Mienzo);

- **Description botanique:**

Duguetia staudtii est un arbre de taille moyenne assez grande, pouvant atteindre 35 à 40 m de haut, avec un tronc sans branche jusqu'à 20 m (Figure 3 C).

Duguetia staudtii, avec un tronc droit et cylindrique pouvant atteindre (70 -90) cm de diamètre (Figure 3 D), est largement répandu dans les forêts sempervirentes de la Sierra Leone au Cameroun. Il possède des feuilles longues étroites et persistantes (Figure 3 A), alternes, simples et entières [41]. Les fleurs de *Duguetia staudtii*, actinomorphes et bisexuées, sont solitaires ou assemblées en racèmes condensés axillaires (Figure 3 B), parfois cauliflores. Elles se composent de 3 sépales libres et valvaires (Figure 4 B), coriaces, de 6 pétales imbriqués, libres et bisériés, et d'un réceptacle conique portant de nombreuses étamines libres, sessiles ou subsessiles, aux anthères à déhiscence extrorse, et un ovaire supère constitué de nombreux carpelles libres, uniovulés et contigus [41].

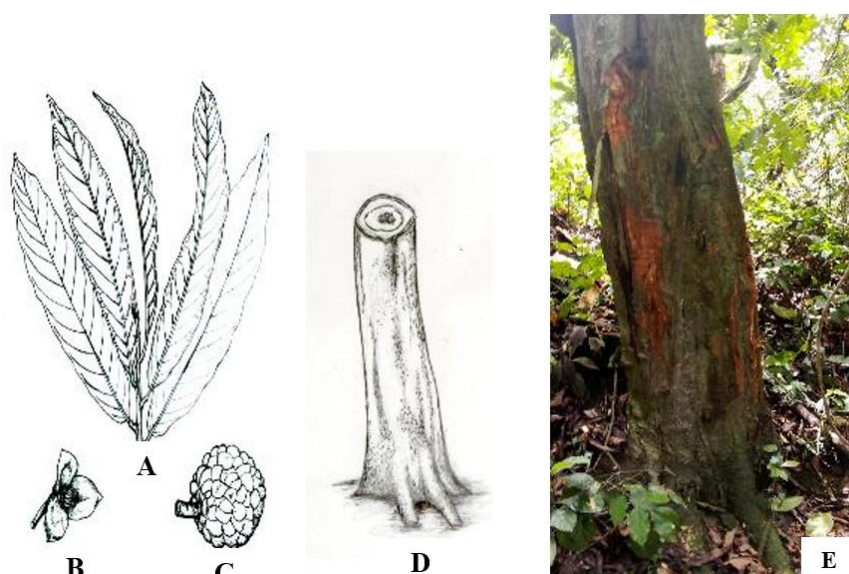


Fig. 3. Aspect général de *Duguetia staudtii* (Diels & Engl) (Annonaceae)

A: Planche montrant un aperçu du rameau feuillé; B: fleur; C: fruit et D: Tronc; E: Aperçu du tronc écorché de la plante (Photo de terrain: Kouassi G, Bécédi-brignan, Février 2023).

Le fruit syncarpique est composé de nombreux méricarpes contigus ou soudés à la base (Figure 3 C). Le bois de cette plante connue sous le nom de " *ntom* " en Afrique centrale et " *aniouketi* " en Côte d'Ivoire est utilisé localement dans les domaines de la construction des maisons et de la médecine traditionnelle [42].

- Utilisation thérapeutique de la plante dans la pharmacopée ivoirienne et dans la région

Dans la nation ivoirienne, la plante « *Duguetia staudtii* », est comptée parmi les plantes médicinales antimicrobiennes sollicitées en médecine traditionnelle par les populations locales pour soigner diverses maladies [42].

En ce qui concerne son usage dans la région de la Mé (au Sud-Est de la Côte d'Ivoire), le peuple « Akyé » utilisent le décocté, le macéré, l'infusé et la confection de pâte des écorces de « *Duguetia staudtii* » contre les ulcères gastriques, les vomissements, les tumeurs, les douleurs, les inflammations corporelles et les dermatoses, etc. Les écorces fraîches bien lavées de « *Duguetia staudtii* » sont séchées au soleil ou à l'ombre pendant quelques jours (3 à 5 jours). Le décocté des écorces fraîches ou séchées employé en boisson est utilisé contre le vomissement, l'ulcère gastrique. Par ailleurs, la macération des écorces sèches exposée au soleil pendant la journée (3 à 6 h) est utilisée en bain contre la fatigue, les courbatures et les douleurs corporelles par le peuple Akyé.

Le bain en vapeur du décocté de l'écorce de la tige est aussi utilisé pour les mêmes causes. Ensuite, le décocté des écorces de « *Duguetia staudtii* » est utilisé en bain simple ou en pansement contre les dermatoses infantiles (démangeaisons et éruptions cutanées, varicelle, variole, rougeole, érythèmes fessiers, etc). Dans la région de la Mé, la pâte obtenue après avoir pétri les écorces fraîches ou sèches avec du Kaolin blanc, est employée pour le même but. Les Akyé utilisent fréquemment la pâte obtenue par pétrissage des écorces sèches plus du piment sec par voie anale (lavement) pour lutter efficacement contre la varicelle, la rougeole, les éruptions cutanées, etc).

Dans le traitement efficace des dermatoses, les Praticiens de la Médecine Traditionnelle rencontrés conseillent la pulvérisation des écorces sèches. Cependant, la poudre obtenue associée à du jus de citron ou pétrie avec du poivre ou de l'ail donne une pâte (solide) qui est utilisée en massage ou en application locale par voie cutanée contre toutes sortes d'infections cutanées (dartres, scabiose ou gale, rougeole, varicelle, variole, psoriasis, furoncles, abcès, panaris, teignes, pieds d'athlètes, etc). De plus, la pommade antimicrobienne confectionnée avec la poudre noire issue de l'écorce sèche calcinée et pulvérisée à laquelle on ajoute du beurre de karité est fréquemment utilisée en massage ou par application locale par voie cutanée pour les mêmes causes.

3.2 ACTIVITÉS ANTI DERMATOPHYTIQUES, ANTICANDIDOSIQUES ET POUVOIR ANTIFONGIQUE DE CHAQUE EXTRAIT DE PLANTES SUR LES SOUCHES FONGIQUES CONCERNÉES

Neuf (9) extraits de plantes au total ont été testés sur des trois fongiques dont les résultats sont contenus dans les tableaux ci-dessous (Tableau I à III).

Les résultats révèlent que les dermatophytes (*Trichophyton mentagrophytes*; *Trichophyton rubrum* et la levure *Candida albicans* 479 ont été sensibles aux extraits macérés aqueux aussi bien que ceux hydro-éthanoliques des plantes étudiées avec des CMI allant de 01,56 à 100 mg/ml et des CMF allant de 12,5 à 100 mg/ml (Tableau I à III).

Cependant, ce sont les extraits hydro-éthanoliques qui sont les plus actifs avec des CMI plus faibles (compris entre 01,56 et 50 mg/ml). Ensuite, *Candida albicans* en est moins sensible.

Tableau 1. Valeurs des paramètres antifongiques des extraits de *Combretum paniculatum* (Vent) (Combretaceae)

Extraits	Souches fongiques testées	CMI (mg / ml)	CMF (mg / ml)	CI50 (mg / ml)	Rapport CMF/CMI	Pouvoir antifongique de l'extrait
Com D	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	> 100	ND		ND	ND
Com H-E	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	12.5	25		CMF/CMI = 2	Fongicide
Com A	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	25	50		CMF/CMI = 2	Fongicide
Com D	<i>Trichophyton rubrum</i>	ND	ND		ND	ND
Com H-E	<i>Trichophyton rubrum</i>	25	25		CMF/CMI = 1	Fongicide
Com A	<i>Trichophyton rubrum</i>	25	50		CMF/CMI = 2	Fongicide
Com D	<i>Candida albicans</i> 479	> 100	ND		ND	ND
Com H-E	<i>Candida albicans</i> 479	06,25	50	03,125	CMF/CMI = 8	Fongistatique
Com A	<i>Candida albicans</i> 479	> 100	ND		ND	ND

Légende: Com D: Extrait Décocté de *Combretum paniculatum*; Com A: Extrait macéré Aqueux de *Combretum paniculatum*; Com H-E: Extrait Hydro-éthanolique 70% de *Combretum paniculatum*; ND: Non Déterminé

Tableau 2. Valeurs des paramètres antifongiques des extraits de *Trema orientalis* (L.) (Cannabaceae)

Extraits	Souches fongiques testées	CMI (mg / ml)	CMF (mg / ml)	CI50 (mg / ml)	Rapport CMF/CMI	
TO D	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	>100	ND		ND	ND
TO H-E	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	50	50		CMF/CMI= 1	Fongicide
TO A	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	>100	>100		ND	ND
TO D	<i>Trichophyton rubrum</i>	ND	ND		ND	ND
TO H-E.	<i>Trichophyton rubrum</i>	6,25	25		CMF/CMI= 4	Fongicide
TO A	<i>Trichophyton rubrum</i>	12,5	50		CMF/CMI= 4	Fongicide
TO D	<i>Candida albicans</i> 479	> 100	ND		ND	ND
TO H-E.	<i>Candida albicans</i> 479	12,5	100	01,56	CMF/CMI= 8	Fongistatique.
TO A	<i>Candida albicans</i> 479	100	>100		ND	Fongistatique

Légende: TO D: Extrait Décocté de *Trema orientalis*; TO A: Extrait macéré Aqueux de *Trema orientalis*;

TO H-E: Extrait Hydro-éthanolique 70% de *Trema orientalis*. ND: Non Déterminé;

Tableau 3. Valeurs des paramètres antifongiques des extraits de *Duguetia staudtii* (Engl. & Diels). (Annonaceae)

Extraits	Souches fongiques testées	CMI (mg / ml)	CMF (mg / ml)	CI50 (mg / ml)	Rapport CMF/CMI	Pouvoir antifongique de l'extrait
DS D	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	100	>100		ND	Fongistatique
DS H-E	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	25	25		CMF/CMI= 1	Fongicide
DS A	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>	50	>100		ND	Fongistatique
DS D	<i>Trichophyton rubrum</i>	ND	ND		ND	ND
DS H-E	<i>Trichophyton rubrum</i>	1,56	12,5		CMF/CMI= 8	Fongistatique
DS A	<i>Trichophyton rubrum</i>	6,25	25		CMF/CMI= 4	Fongicide
DS D	<i>Candida albicans</i> 479	50	>100		ND	Fongistatique
DS H-E	<i>Candida albicans</i> 479	12,5	12,5	0,78	CMF/CMI=1	Fongicide
DS A	<i>Candida albicans</i> 479	100	>100		ND	Fongistatique

Légende: DS D: Extrait Décocté de *Duguetia staudtii*; DS A: Extrait macéré Aqueux de *Duguetia staudtii*;

DS H-E: Extrait Hydro-éthanolique 70% de *Duguetia staudtii*; ND: Non Déterminé;

Enfin, les extraits décoctés ont une très faible activité inhibitrice sur la croissance in vitro des espèces fongiques étudiées avec des CMI et des CMF strictement supérieures à 100 mg/ml et des rapports d'activités non déterminés (ND) (Tableau I à III).

Les résultats des valeurs des CMI; CMF; CI₅₀; les rapports d'activités et d'efficacité des extraits actifs ont été consignés dans des tableaux de comparaison (Tableau III)

Les valeurs de la CI₅₀ des extraits hydro-éthanoliques de: *Duguetia staudtii* (DS H-E); *Trema orientalis* (TO H-E) et de *Combretum paniculatum* (Com H-E) sont respectivement 0,78 mg/ml; 01,56 mg/ml et 03,125 mg/ml. (Figure 5).

Ainsi, c'est l'extrait hydro-éthanolique de *Duguetia staudtii* (DS H-E) qui est le plus actif car sa CI₅₀ est la plus faible (Tableau III).

4 DISCUSSION

Les données ethnobotaniques obtenues sur chacune des plantes médicinales ivoiriennes étudiées permettent de justifier qu'elles font parties des plantes médicinales utilisées en médecine traditionnelle; donc des plantes de la pharmacopée Africaine. En effet, *Combretum paniculatum* Vent (Combretaceae) et *Trema orientalis* (L.) (Cannabaceae) figurent sur la liste des plantes de la pharmacopée ivoirienne alors que *Duguetia staudtii* (Engl & Diels) (Annonaceae) qui n'en fait pas encore partie, est suffisamment utilisée en médecine traditionnelle en Côte d'Ivoire surtout par les Akyé dans la région de la Mé. Cette première observation a été faite par [43], qui ont montré que *Combretum paniculatum* est une plante de la pharmacopée ivoirienne suffisamment utilisée en phytothérapie traditionnelle à cause de ces nombreuses vertus thérapeutiques. Par ailleurs, la plante « *Trema Orientalis* », est comptée parmi les plantes médicinales antimicrobiennes sollicitées en médecine traditionnelle par les populations ivoiriennes pour soigner les dermatoses, notamment la gale [37]. Quant à la plante « *Duguetia staudtii* », elle est comptée parmi les plantes médicinales antimicrobiennes sollicitées en médecine traditionnelle par les populations locales ivoiriennes pour soigner diverses maladies [42].

La sensibilité des espèces fongiques testées aux extraits aqueux et hydro-éthanoliques de *Combretum paniculatum*, *Trema orientalis* et de *Duguetia staudtii* s'explique par les propriétés antimicrobiennes; celles antifongiques notamment qu'ont les métabolites secondaires présents dans ces extraits végétaux étudiés. Ces explications concordent avec celles de [44] qui ont justifié récemment dans leurs travaux par des études phytochimiques, la présence dans les extraits aqueux et hydro-éthanoliques 70% de ces trois plantes, la présence de sept (07) métabolites secondaires tels que les polyphénols totaux, les polyterpènes et stérols, les tanins, les alcalo ides, les flavono ides, les quinones et les saponosides. Ces résultats s'expliquent par le fait que ces métabolites secondaires détectés dans les extraits étudiés sont couramment rencontrés dans le règne végétal. Cette remarque a été faite par [45], qui ont trouvé que ces phyto-composés (polyphénols, flavono ides, etc.) font partis de la variété de métabolites secondaires à activités biologiques intéressantes fabriqués naturellement par les plantes. Ces composés chimiques contenus dans les organes de plantes étudiées justifient l'utilisation en médecine traditionnelle de ces plantes médicinales contre plusieurs infections microbiennes; notamment les dermatoses dans la région de la M  [27]. En effet, ces résultats du tri-phytochimique des extraits aqueux (décocté) des feuilles de *Trema orientalis* sont identiques de ceux de [26] obtenus sur la même plante dont les feuilles ont été récoltées à Agboville au Sud-Est de la Côte d'Ivoire en pays Krobou dans la région de l'Agneby-tiassa. Ces résultats diff rent de ceux de [29], dont la caractérisation phytochimique par tube et par Chromatographie sur Couche Mince (CCM) de l'extrait aqueux des feuilles de *Trema orientalis* récoltées au Sud du Congo-Brazaville ont aussi révélé la présence de ces composés chimiques en plus, des sucres réducteurs et des coumarines mais l'absence d'alcalo ides et de quinones. Cette différence pourrait s'expliquer par une différence de substrats (sols) de pays différents.

En effet, la présence abondante de stérols et de polyterpènes révélés en plus des composés phénoliques comme les polyphénols, les tanins, les flavono ides et les alcalo ides seraient donc responsables de ces activités antidermatophytiques et anticandidosiques respectivement sur les dermatophytes (*Trichophyton mentagrophytes*; *Trichophyton rubrum*) et la levure saprophyte (*Candida albicans* 479) testées.

L'effet fongicide à 66% soit (4 fois fongicides / 6) des extraits des feuilles de *Combretum paniculatum*, sur les dermatophytes serait lié à la présence de tanins (cath chiques et galliques), de quinones et de saponosides dans les extraits aqueux et hydro-éthanoliques de cette combretaceae en plus des quatre autres composés chimiques détectés. Par ailleurs, les combretaceae sont des familles botaniques qui présentent en général de nombreuses propriétés pharmacologiques dont certaines espèces ont des propriétés antifongiques remarquables à cause de la présence abondante de polyphénols, de tanins, de saponines et de quinones dans leurs différents organes; les feuilles notamment. Ces explications concordent avec celles de [46], suite à ses travaux menés au Togo qui a montré que les extraits hydro-éthanoliques de trois genres de Combretaceae (*Anogeissus*, *Combretum* et *Terminalia*) inhibent à des degrés divers la croissance in vitro de 21 souches fongiques pathogènes, particulièrement les dermatophytes. En effet, les extraits des plantes appartenant aux genres *Anogeissus*, *Pteleopsis* et *Terminalia* de la famille des Combretaceae se sont montrés les plus actifs. Par contre, les extraits aqueux de *Combretum paniculatum* n'ont pas été actifs sur *Candida albicans* 479 car l'action inhibitrice des principes actifs (ou phyto-composés) antifongiques détectés dans les extraits aqueux serait influencer ou limiter par la présence d'un nombre important de macromolécules.

Par ailleurs, ces principes actifs ou métabolites secondaires révélés, sont des substances bioactives ayant une activité inhibitrice élevée sur les champignons dermatophytiques concernées (*T. mentagrophytes*; *T. rubrum*).

Par contre, les extraits aqueux de *Combretum paniculatum* n'ont pas été actifs sur *Candida albicans* 479 car l'action inhibitrice des principes actifs (ou phyto-composés) antifongiques détectés dans les extraits aqueux serait influencer ou limiter par la présence d'un nombre important de macromolécules. Autrement dit, la forte activité des métabolites secondaires bioactifs contenus dans les extraits aqueux sur la levure serait limitée par la nature de l'extrait ou le mode d'extraction.

En effet, les extraits aqueux ont été obtenus par l'eau (eau osmosée) qui est un solvant non sélectif par rapport à l'éthanol. Cependant, l'eau pendant l'extraction, prend tous les composés chimiques et les molécules actives sont noyés dans un mélange où les macromolécules (protéines, poly-saccharides, glycoprotéines, etc) sont majoritaires. Ce qui rend les extraits aqueux (décocté et macéré) inactifs, voir inefficaces sur les souches étudiées avec des CMI et des CMF strictement supérieures à 100 mg/ml et des rapports d'activités non déterminés (ND) (Tableau I   III).

Dans cette étude, l'eau a été d'abord choisie comme solvant d'extraction en références aux savoirs traditionnels des praticiens de la médecine traditionnelle rencontrés. Ensuite, le mélange de solvants (eau   30% et l'éthanol 96    70%) choisie a permis de savoir que l'eau n'étant pas sélective, est capable d'extraire un nombre important de composés chimiques pendant que l'éthanol à la particularité de faire une sélection de composés chimiques de polarités croissantes comme les composés phénoliques (polyphénols; flavono ides; etc) qui confèrent aux extraits hydro-éthanoliques (Com H-E; TO E-H et DS E-H) respectivement des pouvoirs fongicides et fongistatiques avec des rapports d'efficacité différentes sur les dermatophytes et la levure testés (Tableau II et III).

Ces observations sont proches de celles faites par [47] qui ont montré dans leurs travaux que les extraits aqueux et ceux mixtes possèdent des teneurs élevées en composés phénoliques traduisant leurs pouvoirs antimicrobiens et antioxydants, ceci indépendamment du solvant utilisé. Vu les performances moyennes obtenues sur les souches fongiques avec les extraits aqueux obtenus par macération, nous avons décidé d'améliorer l'activité des extraits de plantes en utilisant d'autres solvants pour l'extraction; notamment l'alcool ( thanol, méthanol, etc.) afin d'extraire beaucoup de principes actifs à activités antimicrobiennes. Au regard des

résultats obtenus suites aux travaux de [19] menées en Côte d'Ivoire, nous avons choisi l'éthanol 96° comme le deuxième solvant d'extraction et un mélange eau-éthanol 96° à 70/30 (V/V) préparé qui a donné de meilleures performances aux extraits hydro-éthanoliques (Com H-E; TO E-H et DS E-H). Ces résultats corroborent ceux de [48] dans la littérature, admettant suite à leurs travaux que les mélanges hydro-alcooliques font parties des solvants les plus utilisés pour extraire un grand nombre de principes actifs à activités antimicrobiennes en phytothérapie.

C'est ce qui explique le pouvoir fongicide à 100% des extraits hydro-éthanoliques 70% de *Combretum paniculatum* et de *Trema orientalis* sur les dermatophytes testées (*Trichophyton mentagrophytes* et *Trichophyton rubrum*) et leur pouvoir fongistatique, c'est-à-dire candidostatique sur la levure (*Candida albicans* 479).

Ces résultats sont très proches de ceux de [49], qui ont montré dans leurs travaux que l'extrait brut hydro-éthanolique macéré 70 % (Eeth70 %) de *Combretum racemosum* P. Beauv, une Combretaceae a exercé un effet fongicide à 100% sur toutes les souches dermatophytiques étudiées.

Quant à l'extrait hydro-éthanolique 70% de *Duguetia staudtii*, en plus d'être très actif sur *T. mentagrophytes* et fongistatique sur *T. rubrum*, est le seul extrait actif sur la levure *C. albicans* 479; c'est-à-dire fongicide sur elle à cause de sa teneur en composés chimiques.

L'analyse des résultats montre que les deux dermatophytes et la levure testée sont sensibles à l'extrait hydro-éthanolique 70 % selon une relation dose-réponse. Cependant, l'extrait Eeth70 % exerce une action fongicide sur les deux dermatophytes à une concentration minimale inhibitrice (CMI) allant de 01,56 mg/ml à 50 mg/ml.

Ces résultats sont différents de ceux de [12] qui avaient montré que l'extrait hydro-éthanolique 70% d'*Anogeissus leiocarpus* possède un très bon potentiel antifongique sur deux dermatophytes du même genre que ceux étudiés dont les paramètres sont respectivement pour *Trichophyton mentagrophytes* (CMI = 24 µg/ml) et *Trichophyton soudanense* (CMI = 49 µg/ml). Cette différence de sensibilité des germes fongiques aux différents extraits hydro-éthanoliques des plantes étudiées pourraient s'expliquer par la nature et la quantité de phytocomposés chimiques contenus dans les différents extraits de plantes ayant des activités antifongiques différentes sur chaque souche fongique.

5 CONCLUSION

Les Praticiens de la Médecine Traditionnelle de la région de la Mé utilisent plusieurs plantes médicinales parmi lesquelles figurent potentiellement *Combretum paniculatum* Vent (Combretaceae); *Trema orientalis* (L.) (Cannabaceae) et *Duguetia staudtii* (Engl & Diels) (Annonaceae) contre les dermatoses fongiques; notamment les dermatophytoses et les candidoses humaines. En effet, les composés chimiques détectés dans les différents extraits de plantes à partir du tri-phytochimique justifient leurs activités antifongiques sur les espèces fongiques étudiées et leur utilisation en médecine traditionnelle par les Akyé dans la région de la Mé. Les différents résultats obtenus à la suite de cette étude, constituent une base de données pour des études pharmacologiques. L'extrait hydro-éthanolique 70 % de chaque plante étudiée ou leur combinaison à part égale pourrait constituer un potentiel produit pour la mise au point de formes dermatologiques efficaces contre les dermatoses fongiques.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts relatif à cet article.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les responsables coutumiers des localités visitées pour leur coopération. Nous sommes aussi très reconnaissants à l'égard des acteurs de la médecine traditionnelle rencontrés pour leurs disponibilités et pour leurs savoirs thérapeutiques qu'ils nous ont montrés.

Nous voulons témoigner notre profonde gratitude aux Enseignants-Chercheurs du Centre National de Floristique; des Laboratoires des Milieux Naturels et Conservation de la Biodiversité; de Biologie et Santé de l'UFR Biosciences; le Laboratoire de Sciences du Médicament, Sciences Analytiques et Santé Publique de l'UFR Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de l'Université Félix-Houphouët Boigny qui nous ont accompagné dans la réalisation et l'accomplissement de ce travail.

REFERENCES

- [1] Y. Dieng, M.A Faye-Niang, A Ndour-Diop, «Sensibilité aux antifongiques des souches de *Candida* responsables de candidoses oropharyngées chez des sujets vivants avec le VIH». *Revue de l'école de Médecine*, Vol. 2, n°3, pp. 835-838, 2005.
- [2] A. Paugam, S. Challier, C Rouges, S Guégan-Bart, «Mycoses superficielles», 2023.
[Online] Available: <https://www.emconsulte.com/traite/TM/presentation/akos-traite-de-medecine> (12 Juillet, 2023).
- [3] M. Monod, M Fratti, B Mignon, F Baudraz-rosselet, «Dermatophytes transmis par les animaux domestiques», *Revue de Médecine Suisse*, vol.10, n°3, pp.749-753, 2014.
- [4] DIPE: Direction de l'Information, de la Planification et de l'Evaluation des maladies infectieuses, District sanitaire d'Adzopé, Région de la Mé; consulté le 24 Février 2021.
- [5] V.S. Sanfo, «Aspects épidémiologiques et cliniques des dermatoses observées chez les ouvriers qui manipulent le ciment au Burkina Faso». Thèse de Doctorat d'Etat; Université polytechnique de Bobo-Dioulasso, *Institut Supérieur des Sciences de la Santé (INSSA)*, 110 p, 2015.
- [6] S. Malgrain, «Dermatologie courante du nourrisson et du jeune enfant: prise en charge et conseils à l'officine». Thèse de Doctorat d'exercice, UFR Sciences Pharmaceutiques et Ingénierie de la Santé; Université Angers; République de France, 152 p, 2018.
- [7] J. Murlot, «Mycoses superficielles chez l'homme: physiopathologie et prise en charge à l'officine». Thèse de Doctorat, Faculté de Pharmacie, Université de Marseille, France, pp.135, 2022.
- [8] A.L Mavor, S Thewes & B. Hube, «Systemic fungal infections caused by *Candida* species: epidemiology, infection process and virulence attributes. *Current Drug Targets*, Vol. 6, n°2, pp. 863-874, 2005.
- [9] G.N. Zirihi, K. N'Guessan., D.T. Etien, P. Grellier, «Ethno pharmacological, study of Plants used to treat malaria; in traditional medicine, by Bété Population of Issia (Ivory Coast). *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, Vol. 2, n°4, pp.216-227, 2010.
- [10] OOAS (Organisation Ouest-Africaine de la Santé). 2013. - Pharmacopée de l'Afrique de l'Ouest (PAO). *Manuel de formation des Tradipraticiens*. Site: www.wahooas.org (Consulté le 13/05/2025).
- [11] F. Séguéna, K. Soro, D Soro et K. N'guessan, «Savoir-faire des populations locales des taxons du Jardin Botanique de Bingerville, Côte d'Ivoire», *Journal of Applied Biosciences*, Vol. 68, n°2, pp. 5374 – 5393, 2013.
- [12] K. Bené, D. Camara, Y Kanga & G.N. Zirihi, «Activité antidermatophytique in vitro d'un extrait hydro-éthanolique d'*Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr. (Combretaceae)», *Phytothérapie*, Vol. 21, n°4, pp. 209-213, 2023.
- [13] A.B. Yapi, D. Camara, K. Coulibaly, G.N. Zirihi, «Étude botanique, triphytochimique et évaluation de l'activité antifongique de l'extrait éthanolique des feuilles de *Eclipta prostrata* (L.) L. sur la croissance in vitro de trois souches fongiques». *Journal of Applied Biosciences*, Vol.125, n°4, pp.12581-12589, 2018.
- [14] D. Soro, Y. Kanga, Y. Sanogo, G.M.L. Ouattara, «Plantes médicinales utilisées en médecine traditionnelle pour le contrôle des maladies fongiques dans le département de Korhogo (côte d'ivoire)», *Tanganyika Journal of Sciences*, Vol.3, n°1, pp. 47 – 59, 2023.
- [15] C. Pin, «L'entretien semi-directif», LIEPP Fiche méthodologique n°3, Site: www.sciencespo.fr/liepp, pp. 1-6, 2023. (Consulté le 14 Juillet 2025).
- [16] APG III, «The Angiosperm Phylogeny Group, « An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III »», *Botanical Journal of the Linnean Society*, Vol.161, n°2, pp.105-121, 2016.
- [17] A.E. Odoh, E. Begbin, G.N. Zirihi & D. Koné-Bamba, «Toxicités orale aiguë et subaiguë de l'extrait aqueux des feuilles de *holarrhena floribunda* chez les rongeurs». *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Vol.38, n°5, pp. 206 – 216, 2021.
- [18] G.N. Zirihi, «Etudes Botaniques, Pharmacologiques et Phytochimiques de quelques Plantes médicinales antipaludiques et/ou immunogènes utilisées chez les Bété du Département d'Issia, dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire». Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Cocody-Abidjan, UFR Biosciences, 184 p, 2006.
- [19] G.N. Zirihi, A.K.M. Kra & F. Guédé-Guina, «Évaluation de l'activité antifongique de *Microglossa pyrifolia* (Lamarck) O. Kuntze (Asteraceae) « PYMI » sur la croissance in vitro de *Candida albicans*». *Revue de Médecine et de Pharmacopées Africaines*, Vol.17, n°3, pp.11-18, 2003.
- [20] A.K.M. Kra, «Recherche bioguidée de composés antifongiques à partir de plantes médicinales de Côte d'Ivoire». Thèse de Doctorat de l'Université de Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 242 p, 2016.
- [21] G. M. Ahon, «Evaluation et essai d'optimisation de l'activité antifongique des extraits de *Terminalia superba* Engl. et Diels (Combretaceae) sur la croissance in vitro de *Aspergillus fumigatus*, *Candida albicans* et *Cryptococcus neoformans*». Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 117 p, 2014.
- [22] J.D. Carr, 1988, «Combretaceae in southern Africa», *Bothalia African Biodiversity and Conservation*, Vol. 19, n°1, pp. 1-3, 1989.
- [23] A. Thiombiano, « Les Combretaceae du Burkina Faso: Taxonomie, écologie, dynamique et régénération des espèces». Thèse de doctorat d'Etat, Université de Ouagadougou, 271 p, 2005.
- [24] G.H. Schmeler, «*Combretum paniculatum* Vent. Prot. 11 (12): Medecinal plants / Plantes médicinales, 2012. [Online] Available: www.Wikipedia.com.https://www.emconsulte.com/traite/TM/presentation/akos-traite-de-medecine (12 Juillet, 2025).
- [25] B. Faga, «Characterization of antimicrobial compounds from *Combretum paniculatum*, a plant with proven anti-HIV replication activity». PhD thesis, Paraclinical Science, University of Pretoria, 168 p. 2007.

- [26] K. N'Guessan, F.H. Tra Bi, M.W. Koné, «Étude ethno-pharmacologique de plantes antipaludiques utilisées en médecine traditionnelle chez les Abbey et Krobou d'Agboville (Côte d'Ivoire)», *Ethnopharmacologia*, Vol. 44, n°1, pp.42-50,2009.
- [27] K.G. Kouassi, A.S.A. Aka Any-Grah, Y.C.V. Yapo, K. Bené, Y. Kanga, G.K.N.A. Konan, G.N. Zirihi, «Inventaire et utilisation des plantes médicinales par le peuple Akyé contre les dermatoses microbiennes dans la région de la Mé (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)», *Revue Africaine Malgache de Recherches Scientifique (RAMReS) – Série Pharm. Médecine Traditionnelle Africaine*, vol. 23, n°1, pp.102-128, 2024.
- [28] G.N. Zirihi, K. N'Guessan, D.T. Etien & P. Grellier, « Ethno-pharmacological study of Plants used to treat malaria in traditional medicine by Bété Population of Issia (Ivory Coast). *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, vol.2, n°4, pp.216-227, 2010.
- [29] C.N. Loumpangou, A.W.O. Etou, L.J.C.M. Bonazaba, K B.I. Tsati, M.P.U. Bazolo, «Caractérisation Phytochimique et Toxicité aigüe des feuilles de *Trema Orientalis* (L.) Blume (Cannabaceae) ». *Journal of Social Ouest-African Chemical Sciences*, vol. 2, n°4, pp.52 – 59, 2016.
- [30] K.C.K. N'dah, A. Koulibaly, S. Coulibaly, B.B. Boko, K.B. Dramane, V.P-A Diomandé & Y.J Kouadio, « Potentiel de régénération naturelle des espèces ligneuses associées dans les agrosystèmes cacaoyers traditionnels de la zone rurale de djekro (Daloa, cote d'ivoire)», *African Journal On Line*, vol. 3, n°1, pp.73-85, 2021.
- [31] APG IV, «An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181: pp. 1-20, 2016.
- [32] M.S. Tiébré, D. Ouattara, Y.C.Y. Adou, A. Gnagbo & K.E. N'guessan, «Caractérisation de la flore et de la végétation et potentiel de conservation de la biodiversité végétale en zone d'activités anthropiques dans le Nord-est de la Côte d'Ivoire». *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 17 No3, pp. 893-900, 2016.
- [33] K. Tuo, « Criblage phytochimique, activité antioxydante et anti plasmodiale in vitro de cinq plantes utilisées traditionnellement en côte d'ivoire contre le paludisme», Thèse de Doctorat en ethnopharmacologie, Université Félix Houphouët Boigny (UFHB), Côte d'Ivoire, 201p, 2015.
- [34] O.A.W. Etou, I.R.D.G. Elion, L.C. Nkounkou, N.J.D. Hibandza, M.L.J.C. Bonazaba, Ouamba J.M. & A.A. Abena, « Effets des extraits polaires des feuilles de *Trema orientalis* (Linn.) Blume (Ulmaceae) sur la pression artérielle moyenne chez le rat». *Revue Africaine Malgache de Recherches Scientifique (RAMReS) – Série Pharm. Médecine Traditionnelle Africaine*, vol.18, n°1, pp.8-15, 2016.
- [35] M. Baumer, «Arbustes et arbrisseaux en Afrique occidentale». *Enda – Éditions*, Dakar, pp 120-121, 1995.
- [36] Adjanohoun E. & Aké L. Assi, «Contribution au recensement des plantes médicinales de Côte d'Ivoire», *Centre National de Floristique*, Abidjan, 359 p, 1979.
- [37] Malan D.F, «Utilisation de la diversité floristique des forêts villageoises de la périphérie du Parc National du Taï, réserve de biosphère et de patrimoine mondial (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire): cas de Gouleako II». Mémoire de DEA, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 99p, 2008.
- [38] K.B. Bla, J.N.D. Trebissou, A. Bidie, A.J. Yapo, G.N. Zirihi & A. J Djaman, «Étude ethno-pharmacologique des plantes antipaludiques utilisées chez les Baoulé-N'Gban de Toumodi, dans le Centre de la Côte d'Ivoire». *Journal of Applied Biosciences*, vol.85, n°3, pp. 7775 – 7783, 2015.
- [39] F.H. Tra Bi, G.M. Irié, K.C.C. N'gaman & C.H.B. Mohou, « Études de quelques plantes thérapeutiques utilisées dans le traitement de l'hypertension artérielle et du diabète: deux maladies émergentes en Côte d'Ivoire». *Sciences & Nature*, Vol.5, n°1, pp.39 – 48, 2008.
- [40] F.H. Tra Bi, «Utilisation des plantes par l'homme, dans les forêts classées du Haut- Sassandra et de Scio, en Côte d'Ivoire». Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Université de Cocody-Abidjan, 212p, 1997.
- [41] L.W. Chatrou, M.D. Pirie, R.J. Erkens, L. Thomas, P. Couvreur, K.M. Neubig, J.R. Abbott, J.B. Mols, J.W. Maas, R.M.K. Saunders & A.W. Chase, «A new subfamilial and tribal classification of the pantropical flowering plant family Annonaceae informed by molecular phylogenetics». *Botanical Journal of the Linnean Society*, Vol.169, pp.5 – 40, 2012.
- [42] T.A. Yapi, J.B. Boti, T.Z. Félix, A.C. Ahibo, F. Tomi & A. Bigbelli, «*Pachypodanthium Staudtii* Engl & Diels from Côte d'Ivoire: Composition of Leaf, Stem Bark and Roots Oils». *Journal of Scientific Research*, Vol.69, n°1, pp.128-134, 2012.
- [43] G.R.M. Kabran, J.A. Mamyrbekova-Bekro, J-L Pirat, Y-A Bekro, N.S.A Verbaere, E Meudec, «Identification de composés phénoliques extraits de deux plantes de la pharmacopée ivoirienne». *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, vol.38, n°2, pp.57 – 63, 2014.
- [44] K.G. Kouassi, A.S.A. Aka Any-Grah, G.K.N.A. Konan, A.E. Odoh & G.N. Zirihi, «Phytochemical study and in vitro antibacterial activities of extracts from three Ivorian Medicinal Plants traditionally used to treat inflammatory dermatoses in the Mé Area, South-East of Ivory Coast». *European Journal of Medicinal Plants*, Vol.36, n°1, pp.27-44, 2025.
- [45] N. Alouti, S. Maamri, B.E. Boumaraf, «Utilisation et toxicité des molécules bioactives d'origine végétale», Mémoire de Master en Sciences biologiques; Option: Toxicologie; Université Larbi Tébessi – Tébessa, République Algérienne, 72p, 2022.
- [46] K. Batawila, «Diversité, écologie et propriétés antifongiques des Combretaceae du Togo». *Acta Botanica Gallica*, vol.149, n°4, pp.515-516, 2013.
- [47] S. Bourgou, R. Serairi Beji, F. Medini, R. Ksouri, «Effet du solvant et de la méthode d'extraction sur la teneur en composés phénoliques et les potentialités antioxydantes d'*Euphorbia helioscopia*», *Journal of new sciences*, vol. 28, n°12, pp. 1649-1655, 2016.

- [48] A.B. Kakou, A. Benie, H.A. N'guessan, K.F. Konan, N.K. Guessennd & Y.A. Bekro, «Analyse phytochimique, activité antibactérienne des extraits hydro-méthanoliques des tiges de *Ximenia americana*, espèce de Côte d'Ivoire sur *Staphylococcus aureus* résistant à la méticilline. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol.14, n°9, pp. 3429-3440, 2020.
- [49] K.R. Kamou, Y.Z. Nanga, G. Gnahoue, S.P. Kambou, C. Bahi & A. Coulibaly, «Potentialités bioactives et activité antidermatophytique superficielle d'extraits de *Combretum racemosum* P. Beauv. (Combretaceae). *Afrique SCIENCE*, Vol.13, n°5, pp.29 – 42, 2017.

Étude, à partir des indices, de la variabilité hydroclimatique du bassin versant au sud du fleuve Saloum au Sénégal

[Study, based on indices, of the hydroclimatic variability of the watershed south of the Saloum River in Senegal]

Ndiakhate Gueye, Papa Babacar Diop Thioune, and Ibra Kandji

Laboratoire BIOGERENAT, Institut Supérieur Formation Agricole et Rural (ISFAR), BP 54, Université Alioune DIOP de Bambey, Senegal

Copyright © 2026 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 analyzes the hydroclimatic variability of the watershed south of the Saloum River over the period 1961–2023 using the Standardized Precipitation Index (IPS) and the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (IPES), combined with statistical tests and seasonal methods (aridity indices of De Martonne, Bagnouls-Gaussen, and Euverte). The results confirm a Sudano-Sahelian climate characterized by a long dry season and a concentration of rains between June and October. Three climatic phases are identified: a humid phase, a dominant dry phase between the 1970s and 1990s, and a partial and irregular recovery since the 2000s. A marked spatial variability is observed, with a more contrasted dynamic at Kaolack, more stable at Fatick, and a recent moist trend at Nioro. However, the irregularity of rainfall does not confirm of a sustainable return to normal, a situation also observed in other West African regions. The IPS proves to be more sensitive to rainfall extremes, while the IPES integrates the effect of increased temperatures via potential evapotranspiration. In this context of climate change, the IPES seems more suitable than the IPS for the analysis of drought and humidity trends at the territorial level and for support to water resources management.

KEYWORDS: IPS et IPES indices, Saloum River basin, hydroclimatic variability, drought.

RESUME: Cette étude analyse la variabilité hydroclimatique du bassin versant au sud du fleuve Saloum sur la période 1961–2023 à partir de l'Indice de Précipitation Standardisé (IPS) et l'Indice de Précipitation et d'Evapotranspiration Standardisé (IPES), combinés à des tests statistiques et des méthodes saisonnières (indices d'aridité de De Martonne, de Bagnouls-Gaussen et d'Euverte). Les résultats confirment un climat soudano-sahélien marqué par une longue saison sèche et une concentration des pluies entre juin et octobre. Trois phases climatiques sont identifiées: une phase humide, une phase sèche dominante entre les années 1970 et 1990, et une reprise partielle et irrégulière depuis les années 2000. Une variabilité spatiale marquée est observée, avec une dynamique plus contrastée à Kaolack, plus stable à Fatick et une tendance récente plus humide à Nioro. Toutefois, l'irrégularité des précipitations ne permet pas de confirmer un retour durable à la normale, une situation également observée dans d'autres régions ouest-africaines. L'IPS se révèle plus sensible aux extrêmes pluviométriques, tandis que l'IPES intègre l'effet de l'augmentation des températures via l'évapotranspiration potentielle. Dans ce contexte de changement climatique, l'IPES apparaît plus adaptée que l'IPS pour l'analyse des tendances de sécheresse et d'humidité à l'échelle territoriale et pour l'appui à la gestion des ressources en eau.

MOTS-CLEFS: indices IPS et IPES, bassin du fleuve Saloum, variabilité hydroclimatique, sécheresse.

1 INTRODUCTION

Le changement climatique demeure l'un des défis majeurs du XXI^e siècle [1]. Il se manifeste notamment par l'augmentation progressive, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années, de la température moyenne de l'atmosphère et des océans, de la diminution de la pluviométrie en quantité et en durée, ainsi que par l'intensification et la fréquence des catastrophes naturelles [2]. En s'appuyant sur les travaux de [3], [4], [5], trois principales périodes sèches ont été identifiées: autour de 1910, 1940 et à partir de 1968 jusqu'à nos

jours. Cette dernière période, marquée par le déficit pluviométrique le plus sévère du XX^e siècle en termes d'intensité et de durée, a profondément affecté les secteurs clés du développement des pays sahéliens, notamment au Sénégal. Malgré l'observation de quelques années plus humides ayant conduit certains auteurs à évoquer un possible retour progressif à des conditions plus favorables [6], de fortes incertitudes persistent quant à l'interprétation de l'évolution future des précipitations dans la région ouest africaine. Les alternances d'épisodes chauds/froids et secs/humides soulignent le caractère non statique du climat [7].

Plusieurs de ces études reposent sur l'utilisation d'indicateurs climatiques tels que l'Indice de Précipitation Standardisé (IPS). Toutefois, cet indice présente certaines limites, car il ne prend en compte que les précipitations et ignore l'influence de la température dans l'analyse des conditions de sécheresse. Afin de pallier cette insuffisance, [8] ont développé l'Indice de Précipitation et d'Évapotranspiration Standardisé (IPES), un indicateur multi-scalaire intégrant à la fois les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'IPES repose sur un bilan hydrique climatique simple correspondant à la différence entre les précipitations et l'ETP, calculé à différentes échelles de temps (mensuelle, saisonnière ou annuelle). En raison de ses exigences limitées en matière de données, il constitue un outil performant pour l'identification, l'analyse spatio-temporelle et la surveillance des sécheresses dans divers contextes climatiques. Cette approche a notamment été appliquée par [3] en Gambie et [9] en Casamance.

Dans ce contexte, l'imprévisibilité des régimes pluviométriques, conjuguée aux phases récentes d'amélioration relative, justifie la nécessité d'analyses régionales approfondies. Ainsi, l'étude de la variabilité hydroclimatique du bassin versant au Sud du fleuve Saloum apparaît particulièrement pertinente au regard de l'évolution des modes de variabilité interannuelle et de l'organisation spatiale observées récemment. Cette problématique s'inscrit dans les objectifs du développement durable et les orientations de la CCNUCC, des COP et du GIEC, qui encouragent la communauté scientifique à mieux comprendre les mécanismes atmosphériques responsables des changements climatiques brusques [10].

Le présent travail vise à analyser la variabilité hydroclimatique du bassin versant au sud du fleuve Saloum à partir d'indices climatiques, notamment l'Indice de Précipitation et d'Évapotranspiration Standardisé (IPES). La méthodologie repose d'abord sur l'étude de la variabilité spatio-temporelle et des tendances récentes des paramètres climatiques (précipitation, température et humidité), à travers divers indices climatiques. Ensuite, l'estimation et l'analyse de l'IPES seront réalisées. Enfin, pour l'analyse de la structure interne des séries temporelles, deux tests statistiques sont utilisés: le test de Pettitt (1979) pour la détection des ruptures et le test de Mann-Kendall (1945) pour l'analyse des tendances. Ces outils sont largement reconnus pour leur robustesse et ont été appliqués avec succès dans de nombreuses études en Afrique.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant au sud du fleuve Saloum, mis en évidence par la figure 1, constitue une entité administrative englobant les régions de Fatick et de Kaolack localisées au centre ouest du Sénégal. D'après [4], il appartient au domaine climatique nord-soudanien et s'étend entre les isohyètes 500 et 700mm. Le climat de la région est caractérisé par l'influence concomitante de plusieurs systèmes de circulation atmosphérique, notamment l'harmattan, vent chaud et sec soufflant principalement du nord et du nord-Est, la mousson africaine, vent chaud et humide dominant entre avril et octobre, ainsi que l'alizé maritime, qui conditionne les influences océaniques le long de la frange côtière. L'ensoleillement moyen annuel est estimé à environ sept heures par jour.

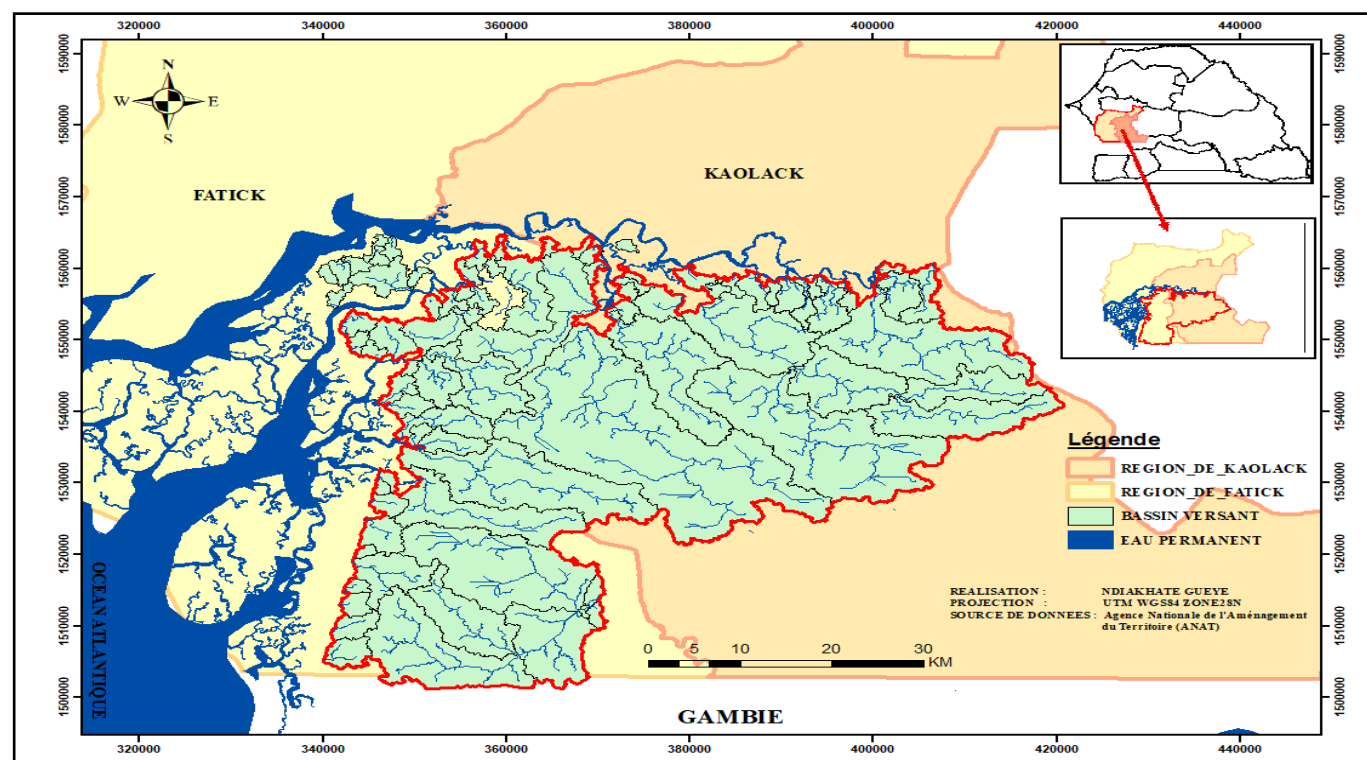


Fig. 1. Situation géographique de la zone d'étude

2.2 DONNÉES

Dans le cadre de cette étude, les données météorologiques ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) pour les stations de Kaolack (1961-2023), Fatick (1991-2023) et Nioro (1981-2023). La disponibilité de plusieurs stations permet une analyse comparative de la variabilité spatiale des précipitations à l'échelle du bassin. Les séries temporelles sont exploitées sous un pas de temps mensuel. La longueur des séries satisfait les critères de validité statistique recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), qui préconise une période minimale de 30 années continues pour toute analyse climatologique fiable [2]. Cette condition garantit la robustesse des analyses statistiques menées et renforce la pertinence des interprétations relatives à la variabilité et aux tendances climatiques observées. Les données climatiques de base pour les stations sélectionnées sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau 1. Données climatiques des stations de la zone d'étude

Station	Lat (°déc)	Long (°déc)	Alt (m)	Période	T.max. (°C)	T.min. (°C)	P.moy. (mm)	Éct (mm)	Cv
Fatick	14,33 N	-16,40W	6	1991-2023	41,4	13,8	618	178	0,29
Kaolack	14,14N	-16,07W	6	1961-2023	43	13	628	149	0,24
Nioro	13,73N	-15,78W	18	1981-2023	53	19	765	176	0,23

Lat: latitude; Long: longitude; Alt: altitude; T.max: température maximale; T.min: température minimale; (°déc): degré décimal; Pmoy: précipitation moyenne; Éct: écart-type; Cv: coefficient de variation (rapport entre l'écart-type et la précipitation moyenne)

La station de Kaolack, retenue comme station de référence pour la zone d'étude, est représentative d'un large gradient climatique au Sénégal, allant des influences atlantiques aux conditions continentales [11].

2.3 MÉTHODES

L'approche méthodologique retenue pour l'évaluation de la variabilité hydroclimatique repose sur l'application d'indicateurs climatiques reconnus et de tests statistiques largement utilisés par les services météorologiques et hydrologiques nationaux à l'échelle internationale. Les indices mobilisés comprennent l'Indice de Précipitation Standardisé (IPS), l'indice d'aridité de De Martonne (Am) et l'indice pluviothermique de Gaussen-Bagnouls et d'Euverte, ainsi que l'Indice de Précipitation et d'Évapotranspiration Standardisé (IPES). Les hauteurs annuelles de précipitations ont été estimées par agrégation temporelle des données mensuelles. Pour mieux affiner les analyses, des données IPES aux échelles temporelles (1, 3, 6, 9, 12, et 24 mois) pour la zone d'étude (1961-2022) ont été extraits dans la

plateforme du moniteur mondial de la sécheresse. Cette dernière fournit un suivi mondial de la sécheresse via l'indice standardisé IPES avec une résolution spatiale de 0,5 degré, calculé à différentes échelles temporelles et intégrant précipitation et évapotranspiration potentielle estimée par la méthode FAO-56 de Penman-Monteith. Les données, dérivées de CRU TS 4.07 (1901-2022), sont disponibles en plusieurs versions, la v2.9 étant recommandée par [12] pour limiter les biais.

Préalablement au calcul des indices climatiques, un contrôle de qualité des séries chronologiques de précipitations et de température a été réalisé afin d'identifier et de corriger les données manquantes et les incohérences éventuelles. Les modalités de calcul des indices sont détaillées dans la section suivante. Les valeurs obtenues ont ensuite été soumises à des analyses statistiques basées sur le test non paramétrique de Mann-Kendall, destiné à la détection des tendances, et le test de Pettitt, consacré à l'identification des ruptures dans les séries temporelles.

2.3.1 CALCUL DES INDICES CLIMATIQUES

2.3.1.1 INDICE DE PRÉCIPITATION STANDARDISÉ (IPS)

L'indice de précipitation standardisé (IPS) permet de quantifier le déficit ($IPS < 0$) ou l'excédent ($IPS > 0$) de précipitations à différentes échelles temporelles (3, 12 ou 24 mois). Sa simplicité en fait un indice largement utilisé, tout en intégrant des facteurs essentiels tels que la période de référence (≥ 30 ans) et la variabilité géographique des zones étudiées.

Étant donné l'hétérogénéité pluviométrique de la région du Sine Saloum, l'IPS a été calculé pour chaque station afin de refléter fidèlement la variabilité interannuelle locale, conformément à l'hypothèse d' [10] sur la non-pertinence d'un IPS global.

$$IPS = \frac{X_{ji} - \bar{X}_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

Avec

X_i : lame d'eau de pluie cumulée d'une année j à une station i (mm); $\bar{X}_i$ et σ_i : les moyenne et écart-type des précipitations enregistrées à la station i ; N_j : le nombre de stations présentant des valeurs pour l'année j .

2.3.1.2 INDICE DE DE MARTONNE

L'indice de De Martonne (A_m), développé en 1925, évalue l'aridité d'une région à des échelles temporelles courtes, facilitant la détection et le suivi des sécheresses sur les plans agricole et météorologique. Il se calcule comme suit [13].

$$A_m = \frac{P_i}{T_m + 10} \quad (2)$$

P_i : Précipitation moyenne mensuelle (mm); T_m : Température moyenne mensuelle (°C);

2.3.1.3 MÉTHODE PLUVIOTHERMIQUE DE H. GAUSSEN - F. BAGNOULS ET D'EUVERTE

Le diagramme ombrothermique, développé par F. Bagnouls (1953) et Henri Gaussen (1957), constitue un outil de référence pour l'analyse climatique régionale. Il permet d'identifier les saisons climatiques d'un territoire et s'applique à tous les types de climats en reposant sur la corrélation entre la température et les précipitations [14]. Une période sèche est définie lorsque la précipitation moyenne mensuelle est inférieure ou égale au double de la température moyenne mensuelle ($P \leq 2T$), tandis qu'une période humide correspond à la condition inverse ($P > 2T$). La saison humide peut également être déterminée par la méthode dite d'Euverte.

La méthode d'Euverte repose sur le rapport P/T entre les précipitations et les températures moyennes mensuelles pour caractériser les conditions d'humidité, en particulier en milieu aride et semi-aride. Largement utilisée dans les études climatologiques au Sénégal, elle distingue quatre régimes climatiques (très sec, sec, sub-humide et humide) et complète efficacement les approches de Gaussen-Bagnouls et de De Martonne dans l'analyse du climat local.

2.3.1.4 INDICE DE PRÉCIPITATION ET D'ÉVAPOTRANSPIRATION STANDARDISÉ (IPES)

L'utilisation de l'IPES est plus adaptée à l'analyse des effets du changement climatique sur les conditions hydriques, contrairement à d'autres indices tels que l'indice de précipitation standardisé (IPS), qui repose uniquement sur les données de précipitation (gains) sans intégrer l'effet de l'évapotranspiration (pertes) [3].

La procédure de calcul de l'indice comprend:

- L'estimation du bilan hydrique climatique;
- L'accumulation des déficits et excédents à différentes échelles temporelles;
- L'ajustement à une distribution de probabilité log-logistique.

L'IPES est obtenu à partir du bilan hydrique climatique, calculé comme la différence mensuelle entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), estimée ici à partir de la température, pour chaque mois i [8]:

$$D_i = P_i - ETP_i \quad (3)$$

L'analyse commence par l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui peut être calculée par des méthodes physiques, comme Penman-Monteith, ou empiriques, comme Thornthwaite. Penman-Monteith est reconnu comme référence par la FAO pour sa robustesse, mais cette étude utilise la méthode de Thornthwaite en raison de la disponibilité limitée des données et de sa simplicité, ne nécessitant que la température moyenne mensuelle.

Ainsi, le bilan hydrique climatique (D_i) fournit une mesure simple de l'excédent ou du déficit en eau pour le mois i analysé et il peut être agrégée à différentes échelles de temps $k = 1, 3, 6, 12$, ou 24 mois. La différence $D_{i,j}^k$ pour un mois j et une année i donnés dépend de l'échelle de temps k choisie. Par exemple, la différence cumulée pour un mois d'une année i donnée, sur une échelle de temps de 12 mois, est calculée à l'aide de:

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} \quad \text{si } j < k \quad (4)$$

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^j D_{i,l} \quad \text{si } j \geq k \quad (5)$$

$\sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l}$ traduit la somme des $D_{i,j}$ du mois précédent (indice $i - 1$), pour les colonnes allant de $13 - k + j$ jusqu'à 12. $\sum_{l=1}^j D_{i,l}$ indique la somme des D_i du mois courant (indice i), de la colonne 1 jusqu'à j .

L'issue de cette étape a permis de constituer un échantillon D de valeurs $X_{i,j}^k$ soumis à une analyse fréquentielle afin d'identifier la loi de probabilité la plus appropriée pour son ajustement. Compte tenu des caractéristiques, la loi log-logistique à trois paramètres a été retenue pour modéliser la distribution de la série D aux différentes échelles temporelles, en vue du calcul de l'IPES. La fonction de densité de probabilité de la loi log-logistique s'écrit sous la forme suivante:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right)^{-2} \quad (6)$$

Où α , β et γ sont respectivement les paramètres d'échelle, de forme et d'origine pour les valeurs D comprises dans la plage ($\gamma < D < \infty$). Ainsi, la fonction de distribution de probabilité de la série D selon la distribution log-logistique est donnée par:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (7)$$

Avec $F(x)$, l'IPES peut facilement être obtenu en tant que valeurs normalisées de $F(x)$. Par exemple, d'après l'approximation classique [15]:

$$IPES = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (8)$$

Où $W = -2 \ln(p)$ pour $p \leq 0,5$. p est la probabilité de dépasser une valeur D déterminée, $p = 1 - F(x)$.

Si $p > 0,5$, p est remplacé par $1 - p$ donc $W = -2 \ln(1 - p)$ et le signe de IPES résultant est inversé.

Les constantes sont: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$ et $d_3 = 0,001308$.

2.3.2 DÉTECTION DES TENDANCES ET RUPTURES

Selon [5], une rupture correspond à un changement dans une série chronologique à un instant généralement inconnu. Dans cette étude, les ruptures et tendances ont été détectées à l'aide des tests non paramétriques de Pettitt (1979) pour une rupture unique et de Mann-Kendall (1945) pour les tendances monotones. Les résultats sont interprétés en considérant l'hypothèse nulle d'absence de rupture (seuil 5 %); son rejet indique une rupture significative et permet d'estimer sa date. Les analyses ont été réalisées avec Matlab selon la méthodologie de [2] dictée ci-après:

2.3.2.1 TEST DE MANN KENDALL

Le test de Mann-Kendall (MK) s'agit d'un test non paramétrique fondé sur les rangs, permettant d'évaluer la significativité de la corrélation entre le temps et la variable étudiée, sans hypothèse préalable sur la distribution des données. Soit $(x_1, \dots, x_n)$ un échantillon de valeurs indépendantes d'une variable aléatoire X , dont on cherche à analyser la stationnarité. La statistique de Mann-Kendall (S) est alors définie par:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(x_i - x_j) \quad (9)$$

où x_i et x_j représentent les valeurs séquentielles des données et n la taille de l'échantillon. La statistique du test est obtenue en considérant l'ensemble des couples (x_i, x_j) avec $i < j$, puis en calculant la différence entre le nombre de cas pour lesquels $x_j > x_i$ et ceux pour lesquels $x_j < x_i$. La significativité de la tendance est ensuite évaluée à l'aide de la variable normalisée du tau de Kendall (Z), définie comme suit:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} si S > 0 \\ 0 si S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} si S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

En présence de valeurs identiques dans la série, la variance S peut être définie comme suit:

$$\text{ar}(S) = n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n \frac{t_i i(i-1)}{18} \quad (11)$$

où, t_i désigne le nombre d'égalités impliquant k valeurs.

Une valeur positive (ou négative) de Z indique une tendance ascendante (ou descendante) et sa significativité est comparée à la valeur critique ou seuil de significativité du test.

2.3.2.2 TEST DE PETTITT

Il repose sur les hypothèses de H_0 : la série est stationnaire (homogène ou absence de rupture); H_1 : la série présente une rupture à un instant connu.

La statistique de test Z est alors calculée comme suit:

$$Z = \max |U(k)|, k = 1, \dots, n-1 \quad (12)$$

Avec:

$$S = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{signe}(x_j - x_i) \quad (13)$$

Asymptotiquement, la fonction de répartition de Z peut être approchée par la formule suivante:

$$P(Z \leq z) = 1 - 2 \exp\left(\frac{-6z^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (14)$$

L'hypothèse nulle H_0 est rejetée au seuil de signification α lorsque la valeur observée de la statistique Z excède le quantile d'ordre $1-\alpha$ de la distribution ci-dessus. Le test permet également d'estimer la date de la rupture, à partir de l'indice k pour lequel la valeur absolue de la statistique $U(k)$ est maximale.

3 RÉSULTATS

Cette phase présente les résultats obtenus après l'application des méthodes décrites ci-dessus.

3.1 VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES INDICES DE PRÉCIPITATION STANDARDISÉ (IPS) POUR LA STATION DE KAOLACK, FATICK ET NIOIRO

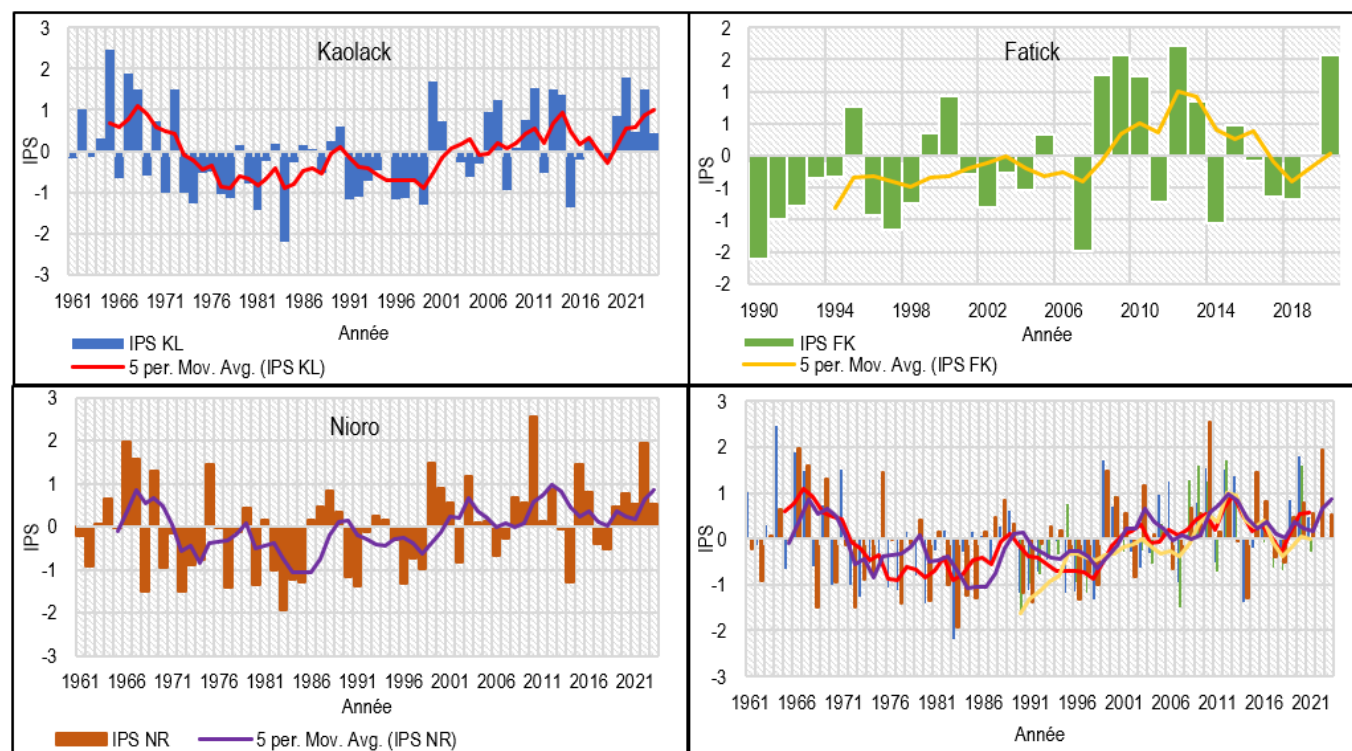


Fig. 2. Evolution interannuelle des IPS de Kaolack, Fatick et Nioro

KL: Station Kaolack; FK: Station Fatick; NR: Station Nioro; 5 Moy.mob.le sur pér: Moyenne mobile sur une période de 5ans

L'analyse de l'évolution temporelle des indices de précipitation standardisé (IPS) à Kaolack, Fatick et Nioro, sur les périodes 1961–2023, 1991–2023 et 1981–2023 met en évidence une forte variabilité interannuelle. Trois grandes phases se distinguent. La première, de 1961 à la fin des années 1960, correspond à une période globalement humide marquée par des indices largement positifs, traduisant des cumuls pluviométriques supérieurs à la moyenne. La deuxième phase, amorcée à partir de 1970, est caractérisée par une rupture nette et une longue période sèche jusqu'à la fin des années 1990, avec des épisodes de sécheresse sévère, notamment en 1972–1973 et 1983–1984, en lien avec la grande sécheresse sahélienne [16].

À partir de la fin des années 1990, une reprise progressive mais irrégulière des précipitations est observée dans les trois stations, comme en témoignent la remontée des moyennes mobile, avec une alternance d'années humides et sèches. Cette évolution traduit une tendance récente à une relative humidification du climat selon un gradient sud-nord, avec des précipitations plus importantes à Nioro, sans toutefois atteindre les niveaux de précipitation des années 1960. Globalement, ces résultats illustrent la transition d'un régime humide à un régime sec, suivie d'un rétablissement partiel et instable, confirmant la vulnérabilité du climat local à la variabilité pluviométrique sahélienne, comme l'ont également montré [3].

3.2 VARIABILITÉ DES TEMPÉRATURES

3.2.1 INDICE D'ARIDITÉ DE DE MARTONNE (AM)

Entre 1961 et 2023, le climat de la région est majoritairement semi-aride, avec quelques épisodes tempérés surtout à la station de Nioro, et une période totalement semi-aride de 1971 à 1998 correspondant à la grande sécheresse de 1969.

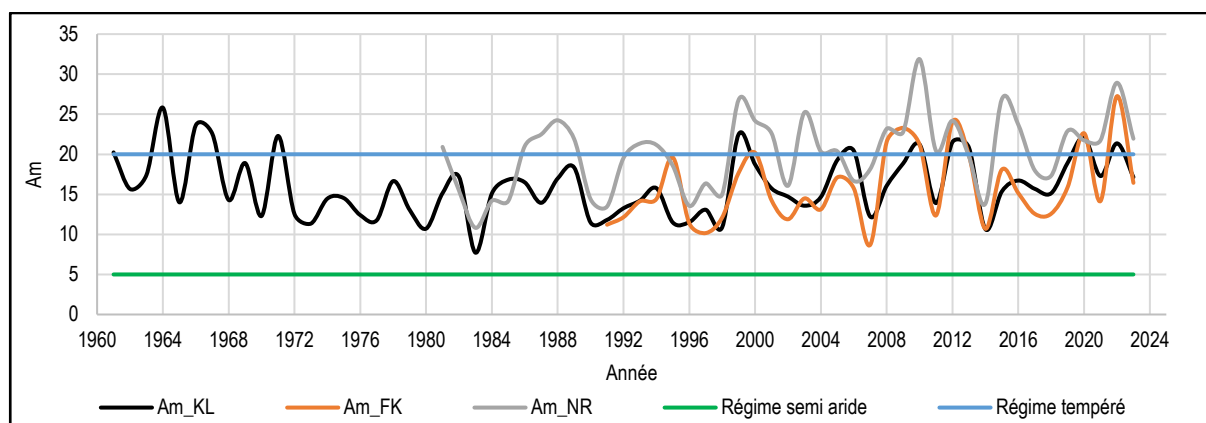


Fig. 3. Courbe de variation des indices de De Martonne de Kaolack, Fatick et Nioro

Am_{KL} (indice de De Martonne de Kaolack); Am_{FK} (indice de De Maronne de Fatick); Am_{NR} (indice De Martonne de Nioro).
 $Am < 5$: régime aride; $5 < Am < 20$: régime semi-aride; $Am > 20$: régime tempéré

3.2.2 LES DIAGRAMMES PLUVIOTHERMIQUES SELON (BAGNOULS – GAUSSEN ET EUVERTE)

L'analyse climatologique de Kaolack, Fatick et Nioro (figure 4) montre un régime soudano-sahélien caractérisé par une longue saison sèche (novembre-mai) et une saison humide courte mais intense (juin-octobre), avec des précipitations maximales en août et des températures relativement stables (25-32 °C). Ce climat, confirmé par les méthodes de Bagnouls-Gausсен et d'Euvette, influence fortement la disponibilité en eau, l'agriculture pluviale et la végétation de savane sèche.

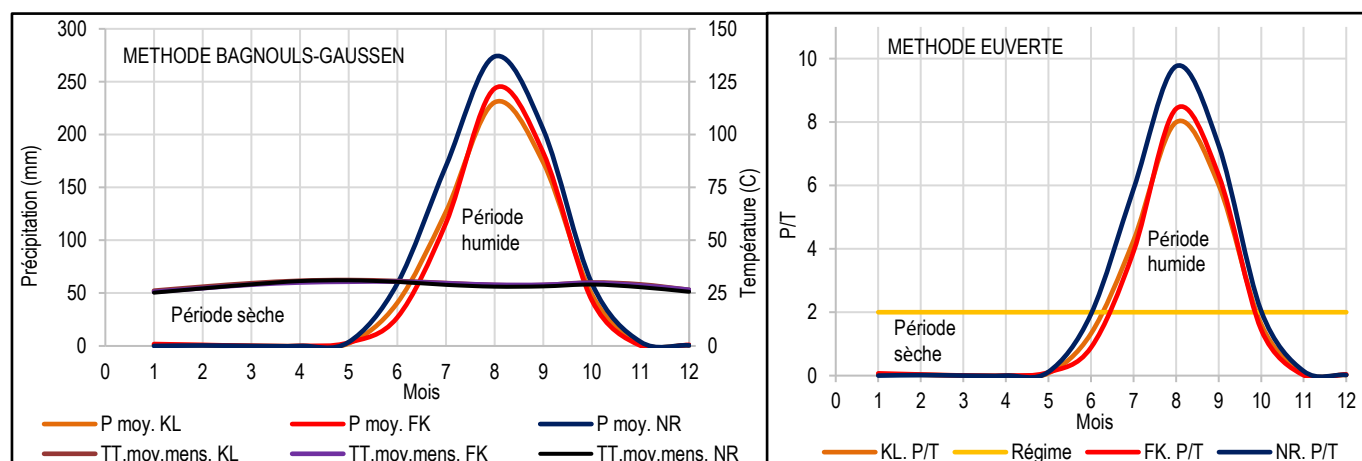


Fig. 4. Diagrammes pluviothermiques de Gausсен-Bagnouls et d'Euvette

P_{moy} : Précipitation moyenne; $TT.moy.mens$: température moyenne mensuelle; P/T : rapport précipitation sur température; KL: station de Kaolack; FK: station de Fatick; NR: station de Nioro; la courbe orange (Régime) illustre la limite supérieure du régime sèche.

3.3 DÉTECTION DES TENDANCES AU SEIN DES SÉRIES PLUVIOMÉTRIQUES ANNUELLES

Les indices de précipitation saisonnière (IPS) montrent une tendance à la hausse dans les trois stations, significative à Fatick et Nioro, mais non significative à Kaolack. Le test de Pettitt détecte des ruptures significatives vers 1998 à Kaolack et Nioro, correspondant à la fin de la sécheresse sahélienne, tandis qu'à Fatick une rupture non significative est estimée vers 2007, reflétant des changements ponctuels du régime pluviométrique liés à la variabilité naturelle. Les résultats obtenus avec ces statistiques descriptives ont confirmé les travaux de nombreux auteurs dont [16] qui ont révélés la rupture pluviométrique de l'année 1998, correspondant au début de la reprise pluviométrique avec une alternance importante d'année humide que sèche. Néanmoins, cet indicateur établi en fonction de la précipitation, quel que soit l'échelle temporelle choisie, ne prend pas en compte l'évapotranspiration qui dépend de la température, un paramètre important dans la caractérisation des sécheresses [3], [9]. Donc, dans ce contexte de changement climatique, l'utilisation de l'IPES devient importante pour mieux affiner les tendances de sécheresses et d'humidité soulignées par l'IPS.

Tableau 2. Test de Mann-Kendall et Pettitt appliqué à l'IPS des stations de Kaolack, Fatick et Nioro

Station	Test de Mann Kendall				Test de Pettitt			
	Z	p-value	Tendance	Caractère	Z	p-value	Rupture	Caractère
Kaolack	1,471	0,141	Hausse	Non significative	418	0,032	1998	Significative
Fatick	2,231	0,026	Hausse	Significative	136	0,099	2007	Non significative
Nioro	2,135	0,033	Hausse	Significative	438	0,021	1998	Significative

3.4 INDICE DE PRÉCIPITATION ET D'ÉVAPOTRANSPIRATION STANDARDISÉ (IPES)

L'IPES a été estimé à partir des bilans hydriques mensuels calculés avec la méthode de Thornthwaite. Les bilans annuels ont permis de déterminer les quantiles à plusieurs échelles, puis d'effectuer une analyse fréquentielle avec la loi log-logistique à trois paramètres, validée par le test de Kolmogorov-Smirnov ($p\text{-value} > 0,05$). Ceci traduit qu'il y a une concordance entre la distribution empirique et la loi théorique, témoignant de la capacité du modèle à reproduire fidèlement le comportement statistique des données hydroclimatiques.

La figure 5 montre une forte variabilité interannuelle de l'IPES pour $K=12$ dans le bassin versant au sud du fleuve Saloum, avec une prédominance d'indices négatifs indiquant des épisodes secs fréquents et une vulnérabilité accrue à la sécheresse. Cette tendance correspond aux déficits hydriques observés en Afrique de l'Ouest depuis les années 1970 [9], [17], [18], [19], [20] et également au Sénégal [17]. L'alternance irrégulière de phases sèches et humides reflète à la fois la variabilité climatique naturelle et les changements climatiques récents, susceptibles de modifier la fréquence et l'intensité des événements extrêmes, avec des impacts sur l'eau, l'agriculture et les écosystèmes.

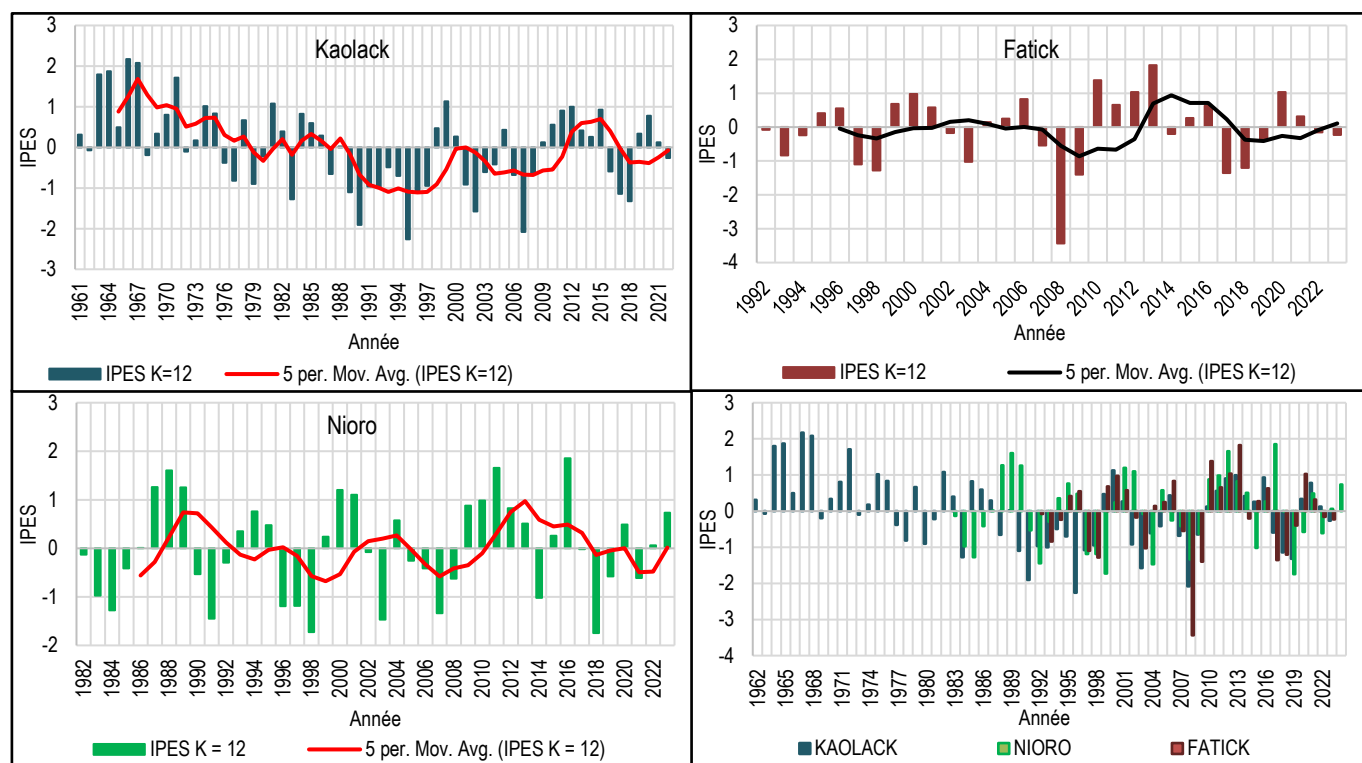


Fig. 5. Variabilité interannuelle des IPES 12 de Kaolack, Fatick et Nioro

5 Moy.mob.le sur pér: Moyenne mobile sur une période de 5 ans; K = échelle de temps

3.4.1 INTERPRÉTATION DE LA TENDANCE ET DE LA VARIABILITÉ DE L'IPES

Les statistiques descriptives du tableau montrent une baisse significative avec une rupture en 1987 à Kaolack, tandis qu'à Fatick et Nioro, les ruptures détectées en 2009 et 2008 ne sont pas significatives, mais indiquent néanmoins une dégradation progressive de l'IPES. Cette dernière comme affirmée par [3], [17] est liée avec la hausse des températures qui améliore l'évapotranspiration potentielle (ETP), suivi de la baisse de l'humidité sur bassin.

Tableau 3. Tendance des séries de IPES 12 des stations de Kaolack, Fatick et Nioro

Station	Mann Kendall			PETTITT		
	Z	p-value	Observation	p-value	Rupture	Observation
Kaolack	-2	0,024	Significative	0,012	1987	Significative
Fatick	0,405	0,685	Non significative	0,756	2009	Non significative
Nioro	0,390	0,696	Non significative	0,781	2008	Non significative

3.4.2 DONNÉES IPES EXTRAITS DANS LA PLATEFORME DU MONITEUR MONDIAL DE LA SÉCHERESSE

L'analyse de la figure 6 des IPES aux échelles temporelles k (1, 3, 6, 9, 12, et 24 mois) met en évidence une forte variabilité hydroclimatique marquée par une tendance au dessèchement du bassin. Selon [17], ces échelles sont utiles pour surveiller les ressources en eaux de surface. Les indices à courte échelle ($k = 1$ et $k = 3$) traduisent une alternance rapide d'anomalies humides et sèches, soulignant l'instabilité saisonnière. Aux échelles intermédiaires ($k = 6$ et $k = 9$), les fluctuations deviennent plus structurées et mettent en évidence des épisodes de sécheresse agricole persistants, notamment entre 1970 et 1990. Les indices à longue échelle ($k = 12$ et $k = 24$) confirment l'installation d'une sécheresse hydrologique durable durant cette période, contrastant avec les conditions humides antérieures à 1969. Depuis la fin des années 1990, une reprise partielle mais irrégulière est observée, bien que plusieurs périodes récentes restent dominées par des valeurs négatives, traduisant un déficit hydrique structurel renforcé par l'augmentation des températures et de l'évapotranspiration potentielle, conformément aux résultats de [3], [17]. Dans l'ensemble, la cohérence entre les échelles temporelles montre une dynamique de sécheresse multiscalaire affectant les ressources en eau et la stabilité des systèmes agroécologiques.

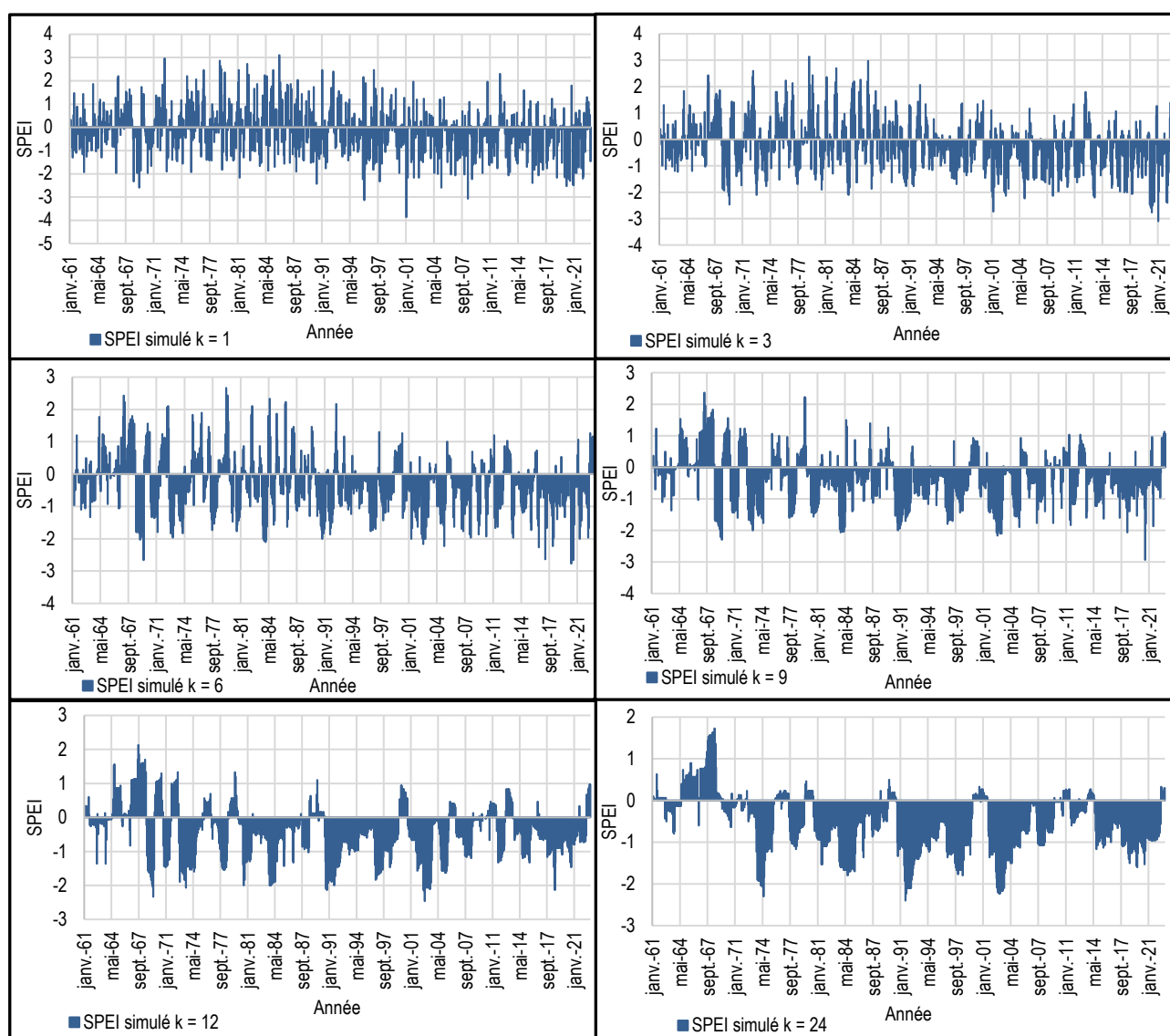


Fig. 6. Evolution temporelle de l'indice SPEI à des échelles de temps (1, 3, 6, 9, 12, et 24 mois) pour la zone d'étude d'étude

Tableau 4. Tendence des séries de SPEI de la zone d'étude (1961-2022)

Echelle	Tau de Kendall (Z)	p-value	Tendance	Caractère
SPEI 1	-5,766	0,000000	Baisse	Significative
SPEI 3	-6,876	0,000000	Baisse	Significative
SPEI 6	-5,745	0,000000	Baisse	Significative
SPEI 9	-4,605	0,000000	Baisse	Significative
SPEI 12	-4,929	0,000000	Baisse	Significative
SPEI 24	-8,481	0,000000	Baisse	Significative

3.5 CORRÉLATION ENTRE IPS – IPES

La représentation graphique (figure 7) entre l'IPS et l'IPES 12 mois permet de voir les similitudes et différences temporelles.

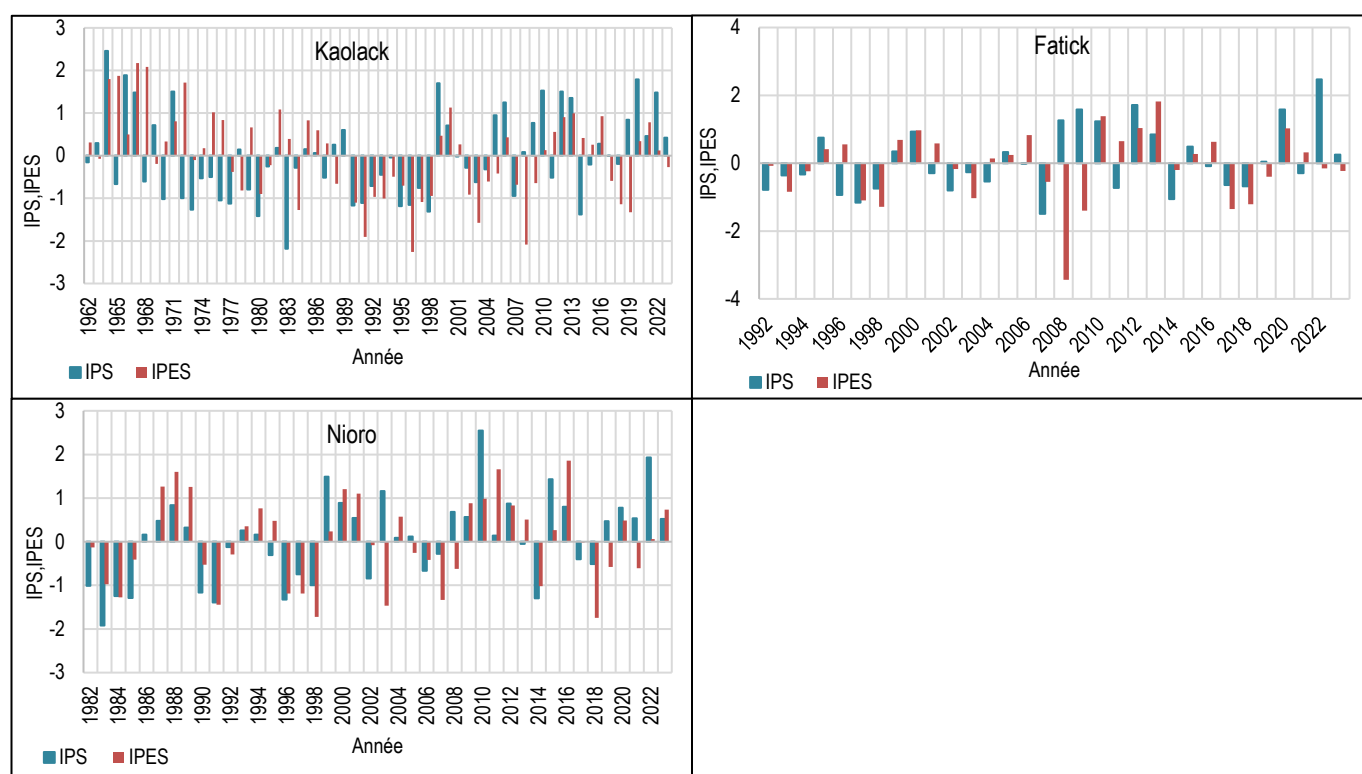


Fig. 7. Evolution spatio-temporelle des indices IPS et IPES des stations

Les indices IPS et IPES présentent une forte cohérence temporelle dans les trois stations, traduisant une bonne identification des phases sèches et humides. A Kaolack, l'IPS révèle une variabilité interannuelle plus marquée, particulièrement après 1998, soulignant une sensibilité accrue aux extrêmes pluviométriques, tandis qu'à Fatick, les deux indices restent globalement proches de zéro, reflétant une relative stabilité du régime pluviométrique. A Nioro, une transition progressive vers des conditions plus humides est observée après les années 2000, avec des valeurs de l'IPS légèrement supérieures à celles de l'IPES. Cette divergence est liée à l'augmentation des températures, qui accroît l'ETP et réduit les valeurs de l'IPES malgré l'amélioration des précipitations [17]. Dans ce bassin, la hausse des températures a également affecté les eaux souterraines à travers des processus d'évaporation avant et pendant l'infiltration, comme l'a affirmé [21] dans ses travaux basés sur les analyses isotopiques environnementales (^{18}O , ^2H). Globalement, l'IPES offre une représentation plus lissée de la variabilité hydroclimatique et apparaît plus adaptée que l'IPS pour l'analyse des tendances de sécheresse et d'humidité à l'échelle territoriale [3].

4 DISCUSSION

Cette étude met en évidence la variabilité hydroclimatique du bassin sur la période 1961-2023 à travers une approche combinant les indices IPS et IPES, des tests statistiques et des indices saisonnières d'aridité. Les résultats confirment l'appartenance de la zone d'étude au domaine soudano-sahélien, caractérisé par une longue saison sèche et une forte concentration des précipitations entre juin et

octobre, en cohérence avec les dynamiques observées à l'échelle du Sahel ouest-africain [13], [22]. L'analyse conjointe des indices IPS et IPES révèle une évolution contrastée du régime hydroclimatique dans les trois stations de Kaolack, Fatick et Nioro. L'IPS montrent une tendance à la hausse, significative à Fatick et à Nioro, mais non significative à Kaolack, avec des ruptures détectées autour de 1998 à Kaolack et à Nioro, traduisant des modifications du régime pluviométrique liées à la variabilité climatique. En revanche, l'IPES met en évidence des déficits hydriques marqués durant les années 1990, suivis d'une amélioration partielle et irrégulière au début du XXI^e siècle, avec un retour relatif à des conditions plus humides à partir de 2010. Ces résultats permettent d'identifier trois phases climatiques majeures: une phase humide, une phase sèche et une phase de reprise, en accord avec les travaux antérieurs soulignant la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest durant les années 1970 [23], [18], [19] et au Sénégal [9], [17], [16]. La phase de reprise, caractérisée par une alternance d'épisodes secs et humides, s'inscrit dans la dynamique climatique sahélienne décrite par plusieurs auteurs [4], [5], [6], notamment au Sine Saloum [21], [24]. Toutefois, l'irrégularité récente ne permet pas de conclure à un retour définitif à la normale pluviométrique dans ce bassin, une situation également observée dans d'autres régions ouest-africaines [9], [16], [25].

L'analyse de corrélation souligne des différences fonctionnelles entre les indices. L'IPS apparaît globalement plus sensible aux extrêmes climatiques, tandis que l'IPES fournit une représentation plus intégrée de la sécheresse, cohérente avec les observations issues du moniteur mondial de la sécheresse. La dynamique spatiale révèle une forte variabilité à Kaolack, une variabilité plus faible à Fatick et une tendance plus humide récente à Nioro. La diminution des valeurs de l'IPES est principalement liée à l'augmentation des températures, qui intensifie l'ETP et le stress hydrique, en lien avec le changement climatique [3], [9], [17], avec des impacts directs sur la disponibilité des ressources en eau dans le bassin [21].

Dans ce contexte, l'IPES apparaît plus adapté que l'IPS pour l'analyse des tendances de sécheresse et d'humidité à l'échelle territoriale, bien que l'IPS demeure plus pertinent que le PDSI (Palmer Drought Severity Index ou indice de sécheresse de Palmer) pour l'étude des tendances de sécheresse [26], [27] par [3]. Malgré certaines limites liées à l'estimation de l'ETP et à la prise en compte des rétroactions de la végétation, l'IPES constitue un indicateur robuste pour la caractérisation de la sécheresse et l'appui à la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique [9], [17], [28], et un outil pertinent pour la surveillance climatique et l'aide à la décision.

5 CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer l'ampleur spatio-temporelle de la sécheresse sur la période 1961–2023 dans les bassins versants situés au sud du fleuve Saloum, à partir d'une analyse conjointe des indices IPS et IPES. L'intégration d'indices IPES multiscalaire issus du moniteur mondial de la sécheresse a permis d'affiner et de consolider les résultats obtenus à partir des données de l'ANACIM, tout en mettant en évidence la performance de l'IPES pour la caractérisation des tendances de la sécheresse. Les résultats montrent une forte dépendance du régime hydroclimatique aux températures et aux précipitations, marquée par un régime pluviométrique unimodal et une variabilité interannuelle significative. Une tendance globale à la baisse des indices est observée à partir des années 1970, accompagnée d'une alternance marquée des phases humides et sèches au cours des dernières décennies. L'IPS apparaît plus sensible aux extrêmes climatiques, tandis que l'IPES offre une représentation plus lissée et plus adaptée à l'analyse des tendances à long terme. Dans un contexte de changement climatique, l'IPES, associé à des outils statistiques robustes, constitue un indicateur pertinent pour la surveillance climatique, l'évaluation du risque de sécheresse et l'appui à la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant au sud du fleuve Saloum.

REFERENCES

- [1] T. Sharma et A. K. Paswan, « Review of hydro-climate variability and modeling approaches for water security under climate change in India », *Discov Geosci*, vol. 3, n° 1, p. 129, sept. 2025, doi: 10.1007/s44288-025-00246-y.
- [2] C. Faye, « Changement climatiques observés sur le littoral sénégalais (Région de Dakar) depuis 1960 : Etude de la variabilité des tendances sur les températures et la pluviométrie », 2019, Consulté le: 23 septembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <http://rivieresdusud.uas.sn/xmlui/handle/123456789/323>.
- [3] S. M. K. SENE et F. Cheikh, « Caractérisation des conditions humides et sèches du bassin du Niaoulé dans un contexte de changement climatique avec l'Indice Standardisé de Précipitation et d'Évapotranspiration (Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index: SPEI) », *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal*, vol. 7, n° 4, 2023.
- [4] I. Camara, M. Noblet, Q. Lejeune, et Y. Sané, Évaluation de la variabilité climatique et des tendances climatiques futures dans la région de Fatick-Sénégal. Report produced under the project «Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne», Climate Analytics gGmbH, Berlin. 2019.
- [5] A. Bodian, « Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest) », *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, n° Volume 8, p. 297-312, janv. 2014, doi: 10.4000/physio-geo.4243.
- [6] P. Ozer, M. Erpicum, G. Demarée, et M. Vandiepenbeeck, « The Sahelian drought may have ended during the 1990s », *Hydrological Sciences Journal*, vol. 48, n° 3, p. 489-492, juin 2003, doi: 10.1623/hysj.48.3.489.45285.

- [7] M. Sow, D. Gaye, et M. M. Diakhate, « Analyse de l'évolution spatiotemporelle de la tendance des extrêmes chauds au Sénégal », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, août 2024, doi: 10.4000/12jq1.
- [8] S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, et J. I. López-Moreno, « A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index », avr. 2010, doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- [9] C. Faye, « Analyse de l'intensité et des tendances de la sécheresse à l'aide du SPEI modifié au Sud du Sénégal de 1980 à 2016 », *Territoires, Environnement et Développement (TED)*, vol. 1, n° 2, p. 49-69, déc. 2022, doi: 10.34874/IMIST.PRSM/ted-v1i2.34107.
- [10] A. Ali, T. Lebel, et A. Amani, « Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel », *Sécheresse*, vol. 19, n° 4, p. 227-235, 2008.
- [11] O. C. Diouf, « Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal », 2016, Consulté le: 1 octobre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.academia.edu/download/87250338/184.pdf>
- [12] S. Beguería, S. M. Vicente Serrano, F. Reig-Gracia, et B. Latorre Garcés, « SPEIbase v.2.9 [Dataset] ». DIGITAL.CSIC, juillet 2023. doi: 10.20350/digitalCSIC/15470.
- [13] V. B. Traore, M. L. Ndiaye, S. Diallo, R. M. Ndiaye, R. Diouf, et M. L. Sow, « Characterization of climatic aridity in the groundnut basin, Senegal », *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 8, n° 1, 2022, Consulté le: 15 octobre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/553>.
- [14] A. Bodian, H. Dacosta, R. N. Diouf, E. H. O. Ndiaye, et A. Mendy, « Contribution à la connaissance de l'aléa pluvial au Sénégal grâce à la valorisation des données pluviographiques historiques », *Climatologie*, vol. 13, p. 38-46, 2016, doi: 10.4267/climatologie.1194.
- [15] M. Abramowitz et I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions: With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Courier Corporation, 1965.
- [16] L. Descroix *et al.*, « Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le bassin du Niger moyen », *Climatologie*, vol. 12, p. 25-43, 2015, doi: 10.4267/climatologie.1105.
- [17] S. Bouly, A. CISSE, C. FAYE, et T. SANE, « L'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) de 1950 A 2018 pour caractériser la tendance de la sécheresse sur la BASSE CASAMANCE », *Espace Géographique et Société Marocaine*, n° 32, 2020.
- [18] D. Sighomnou, « Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun: perspectives d'évolution des ressources en eau », *These doct Etat Univ Yaoundé I, Cameroun*, 2004.
- [19] É. Servat *et al.*, « De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne », *rseau*, vol. 12, n° 2, p. 363-387, 1999, doi: 10.7202/705356ar.
- [20] D. Rosbjerg, *Sustainability of Water Resources Under Increasing Uncertainty*. IAHS, 1997.
- [21] N. M. Dieng, P. Orban, J. Otten, C. Stumpp, S. Faye, et A. Dassargues, « Temporal changes in groundwater quality of the Saloum coastal aquifer », *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 9, p. 163-182, févr. 2017, doi: 10.1016/j.ejrh.2016.12.082.
- [22] L. Descroix *et al.*, « Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le bassin du Niger Moyen », *Annales de l'Association internationale de climatologie*, déc. 2015, Consulté le: 7 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ird.hal.science/ird-02153162>.
- [23] S. E. Nicholson, « The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability », *International Scholarly Research Notices*, vol. 2013, n° 1, p. 453521, 2013, doi: 10.1155/2013/453521.
- [24] G. Panthou, « Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années », *phdthesis*, Université de Grenoble, 2013. Consulté le: 7 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-00928772>.
- [25] G. Panthou *et al.*, « Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: the Sahelian case », *Environ. Res. Lett.*, vol. 13, n° 6, p. 064013, mai 2018, doi: 10.1088/1748-9326/aac334.
- [26] J. Keyantash et J. A. Dracup, « The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices », août 2002, doi: 10.1175/1520-0477-83.8.1167.
- [27] N. B. Guttman, J. R. Wallis, et J. R. M. Hosking, « Spatial Comparability of the Palmer Drought Severity Index », *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 28, n° 6, p. 1111-1119, 1992, doi: 10.1111/j.1752-1688.1992.tb04022.x.
- [28] S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno, M. Angulo, et A. E. Kenawy, « A New Global 0.5° Gridded Dataset (1901–2006) of a Multiscalar Drought Index: Comparison with Current Drought Index Datasets Based on the Palmer Drought Severity Index », août 2010, doi: 10.1175/2010JHM1224.1.

