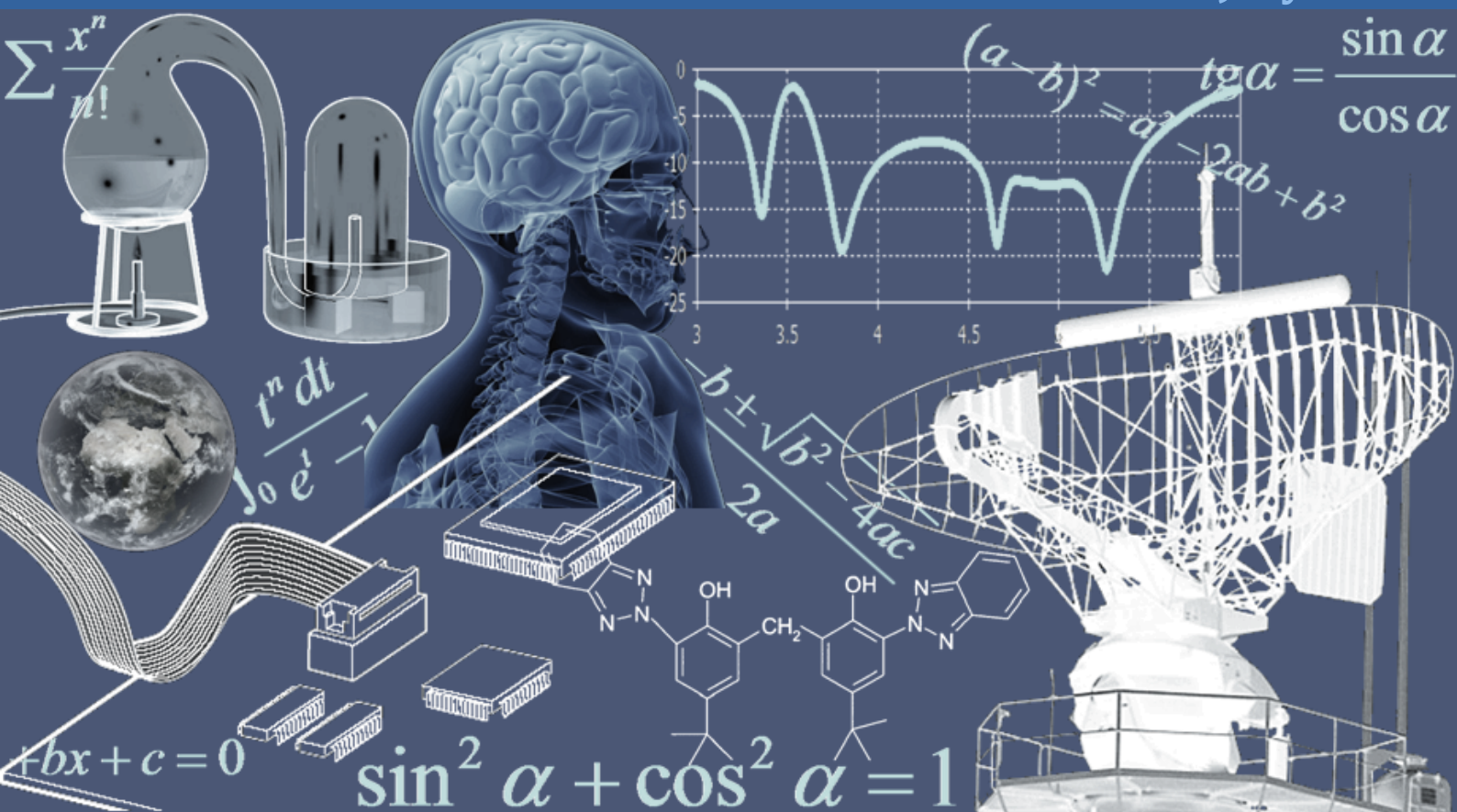


INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION AND APPLIED STUDIES

Vol. 46 N. 1 July 2025



International Peer Reviewed Monthly Journal



International Journal of Innovation and Applied Studies

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

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

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

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

Editorial Advisory Board

Amir Samimi, Ph.D. of Science in Chemical engineering, Process Engineer & Risk Specialist of Oil and Gas Refinery Company, Iran
Mahsa Ja'fari, Department of Chemical Engineering, Abadan Faculty of Petroleum, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran
Alin Velea, Paul Scherrer Institute, Switzerland
Kamyar Hasanzadeh, Aalto University, Finland
Ogbonnaya N. Chidibere, University of East Anglia, United Kingdom
Oumair Naseer, University of Warwick, United Kingdom
Wei Zheng, University of Texas Health Science Center at San Antonio, USA
Hu Zhao, University of Southern California, USA
Haijian Shi, Kal Krishnan Consulting Services, Inc, USA
Syed Ainul Abideen, University of Bergen, Norway
Malika Maataoui, Mohammed V University, Morocco
Fabio De Felice, University of Cassino and Southern Lazio, Italy
Giovanni Leonardi, Mediterranea University of Reggio Calabria, Italy
Siham El Gouzi, Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Spain
Mohamed KOSSAÏ, European Business School EBS Paris, France
Mustafa Batuhan AYHAN, Marmara University, Turkey
Andrzej Klimczuk, Warsaw School of Economics, Poland
Corinthias P. M. Sianipar, Tokyo University of Science, Japan
Irfan Jamil, Sinohydro Engineering, China
Sukumar Senthilkumar, Chonbuk National University, South Korea
Bratu (Simionescu) Mihaela, Bucharest University of Economic Studies, Romania
Mirela Maria Codescu, National Institute for R&D in Electrical Engineering ICPE-CA, Romania
Milen Zamfirov, St. Kliment Ohridski Sofia University, Bulgaria
Svetoslava Saeva, Neofit Rilski South-West University, Bulgaria
Dimitris 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

Nouvelles données pétro-structurales du sillon volcano-plutono-sédimentaire de Marabadiassa-Katiola (Centre de la Côte d'Ivoire)	1-16
<i><u>Kone Massahona Jean Pierre, Gbele Ouattara, and N'Dri Koffi Alexis</u></i>	
Etat des lieux de la transformation de la viande d'aulacodes et perception des consommateurs au Sud-Bénin	17-37
<i><u>Linton Elie, Salifou F. A. Chakirath, Dassey Emmanuel Geoffroy, Kiki S. Pascal, Ahounou G. Serge, Souaïbou Farougou, Mensah Guy Apollinaire, and Youssao Issaka Abdou Karim</u></i>	
IMPACT OF MODERATE BLOOD ALCOHOL CONTENT ON THE EXPLICIT LEARNING OF A LIST OF WORDS IN YOUNG SCHOOLCHILDREN IN THE CITY OF ABIDJAN (CÔTE D'IVOIRE)	38-45
<i><u>Koffi Serge Pacôme Kouadio, Emmanuel Diboh, Seydou Silue, and Antoine Némé TAKO</u></i>	
Caractérisation pétro-structurale du terrane panafricain de Tchilit dans le secteur de Gofat-Tafadek (Massif de l'Air, Nord Niger)	46-72
<i><u>Salissou Abdoul Ganiou Amadou, Hassan Ibrahim Maharou, Sanda Chekaraou Mahamane Moustapha, Mallam Mamane Hallarou, Fozing Eric Martial, and Moussa Konate</u></i>	
Soil-Structure Interface Modeling and Characterization	73-82
<i><u>Oustasse Abdoulaye Sali, Déthié Sarr, and Diogoye Diouf</u></i>	
CONTRIBUTION DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE DANS L'ESTIMATION DES DÉBITS MENSUELS DU FLEUVE BAGOÉ À LA STATION HYDROMÉTRIQUE DE KOUTO AU NORD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE	83-96
<i><u>Adja Miessan Germain, KAMENAN Satti Jean-Robert, Privat TOHOURI, Marc Youan Ta, and Kouassi Amani Michel</u></i>	
UTILISATION DES MATERIAUX BIOSOURCES DANS L'ISOLATION THERMIQUE DES HABITATIONS: CAS DE LA PAILLE DE RIZ ET DE LA NATTE DE ROSEAU	97-111
<i><u>Waibaye Adoum, Bozabe Renonet Karka, and Koivoudou Lacatus</u></i>	
Modélisation hydrodynamique de l'aquifère côtier du Saloum (Centre Ouest du Sénégal) par approche stochastique	112-123
<i><u>Seyni NDOYE, Hamza Brahim Mahamat, Amadou Sarr, Mathieu Le Coz, Arnaud Gauthier, Cheikh Bécaye GAYE, Philippe Le Coustumer, and Moutaz RAZACK</u></i>	
Etude de l'impact de <i>Chromolaena odorata</i> (Asteraceae) sur les propriétés du sol (acidité et humidité) ainsi que sur les performances agronomiques du maïs (<i>Zea mays</i>) dans la région du Haut Sassandra, Centre Ouest de la Côte d'Ivoire	124-135
<i><u>Konan Kouamé Firmin, Roger BAYALA, Tokpa Lisette Zeh, Toure Bessimory, Lance Armand BALE, Yao Sadaïou Sabas Barima, and Sidiky BAKAYOKO</u></i>	
Effet du sarclo-binage sur le rendement et la rentabilité d'aubergine en culture de contre saison à Faranah, République de Guinée	136-145
<i><u>Mamadou Malal Balde, Bandjou Samoura, Hamidou Bah, Hadiatou Mariama Diallo, and Diawadou Diallo</u></i>	

Nouvelles données pétro-structurales du sillon volcano-plutono-sédimentaire de Marabadiassa-Katiola (Centre de la Côte d'Ivoire)

[New petro-structural data of the Marabadiassa-Katiola volcano-plutonous-sedimentary greenstone belt (Central Côte d'Ivoire)]

Kone Massahona Jean Pierre, Ouattara Gbele, and N'Dri Koffi Alexis

Laboratoire des Sciences Géographiques, du Génie Civil et des Géosciences, Institut National Polytechnique Félix HOUPOUËT-BOIGNY, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

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

ABSTRACT: The Marabadiassa-Katiola volcano-plutono-sedimentary greenstone belt (Central Côte d'Ivoire) belongs to the Paleoproterozoic domain of the West African craton, known to contain significant gold mineralization like other regions of the country (Tongon, Yaouré, Ity, Sissingué,...). Our study was based on the description (macroscopic and microscopic) of rock samples collected in the field during our various missions and on the analysis of teleanalytical and aeromagnetic maps of the study area. The Marabadiassa-Katiola greenstone belt is formed of Birimian volcano-sedimentary units intruded by plutonites. These are mainly basalts, andesites, pyroclastics and volcanoclastics associated with phillitoid or sandstones detrital sediments. The plutonism is marked by gabbros with a grainy or micro-grained texture in places, granites in the form of arena or in outcrop, sometimes alkaline or with two micas with small dark enclaves, diorites, granodiorites with a medium-grained texture with sometimes few dark enclaves or sometimes little deformed to basic dark enclaves or sometimes not deformed. All of these formations are affected by low-grade metamorphism of the greenschist facies. At the structural level, the area is part of the phases of regional tectonics that generated the sinistral shear corridors, thus causing a fracture network that can host mineralization. Several structural markers are found there, both ductile and brittle. These include foliation, fractures and faults, veins and dikes, sigmoidal tension cracks, and NE-SW-trending shear zones.

KEYWORDS: Lithologies, structures, satellite and aeromagnetic imagery, furrow, Birimian, Côte d'Ivoire.

RESUME: Le sillon volcano-plutono-sédimentaire de Marabadiassa-Katiola (Centre de la Côte d'Ivoire) appartient au domaine paléoproterozoïque du craton ouest africain, réputé pour renfermer d'importantes minéralisations aurifères à l'instar d'autres régions du pays (Tongon, Yaouré, Ity, Sissingué...). Notre étude s'est appuyée sur la description (macroscopique et microscopique) des échantillons de roches recueillis sur le terrain lors de nos différentes missions et sur l'analyse des cartes téléanalytiques et aéromagnétiques de la zone d'étude. Le sillon de Marabadiassa-Katiola est formé d'unités volcanosédimentaires birimiennes intrudées par des plutonites. Il s'agit principalement des basaltes, des andésites, des pyroclastites et des volcanoclastites associées à des sédiments détritiques philliteux ou grésopélitiques. Le plutonisme est marqué par des gabbros à texture grenue ou microgrenue par endroit, des granites sous forme d'arène ou en affleurement, quelques fois alcalins ou à deux micas avec de petites enclaves sombres, des diorites, des granodiorites à texture grenue moyenne avec parfois, peu d'enclaves sombres ou parfois peu déformées à enclaves sombres basiques ou quelques fois non déformées. L'ensemble de ces formations est affecté par un métamorphisme de faible degré du faciès de schistes verts. Au niveau structural, la zone s'inscrit dans les phases de la tectonique régionale qui a engendré les couloirs de cisaillements senestres, causant ainsi un réseau de fracturation pouvant encaisser des minéralisations. On y rencontre plusieurs marqueurs structuraux aussi bien ductiles que cassants. Ce sont entre autre, la schistosité, les fractures, les failles, les filons et veines, des fentes de tension sigmoïdales et les zones de cisaillement orientées NE-SO.

MOTS-CLEFS: Lithologies, structures, imagerie satellitaire et aéromagnétique, sillon, birimien, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Le craton ouest-africain, large portion de la lithosphère stabilisé depuis 1,9 Ga, est dominé par des terrains paléoprotérozoïques (2,2-2,0 Ga en moyenne) d'âge birimien reconnus sous le vocable de ceinture de roches vertes [1], [2], [3]. Ce sont en effet, des roches plutono-volcaniques, volcanoclastiques et sédimentaires, métamorphisées généralement sous des conditions de faciès schistes verts à localement amphibolitiques et intrudées par des massifs de granitoïdes [4], [5], [6].

Selon [7] ces terrains birimiens montrent un grand intérêt pour la recherche minière car réputés pour renfermer d'importantes minéralisations surtout aurifères. Des minéralisations qui sont le plus souvent associées à des shear zones et/ou dans les zones de contact métasédiments-roches vertes / intrusions granitoïdiques [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15].

Ce travail a pour but d'apporter de nouvelles données pétrographiques et structurales sur ces formations birimiennes dans le sillon volcano-plutono-sédimentaire de Marabadiassa-Katiola (Centre de la Côte d'Ivoire).

2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La zone d'étude s'inscrit dans le domaine paléoprotérozoïque de la dorsale de Man. Les travaux de [16] ont classé ces terrains paléoprotérozoïques en trois grands groupes de formations qui constituent les ceintures de roches vertes, dominées par les roches ignées mafiques et volcano-sédimentaires, les plutons granitoïdiques, et les bassins métasédimentaires détritiques. Les relations de terrain et les études géochronologiques dans la zone d'étude, soutiennent la succession suivante [17], [18]:

- 1) La formation des roches volcaniques de la ceinture de roches vertes;
- 2) La mise en place d'une première génération de granitoïdes, principalement de composition ttg, entre 2,123 ga et 2,108 ga;
- 3) La formation du bassin de bandama orienté so-ne, contemporain du volcanisme andésitique, entre 2,108 ga et 2,094 ga;
- 4) La mise en place d'une deuxième génération de granitoïdes, principalement de composition péralumineuse, calcique 2,097 ga.

Deux ceintures volcano-plutoniques sont exposées à l'Est du bassin de Bandama [16]. Il s'agit:

- 1) La ceinture de roches vertes de Katiola (KGB) bordant le Complexe Granitique de Fronan (FGC);
- 2) La ceinture de roches vertes de Marabadiassa (MGB) bordant la partie Ouest du Batholite d'Alékro.

Les ceintures de roches vertes sont constituées de metabasaltes, de métadolérites, de métagabbros et de métagabbros stratifiés à grains grossiers. Les metabasaltes sont associés à des schistes à grains fins et à des pélites. Dans le MGB, de grandes coupes de roches ultramafiques composées de cinq corps alignés NE-SO [19], sont situées sous les métagabbros et à proximité des bords intrusifs du granite. Ils sont aussi appelés ultrabasites d'Alékro, village dont ils sont le plus proche. Les roches de la ceinture ont subi un métamorphisme dans le faciès schistes verts, évoluant vers des faciès amphibolitiques à épidote près des plutons. Cependant, les textures magmatiques des roches mafiques sont souvent préservées. Les travaux de [20] ont permis de caractériser les formations ainsi que les phases de déformations (Figure 1). Ainsi, les roches de la ceinture seraient affectées par deux principaux événements de déformation:

- 1) La première déformation due aux intrusions de granitoïdes est caractérisée par des structures verticales;
- 2) La deuxième déformation est due à des failles de décrochement latéral senestre n010-n030 et à des plissements de tendance ne-so convexes qui ont affecté la ceinture de roches vertes, mais aussi les formations du bassin de bandama.

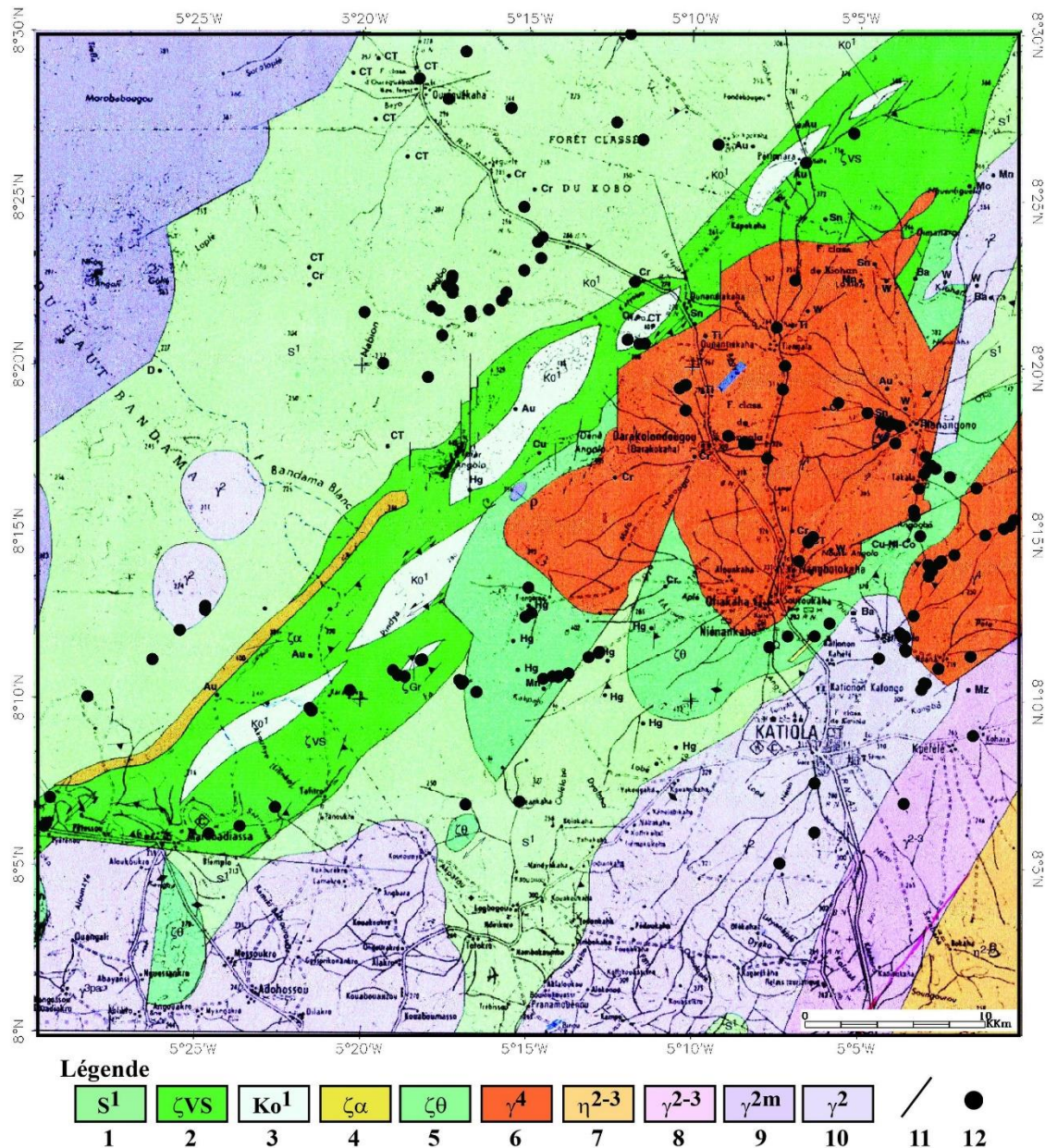


Fig. 1. Carte géologique de la région de Katiola-Marabadiassa (Centre de la Côte d'Ivoire [16]. 1: Schistes; 2: Métavolcanosédiments; 3: Méta-arénites; 4: Méta-andésites; 5: Métagabbros, métadolérites, amphibolites; 6: Granodiorite à biotite-hornblende; 7: Tonalites; 8: Granites à deux micas; 9: Batholite de Ferké; 10: Granites à biotite; 11: Failles; 12: Points d'observations

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour cette étude, nous avons eu besoin de certains matériels tels les cartes aéromagnétiques, topographiques et géologiques de la région de Katiola. L'utilisation de logiciels informatiques spécialisés nous a permis de traiter les données de terrain et de laboratoire:

- Georient nous a permis de tracer les rosaces de directions des structures géologiques observées sur le terrain;
- Paint, Excel pour les modifications des cartes.
- Envi, ArcGIS pour le traitement des données de la télédétection et élaborer les cartes

L'acquisition des données sur la zone d'étude a consisté essentiellement en une étude pétrographique, ainsi qu'à la collecte d'échantillons en vue d'études plus détaillées en lames minces.

La région de Katiola étant dans une zone tropicale humide et chaude, les phénomènes d'altération sont très poussés. Les affleurements sont donc rares dans certaines zones. Cependant, là où des affleurements ont été rencontrés, ils ont été décrits et des échantillons ont été prélevés. Ainsi donc deux missions ont été effectuées dans la zone d'étude.

4 RÉSULTATS

4.1 CARACTÉRISTIQUES PÉTROGRAPHIQUES DES FORMATIONS DU SILLON

L'étude pétrographique a montré que la région de Katiola renferme des roches magmatiques volcaniques, des volcano-sédimentaires et des roches magmatiques plutoniques et périplutoniques. Toutes les lithologies rencontrées dans la région sont plus ou moins métamorphisées d'où l'usage du préfixe « Méta » utilisé dans la nomenclature de certains faciès.

4.1.1 LES ROCHES VOLCANIQUES ET VOLCANO-SÉDIMENTAIRES

Les formations volcaniques sont essentiellement constituées de basaltes, d'andésites, de pyroclastites, de cinérites et de volcanoclastites (conglomérats polygéniques). On les rencontre sous forme de formations d'aspect massif, souvent altérées plus ou moins métamorphisées.

- **Les basaltes**

Les basaltes sont mélanocrates, massives, denses et plus ou moins déformés à minéraux difficilement identifiables à l'œil nu. Au microscope, elles présentent soit une texture microlitique (MK09 et MK15a), soit à microlitique porphyrique (MK15b) avec une composition minéralogique de Pyroxène avec beaucoup de sections ouralitisés en amphibole, de phénocristaux de Plagioclase disposés parfois en amas, plus ou moins altéré en carbonates ou en séricites, d'orthose également en phénocristaux ou en amas, le tout dans une matrice volcanique composée de cristaux de quartz, d'olivine, de biotite en baguette allongées et alignées, de baguette de plagioclase et d'orthose. On observe également la présence d'épidote et de chlorite provenant des ferromagnésiens, d'abondants minéraux opaques et des microfilonnets de quartz au sein de la matrice. (Figure 2).

- **Les pyroclastites**

La roche est massive verdâtre à sombre à gros cristaux de pyroxène et d'amphibole visibles dans une matrice volcanique et parcourue par endroit par des veines de quartz ou d'orthose. Au microscope, elle présente une matrice volcanique avec des phénocristaux de pyroxène dont certains sont transformés en amphibole, de plagioclase quelque fois en phénocristaux et altéré parfois en séricite ou en épidote, d'orthose et de quartz. On note également la présence de veinules de quartz et de microfractures au sein de la matrice. (Figure 2)

- **Les conglomérats polygéniques**

Ce sont des roches volcanoclastiques massives, mélanocrates (vertes à grises ou brunâtres) à granulométrie fine. La composition minéralogique est celle d'une roche basique à intermédiaire assez pauvre en quartz avec des minéraux ferromagnésiens tels les amphiboles (hornblende). Constituées d'une matrice volcanique, de nature andésitique ou basaltique, ces conglomérats contiennent des fragments (clastes) arrondis à sub-anguleux non jointifs d'andésite, de basalte ou de quartz et d'autres roches basiques massives. (Figure 2)

4.1.2 LES MÉTASÉDIMENTS

Ce sont des roches sédimentaires formées par la consolidation de sédiments essentiellement des grains de quartz, par un ciment. Dans notre zone d'étude, on distingue les grauweekes et les quartzites.

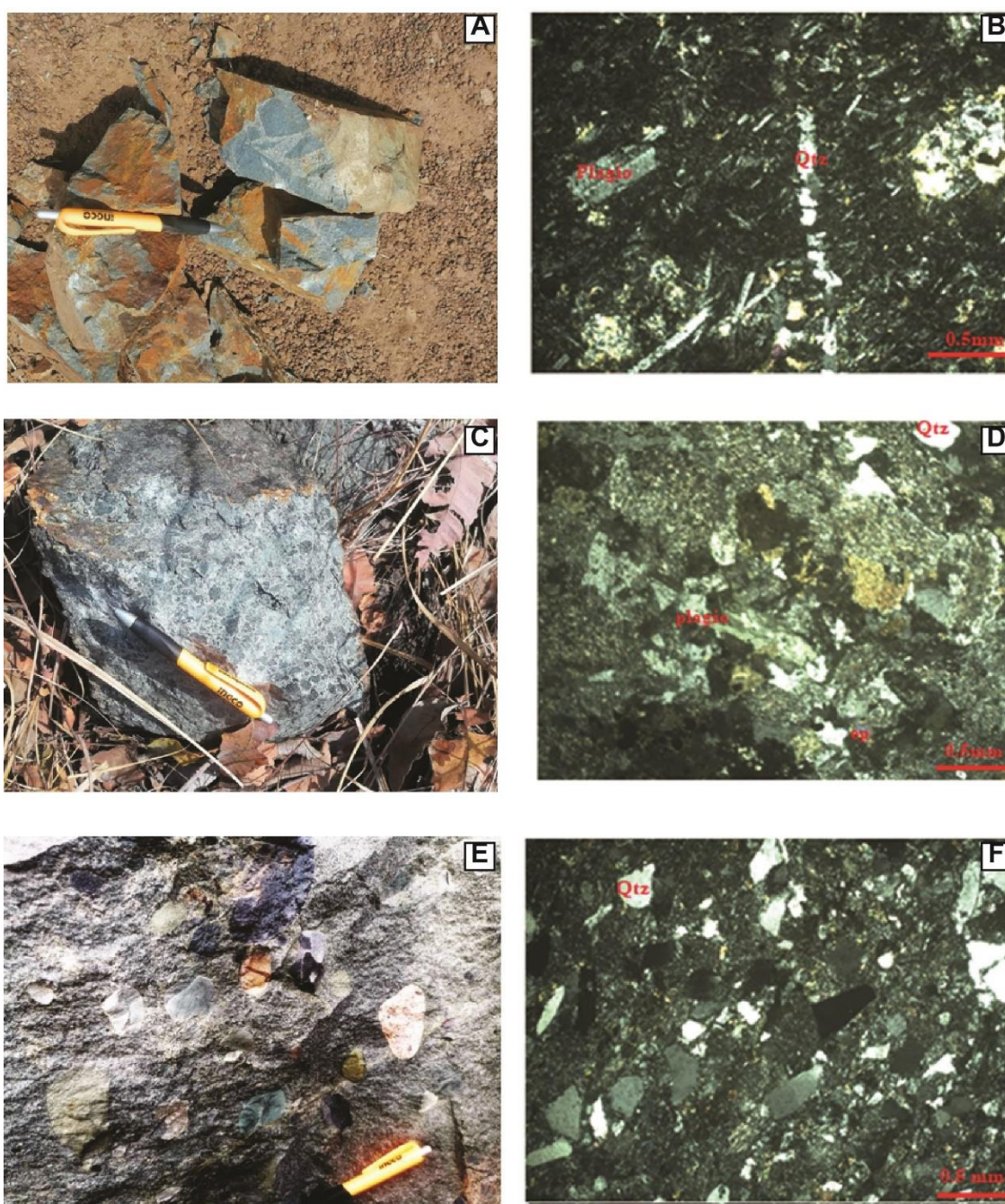


Fig. 2. Aspect macroscopique et microscopique de roches volcanique. A et B: basalte; C et D: pyroclastite à cristaux d'amphibole; E et F: conglomérat polygénique

- **Grauwackes**

Ce sont des roches consolidées de couleur grisâtre composées de grains de quartz limpides, arrondis pris dans un ciment. En raison du métamorphisme de faible degré qu'a subi la région, le terme de « méta » a été ajouté à leur dénomination. Ainsi, selon la nature des grains, on distingue les métasédiments grésio-pélitiques et les métasédiments phylliteux. (Figure 3).

- **Quartzites**

Ce sont des roches massives, compactes, très dures principalement formées de quartz d'origine sédimentaire et ayant subies un métamorphisme. Au microscope la roche présente des filonnets de quartz au sein de nombreuses fractures qui la parcourent et deux états de recristallisation, le premier à gros grains de quartz et l'autre à petits grains. (Figure 3)

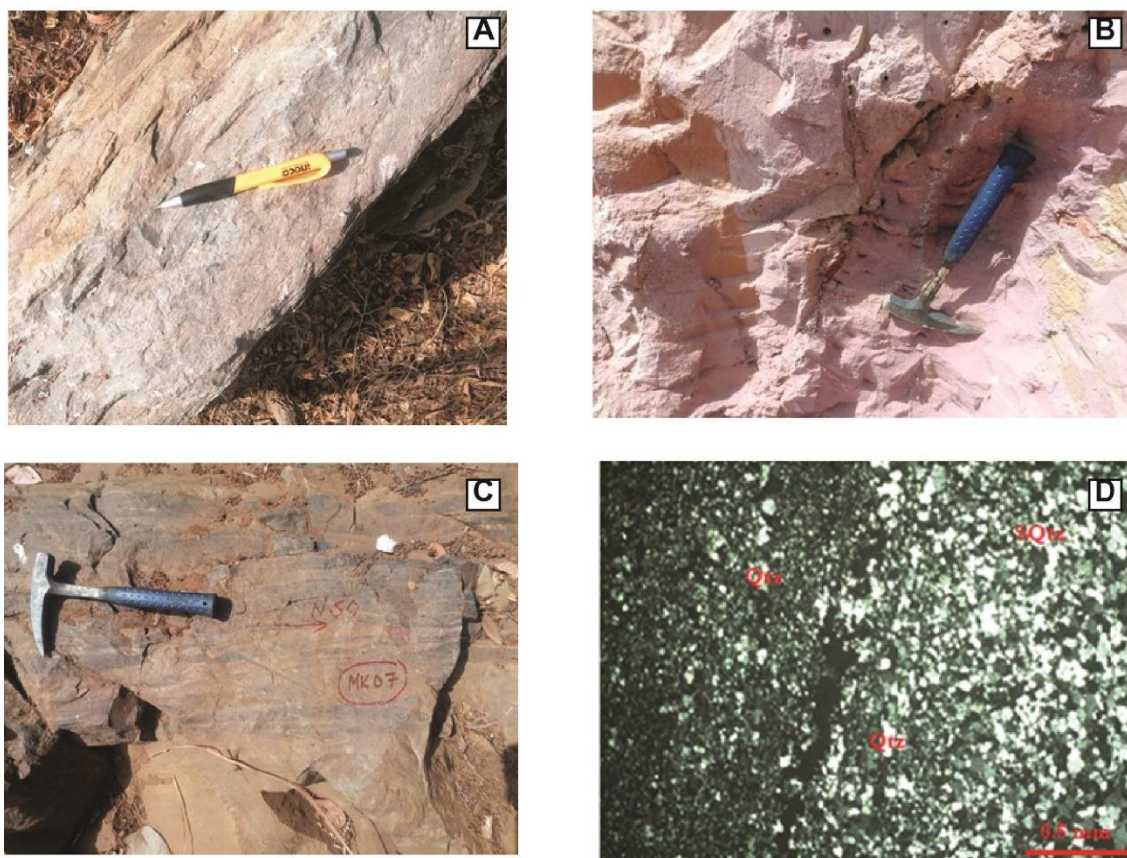


Fig. 3. Aspects macroscopiques et microscopiques de métasédiments. A et B: Aspect macroscopique de grauwaacke; C: Aspect macroscopique de quartzite; D: Aspect microscopique de quartzite

4.1.3 LES PLUTONITES

Cette unité géologique est constituée de granodiorite, de granite, en forme de batholite et localement de gabbro et de diorite. On les trouve quelques fois en intrusion dans les ensembles volcaniques et volcanosédimentaires.

- Les granites

Ce sont des roches grenues, leucocrates et denses à composition minéralogique de quartz abondant, de feldspath, surtout plagioclase, et de biotite. Dans la zone d'étude, on les rencontre sous forme massive ou quelques fois sous forme d'arène granitique. Quelques affleurements contiennent en plus de la biotite, des plages de muscovite d'où le terme de granite à deux micas qui leur est attribué. Au microscope ces roches présentent une texture grenue avec une composition minéralogique de plagioclase souvent zoné et en voie de damouritisation. Quelques sections limpides contiennent des inclusions d'apatite. On note également la présence de quartz en grande quantité présentant quelques fois des craquelures, de la biotite peu abondant avec des extinctions droites et de la muscovite au sein de certains affleurements. (Figure 4).

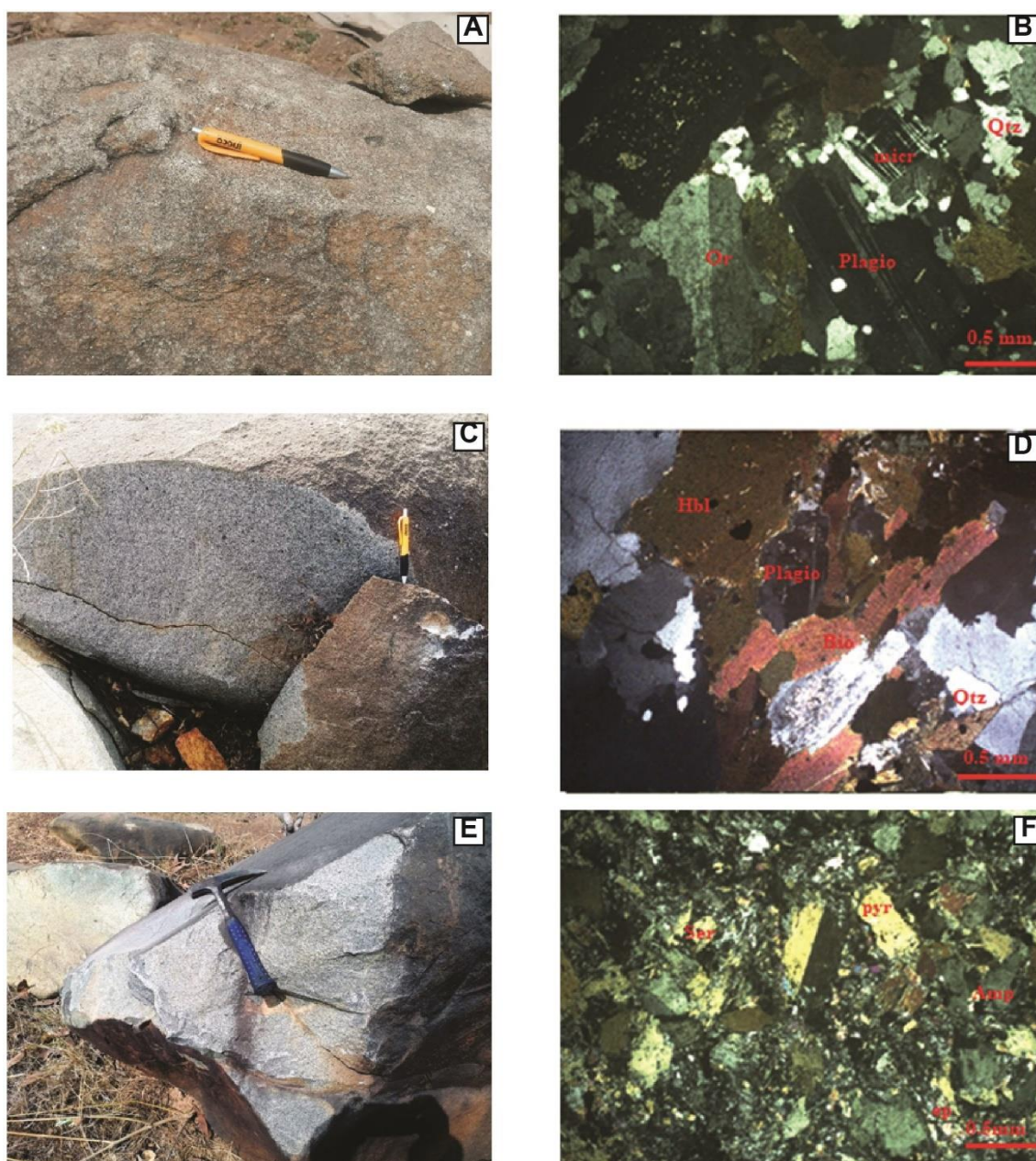


Fig. 4. Aspect macroscopique et microscopique des plutonites de la zone d'étude. A et B: Granite; C et D: Granodiorite; E et F: Gabbro

• Les granodiorites

On les rencontre à différents endroits dans notre zone d'étude. Ce sont des formations grenues, mésocrates de composition minéralogique voisine de celle d'un granite avec des proportions variables de quartz. Les roches saines, de grains fins à grossiers, sont composées de quartz, de phénocristaux de plagioclase (dominants) et de minéraux ferromagnésiens essentiellement de biotite et d'amphibole (hornblende verte). L'observation microscopique présente une roche à texture grenue à grenue porphyroïde avec des phénocristaux de plagioclases quelques fois zonées ou altérés en séricite ou épidote ou encore en voie de damouritisation, des cristaux d'orthose avec des mâcles de carlsbad, des biotites et une quantité moins abondante de quartz. Quelques sections présentent du microcline et des cristaux d'amphibole (hornblende), (Figure 4).

• Les gabbros

La roche est saine, massive, grenue et mélanocrate. Sa composition minéralogique est proche de celle des granodiorites avec une proportion plus élevée en plagioclase (parfois subautomorphes) et en ferromagnésiens. Au microscope, la roche a soit une texture grenue normale (MK10a, MK14), soit une texture grenue porphyroïde (MK07b), soit une texture microgrenue porphyrique (MK16). La composition minéralogique est constituée de plagioclase en très grande quantité, souvent en phénocristaux (MK13b), avec certaines plages altérées en séricite ou en épidote, de pyroxène en grande quantité, quelques fois en phénocristaux (MK16) et altéré, On note également la présence de microfilon de quartz dans certaines lames (MK07b) et quelques minéraux opaques (MK14). (Figure 4)

- **Les diorites**

C'est une roche à texture grenue, de couleur mélanocrate, composée essentiellement de plagioclases subautomorphes et d'amphiboles (hornblende verte) avec un peu de biotite. Le quartz y est rare. On les rencontre en massifs isolés dans la zone d'étude. L'observation microscopique a révélé une texture grenue porphyroïde (MK13b) avec une composition minéralogique de plagioclase en très grande quantité et en phénocristaux, souvent altérées en séricite ou en épidote, d'amphibole en grande quantité, de feldspaths alcalins (microcline et orthose), de biotite avec très peu de cristaux de quartz arrondis pour la plupart. (Figure 4)

4.2 DISTINCTIONS LITHOLOGIQUES (CARACTÉRISTIQUES DES ZONES OBSERVÉES)

Sept zones numérotées de A à G, de natures lithologiques différentes peuvent être observées (Figure 5):

Zone A: Elle se situe dans la partie Nord-Ouest de la zone d'étude et correspond au leucogranite de ferké. Elle est caractérisée sur l'image de composition colorée 752 par une teinte rouge-verdâtre et des linéaments discontinus. L'on y rencontre également des structures circulaires parfois emboîtées les unes dans les autres.

Zone B: Elle est orientée OSO-NNE et correspond au bassin sédimentaire métamorphisé de la vallée du Bandama. Elle part de Adossé-Oka dans sa partie sud et s'étend jusqu'à Ourégouékaha au Nord et Sérigbokaha au Nord-Est. Elle est caractérisée sur l'image de composition colorée 752 par une mosaïque de teintes rouge-verte-blanchâtre, des linéaments discontinus et des structures circulaires. L'on rencontre également deux intrusions magmatiques correspondant à des granites à biotites (zone C).

Zone C: Elle est située au sein du bassin sédimentaire (zone B) où elle apparaît en intrusion. Cette zone correspond aux granites à biotites de Sambasso et de Boribana. Sur l'image de composition colorée 752, cette zone apparaît avec une teinte généralement blanchâtre avec de fines parties rouges ou verdâtres. Elle est caractérisée par des linéaments et des structures circulaires.

Zone D: Elle est orientée NE-SO et correspond au sillon volcano-sédimentaire de Katiola, qui part de Marabadiassa au sud jusqu'à Pétiennara au Nord. Elle est caractérisée sur l'image de composition colorée 752 par une mosaïque de teintes rouge-verte-blanche à dominance rougeâtre dans sa partie Sud et verdâtre dans sa partie Nord. On y rencontre des linéaments discontinus qui épousent pour la plupart l'orientation du sillon et qui sont beaucoup plus concentrés dans la partie Nord et également quelques structures circulaires correspondant probablement à des intrusions granitoïdiques.

Zone E: Elle est située au Centre-Est de notre zone d'étude et correspond au massif granodioritique de Fronan. Sur l'image de composition colorée 752, elle a une teinte à dominance verdâtre et elle est caractérisée par des traits discontinus et quelques structures circulaires traduisant des plutons granitiques. Sur le terrain, on y rencontre des metabasites non déformés, des gabbros, des arènes granitiques et des granodiorites à amphibole (route de Tiengala).

Zone F: Située au Sud de notre zone d'étude et à l'Est de Marabadiassa, cette zone correspond aux gneiss granitiques. Elle est caractérisée par des traits discontinus qui sont concentrés dans sa partie Nord et de quelques structures circulaires dans ses parties Sud et Sud-Est.

Zone G: Elle est située à l'Est de notre zone d'étude et correspond aux granites indifférenciés de Katiola. Elle est parcourue par des linéaments discontinus et par des structures circulaires, traduisant plusieurs plutons granitiques. Sur le terrain on y rencontre des granodiorites à texture grenue moyenne avec peu d'enclaves sombres au Nord Kowara et à l'Ouest de Kabolo où on a rencontré également des roches pyroclastites à gros cristaux d'amphibole et de pyroxène, des granodiorites peu déformées à enclaves sombres basiques ou encore non déformée ou quelque peu altérée. A Kowara, nous avons aussi observé des granites à deux micas avec de petites enclaves sombres. Au barrage de Nikolo, nous avons rencontré deux faciès; le premier faciès (F1), est une granodiorite à enclaves sombres (MK27a) et le second est un leucogranite en injection dans F1 et contenant des enclaves de de F1.

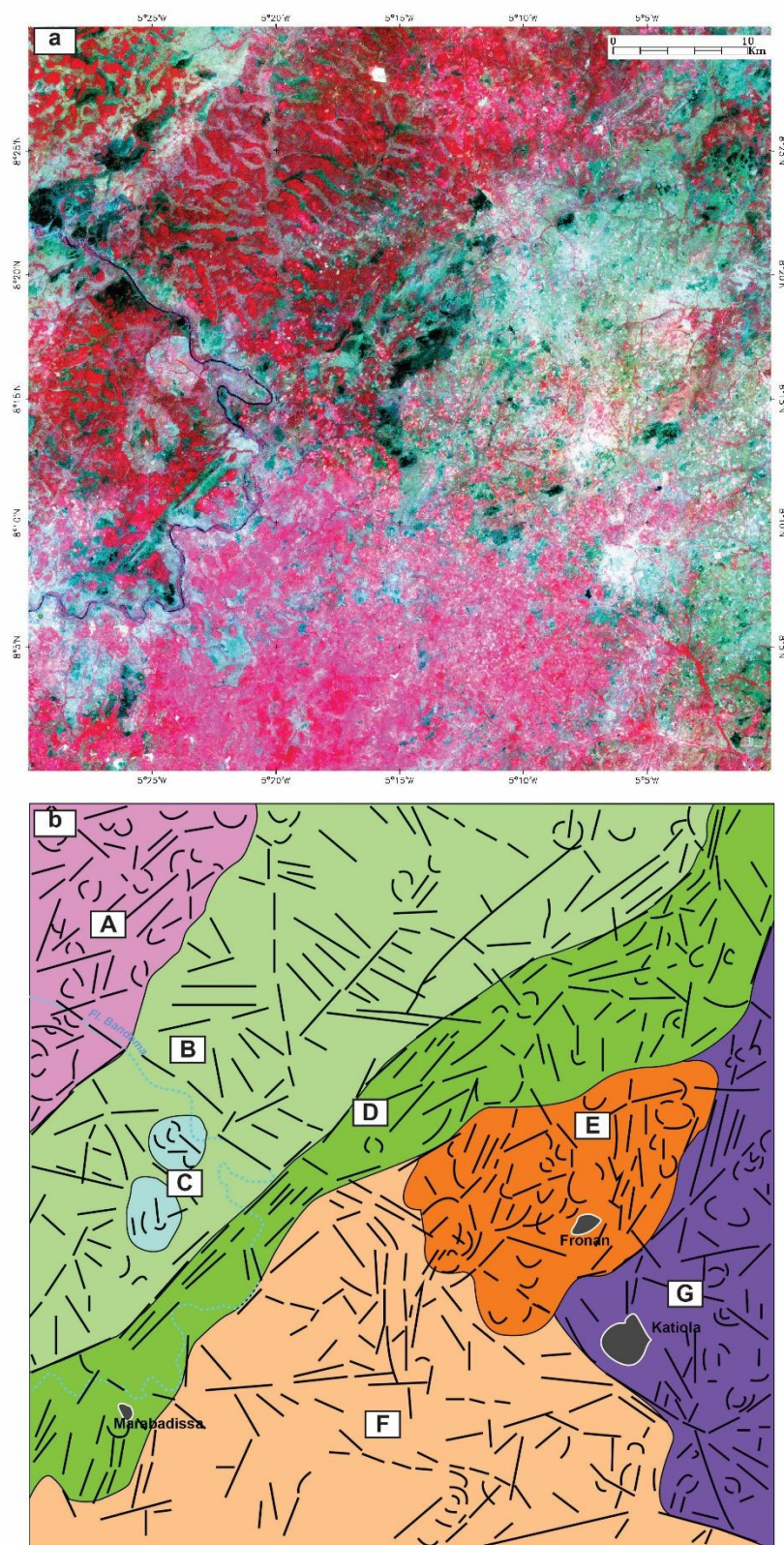


Fig. 5. Image Landsat ETM+ (432) et carte géologique télédanalytique finale montrant les grands ensembles lithologiques et les structures

4.3 ANALYSE STRUCTURALE

L'analyse structurale concerne les structures observées sur les images satellitales après leur traitement et également les mesures structurales recueillies sur le terrain.

4.3.1 ANALYSE LINÉAMENTAIRE (LES STRUCTURES OBSERVÉES SUR LES IMAGES SATELLITALES)

L'observation des images satellitales nous a permis de distinguer deux types de structures de formes et d'orientations diverses. Ce sont les linéaments et les structures circulaires (Figure 5). Les linéaments observés dans la zone d'étude ont des orientations diverses: NE-SO, NO-SE, N-S et E-O. Sur le terrain, ces linéaments correspondent, soit à des couloirs de cisaillement, soit à des failles ou fractures isolées.

- **Les linéaments orientés NE-SO**

Ils sont les plus nombreux et sont plus concentrés au centre de notre zone d'étude dans les volcanites et les volcanosédimentaires où ils épousent la direction du sillon Birimien. Ils sont disposés en ligne droite l'un après l'autre au sein du sillon volcano-sédimentaire formant un couloir de linéaments discontinus ou apparaissent parfois isolés ou doublés dans les autres formations.

- **Les linéaments orientés NO-SE**

Ils traversent la zone d'étude en partant du SE vers le NO, en linéaments discontinus, du massif granodioritique de Fronan au leucogranite de Ferkessédougou. On y rencontre également des linéaments isolés NO-SE au sein des granites indifférenciés de Katiola.

- **Les linéaments orientés N-S**

Ils sont peu nombreux. On les rencontre au sein des gneiss granodioritiques de Marabadiassa où ils sont plus concentrés et également au sein des granites indifférenciés de Fronan.

- **Les linéaments orientés E-O**

Également peu nombreux, ces linéaments sont concentrés essentiellement au sud de notre zone d'étude au sein des gneiss granitiques de Marabadiassa. Sur le terrain certains correspondent à des cours d'eau asséchés pendant la saison sèche. Les structures circulaires se répartissent sur toute la zone d'étude. En forme d'arcs de cercle ou de cercles concentriques, ces structures circulaires correspondent à des plutons dont certains apparaissent en intrusion au sein des volcanites (zone C: granite à deux micas de Sambasso et Boribana).

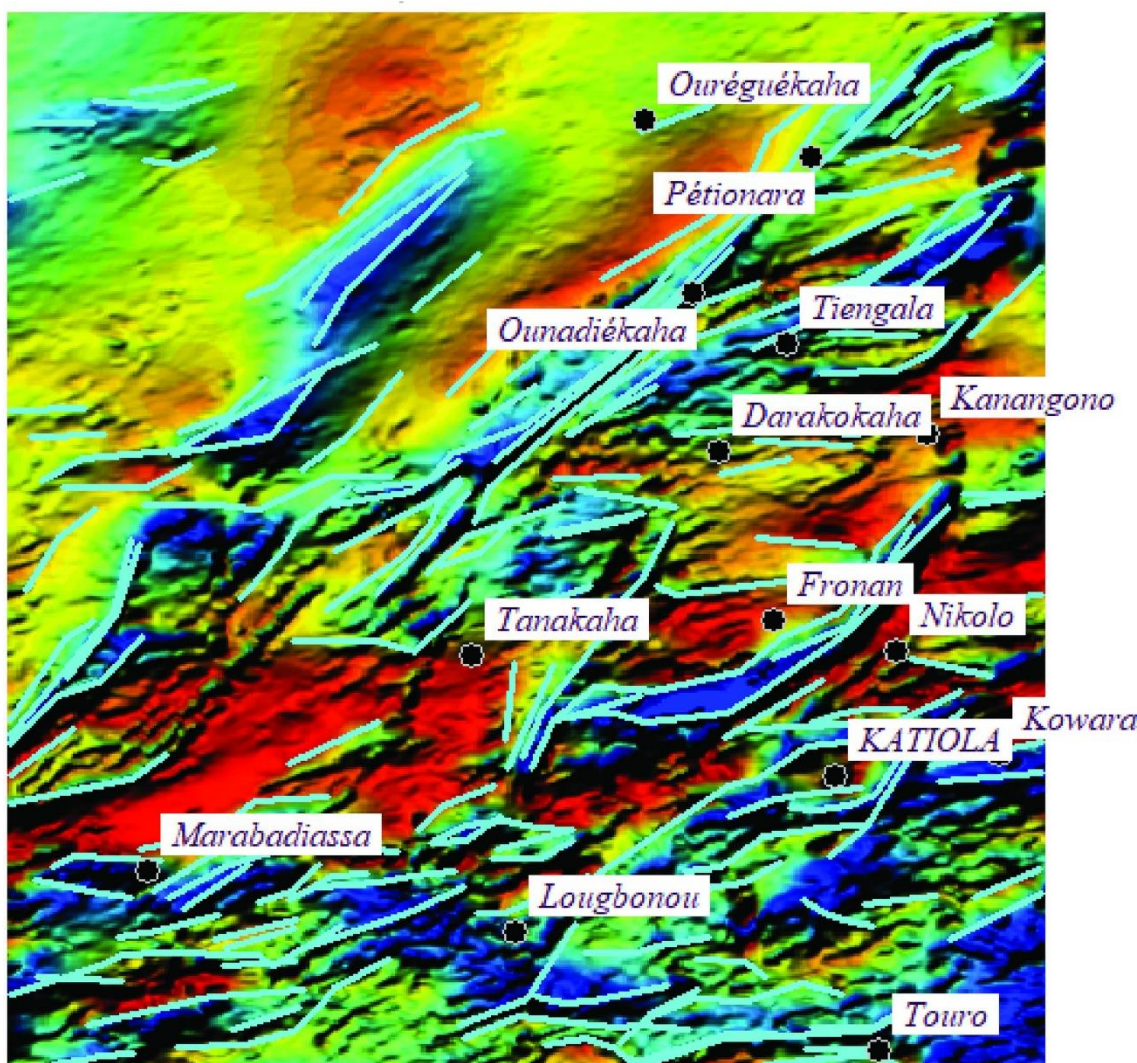


Fig. 6. Carte aéromagnétique (TMI) et les linéaments magnétiques (bleu clair)

4.3.2 DONNÉES STRUCTURALES DE TERRAIN

Les mesures structurales recueillies sur le terrain concernent la schistosité, les fractures, les veines et filons de quartz ainsi que les zones de cisaillement. Elles se répartissent en deux groupes: les déformations ductiles et les déformations cassantes.

- **Les Déformations Ductiles**

Elles concernent la schistosité et les zones de cisaillement (Figure 6). Les mesures des schistosités montrent différentes directions allant de $N60^\circ$ à $N80^\circ$. Elles ont été observées sur les métasédiments phylliteux (MK02) et grésopélitiques (MK03 et MK04) de la zone de Marabadiassa, sur les quartzites en bordure de la route Marabadiassa-Katiola (MK07) et sur les métasédiments pélitiques de Ouréguékaha (MK20). Un cisaillement senestre $N10^\circ$ a également été observé à l'Ouest de Kabolo au sein de granodiorites peu déformée à enclaves sombres basiques.

- **Les Déformations Cassantes**

Elles concernent les fractures, les failles, les filons et veines rencontrées dans la zone d'étude (Fig.7). Les orientations des fractures observées peuvent être réparties en deux classes: la première regroupe celles orientées $N25^\circ$ à $N90^\circ$ en passant par $N40^\circ$, $N60^\circ$ et $N70^\circ$. Elles ont été observées sur les métasédiments grésopélitiques, en bordure de route, non loin de Flanikaha (axe Marabadiassa-Katiola) et sur les microgabbros et les basaltes altérés au Nord-Ouest de Darakokaha.

La seconde classe constitue celles orientées $N125^\circ$ à $N170^\circ$ en passant par $N130^\circ$, $N140^\circ$ et $N150^\circ$, observées également sur les mêmes échantillons que celles de la première classe, à l'exception des fractures orientées $N130^\circ$ et $N170^\circ$ observées avant Marabadiassa sur une colline de gabbro. Des failles ont également été observées dans notre zone d'étude, notamment sur l'axe Marabadiassa-Flanikaha, sur les métasédiments grésopélitiques où elles sont orientées $N20^\circ$ avec un pendage de $75^\circ NW$ et non loin de Darakokaha sur

des conglomérats polygéniques où on note une orientation de $N60^{\circ}-55^{\circ}NO$. En plus des failles, des filons et veines ont également été rencontrés avec des orientations allant de $N60^{\circ}$ à $N150^{\circ}$ pour les filons et de $N70^{\circ}$ à $N140^{\circ}$ pour les veines.

A Ourégukaha, sur les métasédiments pélitiques, on rencontre des filonnets de quartz parallèles à la schistosité S_1 et recoupés par des filons de quartz $N90^{\circ}-70^{\circ}N$ à fantômes de sulfures. A Timorokaha, également sur des métasédiments pélitiques, des filonnets de quartz ont été aussi observés; ceux-ci se présentent sous-forme de fentes de tension sigmoïdales indiquant une faille normale. Des filons de quartz parallèles à S_1 ont aussi été observés.

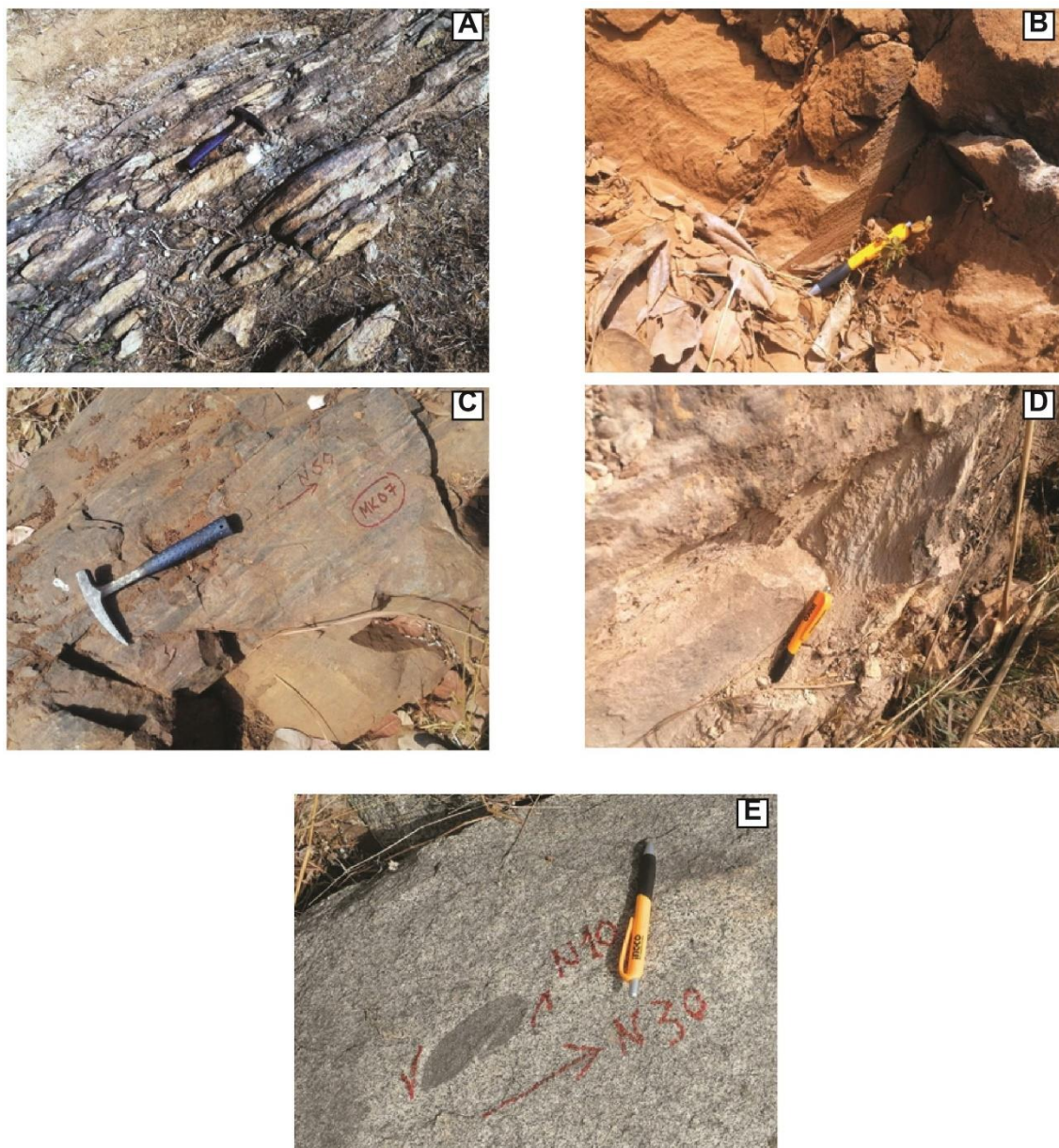


Fig. 7. Différentes déformations ductiles observées dans la zone d'étude. A, B, C et D: Différents types de schistosité; E: Cisaillement dextre $N10^{\circ}$

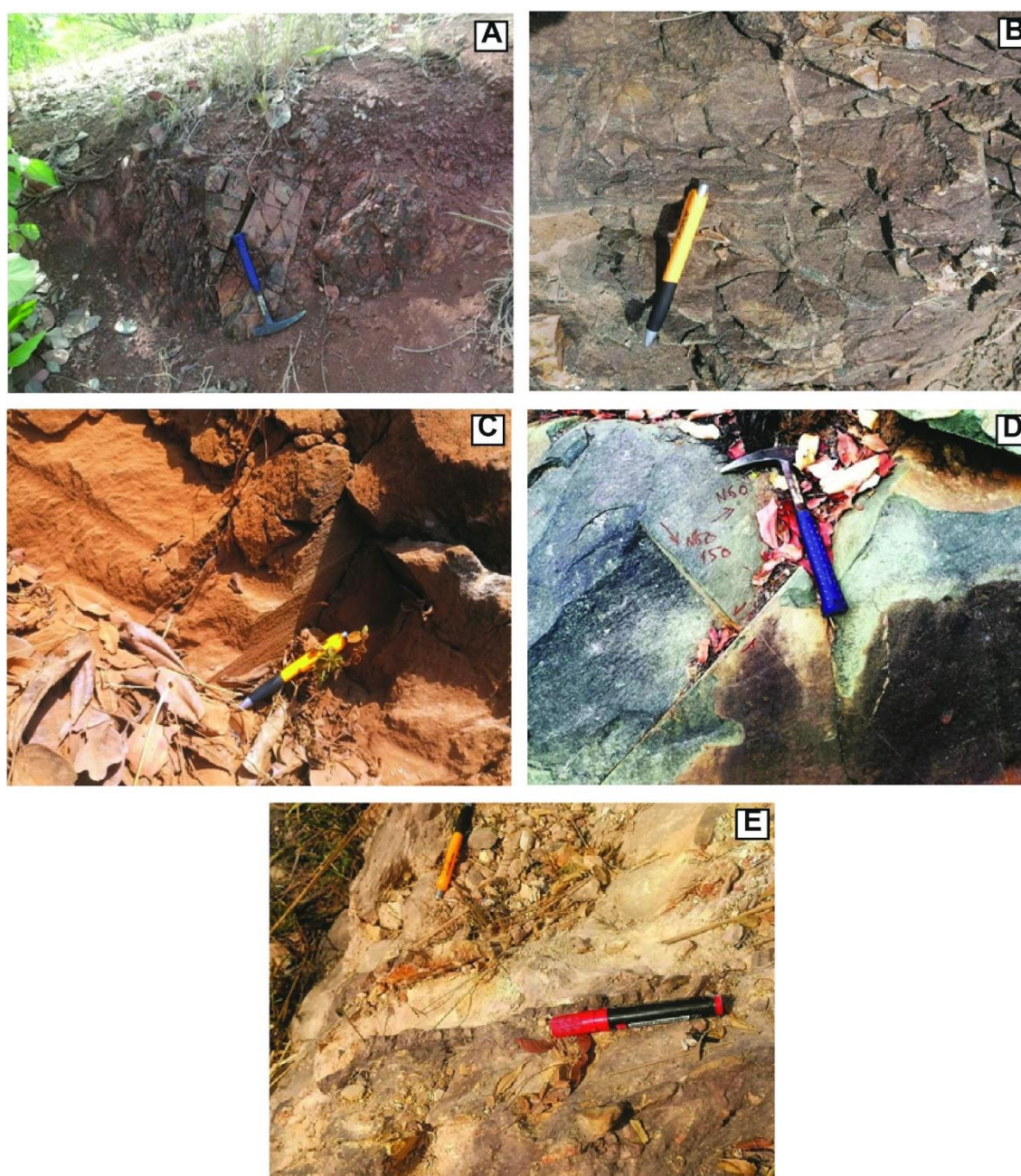


Fig. 8. *Différentes déformations cassantes observées dans la zone d'étude. A et B: Fractures; C et D: Failles; E: Filon de quartz*

5 DISCUSSION

Le sillon volcano-sédimentaire de Marabadiassa-Katiola fait partie des sillons birimiens Ouest-africains, dont la compréhension de la genèse demeure encore un sujet de discussion. Ce qui témoigne des nombreux travaux de recherche effectués sur ces sillons sur les plans pétrographique et structural. Cette partie qui est la synthèse de principaux résultats de nos travaux de recherche dans la région de Katiola, permettra de faire une comparaison avec d'autres travaux effectués dans le birimien Ouest-Africain.

Au plan lithologique, l'étude du sillon Birimien de Katiola a relevé quatre grandes unités géologiques dans la région à savoir: les roches métavolcanites basiques de composition basaltique à andésitique, les roches volcanosédimentaires associés à des unités sédimentaires en intercalation et les roches plutoniques qu'on rencontre parfois en intrusion au sein du complexe volcano-sédimentaire. Ces résultats corroborent ceux de la plus part des travaux effectués sur les sillons du domaine Kénéma-Man [21], [22], [23], [24], [25] comme l'indiquent les travaux de [26] dans la partie sud du sillon de Toumodi-Fettékro, de [27], dans le gisement de Bonikro, de [13] dans le gisement d'Agbahou et de [28] dans les prospectes de la région de Dabakala. Les roches du sillon volcanosédimentaires de Katiola ont été métamorphisées sous des conditions du faciès des schistes verts et localement du faciès des amphibolites. Ces conditions

métamorphiques sont similaires avec celles observées par les auteurs précités et également avec d'autres auteurs sur des sillons birimiens Ouest-Africains [29], [30], [31], [32].

Les formations de la zone d'étude ont subi une tectonique marquée par une direction générale des formations birimiennes NE-SO. Cette direction a été confirmée par la carte lithostructurale qui en plus, révèle des directions secondaires de NO-SE, N-S et E-O. Ces observations ont été faites par [26], [28], [33], [34] dans le sillon de Toumodi-Fettékro, un peu plus au Sud de la zone d'étude. Sur le terrain, ces directions de fracturation ont mis en évidence une diversité de marqueurs structuraux aussi bien ductiles que cassants. Ces marqueurs de déformations sont la schistosité, les fractures, les failles, les filons et veines, des fentes de tension sigmoïdales et les zones de cisaillement orientées NE-SO.

Les failles observées dans la zone d'étude montrent des orientations allant du NE au NO. Ce qui concorde avec les observations faites par [13] sur le gisement d'Agbahou, par [27] sur le gisement de Bonikro, par [26] dans le sud du sillon de Toumodi-Fettékro et ailleurs dans le Birimien ouest-africain. Les tendances NO symboliseraient en effet, des failles décrochantes et leur mise en place est due selon [9], [35], [6] à des tectoniques transcurrentes. Dans la ceinture d'Ashanti [35] ont conclu que les failles agissaient comme des canaux contrôlant la distribution des minéralisations aurifères puis ont acheminé et piégé les fluides hydrothermaux. Les couloirs de cisaillements de la partie sud du sillon volcano-sédimentaire de Katiola-Marabadiassa indiquent des directions qui varient du NE - SO au NNE - SSO. En effet, ces mêmes directions ont été observé dans le sillon de l'Ashanti, au Ghana [36], [37], dans le gisement d'Agbahou [13] et dans le gisement de Bonikro [26].

Nous proposons une nouvelle carte lithostructurale qui est un guide à l'exploration minière aurifère dans cette partie du craton ouest-africain (Fig. 9).

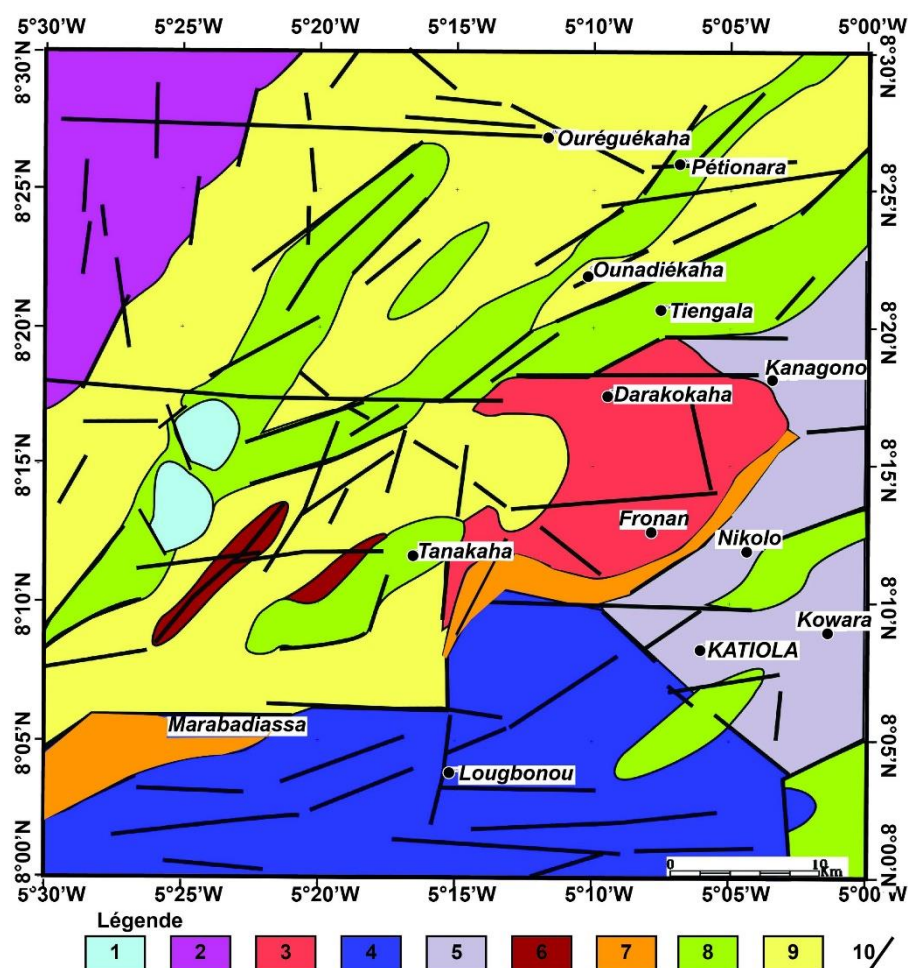


Fig. 9. Carte géologique actualisée de la zone d'étude. 1: granites alcalins; 2: leucogranite de Ferké; 3: granodiorite de Fronan; 4: gneiss granitiques; 5: granites indifférenciés; 6: métaconglomérats; 7: Métabasaltés; 8: volcanoclastites et gabbros; 9: métasédiments; 10: failles

6 CONCLUSION

Le sillon volcano-sédimentaire de Marabadiassa-Katiola est composée de formations volcaniques et volcanosédimentaires associées à des unités sédimentaires en intercalation; d'où le terme de formations volcanosédimentaires birimiennes. Ces formations sont intrudées par endroits par des plutonites. L'ensemble de ces formations, plus ou moins altérée, est affecté par un métamorphisme de faible degré du faciès des schistes verts et localement du faciès des amphibolites.

Au plan tectonique, Les structures sont pour la plupart orientées NE-SW. Ce qui épouse la direction générale du sillon volcano-sédimentaire. Sur le terrain, on rencontre la schistosité, les fractures, les veines et filons de quartz ainsi que les zones de cisaillement qui sont de véritables marqueurs de minéralisation.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Centre d'Excellence Africain Mines et Environnement Minier (CEA-MEM) et l'ensemble du personnel de l'Institut National Polytechnique Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Yamoussoukro pour leurs franches collaborations.

REFERENCES

- [1] W. Abouchami, M. Boher, A. Michard, and F. Albarede. «A major 2, 1 Ga event of mafic magmatism in West Africa: an early stage of crustal accretion». *J. Geophys. Res.*, 95: 17605-17629, 1990. <https://doi.org/10.1029/JB095iB11p17605>.
- [2] J. J. Peucat, R. Capdevila, A. Drareni, Y. Mahdjoub, and M. Kahoui. «The Eglab massif in the West African Craton (Algeria), an original segment of the Eburnean orogenic belt: petrology, geochemistry and geochronology». *Precamb. Res.*, 136, pp. 309-352, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.12.002>.
- [3] S. Pawlig, M. Gueye, R. Klischies, S. Schwarz, K. Wemmer, and S. Siegesmund. «Geochemical and Sr–Nd isotopic data on the Birimian of the Kedougou-Kenieba Inlier (Eastern Senegal): implications on the Palaeoproterozoic evolution of the West African Craton». *S. Afr. J. Geol.*, 109, pp. 411-427, 2006. <https://doi.org/10.2113/gssajg.109.3.411>.
- [4] M. Boher. «Croissance crustale en Afrique de l'Ouest à 2,1 Ga. Apport de la Géochimie isotopique». *Thèse de Doctorat, Univ. Nancy I*, 180 p, 1991.
- [5] W. Hirdes, D. W. Davis, G. Lüdtke, and G. Konan. «Two generations of Birimian (Paleoproterozoic) volcanic belts in northeastern Côte d'Ivoire (West Africa): consequences for the 'Birimian controversy'». *Precamb. Res.*, 80, pp. 173-191, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(96\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(96)00011-3).
- [6] M. Lompo. «Paleoproterozoic structural evolution of the Man-Leo Shield (West Africa). Key structures for vertical to transcurrent tectonics». *J. Afr. Ear. Sci.*, 58 (1), pp. 19-36, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.01.005>.
- [7] J. P. Milési, J. L. Feybesse, P. Ledru, A. Dommange, M. F. Ouédraogo, E. Marcoux, A. E. Prost, C. Vinchon, J. P. Sylvain, V. Johan, M. Tegye, J. Y. Calvez, and P. Lagny. «Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. Leurs relations avec l'évolution lithostructurale au Protérozoïque inférieur». *Chron. Rech. Min., France*, 497, pp. 3-98, 1989.
- [8] R. Fabre. «Les effets tectoniques des décrochements N-S sénestres dans les formations volcaniques de la région du Yaouré, centre de la Côte d'Ivoire». *C. R. Acad. Sci. Paris*, 300, pp. 955-960, 1985.
- [9] J. P. Milesi, P. Ledru, J. L. Feybesse, A. Dommange, and E. Marcoux. «Early Proterozoic ore deposits and tectonics of the Birimian orogenic belt, West Africa». *Precamb. Res.*, 58, 1-4, pp. 305-344, 1992. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90123-6](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90123-6).
- [10] J. L. Feybesse. «Géométrie et cinématique des fractures contrôlant la mise en place des veines et veinules de quartz de la mine d'or d'Angovia (Yaouré, Côte d'Ivoire) ». Compagnie Minière d'Afrique, Rapport interne, non publié, 2001.
- [11] K. Affian, F. B. Anoh, E. V. Djagoua, M. Robin, M. C. Azagoh, P. N'Guessan, K. F. Kouamé, M. B. Saley, and J. Biémi. «Contribution de la télédétection à la recherche de gisement d'or dans la région d'Angovia en Côte d'Ivoire». *Télédétection*, 4 (3), pp. 277-288, 2004.
- [12] K. Gbamélé. «Facteurs gouvernant le choix d'un permis de recherche minière pour l'or. Cas de la Côte d'Ivoire». *Mém. Ing. des Tech., Ecole de Formation Cont. et de Perfect. des Cadres, INPHB, Yamoussoukro*, 77 p, 2012.
- [13] N. Houssou. «Etude pétrologique, structurale et métallogénique du gisement aurifère d'Agbahou, Divo, Côte d'Ivoire». *Thèse de doctorat, Univ. Félix Houphouët-Boigny*, 177 p, 2013.
- [14] S. M. Daï-Bi, G. Ouattara, G. Allou, G. B. Koffi, and I. Coulibaly. «Metallotectic Context of the Mineralization of the Tondabo Gold Prospect (Brobo, Center of Côte d'Ivoire, West Africa) ». *International Journal of Geosciences*, vol. 11, pp. 325-344, 2020. <https://doi.org/10.4236/ijg.2020.115017>.
- [15] S. M. Daï-Bi. «Etude lithostructurale et métallogénique de La région de Brobo (Centre De La Côte D'Ivoire): Aide à la compréhension des minéralisations aurifères dans le Birimien». *Thèse de Doctorat, Edp-Inphb, Yamoussoukro*, 190 p, 2020.
- [16] A. Pouclet, S. Doumbia, and M. Vidal. «Geodynamic setting of the Birimian volcanism in Central Ivory Coast (Western Africa) and its place in the evolution of the Palaeoproterozoic of the Man Shield». *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 177 (2), pp. 195-121, 2006. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.177.2.105>.

- [17] S. Doumbia. «Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birimiennes de la région de Katiola-Marabadiassa (centre nord de la Côte d'Ivoire). Evolution magmatique et contexte géodynamique du Paléoproterozoïque». *Thèse de Doctorat, Univ. Orléans, Mémoire BRGM 276*, 253 p, 1997.
- [18] S. Doumbia, A. Pouclet, M. Vidal, A. N. Kouamelan, J. J. Peucat, and C. Delor. «Petrogenesis of juvenile-type birimian (paleoproterozoic) granitoids in central Côte-d'Ivoire, West Africa: geochemistry and geochronology». *Precambr. Res.*, 87, pp. 33-63, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00201-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00201-5).
- [19] E. Bagarre. «Notes sur la géologie des péridotites à chromite et des formations encaissantes du sud de Marabadiassa-Bouaké (C.I.)». *SAREMCI*, 9 p, 1958.
- [20] C. Delor, M. Vidal, A. Pouclet, Y. Siméon, and B. D. Yao. «Chronostratigraphie et évolution du style géodynamique entre 2,2 et 2,0 Ga en Afrique de l'Ouest». *Séance spéciale Soc. Géol. Fr., «Géodynamique du paléoproterozoïque», Orléans*, 17 nov. 1995, p. 14, 1995.
- [21] M. Arnould. «Etude géologique des migmatites et des granites précambriens du nord-est de la Côte d'Ivoire et de la Haute-Volta méridionale». *Mém. BRGM, France*, 174 p, 1961.
- [22] B. Tagini. «Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale». *Thèse Univ. Lausanne. Bull. SODEMI, Abidjan*, 5: 302 p, 1971.
- [23] A. Pouclet, M. Vidal, C. Delor, Y. Siméon, and G. «Le volcanisme birimien du nord-est de la Côte d'Ivoire, mise en évidence de deux phases volcano-tectoniques distinctes dans l'évolution géodynamique du Paléoproterozoïque». *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 167 (4), pp. 529-541, 1996.
- [24] M. Vidal, C. Delor, A. Pouclet, Y. Simeon, and G. Alric. «Evolution géodynamique de l'Afrique de l'Ouest entre 2,2 et 2 Ga: le style archéen des ceintures vertes et des ensembles sédimentaires birimiens du nord-est de la Côte d'Ivoire». *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 167 (3), pp. 307-319, 1996.
- [25] L. Baratoux, V. Metelka, S. Naba, M. W. Jessel, M. Gregoire, and J. Ganne. «Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the Eburnean orogeny (~2.2-2.0 Ga), western Burkina Faso». *Precambr. Res.*, 191, pp. 18-45, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.01>.
- [26] I. Coulibaly. «Pétrologie des Volcanites et des Plutonites du Sud du Sillon Birimien de Toumodi-Fetékro (Côte D'Ivoire): Implications pétrogénétique et tectonique». *Thèse de doctorat, Université Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire*, 218 p, 2018.
- [27] Z. Ouattara. «Caractères lithostratigraphique, structural, géochimique et métallogénique du gisement d'or de Bonikro, sillon birimien de Fettekro, centre-sud de la Côte d'Ivoire». *Thèse de doctorat, Univ. FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY*, 256 p, 2015.
- [28] A. Gnanzou. «Etude des séries volcano-sédimentaires de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire): genèse et évolution magmatique. Contribution à la connaissance de la minéralisation aurifère de Bobosso dans la série de la Haute-Comoé». *Thèse de doctorat, Univ. Paris-Sud Orsay, France et Univ. Félix HOUPHOUËT-BOIGNY*, 303 p, 2014.
- [29] T. Hirst. «The geology of the Konongo gold belt and surrounding country». *Gold Coast Geol. Surv. Bull.*, 14, 1942.
- [30] W. Hirdes, D. W. Davis, and B. N. Eisenlohr. «Reassessment of Proterozoic granitoid ages in Ghana on the basis of U/Pb zircon and monazite dating». *Precambr. Res.*, 56, pp. 89-96, 1992. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90085-3](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90085-3).
- [31] M. Sylla and P. M. N'Gom. «Le gisement d'or de Sabodala (Sénégal Oriental): une minéralisation filonienne d'origine hydrothermale remobilisée par une tectonique cisailante». *J. Afr. Ear. Sci.*, (25), 2, pp. 183-192, 1997.
- [32] F. Bourges, P. Debat, F. Tollon, M. Munoz, and J. Ingles. «The geology of the Taparko gold deposit, Birimian greenstone belt, Burkina Faso, West Africa». *Mineral. Deposita*, 33, 591-605 (1998). <https://doi.org/10.1007/s001260050175>.
- [33] G. Vitali. «Contribution à l'étude géologique du Birimien. Stratigraphie et structure du complexe volcano-sédimentaire de Fettekro (Côte d'Ivoire) ». *Note BRGM*, 26 p, 1970.
- [34] I. Yacé. «Le volcanisme éburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de Fettekro en Côte d'Ivoire». *Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Abidjan*, 373 p, 1976.
- [35] J. L. Feybesse, M. Billa, C. Guerrot, E. Duguey, J. L. Lescuyer, J. P. Milési, and V. Bouchot. «The paleoproterozoic of Ghanaian province: Geodynamic model and ore controls, including regional stress modeling». *Precambr. Res.*, 149, pp. 149-196, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.003>.
- [36] T. Oberthür, T. Weiser, and J. A. Amanor. «Mineralogical siting and distribution of gold in quartz veins and sulphide ores of the Ashanti mine and other deposits in the Ashanti belt of Ghana: genetic implications». *Mineral. Deposita*, 32, pp. 2-15, 1997. <https://doi.org/10.1007/s001260050068>.
- [37] S. E. Wille and R. Klemd. «Fluid inclusion studies of the Abawso gold prospect, near the Ashanti Belt, Ghana». *Mineral. Deposita*, 39, pp. 31-45, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0380-1>.

Etat des lieux de la transformation de la viande d'aulacodes et perception des consommateurs au Sud-Bénin

[Current Status of Grasscutter Meat Processing and Consumer Perceptions in Southern Benin]

Linton Elie¹, Salifou F. A. Chakirath¹, Dassey Emmanuel Geoffroy¹, Kiki S. Pascal¹, Ahounou G. Serge¹, Farougou Souaïbou¹, Mensah Guy Apollinaire², and Youssao Issaka Abdou Karim¹

¹Département de Production et Santé Animales, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Benin

²Centre de Recherches Agricoles en Production Animale et Halieuthique, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, 01 BP 884, Cotonou, Benin

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

ABSTRACT: In Benin, bushmeat from the greater cane rat (*Thryonomys swinderianus*) is the most consumed, despite the availability of domesticated cane rats. The objective of this study was to assess the current state of meat processing for both types of cane rats in southern Benin through a retrospective survey involving 12 hunters, 13 processors, and 68 consumers. Firearms (83.33%) and traps (50%) were the main hunting tools used. Among hunted cane rats, large-sized animals were the most frequent (39.09%), followed by small-sized (30.91%) and medium-sized ones (30%). They were most often sold without any processing ($p < 0.05$). Regarding processors, the main selection criteria for either wild or farmed cane rats were tasting (76.92%) and customer demand (69.23%). The most common processing method was frying (69.23%). Processing cane rat meat was profitable for the majority of respondents (69.23%). The factors contributing to profitability included animal size (38.46%) and the selling price of the processed meat (23.08%). Bushmeat cane rat was the most preferred by consumers (70.59%) due to its good taste (56.25%), availability, and lower purchase price (16.67%). Reported health risks associated with its consumption included Ebola virus (61.11%), Lassa virus (58.33%), gout (60%), and haemorrhoids (30%). Therefore, cane rat meat processing remains traditional, and improving processing methods for both wild and farmed cane rats will better meet consumer expectations.

KEYWORDS: Cane rat, processing, bushmeat, meat, hunting, Southern Benin.

RESUME: Au Bénin, la viande d'aulacode gibier est la plus consommée malgré l'existence des aulacodes domestiques. L'objectif de l'étude était d'examiner la situation actuelle de la transformation de la viande des deux types d'aulacode dans le Sud-Bénin à travers une enquête rétrospective auprès de 12 chasseurs, 13 transformateurs et 68 consommateurs. Le fusil (83,33%) et les pièges (50%) étaient les principaux instruments de chasse utilisés. Parmi les aulacodes chassés, les grands formas étaient fréquents (39,09%), suivis des petits (30,91%) et moyens (30%) formas. Ils sont le plus souvent vendus sans aucune transformation ($p < 0,05$). Concernant les transformateurs, les critères de choix de l'aulacode gibier ou d'élevage sont le goût (76,92%) et l'exigence des clients (69,23%). La transformation la plus réalisée était la friture de la viande (69,23%). L'activité de transformation de l'aulacode est rentable pour la majorité des enquêtés (69,23%). Les facteurs de rentabilité énumérés sont le forma de l'animal (38,46 %) et le prix de vente de la viande transformée (23,08%). La viande d'aulacode gibier est la plus préférée des consommateurs (70,59%) de par son bon goût (56,25%), sa disponibilité et son prix d'achat moins cher (16,67%). Les risques liés à la consommation de la viande d'aulacode énumérés sont le virus Ebola (61,11%), le virus lassa (58,33%), la goutte (60%) et l'hémorroïde (30%). Par conséquent, la transformation de la viande d'aulacode reste traditionnelle et

l'amélioration des procédés de cette dernière pour les deux types d'aulacode permettra de mieux satisfaire les consommateurs.

MOTS-CLEFS: Aulacode, transformation, gibier, viande, chasse, Sud-Bénin.

1 INTRODUCTION

Au Bénin et dans la sous-région ouest-africaine, le gibier est très apprécié des consommateurs en raison de sa saveur et de la qualité nutritive de sa viande. Cette dernière, pauvre en gras et en calories, est riche en protéines de bonne qualité et en minéraux [1], [2]. De ce fait, le gibier contribue de manière non négligeable à la sécurité alimentaire [3], [4]. Par ailleurs, de nombreuses populations rurales comme urbaines tirent de la commercialisation de la viande de brousse une source de revenus importante [5], [6]. Parmi les animaux sauvages commercialisés et consommés comme gibier, l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) est l'une des espèces les plus chassées en Afrique tropicale [7], [8]. En Afrique de l'Ouest, 80 millions d'aulacodes sont abattus par an pour une production de viande d'environ 300 000 tonnes [9]. Au Bénin, l'aulacode domine les produits de chasse et est de loin le gibier dont la viande est la plus consommée, surtout dans le centre et le sud du pays [9], [10]. Cependant, la forte consommation de l'aulacode gibier constitue un danger pour la biodiversité et la préservation de l'environnement. Ceci menace la survie à long terme de l'espèce dont le biotope naturel est de plus en plus réduit en raison de l'urbanisation sans cesse croissante. Ainsi pour réduire la pression de chasse de l'aulacode sauvage, des essais de sa domestication ont été entrepris au Bénin dès les années 1970. Les premiers travaux de sa domestication ont été réalisés dès 1980 [11], [12], [13], [14]. Dès lors, de nombreuses initiatives ont conduit à la promotion et la vulgarisation de l'aulacodiculture dans le pays. Parallèlement à ces initiatives, plusieurs études ont été réalisées sur divers aspects de l'aulacodiculture au Bénin. Ces études ont abordé l'aspect économique [15], [16], [17], [18], la détermination de l'âge de l'aulacode d'élevage [19], [20], [21], sur la santé de l'animal [22], [23] et sur l'alimentation [24], [25], [26], [27]. Linton *et al.* [28] ont souligné que tous ces travaux n'ont pas permis à l'aulacodiculture de prospérer dix ans après et les éleveurs d'aulacodes deviennent de plus en plus rares avec une préférence de la viande d'aulacode gibier par les consommateurs malgré la problématique de sécurité sanitaire que relève cette viande. Ces mêmes auteurs ont énuméré parmi les investigations à faire en vue de la relance de la filière aulacode d'élevage, l'état des lieux des pratiques de transformations des deux types d'aulacode au Bénin.

La présente étude prend en compte cette suggestion et a pour but de recenser les pratiques de transformation actuelles des aulacodes de brousse et d'élevage et la perception des consommateurs sur la viande issue de ces deux types d'animaux au Sud-Bénin.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MILIEU D'ÉTUDE

L'étude a été réalisée du 26 juin au 05 août 2023 au Sud-Bénin et dans les départements du Zou, du Couffo, du Mono, de l'atlantique, du Littoral, de l'Ouémé et du Plateau reconnus comme les zones de forte production ou consommation d'aulacodes. Ces zones ont été déjà présentées par Linton *et al.* (2024).

2.2 MATÉRIELS

Les matériels d'étude ont été composés de trois questionnaires utilisés pour les enquêtes. Le premier questionnaire a été adressé aux chasseurs et renseignait sur l'identité du chasseur, les outils de chasse utilisés, le nombre et les catégories d'aulacodes abattus, la clientèle des chasseurs. Le deuxième questionnaire est adressé aux revendeuses, aux restaurateurs et aux promoteurs des structures commercialisant la viande d'aulacode. Il a porté sur le profil socioprofessionnel des transformateurs, l'origine ou le point d'achat des aulacodes transformés et commercialisés. Le troisième questionnaire a été adressé aux consommateurs de la viande d'aulacode. Il abordait les origines des viandes achetées, les principaux usages faits de la viande ou l'animal acheté et les types de transformations de viande préférés et les raisons du choix d'un type d'aulacode à un autre.

2.3 MÉTHODES

L'étude sur l'état des lieux de la transformation de l'aulacode et perception des consommateurs au Sud-Bénin a été faite à partir d'une enquête. Au total 93 personnes ont été enquêtées dont 12 chasseurs, 13 transformateurs (revendeuses,

restaauratrices, vendeuses d'aliments...) et 68 consommateurs. Tous les enquêtés ont été choisis selon le critère de disponibilité. Cependant, en plus de ce critère, celui relatif à l'accessibilité à l'unité de vente a été également considéré dans le choix des transformateurs et des chasseurs enquêtés.

2.4 ANALYSE STATISTIQUE

Les données collectées ont été enregistrées dans une base de données Excel. Le logiciel SAS a été utilisé pour les analyses statistiques. Les fréquences ont été calculées par la procédure Proc freq puis comparées avec le test de chi-carré et le test bilatéral de Z. Pour chaque fréquence relative, un intervalle de confiance (IC) à 95% a été calculé selon la formule:

$$ICP=1,96 \sqrt{\frac{P(1-P)}{N}}$$

Où P est la fréquence relative et N la taille de l'échantillon.

3 RÉSULTATS

3.1 CARACTÉRISATION DE LA CHASSE D'AULACODE AU SUD-BÉNIN

3.1.1 CARACTÉRISTIQUES SOCIOPROFESSIONNELLES DES CHASSEURS

Les caractéristiques socioprofessionnelles des chasseurs enquêtés ont été présentées dans le tableau 1. Les 2/3 des chasseurs étaient des hommes mariés tandis que le tiers des chasseurs était célibataires. Toutefois, ces deux fréquences n'étaient pas significativement ($p>0,05$) différentes. Concernant les activités principales exercées par les chasseurs enquêtés le tiers pratiquait l'agriculture, 41,67% la chasse et le quart l'artisanat. Les 2/3 des chasseurs avaient hérité l'activité de leurs parents tandis que le tiers était devenu chasseur par leur propre initiative. Les fréquences des différentes caractéristiques socioprofessionnelles n'avaient pas varié significativement ($p>0,05$).

Tableau 1. Caractéristiques socioprofessionnelles des chasseurs

Paramètres		Fréquence (% ; N=12)	IC (%)
Situation matrimoniale	Marié	66,67a	26,67
	Célibataire	33,33a	26,67
Activités principales	Agriculture	33,33a	26,67
	Chasse	41,67a	27,89
	Artisanat	25a	24,50
Origine de la chasse	Héritage	66,67a	26,67
	Initiative personnelle	33,33a	26,67

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

3.1.2 INSTRUMENTS DE CHASSE UTILISÉS ET GESTION DES PRODUITS DE CHASSE

Pour capturer les aulacodes, les instruments de chasse les plus fréquemment utilisés ont été le fusil (83,33%) et le piège (50%). Le quart des enquêtés utilisait la machette, une proportion similaire à celle obtenue pour le piège. D'autres instruments de chasse ont été rapportés, mais par une très faible proportion (8,33%) des enquêtés ($p<0,05$). Il s'agissait des bâtons, des flèches et des chiens dressés.

Les aulacodes tués par un fusil représentaient plus de la moitié des aulacodes chassés ($p<0,05$), ils étaient suivis par ceux capturés par piège (23,33%). Cette dernière proportion était similaire à celle des aulacodes capturés avec d'autres instruments de chasses qui faisaient moins de 15% de la capture totale (Figure 1).

L'effectif moyen d'aulacodes capturés par jour, par semaine et par mois était respectivement de 2,28; 3,79 et 12,5 aulacodes avec des extrêmes de 0 à 4; 0 à 10 et 1 à 30 (Tableau 3). Le poids des aulacodes capturés rapporté par les enquêtés

avait varié de 1 à 10 kg avec une moyenne de 3,73 kg (Tableau 3). Concernant la répartition des capturés par sexe et par forma (Tableau 4), les aulacodes mâles étaient autant capturés que les aulacodes femelles ($p>0,05$) et les animaux de grand forma étaient plus capturés (39,09) mais aucune différence significative n'a existé entre ce taux et ceux des petits et moyens formas capturés ($p>0,05$).

La gestion des aulacodes capturés lors de la chasse a été présentée dans le tableau 5. Pour la majorité (83,33%) des enquêtés, le nombre d'aulacodes capturés était en diminution ces cinq dernières années. Toutefois, une faible proportion des chasseurs ($p<0,05$) avait affirmé observer une augmentation au cours de ce dernier quinquennat. Les aulacodes de brousse capturés étaient vendus directement aux clients chez la plupart des chasseurs enquêtés (83,33%) tandis que la vente indirecte était moins fréquente ($p<0,05$). Plus de la majorité (63,64%) des chasseurs observait une durée de 01 à 05 heures entre la capture et le ramassage tandis que le tiers faisait le ramassage entre 05 et 10 heures de temps après la capture ($p>0,05$). Une durée d'une heure à 05 heures entre la capture et la vente était observée par un peu plus de la moitié des chasseurs enquêtés. Cette fréquence était similaire à celle des chasseurs (36,36%) qui vendaient leurs animaux entre 10 et 24 heures après la capture. Moins d'un dixième vendait le gibier entre 05 à 10 heures après la capture ($p<0,05$).

Tableau 2. Instruments de chasse utilisés

Paramètres	Fréquence (% ; N=12)	IC (%)
Fusil	83,33a	21,09
Piège	50,00ab	28,29
Machette	25,00bc	24,50
Bâton	8,33c	15,64
Flèche	8,33c	15,64
Chien dressé	8,33c	15,64

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

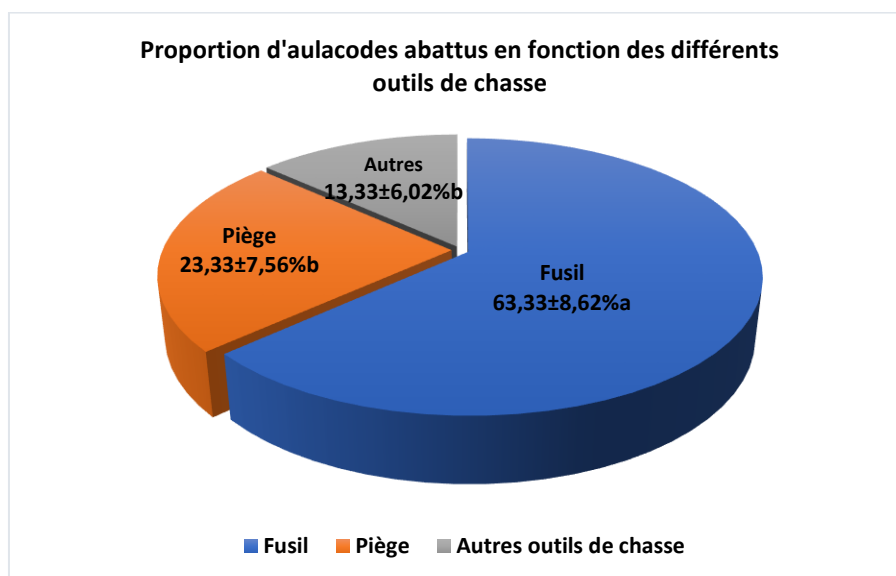


Fig. 1. Proportion d'aulacodes capturés selon le type d'outils de chasse

Tableau 3. Effectifs et poids moyens des aulacodes capturés par la chasse

Paramètres		Moyenne	Minimum	Maximum
Effectifs moyens (Nombre de têtes)	Par jour	2,28±0,76	0	4
	Par semaine	3,79±3,17	0	10
	Par mois	12,5±7,23	1	30
Poids moyens (kg)		3,73±2,40	1	10

Tableau 4. Répartition des aulacodes de chasse capturés par sexe et par format

Paramètres		Fréquence (%)	IC (%)
Sexe le plus capturé (N=12)	Mâle	50,00a	28,29
	Femelle	50,00a	28,29
Répartition des aulacodes selon le forma *	Petit forma (Pds<1kg)	30,91a	8,64
	Moyen forma (Pds entre 1 et 2 kg)	30,00a	8,56
	Grand forma (Pds > 2 kg)	09,09a	9,12

N = effectif des chasseurs enquêtés; *: proportion des aulacodes de forma x sur un effectif de 10 capturés ou abattus; IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

Tableau 5. Gestion des aulacodes chassés

Paramètres		Fréquence (% ; N=12)	IC (%)
Evolution du nombre d'aulacodes capturés ces 5 dernières années	Augmentation	16,67b	21,09
	Diminution	83,33a	21,09
Mode de vente des aulacodes gibier capturés	Ventes directes sans aucun traitement	83,33a	21,09
	Ventes indirectes après traitement	16,67b	21,09
Type de traitement appliqué avant la vente	Habillage	8,33a	15,64
	Transformation	8,33a	15,64
Temps séparant la capture du ramassage	1 - 5h	63,64a	27,22
	5 - 10h	33,33a	26,67
Temps entre capture et vente	1-5h	54,55a	28,17
	5 - 10h	9,09b	16,26
	10-24h	36,36ab	7,22

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

3.2 COMMERCIALISATION DES AULACODES DE CHASSE

Trois quarts des chasseurs avaient estimé que la chasse d'aulacode était une activité rentable alors que le quart pensait que l'activité n'était pas rentable ($p<0,05$). Les principaux clients des chasseurs étaient les transformatrices, les passagers (58,33%) et les revendeurs (41,67%). Les maquis étaient peu fréquents (16,67%) parmi les clients ($p<0,05$). Seulement 18,18% des chasseurs arrivaient à satisfaire la demande de la clientèle; une fréquence plus faible que celle des enquêtés qui n'arrivaient pas à satisfaire les besoins de leurs clients. Cependant, la totalité des enquêtés était unanime sur le fait que la demande en aulacode gibier était plus forte que l'offre (Tableau 6). Les prix de vente des aulacodes capturés ont été présentés dans le tableau 7. Les aulacodes de petits formas étaient vendus entre 1000 et 3000 FCFA. Le prix de vente des aulacodes de moyen forma variait entre 3000 et 8000 FCFA, tandis que les aulacodes de grand forma étaient vendus en moyenne à 9212,50 FCFA.

Tableau 6. Information sur la commercialisation des aulacodes de chasse

Paramètres		Fréquence (% ; N=12)	IC (%)
Rentabilité de l'activité	Rentable	75a	24,50
	Non rentable	25b	24,50
Clients	Transformatrices	58,33a	27,89
	Maquis	16,67b	21,09
	Revendeurs	41,67ab	27,89
	Passagers	58,33a	27,89
Satisfaction des besoins de la clientèle	Non	81,82a	21,82
	Oui	18,18b	21,82
Situation actuelle du marché	Forte demande par rapport à l'offre	100	0

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

Tableau 7. Prix de vente en FCFA des aulacodes chassés et capturés

Paramètres	Moyenne	Minimum	Maximum
Petit forma (Pds < 1 kg)	2277,78±654,84	1000	3000
Moyen forma (Pds entre 1 et 2 kg)	5300±1480,71	3000	8000
Grand forma (Pds > 2 kg)	9212,50±1512,39	6000	12000

3.2.1 CARACTÉRISTIQUES SOCIOPROFESSIONNELLES DES TRANSFORMATEURS D'AULACODES AU SUD-BÉNIN

Les caractéristiques socioprofessionnelles des transformateurs enquêtés ont été présentées dans le tableau 8. Les femmes étaient 5,5 fois plus fréquents que les hommes ($p < 0,05$). La transformation d'aulacode était la principale source de revenus pour la totalité des transformateurs enquêtés, toutefois, une faible proportion de ces enquêtés (23,08%) avait affirmé avoir aussi pour source de revenus l'agriculture ($p < 0,05$). La majorité (76,92%) des enquêtés avaient hérité de l'activité de transformation de leurs parents. Par contre, une faible proportion des enquêtés ($p < 0,05$) s'étaient lancés dans la transformation d'aulacode sur leur propre initiative (23,08%). Le nombre d'enfants en charge chez les transformateurs a varié de 0 à 7 enfants avec une moyenne de $3,07 \pm 2,53$ enfants.

Tableau 8. Caractéristiques socioprofessionnelles des transformateurs d'aulacode enquêtés

Paramètre		Fréquence (% ; N=13)	IC (%)
Sexe	Homme	15,38b	19,61
	Femme	84,62a	22,90
Sources de revenus	Agriculture	23,08b	22,90
	Transformation de la viande d'aulacode	100a	0,00
Origine de l'activité de transformation d'aulacodes	Héritage	76,92a	22,90
	Initiative personnelle	23,08b	22,90

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

3.2.2 TYPES D'AULACODE TRANSFORMÉ ET RAISONS DE CHOIX

Les 84,62 % des enquêtés faisaient la transformation de l'aulacode gibier. Un seul transformateur sur les treize avait déclaré transformer l'aulacode d'élevage ou les deux types d'aulacodes (Tableau 9) ($p < 0,05$). Le choix du type d'aulacode à transformer se justifiait principalement par le goût apprécié par les consommateurs (76,92%), l'exigence des clients (69,23%) et le prix d'achat qui restait abordable (61,54%). Toutefois, 23,08% des transformateurs avaient avancé comme raison de choix du type d'aulacode, la disponibilité de l'animal.

Tableau 9. Type d'aulacodes transformés et raisons de choix

Paramètre		Fréquence (% ; N=13)	IC (%)
Type d'aulacode transformé	Aulacode gibier	84,62a	19,61
	Aulacode d'élevage	7,69b	14,48
	Les deux	7,69b	14,48
Raisons du choix de l'aulacode gibier	Exigence du client	69,23a	25,09
	Disponibilité	23,08b	22,90
	Coût abordable	61,54ab	26,45
	Goût apprécié par les consommateurs	76,92a	22,90

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

3.2.3 TYPES DE TRANSFORMATIONS EFFECTUÉES POUR LES VIANDES D'AULACODES

Dans les tableaux 10 et 11 ont été présentés respectivement les types de transformations observés lors de l'enquête et les durées de chaque procédé de transformation. Le type de transformation le plus fréquent était la friture de la viande (69,23%). Cette fréquence était similaire à celle des transformateurs (38,46%) qui faisaient le fumage de l'aulacode. Peu de transformateurs enquêtés faisaient le braisage de l'aulacode (15,38%; $p < 0,05$).

La durée totale de la transformation de la viande d'aulacode par fumage a varié selon les enquêtés de 20 à 180 minutes avec une moyenne de 75,50 minutes. La durée moyenne de la transformation par friture était de 71,88 minutes. Pour braiser la viande, les transformateurs y consacraient en moyenne 30 minutes (Tableau 11).

Tableau 10. Types de transformation

Paramètre	Fréquence (% ; N=13)	IC (%)
Fumage	38,46ab	26,45
Friture	69,23a	25,09
Braisage	15,38b	19,61

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

Tableau 11. Durée totale (en minute) des procédés de transformation

Variable	Moyenne	Minimum	Maximum
Durée moyenne fumage	75,50±56,33	20	180
Durée moyenne friture	71,88±18,31	45	90
Braisage	30	-	-

3.2.4 DIAGRAMMES DE TRANSFORMATION DES AULACODES

Les figures 2, 3 et 4 ont illustré les diagrammes de fumage, de friture et de braisage de la viande d'aulacode. Pour fumer l'aulacode, les opérations unitaires après la réception de l'animal déjà abattu étaient l'épilation par brûlage suivi du lavage de l'animal épilé, de l'éviscération et de la fente médiane de la carcasse. Le fumage était la dernière étape du processus. Concernant la friture de la viande d'aulacode, une épilation de l'animal était réalisée par l'échaudage après sa réception. L'animal épilé était par la suite lavé à l'eau puis éviscéré. La carcasse ainsi obtenue subissait une fente médiane après avoir été nettoyée avec de l'eau. Les demi-carcasses étaient ensuite découpées en morceaux qui étaient assaisonnés ou non avant d'être précuits. L'étape finale de ce procédé était la friture. Quant au braisage, après la réception de l'animal abattu, une épilation de ce dernier était faite par trois méthodes possibles au choix de l'exécuteur. Ainsi, elle pouvait se faire soit par trempage dans l'eau chaude, soit par application de cendre végétale sur la peau ou soit par brûlage direct des poils au feu de bois. Une fois l'animal épilé, un nettoyage à l'eau était fait avant et après l'éviscération. Ensuite, la carcasse était découpée en des morceaux qui sont lavés et assaisonnés avant d'être mis sur la braise.

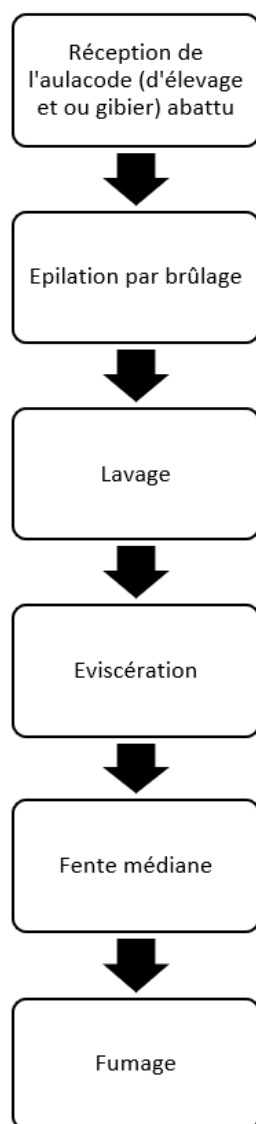


Fig. 2. . 1. *Diagramme technologique du fumage d'aulacode*

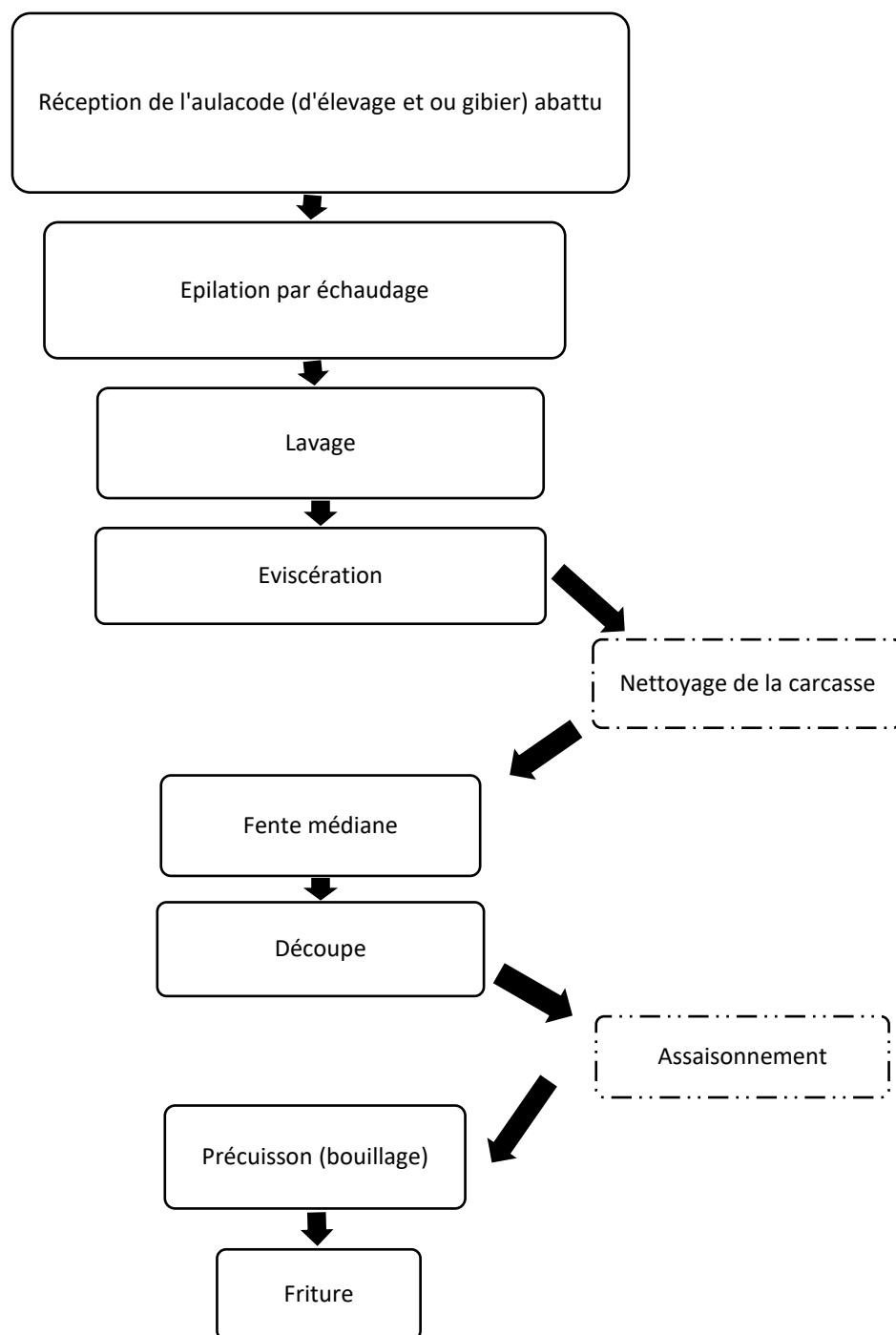
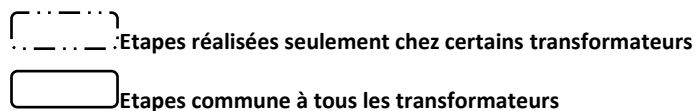


Fig. 3. Diagramme technologique de la friture d'aulacode



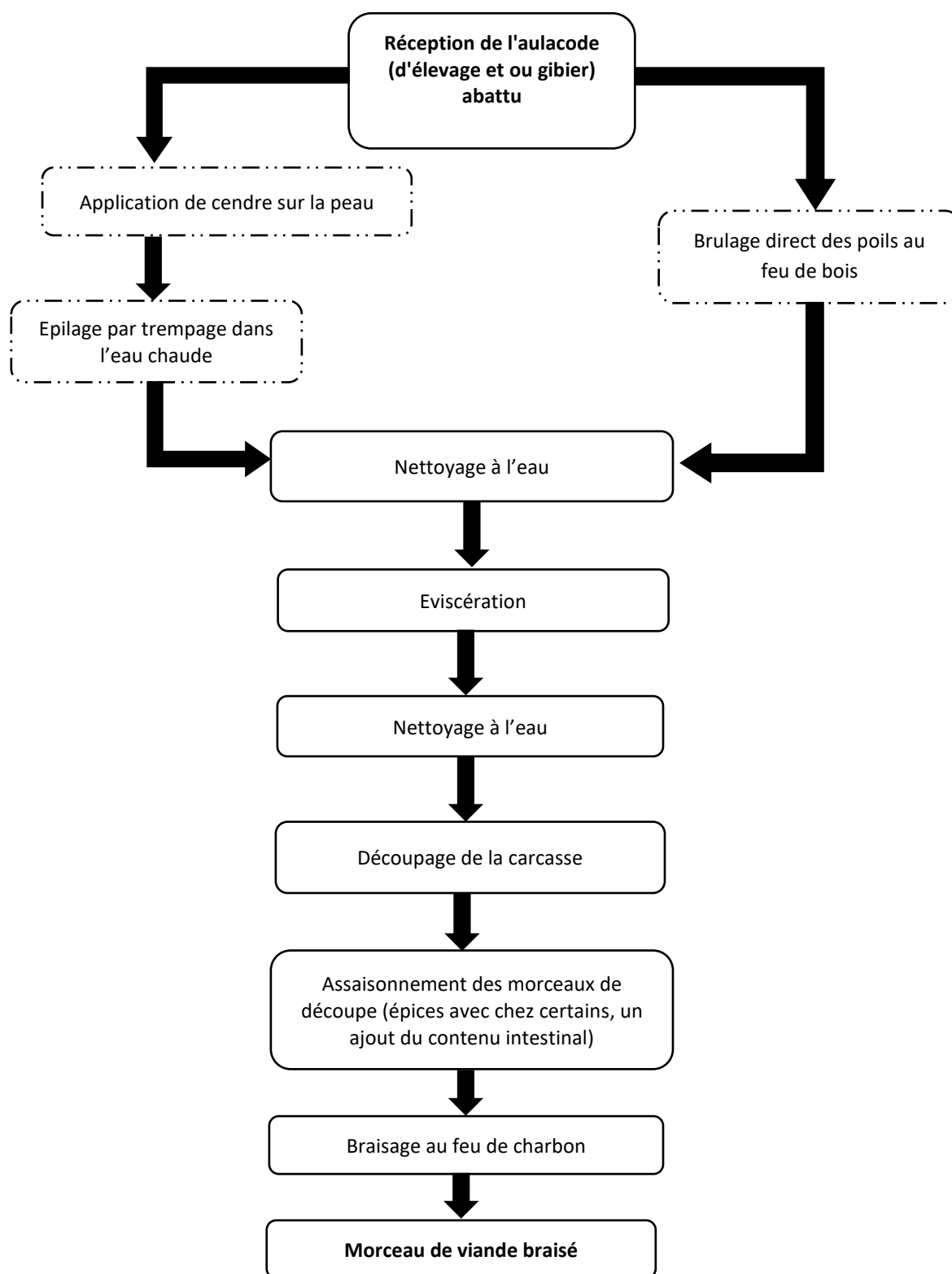


Fig. 4. Diagramme technologique du braisage d'aulacode

⋯ Etapes réalisées seulement chez certains transformateurs

□ Etapes communes à tous les transformateurs

3.2.5 ASPECT ÉCONOMIQUE ET RENTABILITÉ DE LA TRANSFORMATION DE L'AULACODE

Les paramètres de rentabilité de la transformation de la viande d'aulacode ont été présentés dans le tableau 12. Plus des 2/3 des enquêtés avaient affirmé que l'activité de transformation de l'aulacode était rentable. Toutefois, cette fréquence n'était pas significativement différente d'un peu moins du tiers des transformateurs qui avaient estimé que l'activité n'était pas rentable. Au nombre des facteurs liés à la rentabilité, le prix d'achat abordable de l'animal abattu et le forma de la carcasse ont été évoqués par 38,46 % des enquêtés. Ce pourcentage n'était pas significativement différent de celui (moins du quart) des transformateurs qui avaient mentionné le rendement en viande de la carcasse et le prix de vente de la viande transformée comme étant aussi des facteurs conditionnant la rentabilité de l'activité. Les 3/4 des transformateurs enquêtés avaient estimé que les carcasses de gros forma étaient les plus rentables. Cette fréquence était plus importante que celles des transformateurs pour qui les carcasses les plus rentables étaient celles de forma moyen (25%) ou de petit forma (8,33%) ($p < 0,05$). Concernant l'influence du poids de l'aulacode sur la rentabilité, une forte proportion des transformateurs (89,91%) avait estimé que l'activité était plus rentable lorsque l'aulacode avait un poids vif corporel supérieur à 2 kg, alors qu'une faible proportion des enquêtés avait estimé que l'activité était rentable lorsque le poids vif corporel de l'animal était compris entre 1 et 2 kg (27,27%; $p < 0,05$).

Tableau 12. Rentabilité de l'activité de transformation d'aulacodes

Paramètre		Fréquence (%) ; N=13	IC (%)
Rentabilité de l'activité	Pas rentable	30,77a	25,09
	Rentable	69,23a	25,09
Facteurs de variation de la rentabilité	Rendement	23,08a	22,90
	Prix d'achat abordable	38,46a	26,45
	Format	38,46a	26,45
	Prix de vente intéressant	23,08a	22,90
Forma d'aulacodes le plus rentable	Petit format	0c	0
	Forma moyen	25b	23,54
	Gros format	75a	23,54
Poids plus rentable	Inférieur à 1 kg	0b	0,00
	Entre 1 et 2 kg	27,27b	24,21
	Supérieur à 2 kg	89,91a	16,37

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

Le nombre d'aulacodes transformés par les enquêtés en une semaine avait varié de 1 à 14 aulacodes avec une moyenne de 4,55 aulacodes transformés. Par mois, la capacité moyenne de transformation était de 18,20 aulacodes avec des extrêmes de 4 à 56 aulacodes transformés. Le prix d'achat des animaux de petit forma avait varié de 1 750 à 9 000 F CFA. Les aulacodes de forma moyen coustaient en moyenne 8 596,15 F CFA. Le prix moyen des animaux de gros forma était 14 923,08 F CFA. Après transformation, les carcasses des animaux de petit, moyen et gros forma étaient respectivement vendues à 7 925, 11 154,17 et 17 562,50 F CFA. Le prix moyen de vente d'un morceau de la viande cuite d'aulacode était de 688,89 F CFA pour un poids moyen de 199,17 g. Après la vente de la viande d'aulacode, une marge bénéficiaire de 1 900 F CFA en moyenne était réalisée sur chaque aulacode transformé.

Tableau 13. Nombre d'aulacodes transformés, prix d'achat et de vente et marge bénéficiaire

Paramètres		Moyenne	Min	Max
Nombre d'aulacodes transformés	Semaine	4,55±4,60	1	14
	Mois	18,20±18,39	4	56
Prix d'achat selon le format (FCFA)	Petit format	5480,77±2546,36	1750	9000
	Moyen format	8596,15±3402,72	4000	15000
	Gros format	14923,08±5211,55	7000	24500
Prix de vente d'un aulacode transformé en fonction du format (FCFA)	Petit format	7925,00±4508,75	2500	16000
	Prix de vente moyen format	11154,17±4892,59	4350	19500
	Gros format	17562,50±4449,37	8500	23500
Prix de vente d'un morceau d'aulacode transformé (FCFA)		688,89±260,74	500	1200
Poids du morceau d'aulacode transformé vendu (g)		199,17±86,14	100	325
Marge bénéficiaire par aulacode transformé (FCFA)		1900,00±1253,00	400	4000

3.2.6 DIFFICULTÉS RENCONTRÉES ET APPROCHES DE SOLUTIONS PROPOSÉES

Les difficultés auxquelles étaient confrontés les transformateurs ont été présentées dans le tableau 14. Les difficultés les plus récurrentes étaient l'exposition à la fumée et au feu (46,15 %), la mévente (30,77 %), la rareté de l'aulacode (23,08 %), la cessation de la chasse en saison pluvieuse (15,38 %) et des difficultés financières (15,38 %). Le manque d'emplacement (7,69 %) approprié pour l'activité de transformation a été faiblement évoqué ($p < 0,05$). Comme approche de solutions, la majorité des transformateurs (61,54 %) avaient souhaité un appui financier. Les autres solutions proposées par une faible proportion des enquêtés étaient la création de marchés de vente (15,38 %) d'aulacode vivant ou abattu, la mise au point de foyer moderne (15,38 %), la formation (7,69 %) et la mise à disposition d'une main-d'œuvre qualifiée (7,69 %) ($p < 0,05$).

Tableau 14. Difficultés rencontrées et approches de solutions proposées par les transformateurs enquêtés

Paramètre		N	Fréquence (%)	IC (%)
Difficultés rencontrées	Rareté de l'aulacode	13	23,08ab	22,90
	Cessation de la chasse en saison pluvieuse	13	15,38ab	19,61
	Exposition à la fumée et au feu	13	46,15a	27,10
	Difficultés financières	13	15,38ab	19,61
	Manque d'emplacement*	13	7,69b	14,48
	Mévente	13	30,77ab	25,09
Approche de solutions	Appui Financier	13	61,54a	4,25
	Mains-d'œuvre qualifiées	13	7,69b	1,51
	Création d'un marché de vente	3	15,38b	2,13
	Formation	13	7,69b	1,51
	Mise au point de foyer moderne	13	15,38b	2,13

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%; * emplacement approprié pour la transformation des aulacodes

3.3 CONSOMMATION DE LA VIANDE D'AULACODE AU SUD-BÉNIN

3.3.1 CARACTÉRISTIQUES SOCIOPROFESSIONNELLES DES CONSOMMATEURS ENQUÊTÉS

Les caractéristiques socioprofessionnelles des éleveurs enquêtés ont été présentées dans le tableau 15. La quasi-totalité des enquêtés était des hommes. Seulement 22,06 % des enquêtés étaient des femmes ($p < 0,05$). Ces enquêtés étaient principalement des artisans (20,59 %), des éleveurs (19,12 %) et des commerçants (14,17 %). La majorité des consommateurs enquêtés avaient pour source de revenus l'agriculture (66,18 %). En dehors de cette source de revenus, l'élevage, le commerce et l'artisanat étaient les plus fréquents. Moins d'un dixième des enquêtés avait pour source de revenus le fonctionnariat ($p < 0,05$).

Tableau 15. Caractéristiques socioprofessionnelles des enquêtés

Paramètres		Fréquence (% ; N= 68)	IC (%)
Sexe	Homme	77,94a	9,86
	Femme	22,06b	9,86
Source de revenus	Agriculture	66,18a	11,24
	Elevage	29,41b	10,83
	Fonctionnariat	8,82d	6,74
	Artisanat	20,59bc	9,61
	Commerçant	29,41b	10,83

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

3.3.2 PRATIQUES DE CONSOMMATIONS DES VIANDES ET CELLE D'AULACODE

La fréquence de consommation de la viande d'aulacodes chez les consommateurs enquêtés a été présentée dans le tableau 16. La viande d'aulacode était consommée pour la plupart des enquêtés une fois par an (50%) ou une fois par mois (38,24%). Peu de consommateurs ($p<0,05$) avait affirmé consommer la viande d'aulacode une fois par semaine (7,35%) ou au quotidien (2,94%).

Dans le tableau 17, ont été présentées, les pratiques de consommation de la viande de façon générale par les consommateurs enquêtés. Parmi les autres sources de protéines animales consommées en dehors de la viande d'aulacode, le poisson a été cité par la quasi-totalité des consommateurs enquêtés (92,65%). Cette consommation dominait celle de volaille (77,94%), des petits ruminants (64,71%), des porcs (52,94%), du lapin (30,88%), du bœuf (20,59%) et des autres gibiers (22,06%) ($p<0,05$). Les viandes les plus fréquemment consommées étaient principalement celles de la volaille (32,35%) et du porc (23,53%) aux côtés de la viande des ruminants (17,65%), de lapin (5,88%), d'aulacodes (4,41%) et d'autres gibiers (4,41%).

Un peu plus des 2/3 des consommateurs de la viande d'aulacode enquêtés, préféraient l'aulacode gibier à celle d'aulacode d'élevage. A l'inverse, la viande d'aulacode d'élevage était appréciée par une faible proportion des consommateurs enquêtés (27,94%) ($p<0,05$). Très peu de consommateurs (5,88%) n'avaient pas de préférence particulière et consommaient aussi bien l'aulacode gibier que celui d'élevage. Pour les enquêtés qui préféraient la viande d'aulacode d'élevage, la principale raison qu'ils avaient avancée était que de la viande était de bonne qualité sanitaire (72,73%). Par ailleurs, la facilité d'accès à la viande de l'animal et sa disponibilité (13,64%) étaient des raisons supplémentaires évoquées par une faible proportion d'enquêtés ($p<0,05$). La raison de préférence la plus évoquée chez les consommateurs d'aulacode gibier était le goût de la viande (56,25%). Peu de consommateurs (16,67%) avaient évoqué qu'ils préféraient cet animal, car il était disponible et sa viande était moins chère ($p<0,05$). Toutefois, d'autres raisons de préférence telles l'habitude de consommation de la viande des aulacodes de brousse (8,33%) et la bonne qualité nutritive (2,08%) de cette dernière ont été évoquées par des minorités d'enquêtés ($p<0,05$). Quant à la susceptibilité de changement de préférence, 52,94% des enquêtés avaient affirmé qu'ils peuvent changer de préférence. Cette fréquence était similaire à celle des consommateurs qui n'étaient pas encore prêts à changer de préférence (47,06%) ($p>0,05$).

Tableau 16. Fréquence de consommation de la viande d'aulacode au SUD-BENIN

Paramètres	N	Fréquence (%)	IC (%)
Quotidienne	68	2,94b	4,02
Une fois par semaine	68	7,35b	6,20
Une fois par mois	68	38,24a	11,55
Une fois par an	68	50a	11,88

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

Tableau 17. Espèces animales consommées et raisons de choix de la viande d'aulacode gibier ou d'élevage

Paramètre		N	Fréquence (%)	IC (%)
Sources de protéines animales consommées en dehors de l'aulacode	Autres gibiers	68	22,06d	9,86
	Volaille	68	77,94b	9,86
	Porc	68	52,94c	11,86
	Petit Ruminant	68	64,71c	11,36
	Bœuf	68	20,59d	9,61
	Lapins	68	30,88d	10,98
	Poisson	68	92,65a	6,20
Espèces animales fréquemment consommées	Aulacodes	68	4,41c	4,88
	Autres gibiers	68	4,41c	4,88
	Lapin	68	5,88c	5,59
	Porcs	68	23,53ab	10,08
	Ruminants	68	17,65b	9,06
	Volaille	68	32,35a	11,12
	Consommation très rare de viande	68	16,17b	8,75
Type de viande d'aulacode préféré	Aulacode d'élevage	68	27,94b	16,63
	Aulacode gibier	68	66,17a	11,39
	Les deux	68	5,88c	19,01
Raisons de préférence de la viande d'aulacode d'élevage	Facilité d'accès	22	13,64b	14,34
	Disponibilité	22	13,64b	14,34
	Bonne qualité sanitaire	22	72,73a	18,61
Raisons de préférence de la viande d'aulacode gibier	Disponibilité	48	16,67b	10,54
	Bon goût	48	56,25a	14,03
	Habitude de consommation	48	8,33bc	7,82
	Moins chère	48	16,67b	10,54
	Bonne qualité nutritive	48	2,08c	4,04
Susceptibilité de changement de préférence	Oui	68	52,94a	11,86
	Non	68	47,06a	11,86

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

3.3.3 TRAITEMENTS APPLIQUÉS À LA VIANDE AVANT SA CONSOMMATION ET FACTEURS DE PRÉFÉRENCE

Le fumage et la friture étaient les principaux traitements (tableau 18) subis par la viande d'aulacode avant sa consommation (respectivement 70,59 et 75%). Le salage-séchage, le braisage et la cuisson par bouillage étaient moins fréquents auprès des consommateurs enquêtés ($p < 0,05$). La majorité des enquêtés (57,35%) n'avaient pas une préférence particulière quant au sexe de l'animal qu'ils consomment, tandis que 41,18% préféraient consommer la viande d'aulacode mâle. Un seul enquêté avait déclaré sa préférence pour la viande d'aulacode femelle. Pour les préférences liées au format, la majorité (54,41%) des enquêtés n'avaient pas de préférence particulière pour un format donné. Cette fréquence était similaire à celle des enquêtés qui préféraient plus les carcasses de grand format (41,18%). Peu de consommateurs enquêtés (10,29%) avaient affirmé leur préférence aux carcasses de forma moyen ($p < 0,05$).

Tableau 18. Traitements appliqués à la viande avant sa consommation et facteurs de préférence

Paramètre		Fréquence (%) ; N=68	IC (%)
Forme de présentation de la viande préférée	Fumée	70,59a	10,83
	Frite	75a	10,29
	Salée-séchée	1,49c	2,90
	Braisée (Akpèssè)	5,88bc	5,59
	Bouillie	16,18b	8,75
Préférence de consommation selon le sexe	Mâles	41,18a	11,70
	Femelles	1,48b	2,87
	Tous sexes confondus	57,35a	11,76
Forma de carcasse préféré des consommateurs	Petit forma	0c	0,00
	Forma moyen	10,29b	7,22
	Grand forma	41,18a	11,70
	Pas de spécificité	54,41a	11,84

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences interclasses suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

3.3.4 SATISFACTION DES CONSOMMATEURS ET RISQUES DE MALADIES ASSOCIÉES À LA CONSOMMATION DE LA VIANDE D'AULACODE

La viande d'aulacode disponible sur le marché était appréciée par un peu plus des 2/3 des éleveurs enquêtés ($p < 0,05$). Concernant la connaissance des risques de maladies liées à la consommation de la viande d'aulacode, 17 consommateurs sur les 68 enquêtés avaient affirmé connaître les risques de maladie liés à la consommation de l'aulacode gibier telles que les contaminations par le virus Ebola (61,11%) et le virus Lassa (58,33%) qui étaient les risques les plus fréquemment évoqués par les enquêtés. Une faible proportion des enquêtés avait affirmé avoir connaissance également de la goutte (19,44%), de l'hémorroïde (8,33%) et de la contamination de la viande d'aulacode gibier par d'autres virus (27,78 %) ($p < 0,05$). Quant à l'aulacode d'élevage, près de quinze pour cent des enquêtés étaient conscients de certains risques de maladies liés à la consommation de viande d'élevage ($p > 0,05$). Pour la majorité de ces enquêtés, la goutte (60%) et l'hémorroïde (30%) étaient les plus fréquentes, vient ensuite le Lassa qui a été faiblement évoqué (10%) ($p < 0,05$).

Tableau 19. Satisfaction des consommateurs et risques de maladies associées à la consommation de la viande d'aulacode

Paramètre		N	Fréquence (%)	IC (%)
Satisfaction des consommateurs	Satisfaits	67	67,65a	11,12
	Non satisfait	68	32,35b	11,12
Connaissances de maladies liées à la viande d'aulacode	Aulacode d'élevage	68	14,71	8,42
	Aulacode gibier	68	25	10,29
Maladies liées à la consommation des aulacodes d'élevage	Goutte	10	60a	30,36
	Hémorroïde	10	30ab	28,40
	Lassa	0	10b	18,59
Maladies liées à la consommation des aulacodes de Brousse	Goutte	36	19,44bc	12,93
	Ebola	36	61,11a	15,93
	Lassa	36	58,33a	16,11
	Virus	36	27,78b	14,63
	Hémorroïde	36	8,33c	9,03

N= effectif, IC= Intervalle de confiance; ab: les fréquences suivies des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

4 DISCUSSION

4.1 CARACTÉRISATION DE L'ACTIVITÉ DE CHASSE D'AULACODE AU SUD-BÉNIN

La chasse au Sud-Bénin est une activité essentiellement masculine. Un constat similaire avait été fait dans d'autres pays africains par [29]. Par contre Agyeman *et al.* [8] ont noté la présence de la gent féminine dans la chasse au Ghana. Par ailleurs, ces mêmes auteurs ont rapporté que la chasse est souvent pratiquée par certaines populations rurales vivant à proximité des réserves forestières afin de satisfaire leurs besoins en protéines et pour avoir des revenus complémentaires [8]. C'est le constat fait dans la présente étude où le tiers des chasseurs était en réalité des agriculteurs ou des artisans. La proportion des chasseurs (41,67%) ayant la chasse comme activité principale s'explique par le fait qu'ils vivent en réalité près des aires protégées telles que les forêts classées de la Lama et de Dogué-Kétou [30]. La majorité des enquêtes hérite la chasse de leur parent. Cela est lié au fait que la chasse est une activité patriarcale dont les pratiques sont souvent transmises de pères en fils. Ce constat a été également fait par [3] au Nigeria qui ont rapporté que le fait d'avoir un parent chasseur est fortement associé à la probabilité de devenir chasseur soi-même. Les instruments de chasses les plus utilisés par les chasseurs enquêtés dans cette étude sont le fusil, le piège et la machette dans une moindre mesure. Un pareil constat a été fait par [3] et [31] qui ont rapporté que ces deux arsenaux sont les plus utilisés dans la chasse du gibier au Nigéria. Plusieurs autres études ont également confirmé que le fusil et le piège sont les outils de chasse les plus populaires en Afrique subsaharienne [32], [33], [2]. Les résultats obtenus dans la présente étude sont contraires à ceux obtenus par [34] et [8] qui ont rapporté l'utilisation de feu de brousse comme méthode de chasse la plus populaire au Ghana. La capture des aulacodes par fusillade est faite avec des armes artisanales pouvant entraîner un problème de présence de résidus de métaux lourds comme le plomb dans la viande. De plus, au Sud-Bénin, souvent peu de chasseurs et de commerçants de gibiers abattus par balle enlèvent les balles avant la vente [1]. Cela peut constituer un risque pour la santé du consommateur. Dans une étude menée au Bénin, Bodeau-Livinec [35] a démontré que la consommation de la viande de gibier abattu par arme à feu est fortement liée à une concentration élevée de plomb dans le sang des consommateurs. La capture par piège peut aussi avoir ses limites. Elle est non sélective [29], ce qui représente une menace pour la biodiversité. De plus, les gibiers morts dans le piège pourraient déjà être en putréfaction avant l'arrivée du chasseur pour le ramassage. Face à cela, il est souhaitable de renforcer des sensibilisations auprès des chasseurs sur les avantages et les limites de chaque outil de chasse. Par ailleurs, il est nécessaire de réaliser des études visant à déterminer des indicateurs de la putréfaction et les concentrations en métaux lourds dans la viande d'aulacodes de chasse commercialisées au Sud-Bénin.

Presque tous les chasseurs enquêtés font le constat d'une diminution du nombre d'aulacodes gibiers abattus ces cinq dernières années. Cette diminution traduit une pression de chasse plus accrue en raison de la forte demande de l'aulacode gibier, ce que notifient également les chasseurs enquêtés. En effet, le goût unique de la viande de ce gros mammifère rongeur, qui est par ailleurs considéré comme un ravageur des cultures donc non classé sur l'Annexe III de la Convention de Washington [36], en fait une cible idéale pour la chasse. Ce constat est confirmé par les préférences avouées de la majorité des consommateurs (enquêtés dans cette même étude) pour la viande d'aulacode gibier. En dehors de la pression de chasse, la poussée de l'urbanisation, en réduisant leurs biotopes peut également contribuer à cette diminution du nombre d'aulacodes abattus ou capturés pendant la chasse. Tous ces facteurs pourraient à long terme constituer une menace pour la survie de l'espèce dans son milieu naturel. Face à cela, l'élevage en captivité doit être promu.

Les chasseurs enquêtés vendent les aulacodes capturés ou abattus à plusieurs catégories de personnes dont les plus fréquentes sont les passagers, les transformateurs et les revendeurs. Les aulacodes chassés sont le plus souvent exposés aux abords des grandes artères de circulation, c'est ce qui explique la fréquence de ces catégories de clients. Les autres acteurs intervenant dans la transformation sont les maquis et les revendeurs. Ces mêmes catégories d'acteurs impliqués dans la distribution de gibier ont été déjà rapportés par [37] en Guinée. Par ailleurs, Azehoun-Pazou *et al.* [15] ont également identifié les transformateurs, les intermédiaires, les intermédiaires et les particuliers comme des acteurs impliqués dans le circuit de distribution de l'aulacode d'élevage au Bénin. Les prix de vente des animaux chassés déclarés par les chasseurs sont en moyenne 2277,78 F CFA; 5300 F CFA et 9212,5 F CFA respectivement pour les petits formas, les formas moyens et les grands formas. Ces montants déclarés sont en dessous des prix d'achat déclarés par les transformateurs: 7925 F CFA; 8596 F CFA et 14923,08 F CFA respectivement pour les petits, les moyens et les grands formas. Ce grand écart peut s'expliquer par la présence des revendeurs d'aulacodes gibiers qui servent d'intermédiaires entre les chasseurs et les transformateurs. En effet, les revendeurs achètent le gibier auprès des chasseurs pour le revendre à d'autres personnes à un prix supérieur [37].

4.2 TRANSFORMATION DE LA VIANDE D'AULACODE AU SUD-BÉNIN

L'activité de transformation d'aulacode est exercée majoritairement par des femmes avec une faible fréquence des hommes. Ce même constat avait déjà été fait au Bénin par [1] qui ont rapporté que 5 transformateurs sur 8 étaient des femmes.

Les hommes intervenant dans la transformation rapportée dans cette étude ne sont rien d'autre que les chasseurs qui, eux-mêmes, transforment leurs produits de chasse. La faible implication des hommes serait due à l'aspect de transformation qui a trait aux activités de cuisine et pour lesquelles du point de vue sociétal, les hommes confèrent ces responsabilités aux femmes. Tous les transformateurs enquêtés ont tous pour source de revenus cette activité qu'ils exercent et l'ont hérité en majorité de leurs parents. En effet, le savoir-faire en procédure de transformation artisanale des viandes et produits halieutiques est une activité matriarcale qui se transmet de mère en fille [38]. Le constat fait dans cette étude corrobore également celui de [39] en Côte d'Ivoire qui rapportent que la majorité des personnes impliquées dans l'activité de transformation de la viande d'aulacode sont des femmes et cette activité constitue une source de revenus principalement par la vente de la viande. À quelques exceptions près, les transformateurs enquêtés font la transformation de l'aulacode de brousse. Ces transformateurs justifient leur choix par l'exigence des clients qui apprécient plus le goût de l'aulacode gibier. La préférence de la plupart des transformateurs pour l'aulacode gibier a été précédemment rapportée par [40] au Sud-Bénin. Le choix de la quasi-totalité des enquêteurs de transformer la viande d'aulacode gibier traduit la demande des consommateurs. Comme l'ont révélé les résultats de l'enquête réalisée auprès des consommateurs dans la présente étude, la majorité des consommateurs préfèrent la viande d'aulacode gibier. Au Bénin comme dans la sous-région ouest-africaine, la viande de l'aulacode gibier est plus appréciée par rapport à celle de l'aulacode d'élevage [41], [1], [42], [9]. Dans la présente étude, la majorité des consommateurs préfère la viande d'aulacode à cause de son goût bien appréciable. Le même constat a été fait par [42] au Ghana qui ont rapporté le goût comme étant la principale raison de préférence de la viande d'aulacode gibier. D'après [43], le goût spécial qui fait que la viande d'aulacode gibier est recherchée est en réalité l'arrière-goût laissé suite au faisandage de la viande. Cependant, bien que ce soit une qualité appréciée des consommateurs, lorsque le faisandage est mal réalisé, cela peut entraîner une prolifération bactérienne et une production d'amines biogènes nuisibles à la santé du consommateur.

Les modes de cuisson les plus fréquemment adoptés par les transformateurs sont la friture et dans une moindre mesure le fumage. La prédominance de la friture s'explique par le fait que la plupart des unités de transformation visitées dans cette enquête sont des restaurants. Or la friture a été rapportée comme étant le mode de cuisson de la viande le plus fréquent dans les restaurants du Sud-Bénin [44]. Les modes de cuisson observés chez les transformateurs sont corroborés par les observations faites à l'issue des enquêtes réalisées auprès des consommateurs. Le fumage de la viande d'aulacode est une technique de conservation traditionnelle, il est souvent pratiqué par les chasseurs [9] et est très peu pratiqué dans les restaurants. Ceci peut expliquer la faible proportion des transformateurs enquêtés qui font le fumage des aulacodes.

4.3 ASPECT ÉCONOMIQUE DE LA TRANSFORMATION DE L'AULACODE ET DIFFICULTÉS RENCONTRÉES PAR LES TRANSFORMATEURS

L'activité de transformation de l'aulacode est une activité rentable selon la majorité des transformateurs. Toutefois, une proportion similaire de ceux-ci affirme que l'activité n'est pas rentable, l'absence de différence entre ces deux proportions peut être liée à la faible taille de l'échantillon de transformateurs enquêtés. Au nombre des facteurs qui influencent la rentabilité, le forma de l'aulacode transformé de même que le prix d'achat de l'animal vivant ou abattu sont les plus évoqués par les enquêtés. Les animaux de grand forma sont jugés plus rentables que les aulacodes de forma moyen. Ces animaux ont un poids vif supérieur à 2 kg. Ces résultats confirment ceux de [16] au Bénin et [45] au Nigéria. En effet, les animaux de grand forma sont plus charnus que les aulacodes de petits ou de moyen format. Pourtant, dans les restaurants, la viande cuite est souvent vendue en morceau. Une viande bien en chair permettra donc au transformateur d'avoir beaucoup de morceaux et d'y tirer beaucoup de bénéfice. Le constat fait dans cette étude avait été également fait par [18] dans une analyse de rentabilité économique de l'aulacodiculture au Nord-Bénin. La marge bénéficiaire réalisée par aulacode transformé pourrait permettre aux transformateurs de couvrir les charges annexes telles que la main-d'œuvre qui reste non évaluée et autres.

Bien qu'étant rentable, la transformation d'aulacode comme toute activité n'est pas sans difficulté pour les acteurs. La principale difficulté évoquée par les transformateurs est l'exposition à la fumée et au feu. Ceci est un indicateur des conditions de travail des transformateurs enquêtés. En dehors de cette difficulté, environ le tiers des transformateurs a évoqué comme difficulté la mévente. Ceci peut s'expliquer par le pouvoir d'achat des clients. En effet, le prix de vente d'un morceau d'aulacode transformé est de 689 F CFA en moyenne, ce qui n'est pas à la portée de tous les clients. Près du quart des enquêtés ont également évoqué comme difficulté la rareté de l'aulacode, cette rareté s'explique par le fait que la plupart des transformateurs transforment l'aulacode gibier, or la tendance actuelle est que l'aulacode gibier est de moins en moins fréquent dans les produits de chasse comme l'a révélé l'enquête auprès des chasseurs. Par ailleurs, afin de mieux exercer cette activité et faire sa promotion, la majorité des transformateurs sollicitent un appui financier contrairement à la minorité qui souhaiterait une création de marchés de vente, une mise au point de foyer moderne, des formations et une main-d'œuvre qualifiée.

4.4 CONSOMMATION DE LA VIANDE D'AULACODE AU SUD-BÉNIN

La quasi-totalité des consommateurs est des hommes. Un constat similaire a déjà été fait par [46] au Nigeria et d'après ces auteurs, cette prédominance est due au fait que les hommes mangent principalement au restaurant, en particulier lorsqu'ils déjeunent au travail, et qu'ils aiment aussi consommer de la viande de brousse. Selon les pratiques et/ou habitudes alimentaires au Sud-Bénin, la principale source de protéine animale est le poisson [41]. Ceci explique le fait que la quasi-totalité des consommateurs enquêtés ait mentionné le poisson comme source de protéines autre que la viande d'aulacode. Ceci montre que le poisson demeure la source de protéine préférée au Sud-Bénin à cause de sa disponibilité et de son coût abordable. En effet, d'après [41], après le poisson, les autres sources de protéines animales pour les populations au Sud-Bénin sont essentiellement la viande de brousse, la viande d'animaux domestiques. Bien qu'étant préférée au poisson et à la viande domestique, la viande de brousse est beaucoup moins souvent consommée et constitue environ le tiers des prises alimentaires de protéines animales. Outre le poisson, les viandes les plus fréquemment consommées au Sud-Bénin sont principalement celles de la volaille et du porc tandis qu'une infime minorité (4,41%) consomme fréquemment la viande d'aulacode. Ce déclassement de l'aulacode peut être dû au fait que sa viande est chère d'une part et est impliquée dans la transmission de certains virus et maladies d'autre part.

Consommer de la viande d'aulacode frite ou fumée est la principale préférence des consommateurs enquêtés. D'après [43] la viande d'aulacode est principalement mise sur le marché sous la forme frite et fumée, ceci confirme les préférences de consommation exprimées par les enquêtés dans cette étude. Un constat similaire avait déjà été fait par [18] au Sud-Bénin. De même, Fantondji [39] avaient également rapporté en Côte d'Ivoire que la plupart des populations préfèrent le gibier à l'état fumé, dont la préparation est plus aisée. Au Nord-Bénin, la consommation des aulacodes (issus de l'élevage) se fait entre 08 et 12 mois d'âge voire plus. Par ailleurs, les vieux reproducteurs sont également commercialisés [16]. Ceci confirme les résultats obtenus dans la présente étude selon lequel la plupart des consommateurs d'aulacodes enquêtés aiment principalement la viande des aulacodes ayant un âge supérieur à 6 mois et dont les carcasses sont principalement de grand format.

Un satisfécit est accordé à la viande d'aulacode consommée par la plupart des enquêtés, cela laisse penser que la viande d'aulacode disponible au Sud-Bénin, serait de bonne qualité. Toutefois, les recherches devraient être conduites sur les qualités nutritionnelles, sanitaires et microbiologiques de la viande d'aulacode livrée à la consommation au Bénin. Par ailleurs, la considération d'aulacode gibier comme étant agent vecteur du virus d'Ebola et Lassa par les consommateurs au Sud-Bénin, rapportés par le présent travail, confirme les résultats rapportés par [37]. Toutefois, c'est l'occasion de souligner que l'aulacode n'est guère un porteur tant du virus d'Ebola véhiculé plutôt par les primates [47] et [48] que du virus Lassa véhiculé par les *Mastomys spp* [49]. En effet, de telles déclarations et affirmations ont créé une psychose dans la population qui a desservi non seulement l'écoulement des aulacodes d'élevage mais aussi et surtout ont poussé plusieurs aulacodiculteurs à abandonner l'aulacodiculture [50], [51]. Pour la majorité des consommateurs enquêtés, la consommation de la viande de l'aulacode gibier pourrait favoriser le développement de goutte. Cependant, cette maladie n'est pas spécifiquement liée à la consommation de la viande d'aulacode. En effet, la consommation excessive et régulière de toute viande rouge riche en graisses saturées au même titre que celle de l'aulacode peut à terme entraîner une trop grande production d'acide urique que la capacité d'épuration de l'organisme ne peut gérer, ce qui pourrait prédisposer à l'apparition de goutte chez le consommateur [43].

5 CONCLUSION

L'étude explore les pratiques de chasse, de transformation et de consommation de la viande d'aulacodes d'élevage et de brousse au Sud-Bénin. Ainsi, l'aulacode gibier est le plus transformé et sa viande est la plus préférée des consommateurs bien qu'ils soient conscients des risques de maladie liés à la consommation de l'aulacode gibier. La forte demande d'aulacode gibier accentue la pression de chasse et entraîne une diminution du nombre d'aulacodes gibiers obtenus pendant la chasse. Ces aulacodes sont souvent abattus par fusillade et vendus directement pour la plupart aux clients. La transformation de l'aulacode est une activité rentable dans le Sud-Bénin. Elle se réalise principalement par fumage et friture, qui sont les modes de préparation les plus appréciés des consommateurs. Face à la demande croissante de la viande d'aulacode gibier, il urge de promouvoir l'aulacodiculture et les pratiques d'exploitation responsables des populations d'aulacodes sauvages à travers le repeuplement des zones de chasse par les aulacodes d'élevage et une réglementation de la chasse. Par ailleurs, les qualités nutritive et sanitaire de la viande aulacodes de brousse et d'élevage consommée dans le Sud-Bénin doivent être aussi évaluées et une étape de faisandage maîtrisée pourrait être introduite dans le procédé de transformation de la viande d'aulacode d'élevage afin de la rapprocher de la viande d'aulacode gibier de point de vue goût ou saveur.

REFERENCES

- [1] S. Ahmadi, S. Maman, R. Zoumenou, A. Massougbdji, M. Cot, P. Glorennec and F. Bodeau-Livinec, «Hunting, sale, and consumption of bushmeat killed by lead-based ammunition in Benin,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 15, no. 6, pp 1-12.
- [2] Coad L., Fa J.E., Abernethy K., Van Vliet N., Santamaria C., Wilkie D., El Bizri H.R., Ingram D.J., Cawthorn D.-M., Nasi R., *Towards a sustainable, participatory and inclusive wild meat sector*, CIFOR, 2019.
- [3] S. Friant, S.B. Paige, T.L. Goldberg, «Drivers of bushmeat hunting and perceptions of zoonoses in Nigerian hunting communities,» *PLoS Neglected Tropical Diseases* Vol. 9, no. 5, 2015.
- [4] A.S. Kehinde, K.M. Adelakun, S.K. Halidu, A.O. Bobadoye, T.O. Babatunde, B.O. Fadimu, «Nutrient qualities of selected bushmeat in New Bussa and its environs, Nigeria.,» *Ethiopian Journal of Environmental Studies & Management*, Vol. 13, no. 5, pp 579 – 587, 2020.
- [5] J.H. Wright, D. Malekani, S.M. Funk, J. Ntshila, L. Mayet, R. Mwinyihali, J.E. Fa, M. Wieland, «Profiling the types of restaurants that sell wild meat in Central African cities,» *African Journal of Ecology*, Vol. 60, pp 197–204, 2022.
- [6] S.M.-C.V. Sikpo, P.L. Sika, T.M. Koue-Bi, K.H. Yaokokore-Beibro, Richesse spécifique, abondance et biomasse de la faune sauvage dans la filière viande de brousse du marché du District de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 17 (2023) 1557–1573.
- [7] A.A. Alarape, R.B. Shuaibu, Z.B. Yaduma, «The impacts of bushmeat exploitations on the conservation of wildlife in Nigeria,» *Asian Journal of Social Science and Management Technology*, Vol. 3, pp 84–94, 2022.
- [8] Y.B. Agyeman, N. Nsiah, A.P. Pascal, A. OtiYeboah, «Hunting behavior and wildlife value orientations of farmer-hunters,» *Human Dimensions of Wildlife*, Vol. 28, pp 70–83, 2022.
- [9] G.G.A. Ahouanse, M. Gbankoto, H.S. HOUNGBEDJI, C.F.A. Salifou, I.O. Dotché, S. Farougou, G.A. Mensah, I.A.K. Youssao, «Assessment of hygiene of slaughter and distribution of bushmeat in Zogbodomey municipality,» *Theory and Practice of Meat Processing*, vol 9, pp 4–14, 2024.
- [10] C.A.M.S. Djaoun, E.A. Sogbohossou, B. Kassa, C.B. Ahouandjinou, H.A. Akpona, B. Sinsin, «Effectiveness of protected areas in conserving the highly hunted mammal species as bushmeat in Southern Benin,» *The Open Environmental Research Journal*, Vol., 11, pp 14–28, 2018.
- [11] R. Holzer, G.A. Mensah et R. Baptist, «Aspects pratiques en élevage d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus*). III. Comportement de coprophagie,» *Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire Des Pays Tropicaux*, Vol., 39, 247–252, 1986.
- [12] G.A. Mensah et R. Baptist, «Aspects pratiques en élevage d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus*). I. Modes d'accouplement et durée de la gestation,» *Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire Des Pays Tropicaux*, Vol. 39, pp 239–242, 1986.
- [13] G.A. Mensah, R. Holzer, W. Schröder et R. Baptist, «Aspects pratiques en élevage d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus*). II. Détection des chaleurs,» *Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire Des Pays Tropicaux* Vol. 39, pp 243–246, 1986.
- [14] G.A. Mensah, A. Schwarzenberg, C. Stier, T. Kangni, C. Gall, Aspects pratiques en élevage d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus*). VI. Mesures préventives contre la mauvaise usure des incisives, *Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire Des Pays Tropicaux* 49 (1996) 341–346.
- [15] J. Azéhoun-Pazou, A. Adégbidi, F. Biaou et G. Mensah, Circuits et acteurs de commercialisation de l'aulacode d'élevage dans les départements du Mono et du Couffo au sud-ouest du Bénin, *Bulletin de Recherche Agronomique du Bénin* Vol. 46, pp. 42–48, 2005.
- [16] E. Sodjinou, G. Mensah, Analyse technico-économique de l'aulacodiculture au Nord-Bénin: Déterminants d'adoption, *Bulletin de Recherche Agronomique du Bénin*, Vol., 57, pp (2007) 27–38.
- [17] E.R.C. Mensah, R. Mensah, S.C.B. Pomalègni, G.A. Mensah, P.J.E. Akpo, A. Ibrahimy, «Viabilité et financement des élevages d'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) au Bénin,» *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 5, pp. 1842–1859, 2011.
- [18] Y.B. Quenum, «Performances économiques de l'aulacodiculture au Bénin : étude de cas des départements du centre et du sud,» *Revue d'Economie Théorique et Appliquée*, Vol. 1, 119–138, 2011.
- [19] T.I. Sacramento, F. Aizoun, O.S. Sinabaragui, G.A. Mensah, J.-M. Ategbo, «Détermination de l'âge de l'aulacode (*Thryonomys swinderianus*),» *International Journal of Biological and Chemical Sciences* Vol. 7, pp. 1427–1440, 2013.
- [20] T.I. Sacramento, O.S. Sinabaragui, F. Aizoun, S. Farougou, G.A. Mensah, J.M. Ategbo, «Determination of grasscutter age (*Thryonomys swinderianus* Temminck, 1827) from anogenital distance,» *Journal of Applied Biosciences*, Vol. 62, pp. 4637–4643, 2013.
- [21] I.T. Sacramento, G.A. Mensah, J.-M. Ategbo, Determination of the age of grasscutter by the weight of the lens of the eye., 2023. [Online] <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230084095> (July, 2024).

- [22] I.T. Sacramento, G.A. Mensah, J.-M. Ategbo, «Comparative effect of lemon seeds and albendazole a veterinary anthelmintics on gastrointestinal parasites of farmed grasscutter: case of breeding grasscutter in southern Benin,» *Pharmacopée et Médecine Traditionnelle Africaine*, Vol., 21, pp. 36–45, 2022.
- [23] T.I. Sacramento, E. Agbodjento, F. Agbogba, J.-M. Ategbo, «Enquête ethno-vétérinaire et activité antiparasitaire des pépins de citron utilisés pour le traitement des affections parasitaires des aulacodes au Sud-Bénin,» *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 16, pp. 315-328, 2022.
- [24] S.C.B. Pomalegni, Digestibilité de granulés mixtes composés de fourrages et d'aliments concentrés chez l'aulacode (*Thryonomys swinderianus* Temminck, 1827) d'élevage, Mémoire de Fin d'études d'Ingénieur des Travaux de Production Animale CPU/UNB, 2001.
- [25] S.S. Toléba, A.K.I. Youssao, M. Dahouda, U.M.A. Missainhoun, G.A. Mensah, «Identification et valeurs nutritionnelles des aliments utilisés en élevage d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus*) dans les villes de Cotonou et Porto-Novo au Bénin,» *Bulletin de Recherche Agricole du Bénin*, Vol. 64, pp. 1–10, 2009.
- [26] F.F. Aïzoun, S.C.B. Pomalegni, S. Farougou, G.A. Mensah, «Synthèse bibliographique sur l'alimentation de l'aulacode d'élevage avec de granulés de fourrages verts au Bénin,» *Annales des Sciences Agronomiques* Vol., 19, pp. 389–400, 2015.
- [27] F.F. Aïzoun, S.C.B. Pomalegni, D.S.J.C. Gbèmanvo, S. Farougou, I.A.K. Youssao, G.A. Mensah, «Comparaison des performances de croissance chez l'aulacode d'élevage nourri avec trois types de rations alimentaires à base de fourrages, produits et sous-produits de maïs,» *Journal of Animal & Plant Sciences*, Vol. 32, pp 5168 – 5180, 2017.
- [28] E. Linton, C.F.A. Salifou, G.S. Ahounou, P.S. KIKI, G. Dasseya, S. Farougou, G.A. Mensah, Y.I.A. Youssao Abdou Karim, «Typology of Grasscutter (*Thryonomys swinderianus*) Farming in Southern Benin Two Decades after Its Domestication,» *Journal of Experimental Agriculture International*, Vol., 46 pp. 731–746, 2024.
- [29] C. Fargeot, «La chasse commerciale en Afrique centrale. II-Une activité territoriale de rente», *Bois & Forêts des Tropiques*, Vol. 283, pp 65–80, 2005.
- [30] CENAGREF/PAPE, Analyse de mise en œuvre de la catégorisation actuelle des Aires Protégées du Bénin et Proposition d'une nouvelle catégorisation des Aires Protégées de la République du Bénin selon les nouvelles lignes directrices de l'UICN, Mission d'appui, Rapport d'étape, 2013.
- [31] G.A. Lameed, J.K. Omifolaji, A.S. Abere, S.O. Ilori, «Hunting intensity on wildlife population in Oban sector of Cross River National Park,» *Natural Resources*, Vol. 6, pp. 325–330, 2015.
- [32] H. Yasuoka, «Snare hunting among Baka hunter-gatherers: implications for sustainable wildlife management,» *African Study Monographs*, Vol, 49, pp. 115–136, 2015.
- [33] R. Duda, S. Gallois, V. Reyes-Garcia, «Hunting techniques, wildlife offtake and market integration. A perspective from individual variations among the Baka (Cameroon),» *African Study Monographs*, Vol 38, 97–118, 2017.
- [34] Y.B. Agyeman and S. Baidoo, «Farmers perceptions of the effectiveness of strategies for managing wildlife crop depredation in Ghana,» *International Journal of Biodiversity and Conservation*, Vol. 11, pp 165–174, 2019.
- [35] F. Bodeau-Livinec, P. Glorennec, M. Cot, P. Dumas, S. Durand, A. Massougbojji, P. Ayotte, B. Le Bot, «Elevated blood lead levels in infants and mothers in Benin and potential sources of exposure,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 13, pp. 1-14, 2019.
- [36] UNEP-WCMC, *Checklist of CITES species*. CITES Secretariat, Geneva, Switzerland and UNEP-WCMC, Cambridge, United Kingdom, 2021.
- [37] P. Riffier, Fumeuses de poisson à Abidjan : entre pirogues et sardinières. Les nouvelles dynamiques de la filière sardinière. Mémoire de fin d'études en économie et politique maritime. Rennes: Ecole nationale supérieure agronomique de Rennes, 1998.
- [38] A. Fantodji, D. Soro, L'élevage d'aulacodes : Expérience en Côte d'Ivoire, Expérience En Côte d'Ivoire. Edition Gret, Ministère Des Affaires Étrangères, Programme Agridoc. Paris, France, 2004.
- [39] C. Monligui, Itinéraire technique de production et qualité microbiologique de la viande d'aulacode (*Thryonomys swinderianus*) commercialisée dans la commune d'Allada (Sud-Bénin), EPAC/UAC/CAP, 52p., 2018.
- [40] J.T.C. Codjia, A.E. Assogbadjo, «Faune sauvage mammalienne et alimentation des populations holli et fon de la forêt classée de la Lama (Sud-Bénin),» *Cahiers Agricultures*, Vol. 13, pp. 341–347, 2004.
- [41] M. Teye, A. Fuseini, F.N.A. Odoi, «Consumer acceptance, Carcass and sensory characteristics of meats of farmed and wild cane rats (*Thryonomys swinderianus*),» *Scientific African*, Vol., 8, pp 1-9, 2020.
- [42] G. Mensah, O. Koudande, E. Mensah, «Captive breeding and improvement program of the larger grasscutter (*Thryonomys swinderianus*),» *Bulletin de La Recherche Agronomique du Bénin*, Vol. 56, pp. 18–23.
- [43] A. Salifou, K.A.I. Gade, G.S. Ahounou, P.S. Kiki, G.S. Ahounou, F.E.T. Houessou, C. Claude, A.K.I. Youssao, Chaînes de distribution de la viande bovine et des petits ruminants dans le Département du Littoral et ses environs au Sud-Bénin, Bulletin de La Recherche Agronomique Du Bénin (BRAB) 32 (2022) 80–87.
- [44] A.A. Adewumi, E.E. Ofuya, M.K.A. Wahab, «Economic Analysis of Grass Cutter Raised In Captivity in Osun and Oyo State, Nigeria,» *Scientific Reports in Life Sciences*, Vol., 2, pp 1–7, 2007.

- [45] O. Akinsorotan, K. Idris-Adeniyi, O. Alabi, «Profile of Wildlife Animals Meat (Bush Meat) Consumers in Southwest, Nigeria,» *International Journal of Family and Consumer Sciences*, Vol. 10, pp. 9–22, 2021.
- [46] L. Duonamou, «Influence de la fièvre hémorragique Ebola sur la consommation de la viande de gibier à Guéasso en République de Guinée: quelle implication pour une politique de conservation de la faune, Faculté Des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi 2015.
- [47] H. Feldmann, T.W. Geisbert, «Ebola haemorrhagic fever,» *The Lancet*, Vol., 377, pp. 849–862, 2011.
- [48] R.R. Kasarla, A. Verma, N. Bhandari, L. Pathak, «Ebola Haemorrhagic Fever: An Overview,» *Janaki Medical College Journal of Medical Science*, Vol., 12, pp. 71–77, 2024.
- [49] J.B. McCormick, P.A. Webb, J.W. Krebs, K.M. Johnson, E.S. Smith, «A prospective study of the epidemiology and ecology of Lassa fever,» *Journal of Infectious Diseases*, Vol, 155, pp. 437–444, 1987.
- [50] K. Degla, S. Mama, G. Kpadonou, O. Adjibi, G. Aguenounon, «Analyse de l'incidence financière de l'apparition des Epidémies d'Ebola et de Lassa sur la chasse à la battue dans les périphéries de la commune de Parakou au Nord-Bénin,» *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol, 29, pp. 172–183, 2017.
- [51] O. Ibitoye, O. Kolejo, G. Akinyemi, «Burgeoning and domestication of grasscutter (*Thryonomys swinderianus*) in a post-Ebola era: a reassessment of its prospects and challenges in Nigeria,» *World Scientific News*, Vol. 130, pp. 216–237, 2019.

IMPACT OF MODERATE BLOOD ALCOHOL CONTENT ON THE EXPLICIT LEARNING OF A LIST OF WORDS IN YOUNG SCHOOLCHILDREN IN THE CITY OF ABIDJAN (CÔTE D'IVOIRE)

Koffi Serge Pacôme Kouadio¹, Emmanuel Diboh², Seydou Silue¹, and Antoine Némé Tako¹

¹Biology and Health Laboratory, Biosciences Training and Research Unit (UFR), Félix Houphouët Boigny University, Abidjan, Côte d'Ivoire

²Animal Physiology Unit, Environment Training and Research Unit (UFR), Jean Lorougnon Guédé University, Daloa, Côte d'Ivoire

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

ABSTRACT: Excessive alcohol consumption is associated with health, social and school problems. As for moderate drinking, opinions differ depending on authors. Taking account of the way young people drink alcohol and their particular sensibilities to alcoholism at neuroanatomical level, we are led to wonder about the impact of moderate alcohol consumption on their cognitive abilities. The aim of this study was to evaluate the effects of moderate alcohol consumption on memory capacity, and more specifically on explicit learning capacity using the California Verbal Learning Test (CVLT) that is to say a memory test for young people. To do this, 56 young people were selected and divided into four groups including one control group (with a blood alcohol content of 0.0 g/l) and three experimental groups (with blood alcohol contents of 0.2, 0.5 and 0.8 g/l). Each group comprised two sub-groups (occasional and regular drinkers). Participants were subjected to a neuropsychological test, namely learning words from list A of the CVLT. The results of this study showed that alcohol consumption, even in moderate doses, significantly perturb immediate memory, thereby significantly reducing the ability to learn words for occasional drinkers (OD), especially when the blood alcohol content is 0.8 g/l. It also appears that regular drinkers (RD) are better able to tolerate the acute effects of alcohol, when blood alcohol contents are above 0.5 g/l. Schoolchildren are therefore advised to avoid drinking even at moderate dose in the school environment.

KEYWORDS: CVLT, moderate drinking, consumers, learning, young people.

1 INTRODUCTION

The ability to learn is essential to adapt and to blossom in this constantly changing world. This cognitive ability (learning process) is essential for students in academic institutions. However, behaviours such as excessive consumption can damage the structure and functioning of brain, leading to death, health trouble and social problems [1], [2], as well as having an impact on young people's academic results. This type of consumption is linked to bad marks in class [3], [4] or even school abandonment [5]. It also causes profound structural damage, such as the reduction of frontal cortical areas and the cerebellum, which are important structures for learning [6], [7]. The toxic effects of alcohol on the brain have been demonstrated by medical imaging and a reduction in grey matter has been observed in alcohol-dependent individuals [8]. The more alcohol consumption begins early, the greater is grey matter alteration [9]. The problems caused by alcohol consumption on school performance are far from being resolved, especially as, according to [10], pupils drink alcohol in pub that are dangerously close to schools, in a climate of general indifference.

Even if there is a consensus on the harmful consequences of excessive alcohol consumption by young people, there is no consensus on the effects of moderate alcohol consumption, and there are contradictions between authors. Research has shown that a blood alcohol content of 0.5 g/l (corresponding to the consumption of two standard glasses of alcohol) is sufficient to impair performance on cognitive tasks [11]. In contrast, [12] and [13] concluded that moderate alcohol consumption had a

beneficial effect on cognitive performance such as problem solving with young people. Very little research has been carried out on this issue in Africa, and particularly in Côte d'Ivoire. However, taking into account of particular neuroanatomical sensibility of young drinkers [14] and the large number of regular drinkers among students, estimated at 20.04% according to [15] in the city of Abidjan (Côte d'Ivoire), one might naturally wonder what consequences moderate alcohol consumption (BAC ≤ 0.8 g/l) might have on young people's ability to learn. The aim of this study is therefore to provide some answers about the impact of moderate drinking, corresponding to the ingestion of one to three standard glasses of alcohol, on explicit cognitive learning, using the California Verbal Learning Test (CVLT) memory test in these schoolchildren.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 PARTICIPANTS

For this study, 56 participants were recruited using a non-random sampling method (convenience sampling) and divided into four groups including a control group (T) and three experimental groups (E1, E2 and E3). Participants in groups E1 ($n = 15$), E2 ($n = 14$) and E3 ($n = 13$) drink quantities of alcohol solution in order to obtain approximate blood alcohol content (BAC) of 0.2 g/l, 0.5 g/l and 0.8 g/l respectively. Participants in the T control group ($n=14$) did not drink any alcohol in this study (BAC of 0.0 g/l). Each group was made up of occasional drinkers (OD) and regular drinkers (RD). The OD were 8 in T control group, 9 in group E1, 7 in group E2 and 6 in group E3. The RD were 6 in group T, 6 in group E1, 7 in group E2 and 7 in group E3. All the participants (average age = 20.2 ± 3.4 years; average mass = 62.1 ± 6.3 kilograms) were males. All participants were in good physical and mental health, to have drunk at least alcohol once, and to be able to read and write. People with hypersensitivity to alcohol or with metabolic or cognitive disorders, were excluded.

2.2 TECHNICAL MATERIAL

The technical material consisted of pure ethanol (99.8%), distilled water, an aroma to improve the palatable taste of solutions; a graduated test tube; a weighing scale; a laptop computer; a drinking glass and list A of CVLT (California Verbal Learning Test).

2.3 PREPARATION AND ADMINISTRATION OF THE ALCOHOL SOLUTION

On the day of the test, participants have to be sober for at least 24 hours and without having eaten for at least eight hours to allow rapid absorption of the alcohol [16], [17]. The test took place in a room isolated from all outside influences. The informed consent of each participant, was obtained in advance. Following an interview, participants who reported drinking five or more glasses of alcohol at least once a week were classified as regular drinkers and those who reported drinking three to four glasses at least once a month were classified as irregular drinkers [18], [10]. The mass of each participant was then determined using a weighing scale, in order to determine the quantity of drink to be ingested. The alcoholic solution absorbed by the participants had an ethanol concentration of 40%. It was prepared by diluting ethyl alcohol (99.8%) with distilled water using the following formula:

$$Ci \times Vi = Cf \times Vf$$

Ci = initial alcohol concentration

Vi = initial alcohol volume

Cf = final alcohol concentration

Vf = final volume of alcohol

From the alcoholic solution, the mass of the participants and the desired BAC, which depends on the group assigned, the volume of drink to be absorbed by the participant is determined according to Widmark's formula [19]:

$$T = \frac{V \times P \times 0.8}{K \times M}$$

Hence :

$$V = \frac{T \times K \times M}{P \times 0.8}$$

T = approximate blood alcohol content value

V = volume of alcohol consumed by the individual in ml

M = mass of the individual in kg

K = diffusion coefficient (K = 0.7 for men and k = 0.6 for women)

P = percentage of alcohol (40%)

2.4 = DENSITY OF ETHANOL.

Participants were given five minutes to drink the experimental alcohol solution. The tests were carried out 15 minutes after drinking alcohol.

2.5 EVALUATION OF EXPLICIT LEARNING ABILITY

The ability to learn words was assessed using the California Verbal Learning Test (CVLT). The CVLT is a memory test based on the 15-word test model of Rey [20]. It is composed of two lists of 16 words (list A and list B) belonging to four distinct semantic categories (in our case: spice, clothing, tool and fruit) and a recognition list of 40 words containing the 16 words from list A. List A is the list to be learned, while list B is an interference list. The normal procedure is as follows:

- Five immediate free recalls (after reading all the words in list A);
- An immediate free recalls from list B;
- One free recall from list A;
- An indexed recall (the indexes are made up of the categories) from list A;
- A retention interval of 15 or 20 minutes;
- Delayed free recall from the A list;
- Delayed indexed recall of the A list;
- Recognition of the words in list A among the words in the recognition list.

In the present study, only list A was used. The words in list A are: pincers, grape, jacket, pepper, orange, chili pepper, tie, drill, ginger, mandarin, chisel, coat, mustard, grapefruit, hammer, waistcoat.

The study consisted of presenting the words from list A five times in succession, followed by their immediate recall after each presentation. The words were presented at a rate of one per second. Participants were instructed to recall as many words as possible, in any order. The participant also had to recall the words, even if they had already been recalled on the previous trial. The data collected were the number of words from list A correctly recalled on each trial.

2.6 VARIABLES

The study variables were:

- The classification (or treatment) variables which are the groups (T; E1; E2; E3) and the drinker categories (OD; RD) and
- The dependent variable corresponding to the number of words correctly recalled on the five CVLT A-list trials.

2.7 STATISTICS

The data collected was first entered into a spreadsheet (created using Microsoft Excel 2016), then transferred and processed using STATISTICA® 7.1 software. This was used to generate graphs and compare the average performance of the different groups (T, E1, E2 and E3) using the Kruskal-Wallis Test (non-parametric test). To analyse performance between categories (OD; RD), the Mann-Whitney U Test (non-parametric test) was used. The probability (p) of 0.05 is considered to be the limit of significance. Thus, if 'p' is less than or equal to 0.05, the difference between the compared averages is significant. However, if 'p' is higher than 0.05, then the difference between the compared average is not significant.

3 RESULTS

3.1 COMPARISONS OF PERFORMANCE BETWEEN GROUPS

Analysis of performance (number of words correctly recalled on the five trials in list A) revealed significant differences between groups ($H(3,56) = 15.14$; $p = 0.002$) (Figure 1). In detail (multiple comparisons), the analysis reveals that the average performance of individuals in group T (51.93 ± 2.43) is significantly higher than that of individuals in group E3 (44.54 ± 5.80) ($p = 0.030$). Similarly, the average performance of participants in group E1 (52.73 ± 7) was significantly higher than that of participants in group E3 (44.54 ± 5.80) ($p = 0.015$). This analysis also revealed that the average performance of individuals in group E2 (54.43 ± 6.67) was significantly higher than that of participants in group E3 (44.54 ± 5.80) ($p = 0.002$). However, participants in groups T, E1, and E2 performed almost identically (not significantly different) ($p > 0.05$).

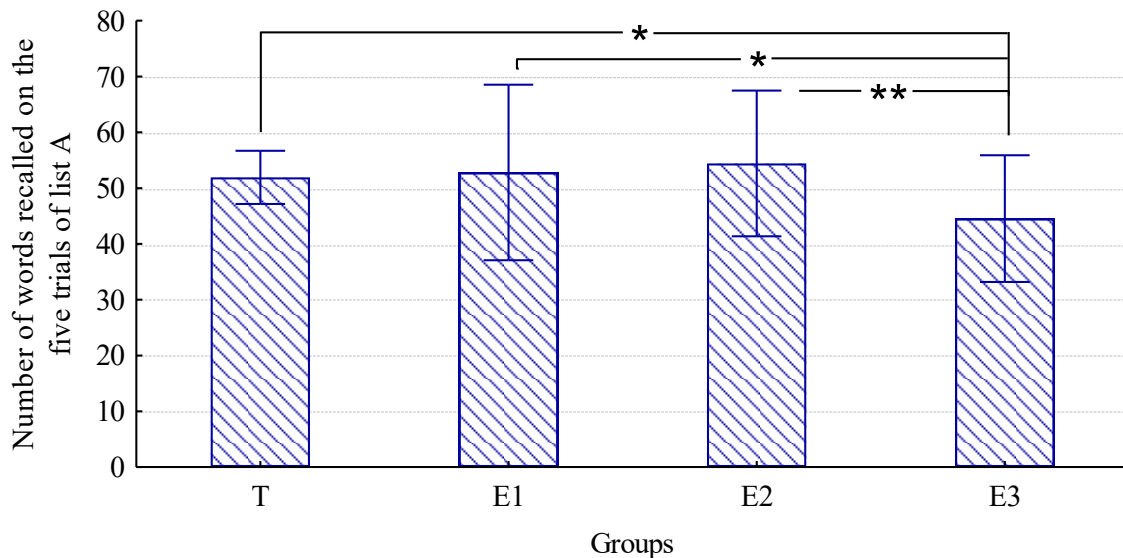


Fig. 1. Overall learning value according to each group

The average performance of participants in group E3 was lower than that of the other groups ($p \leq 0.05$).

The statistical meanings shown in the figures are coded as follows:

* : $p \leq 0.05$; ** : $p \leq 0.01$

3.2 COMPARISONS OF PERFORMANCE BETWEEN GROUPS FOR OCCASIONAL DRINKER (Od)

Analysis of the performance of the occasional drinkers (OD) indicates that at least two groups differ significantly ($H(3,30) = 14.83$; $p = 0.002$) (Figure 2 A). Multiple comparisons revealed a highly significant difference between group T (52.13 ± 1.13) and group E3 (41.17 ± 1.47) ($p = 0.002$). The analysis also revealed that the average performance of individuals in group E3 (41.17 ± 1.47) was significantly lower than that of individuals in group E1 (51.56 ± 2.92) ($p = 0.016$). Similarly, the performance of individuals in group E2 (52 ± 5.00) was significantly better than that of individuals in group E3 (41.17 ± 1.47) ($p = 0.028$). The other inter-group comparisons did not give significant results ($p > 0.05$).

3.3 COMPARISONS OF PERFORMANCE BETWEEN GROUPS FOR REGULAR DRINKER (RD)

At the level of regular alcohol drinker (RD), analysis of overall performance showed no statistically significant differences ($H(3,26) = 6.33$; $p = 0.096$) (Figure 2 B).

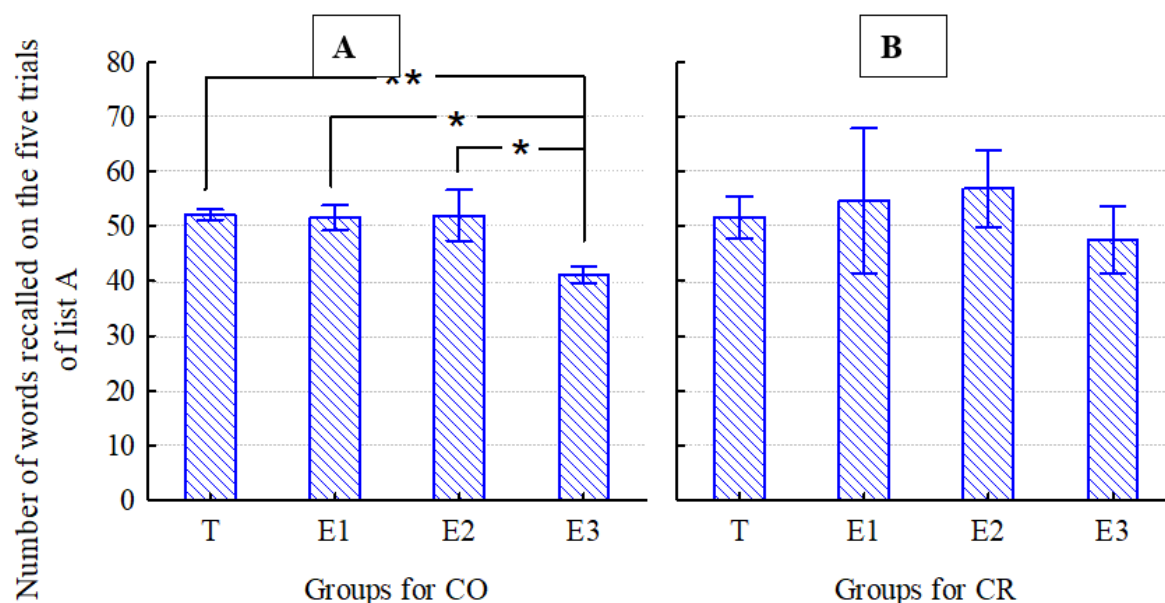


Fig. 2. Overall learning value as a function of group for the OD and CR categories

The average performance of participants in group E3 was lower than that of the other three groups for OD. For RD, the performances of the four groups are not statistically different.

The statistical meanings shown in the figures are reported as follows:

*: $p \leq 0.05$; **: $p \leq 0.01$

3.4 COMPARISONS OF PERFORMANCE BETWEEN CATEGORIES IN GROUPS T, E1, E2 AND E3

Table I shows the results of performance comparisons between occasional drinker (OD) and regular drinker (CR) in the different experimental groups (T, E1, E2 and E3). The results show that there were no significant differences between the categories for the different groups ($p < 0.05$).

Table 1. Results of analyses between CO and CR for groups T, E1, E2 and E3

Groups	Means $\pm$ Standard deviation		P	Significance
	OD	RD		
T	52,13 $\pm$ 1,13	51,67 $\pm$ 2,61	0.662	ns
E1	51,56 $\pm$ 2,92	54,67 $\pm$ 8,03	0.388	ns
E2	52,00 $\pm$ 5,00	56,86 $\pm$ 7,86	0.128	ns
E3	41,17 $\pm$ 1,47	47,43 $\pm$ 7,85	0.073	ns

ns: not significant

There was no difference between the categories (OD and RD) for each of the groups (T, E1, E2 and E3). Moreover, the RD participants performed better than the OD one, although these differences were not significant.

4 DISCUSSION

The aim of this study was to evaluate the effects of moderate blood alcohol content ($BAC \leq 0.8$ g/l) on learning ability in young people, using the California Verbal Learning Test (CVLT). This blood alcohol content corresponds to consumption of one or three standard glasses of alcohol. Young non-alcohol-dependent drinkers were selected and divided into four groups: a control group (non-alcohol drinkers) and three experimental groups ($BAC = 0.2$ g/l, 0.5 g/l and 0.8 g/l). To comply with the recommendations of [21], the participants were all male. [22] have studied the vulnerability of women to alcohol, showing that the hormonal changes caused by the menstrual cycle do not allow effective conclusions to be drawn in the case of inter-

group comparisons. In addition, it is well known that women (girls) tolerate alcohol less well than boys, due to their water deficit compared to men, since alcohol is miscible with water [23].

The results of this study show that moderate alcohol consumption significantly reduces the number of words learned by these young people. In addition, the performance of control participants was significantly better than that of occasional drinkers. These results are in accordance with those of [24], [25], who indicate that alcohol alters most brain functions. Similarly, according to an analysis conducted by [26], alcohol consumption significantly affects working memory. The learning difficulties caused by alcohol consumption can be explained by disruptions to the neuronal circuits involved in memory processes. [27] indicate that alcohol reduces memory capacity (especially when blood alcohol content exceed 0.5 g/l), particularly during explicit memory tasks. This performance drop, in the case of alcohol intoxication, is caused by a poor transfer of information from short-term to long-term memory [28]. [10] reached a similar conclusion when he found a disturbance in attentional and memory performance (with a blood alcohol level of 0.8 g/L) in occasional drinker of "Koutoukou". "Koutoukou" is a local alcoholic beverage with a high alcohol content, produced by distilling the fermented sap of the palm tree (*Elaeis guinéensis* Jacq.). In addition to the ethanol common to all alcoholic beverages, it contains other alcohols such as methanol, butanol and propanol [29]. According to [30], a blood alcohol content of 0.50 g/l doubles the probability of an accident. It has been shown that, for such a dose of alcohol, a number of disorders capable of impairing the performance of cognitive tasks were observed. In particular, reaction times were lengthened and the visual field narrowed, especially when pursuing targets [31]. However, it is currently thought that the risks of accidents linked to alcohol consumption are mainly due to its disinhibiting effect, which has the effect of modifying risk-taking behaviour [32].

The results also show that participants in group E3 (with a BAC of 0.8 g/l) have significantly lower performance than those in the other groups (with BAC below 0.8 g/l). These results suggest that a blood alcohol content of 0.8 g/l constitutes a limit which, once exceeded, causes significant impairment of cognitive performance. For some authors, this value represents the threshold for acute alcohol intoxication [33], [34].

Another key fact of this study was observed. The performance of regular alcohol drinker (RD) did not appear to be impaired at any BAC considered. Moreover, within each group, the performance of the RD was better than that of the OD and even the control group, especially at BAC of 0.2 g/l and 0.5 g/l. However, this difference was not statistically significant and could be explained by the phenomenon of tolerance induced by prolonged exposure to alcohol and resulting from reactive cerebral homeostasis mechanisms [35], [36], [37]. Low-dose alcohol causes behavioural disinhibition [38] and reduces stress. This could improve cognitive performance (such as planning). These results tend to confirm the hypothesis put forward by a number of authors, including [39], [40], [41], that alcohol has beneficial effects on cognition.

It is also important to emphasise the variability of effects from one person to another, influenced by drinking habits [42]. [43] also assure that the effects of alcohol depend on the state of mind at the time. For someone who was already sad, angry or stressed before drinking, having a little alcohol may initially make them feel better. But this effect may then be reversed, and they may soon find themselves even sadder or angrier [44].

5 CONCLUSION

In this study, the aim was to assess the effect of moderate alcohol consumption (one to three standard glasses of alcohol) on the learning ability of schoolchildren, using a memory test, the CVLT (California Verbal Learning Test). The results show that moderate-dose alcohol consumption significantly disrupts immediate memory, reducing the ability to learn words among occasional drinkers (OD), especially when the blood alcohol content is 0.8 g/l. It also appears that regular drinkers (RD) are better able to tolerate the acute effects of alcohol, when BAC exceeds 0.5 g/l. For the time being, schoolchildren are advised to avoid drinking even moderate amounts of alcohol at school.

REFERENCES

- [1] Schneider M., Norman R., Parry C., Bradshaw D., Pluddemann A. Estimating the burden of disease attributable to alcohol use in South Africa in 2000. *South Africa medical journal*; 97 (8): 664-672, 2007.
- [2] Ramsoomar L., Morojele N.K. Trends in alcohol prevalence, age of initiation and association with alcohol-related harm among South African youth: implications for policy. *South Africa medical journal*. 102 (7): 609-612, 2012.
- [3] Feldstein Ewing S.W., Sakhardande A., Blakemore S-J. The effect of alcohol consumption on the adolescent brain: a systematic review of MRI and fMRI studies of alcohol-using youth. *NeuroImage Clinical*, 5: 420-437, 2014.
- [4] Latvala A., Rose R.J., Pulkkinen L., Dick D.M., Korhonen T., Kaprio J. Drinking, smoking, and educational achievement: Cross-lagged associations from adolescence to adulthood. *Drug Alcohol. Depend.* 137: 106-113, 2014.

- [5] Kelly A.B., Evans-Whipp T.J., Smith R., Chan G.C.K., Toumbourou J.W., Patton G.C., Hemphill S.A., Hall W.D., Catalano R.F. A longitudinal study of the association of adolescent polydrug use, alcohol use and high school non-completion. *Addiction*; 110 (4): 627-635, 2015.
- [6] Monti P.M., Miranda R. Jr, Nixon K., Sher K.J., Swartzwelder H.S., Tapert S.F., White A., Crew F.T. Adolescence: booze, brains, and behavior. *Alcoholism, Clinical and Experimental Research*, 29 (2): 207-220, 2005.
- [7] Lisdahl K.M., Thayer R., Squeglia L.M., McQueeney T.M., Tapert S.F. Recent binge drinking predicts smaller cerebellar volumes in adolescents. *Psychiatry Research*, 211 (1): 17-23, 2013.
- [8] Chanraud S., Martelli C., Delain F., Kostogianni N., Douaud G., Aubin H.J., Reynaud M., Martinot J.L. Brain morphometry and cognitive performance in detoxified alcohol-dependents with preserved psychosocial functioning. *Neuropsychopharmacology*; 32 (2): 429-438, 2007.
- [9] INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale). Communiqué de presse: Une étude en neuro-imagerie confirme les conséquences de l'alcool sur le cerveau; 78 p, 2006.
- [10] Diboh E. Effets d'une alcoolisation aigue au Koutoukou sur l'attention et la mémoire des jeunes scolarisés de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët - Boigny, 192p, 2014.
- [11] West R., Wilding J., French D., Kemp R., Irving A. Effect of low and moderate doses of alcohol on driving hazard perception latency and driving speed. *Addiction*, 88 (4): 527-532, 1993.
- [12] Baum-Baicker C. The psychological benefits of moderate alcohol consumption: a review of the literature. *Drug and Alcohol Dependence*, 15 (4): 305-322, 1985.
- [13] Peele S., Brodsky A. Exploring psychological benefits associated with moderate alcohol use: a necessary corrective to assessments of drinking outcomes? *Drug Alcohol Dependence*, 60 (3): 221-247, 2000.
- [14] Spear L.P. Effects of adolescent alcohol consumption on the brain and behaviour. *Nature Reviews Neuroscience*; 19 (4): 197-214, 2018.
- [15] Diboh E, Yao KM, Tako NA, Bakou NF, Assi B. Alcoolisation chez les jeunes élèves en Côte d'Ivoire: préférence et consommation effective. *European Scientific Journal*, 9: 380-393, 2013.
- [16] Haber P.S., Gentry R.T., Mak K.M., Mirmiran-Yazdy S.A., Greenstein R.J., Lieber C.S. Metabolism of alcohol by human gastric cells: Relation to first-pass metabolism. *Gastroenterology*. 111 (4): 863-870, 1996.
- [17] Song Y., Zhang S., Kang J., Chen J. and Cao Y. Water absorption dependence of the formation of poly (vinyl alcohol) -iodine complexes for poly (vinyl alcohol) films. *Royal Society of Chemistry Advances*. 11 (46): 28785-28796, 2021.
- [18] Cahala D, Cisin IH. American drinking practices: Summary of finding from a national probability sample. I. Extent of drinking by population Subgroups. *Qstud Alcohol*, 29: 130-151, 1968.
- [19] Widmark E.M.P. Die theoretischen grundlagen und die praktische Verwendbarkeit der gerichtlichmedizinischen alkoholbestimmung. *Fortschritte der naturwissenschaftlichen forschung*, Neue Folge, Berlin 11: 140, 1932.
- [20] Rey A. L'examen clinique en psychologie. 2ème Edition, Presses Universitaires de France, Paris (France). Volume 1. 222 p, 1964.
- [21] Ettorre E. Revisioning women and drug use: gender sensitivity, embodiment and reducing harm. *International Journal of Drug Policy*, 15 (5): 327-335, 2004.
- [22] Perry BL., Miles D., Burruss K., Svikis D. S. Premenstrual symptomatology and alcohol consumption in college women. *Journal of Studies on Alcohol*, 65 (4): 464-468, 2004.
- [23] Yao M., Adou J-B., Camara P., Bakou F., Tako A. et Seri B. Effets comparés de l'alcoolisation aigue au koutoukou de vin de palme (boisson alcoolique artisanale) et au pastis 45 (boisson alcoolique industrielle) sur la mémoire, chez l'homme. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 5 (3): 1073-1081, 2011.
- [24] Weiss E., Singewald E.M., Ruepp B., Marksteiner J. Alcoholinduced cognitive deficits. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, 164 (1-2): 9-14, 2014.
- [25] Harnett P.H., Lynch S.J., Gullo M.J., Dawe S., Loxton N. Personality, cognition and hazardous drinking: Support for the 2-Component Approach to Reinforcing Substances Model. *Addictive Behaviors*., 38 (12): 2945-2948, 2013.
- [26] Spinola S., De Vita M. J., Gilmour C. E. Effets de l'administration d'alcool aigu sur la mémoire de travail: examen systématique et méta-analyse, *Psychopharmacologie (Berl)*, 239 (3): 695-708, 2022.
- [27] Duka T., Weissenborn R., Dienes Z. State-dependent effects of alcohol on recollective experience, familiarity and awareness of memories. *Psychopharmacology*, 153 (3): 295-306, 2001.
- [28] Khan, A.U. Clinical disorders of memory. Plenum Medical Book Co., NewYork, 272 p, 1986.
- [29] Camara P.A. Alcoolisation au koutoukou en Côte d'Ivoire: constat et propositions. *Alcoologie et Addictologie*, 24 (4): 319-328, 2002.
- [30] Jongen S., Vermeeren A., Van der Sluiszen N.N., Schumacher M.B., Theunissen E.L., Kuypers K.P., Vuurman E.F., Ramaekers J.G. A pooled analysis of on-the-road highway driving studies in actual traffic measuring standard deviation of lateral

- position (i.e., «weaving») while driving at a blood alcohol concentration of 0.5 g/L. *Psychopharmacology*, 234: 837–844, 2017.
- [31] Berry R.A., Denton W.J. Tobacco-Alcohol Amblyopia: Combined Toxic and Nutritional Optic Neuropathy. *Clinical & Refractive Optometry* 31 (2): 220-224, 2021.
 - [32] Wickens C.M., Flam-Zalcman R., Mann R.E., Stoduto G., Docherty C., Thomas R.K. Characteristics and predictors of recidivist drink-drivers. *Trafic injury prevention*, 17 (6): 564-572, 2016.
 - [33] Parker, A.J., Marshall, E.J., Ball, D.L. Diagnosis and management of alcohol use disorders. *British medical journal*, 336 (7642): 496-501, 2008.
 - [34] Kelly, E.C., John, P. Binge Drinking Effects on EEG in Young Adult Humans. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7 (5): 2325-2336, 2010.
 - [35] Goldstein A., Judson B.A. Alcohol dependence and opiate dependence: lack of relationship in mice. *Science*, 172 (3980): 290-292, 1971.
 - [36] Clapp P., Bhav S. V., Hoffman P. L. How Adaptation of the Brain to Alcohol Leads to Dependence: a pharmacological perspective. *Alcohol Research and Health*. 31 (4): 310–339, 2008.
 - [37] Kim S. Y., Jeong S. H., Park E-C. Age at onset of alcohol consumption and its association with alcohol misuse in adulthood. *Neuropsychopharmacology Reports*.43 (1): 40-49, 2023.
 - [38] INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale). Alcool: effets sur la santé. Rapport, Paris, France, 358 p, 2001.
 - [39] Mukamal K.J., Rimm E.B. Alcohol consumption: Risks and benefits. *Current Atherosclerosis Reports*, 10 (6): 536-543, 2008.
 - [40] Fernandez-Sola J. Cardiovascular risks and benefits of moderate and heavy alcohol consumption. *Nature Reviews Cardiology*, 12 (10): 576–587, 2015.
 - [41] Lundgaard I., Wang W., Eberhardt A., Vinitsky H.S., Reeves B.C., Peng S., Lou N., Hussain R., Nedergaard M. Beneficial effects of low alcohol exposure, but adverse effects of high alcohol intake on lymphatic function, *Scientific reports*, 8 (1): 2246, 2018.
 - [42] Aseltine R.H. and Gore S.L. The Variable Effects of Stress on Alcohol Use from Adolescence to Early Adulthood. *Substance Use & Misuse*, 35 (5): 643-668, 2000.
 - [43] Wanner P.B., Vitaro F., Ladouceur R., Brendgen M., Tremblay R.E. Joint trajectories of gambling, alcohol and marijuana use during adolescence: A person- and variable-centered developmental approach. *Addictive Behaviors*, 31 (4): 566-580, 2006.
 - [44] Ballway J.W. and Song B.J. Translational Approaches with Antioxidant Phytochemicals against Alcohol-Mediated Oxidative Stress, Gut Dysbiosis, Intestinal Barrier Dysfunction, and Fatty Liver Disease. *Antioxidants*, 10 (3): 1-34, 2021.

Caractérisation pétro-structurale du terrane panafricain de Tchilit dans le secteur de Gofat-Tafadek (Massif de l'Aïr, Nord Niger)

[Petro-structural Characterization of the Pan-African Terrane of Tchilit in the Gofat-Tafadek Area (Aïr Massif, Northern Niger)]

Abdoul Ganiou Amadou Salissou¹, Ibrahim Maharou Hassan¹, Sanda Chekaraou Mahamane Moustapha², Mallam Mamane Hallarou¹, Fozing Eric Martial³, and Konate Moussa¹

¹Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de géologie, Laboratoire de Géologie: Equipe Bassins et Géoressources, Niamey, Niger

²Université Djibo Hamani, Faculté de l'Education, Département de didactique de discipline, Thaoua, Niger

³Université de Dschang, Faculté des Sciences, Département des sciences de la Terre, Dschang, Cameroon

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

ABSTRACT: This study focuses on the petro-structural characterization of the Pan-African terrane of Tchilit in the Gofat-Tafadek sector, within the Aïr Massif (Northern Niger). The Aïr Massif consists of metamorphic rocks intruded by granitoids. Previous works related to the petrographic characterization and structural analysis of the Pan-African terrains in this region are superficial and fragmentary. The general objective of this study is to analyze the petro-structural characteristics of the Pan-African formations. Specifically, the study aims to: (i) determine the petrographic characteristics of different facies, (ii) identify the deformation structures that have affected them, and (iii) establish a relative chronological relationship between the main deformation phases. To achieve these objectives, a methodological approach was implemented, incorporating petrographic analysis and structural measurements. The schistosity/foliation planes, fault planes, and fractures were analyzed using the Win-tensor and Stereonet programs. Petrographic analysis shows that in the Gofat-Tafadek sector, the Tchilit terrane consists of phyllites, chlorite schists, biotite quartzites, mica schists, muscovite quartzites, quartz schists, paragneiss, biotite orthogneiss, amphibolites, metarhyolites, meta-arkoses, two-mica granites, heterogeneous granites, and pegmatites. Structural analysis of the Tchilit terrane in the Gofat and Tafadek sectors reveals three deformation phases: D0, D1 and D2. The extensional deformation phase D0, characterized by a NNE-SSW extension direction (N20°), is evidenced by normal microfault mirrors observed in quartzites. The first deformation phase, D1 (Pan-African), is ductile to semi-ductile and comprises two episodes: D1a (ductile) and D1b (semi-ductile to brittle). The first ductile episode (D1a), related to Pan-African shortening, is characterized by an ENE-WSW shortening direction (N70° on average), while the second semi-ductile to brittle episode (D1b) is marked by an average shortening direction of NE-SW (N40°). The second deformation phase, D2, marked by a shortening direction of N10° (NNE-SSW), is late to post-Pan-African. It is characterized by the development of a fracture schistosity. The structural evolution over time of the shortening direction in the Tchilit terrane highlights a sinistral counterclockwise rotation, from the ENE-WSW direction (Phase D1) to the NNE-SSW direction (Phase D2). This indicates a deformation continuum during the Pan-African event, associated with the convergence between the West African Craton, the São Francisco Craton, the Congo Craton, and the Saharan Metacraton.

KEYWORDS: Aïr Massif, Pan-African, petro-structural, Tchilit Terrane, Deformation.

RESUME: La présente étude porte sur la caractérisation pétro-structurale du terrane panafricain de Tchilit du secteur de Gofat-Tafadek, dans le massif de l'Aïr (Nord Niger). Le massif de l'Aïr est constitué de roches métamorphiques recoupées par des

granitoïdes. Les travaux antérieurs relatifs à la caractérisation pétrographique et à l'analyse structurale des terrains panafricains de ce secteur sont superficiels et fragmentaires. L'objectif général de cette étude vise à analyser les caractéristiques pétro-structurales des formations panafricaines. Spécifiquement, il s'agit de: (i) déterminer les caractéristiques pétrographiques de différents faciès, (ii) identifier les structures de déformations qui les ont affectés et (iii) établir une relation chronologique relative entre les principales phases de déformation. Pour atteindre ces objectifs, une approche méthodologique a été mise en œuvre, intégrant des analyses pétrographiques et des mesures structurales. Les plans de schistosité/foliation, de plans de failles et fractures ont été traités à l'aide des programmes Win-tensor et Stéreonet. L'analyse pétrographique montre que dans le secteur de Gofat-Tafadek, le terrane de Tchilit est constitué de phyllades, de chloritoschistes, de biotitites à quartz, de micaschistes, de quartzites à muscovite, de quartzoschistes, de paragneiss, d'orthogneiss à biotite, d'amphibolites, de métarhyolites, de méta-arkoses, de granites à deux micas, de granites hétérogranulaires et de pegmatites. L'analyse structurale du terrane de Tchilit du secteur de Gofat et de Tafadek met en évidence trois phases de déformation D0, D1 et D2. La phase de déformation extensive D0, caractérisée par une direction d'extension NNE-SSW ($N20^\circ$), est matérialisée par des miroirs de microfailles normales observés dans les quartzites. La première phase de déformation D1 (panafricaine), ductile à semi-ductile, comprend deux épisodes: D1a (ductile) et D1b (semi-ductile à cassant). Le premier épisode ductile (D1a), de raccourcissement panafricain, est caractérisé par une direction de raccourcissement ENE-WSW ($N70^\circ$ en moyenne), tandis que le second épisode semi-ductile à cassant (D1b) est marqué par une direction moyenne de raccourcissement NE-SW ($N40^\circ$). La deuxième phase de déformation D2, marquée par une direction raccourcissement $N10^\circ$ (NNE-SSW), est tardive à post-panafricaine. Elle est marquée par le développement d'une schistosité de fracture. L'évolution structurale dans le temps de la direction de raccourcissement dans le terrane de Tchilit met en évidence une rotation antihoraire senestre, de la direction ENE-WSW (Phase D1) à la direction NNE-SSW (Phase D2). Celle-ci traduit un continuum de déformation pendant l'événement panafricain, en liaison avec la convergence entre le Craton Ouest Africain, le Craton de São Francisco, le Craton du Congo et le Métacraton Saharien.

MOTS-CLEFS: Massif de l'Aïr, Panafricain, pétro-structurale, Terrane de Tchilit, Déformation.

1 INTRODUCTION

Le bouclier Touareg correspond à un vaste ensemble stabilisé, découpé par des mégacisaillements subméridiens (Black et al., 1994; Navez et al., 1999), qui délimitent des unités lithologiques et structurales allongées ou terranes. Ainsi, 24 terranes (Figures 1, 2-A) comprenant des panneaux archéens/paléoprotérozoïques rajeunis, alternant avec des domaines juvéniles panafricains ont été mis en évidence (Bertrand et al., 1978; Black et al., 1979; Black, 1980; Caby et al., 1981; Moreau, 1982; Black et al., 1994; Navez et al., 1999; Brahimi et al., 2021). La structuration du bouclier Touareg s'est effectuée suite à des collisions et à des accrétiens d'arcs insulaires, le long des zones des mégacisaillement subméridiens, suivant lesquelles se sont produits des coulisages des terranes (Benyahia et al., 2005). Les massifs du Hoggar (Algérie), de l'Adrar des Iforas (Mali) et de l'Aïr (Niger), constituant le bouclier Touareg, représentent un segment orogénique de la chaîne plissée panafricaine trans-Saharienne (Cahen et al., 1984).

Le massif de l'Aïr, d'une superficie d'environ 70 000 km², correspond à la partie sud-est du bouclier Touareg (Ligeois et Claessens, 1991), constitué des quatre terranes suivants: Aougueur, Barghot, Assodé et Tchilit (Black et al., 1994; Navez et al., 1999). Ces terranes, comprenant d'anciens domaines paléoprotérozoïques, et des domaines juvéniles néoprotérozoïques ont été affectés différemment par l'orogénèse panafricaine. Deux phases de structuration panafricaine ont été distinguées: une phase majeure précoce (750-660 Ma) et une phase tardive de (650-580 Ma) (Black et Liégeois, 1993; Black et al., 1994; Liégeois et al., 2003; Benyahia et al., 2005; Liégeois, 2019). Cet événement panafricain a intensément plissé un ensemble de roches métamorphisées dans la catazone aboutissant à des migmatites, au voisinage desquelles se sont formés des granites d'anatexie (Black et al., 1967). Le terrane de Tchilit, objet de la présente étude est l'un des 4 terranes du massif de l'Aïr (Figure 2 B et C).

Au Niger, les provinces sud appartenant à la zone mobile trans-Saharienne, notamment celles du Sud Maradi et du Damagaram-Mounio, ont fait l'objet de nombreuses études structurales (Baraou et al., 2018; Baraou et Konaté, 2020; Boubacar et Konaté, 2020; Baraou et Konaté, 2021; Chékaraou et Konaté, 2021; Badamassi et Konaté, 2021), contrairement à la province nord correspondant à l'Aïr où les travaux antérieurs étaient principalement focalisés sur l'étude pétrographique et géochimique (Black et al., 1967; Greigert et Pognet, 1967; Moreau, 1982; Pouclet et Durand, 1983; Bellion, 1987; Ahmed, 1989; Pouclet et al., 1994; Black et al., 1991; Navez et al., 1999). L'objectif général de cette étude est de dégager les principales caractéristiques des déformations ayant affecté les formations panafricaines du massif de l'Aïr. Spécifiquement, concernant le terrane de Tchilit, il s'agit de: (i) déterminer les caractéristiques pétrographiques de différents faciès, (ii) identifier les structures

de déformations qui les ont affectés et (iii) établir une relation chronologique relative entre les principales phases de déformation.

2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le massif de l'Aïr correspondant à la partie sud-est du bouclier Touareg (Figure 2A), se situe au Nord du Niger, entre les parallèles 17° et 20°30' de latitude nord et les méridiens 7°30' et 10° de longitude est. Il s'étend sur environ 400 km de longueur et 200 km de largeur (Ahmed, 1989). Le massif de l'Aïr est structuré par des mégacisaillements délimitant les terranes: d'Aouzégueur, de Barghot, d'Assodé et de Tchilit (Figure 2B). Le terrane de Tchilit, objet de la présente d'étude, se situe dans la bordure sud-ouest du massif de l'Aïr. Les deux secteurs du terrane de Tchilit concernés par la présente étude sont: Gofat (au Sud) et Tafadek (au Nord) (Figure 1C)

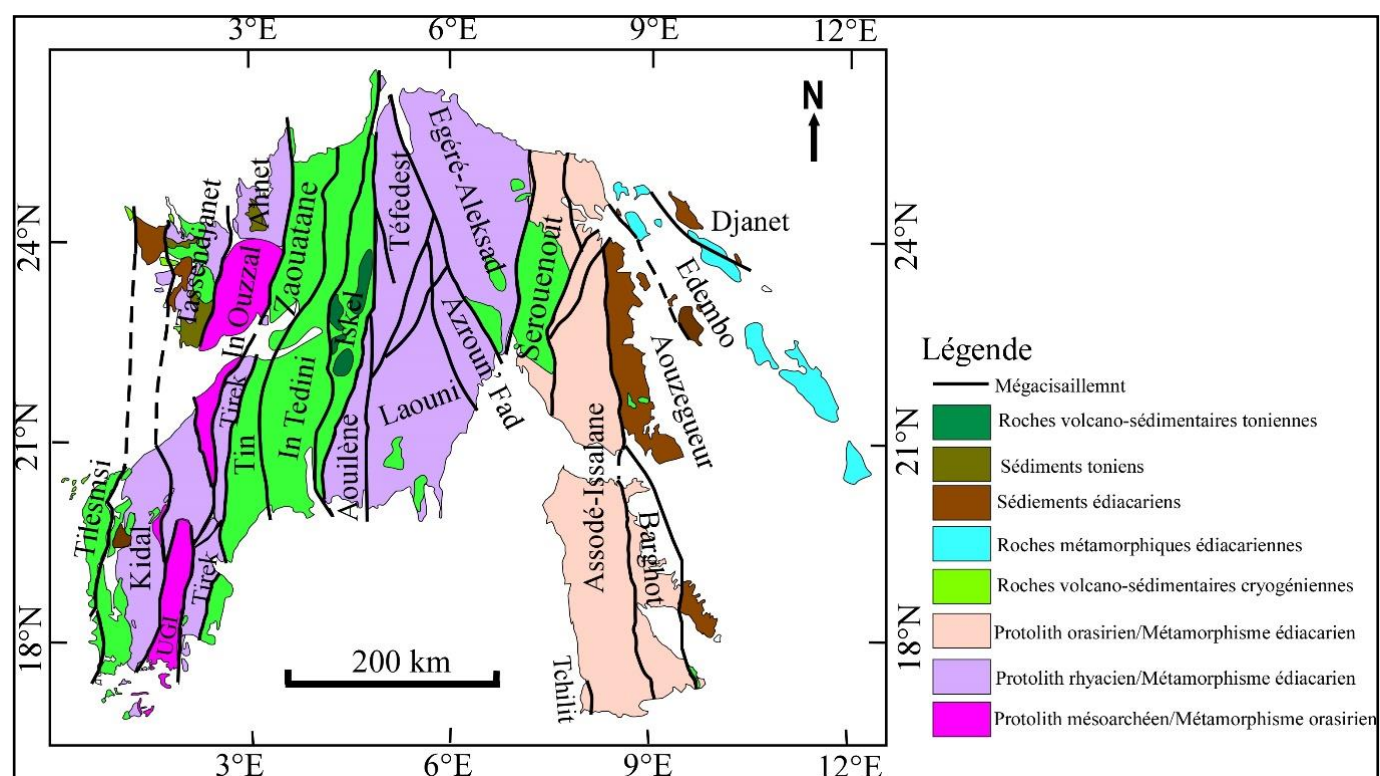


Fig. 1. Carte géologique du bouclier touareg montrant les différents terranes (Brahimi et al., 2018, modifiée)

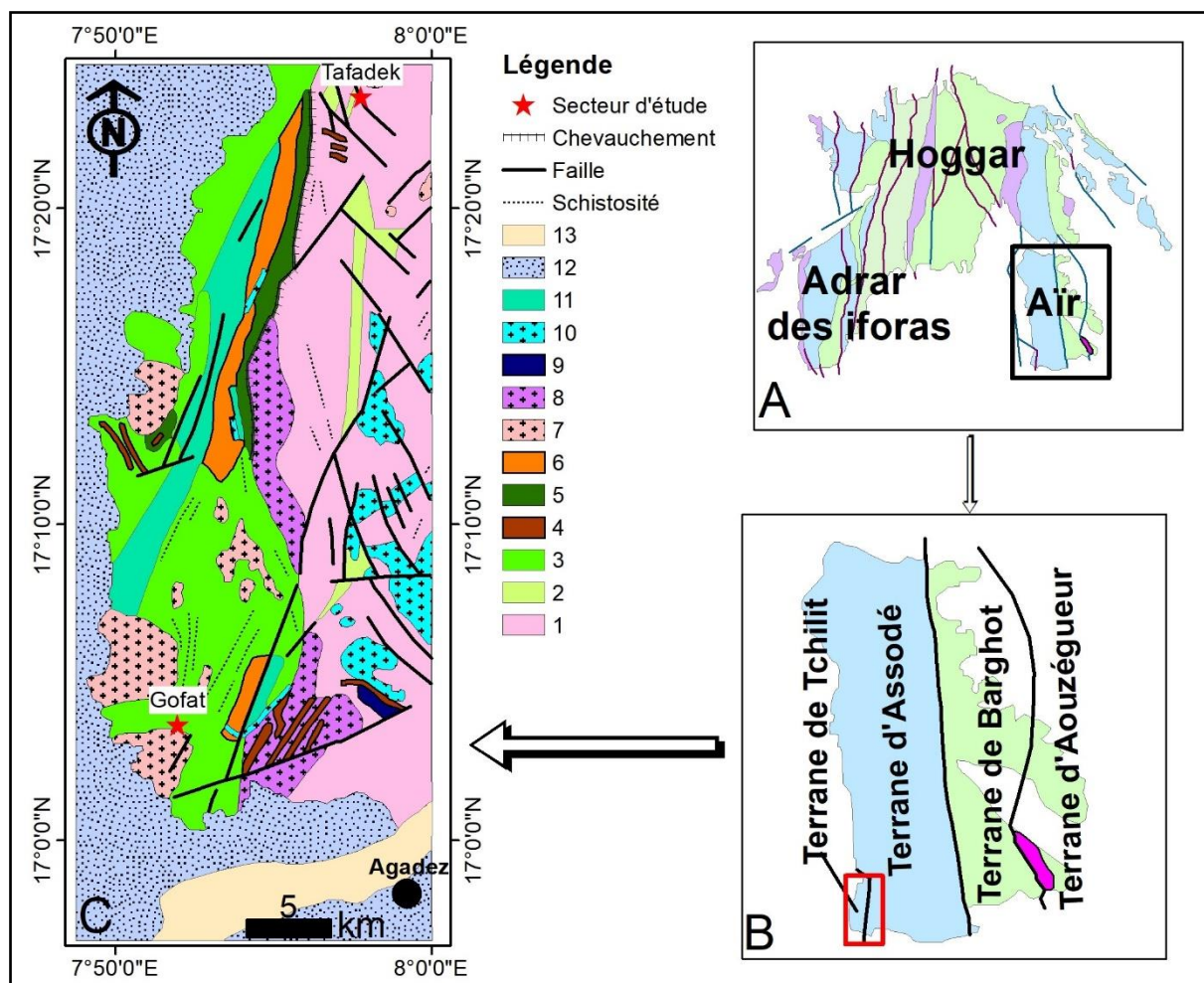


Fig. 2. Localisation de la zone d'étude. A: Carte géologique du bouclier Touareg. B: Carte géologique du Massif de l'Aïr montrant la localisation du terrane de Tchilit. C: Localisation des secteurs d'étude sur un extrait de la carte géologique du Massif de l'Aïr (Black et al., 1967, modifiée). 1. Formation de Tafourfouzete. 2. Formation micaschisteuse d'Edoukel. 3. Méta-arkoses et phyllites. 4. Quartzites à muscovite. 5. Amphibolites. 6. Métaconglomérats. 7. Granites hétérogrannulaires. 8. Granites calco-alcalins porphyriques. 9. Granites à deux micas. 10. Aplogranites. 11. Métarahyolites. 12. Formation paléozoïque. 13. Téloua

2.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

La morphologie actuelle du massif de l'Aïr résulte du bombement du bouclier Touareg au Cénozoïque, associé au volcanisme à la même période (Black et al., 1994; Ahmed et al., 2016). Ce volcanisme cénozoïque explique la mise en place d'un cortège magmatique alcalin constitué de néphélinites, de basanites, de phonolites, de trachy-phonolites et de trachytes quartzifères, réparti en deux grands groupes d'âges: 36-23 Ma et 9-1,5 Ma (Ahmed et al., 2016).

Le socle de l'Aïr est entouré et/ou partiellement recouvert de sédiments phanérozoïques faiblement inclinés à subhorizontaux d'âge ordovicien inférieur à quaternaire (Black et al., 1994). Il est recoupé par les complexes annulaires alcalins anorthositiques du Silurien-Dévonien de la province du Niger-Nigeria (Black, 1965; Moreau, 1982; Bowden et al., 1987; Demaiffe et Moreau, 1991). Dans le massif de l'Aïr, quatre terranes (Aouzegueur, Barghot, Assodé et Tchilit, Figure 3A) ont été définis et intégrés dans un modèle géodynamique marqué par une orogénèse panafricaine, comprenant deux phases (Liégeois et al., 1994). La phase précoce de l'orogénèse panafricaine (750-660 Ma) est marquée par une forte collision, associée à une subduction à l'est de l'Aïr, ayant un pendage ouest, (Black et al., 1994; Liégeois et al., 1994). Cette collision a engendré un métamorphisme de haute pression, occasionnant: une anatexie de la croûte inférieure, un chevauchement régional et un plutonisme calco-alcalin potassique. La phase tardive de l'orogénèse panafricaine (650 à 580 Ma) a produit d'importants déplacements horizontaux, le long des mégacisaillements méridiens associés à la mise en place de batholites calco-alcalins liés à la zone de subduction incliné vers l'Est, à l'Ouest de l'Aïr (Black et al., 1994; Liégeois et al., 1994). Excepté sur leurs bordures

occidentales, les terranes d'Aouzegueur et de Barghot ont été faiblement affectés par la phase tardive panafricaine. En revanche, le terrane d'Assodé enregistré les deux phases. Il faut noter que les terranes d'Assodé et de Barghot sont séparés par la grande zone de cisaillement N-S de Raghane, située à la longitude 8°30'E. Cette dernière est décalée par des failles senestres ultérieures, d'orientation NW-SE (Figure 3A). A l'Est, le terrane de Barghot, présentant un faciès amphibolite dominant, surplombe le terrane d'Aouzegueur à faciès majoritairement schiste vert. A l'Ouest, le terrane d'Assodé chevauche celui de Tchilit à faciès schiste vert.

2.3 CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES DES DIFFÉRENTS TERRANES DU MASSIF DE L'AÏR

2.3.1 TERRANE D'AOUZEGUEUR

Le terrane d'Aouzegueur comprend trois unités lithologiques principales. L'unité orientale, épaisse est constituée des tonalites-trondhjemitites-granodiorites (TTG) d'Eberjegui (Figure 3B), dont l'encaissant se présente sous forme de reliques d'amphibolites mafiques à ultramafiques (Liégeois et *al.*, 1994). Elle est chevauchée par: (i) l'unité ophiolitique d'Aouzegueur (Boullier et *al.*, 1991), dont les serpentinites ont été décrites pour la première fois par Tyrre (1930) et, (ii) par les métasédiments à faciès schiste vert (unité d'Arrei), qui contiennent des écailles tectoniques du TTG d'Eberjegui. L'ensemble de ces 3 unités (TTG d'Eberjegui, l'unité ophiolitique d'Aouzegueur, unité d'Arrei) peut être suivi vers le Nord sur près de 1000 km, jusqu'au Hoggar en Algérie, où des faciès identiques ont été décrits par Caby et Andreopoulos-Renaud (1987). Dans le Nord de l'Aïr, la formation de "Coin", également orientée vers le NE, est recoupée par le TTG d'Eberjegui (Figure 3B). Elle représente probablement l'équivalent septentrional de l'unité d'Arrei à faciès schiste vert (Black et *al.*, 1967, 1994).

2.3.2 TERRANE DE BARGHOT

Le terrane d'Assodé est représenté par deux groupes gneiss recoupés par des granitoïdes calco-alcalins tardifs à post-cinématiques dont l'âge de mise en place est compris entre 715 et 655 Ma (Black et *al.*, 1994; Liégeois et *al.*, 1994). Ces granitoïdes sont généralement représentés par des diorites quartzitiques au monzogranites leucocrates à prédominance de monzogranites porphyriques (Type Dabaga-Est). Ils montrent également des enclaves microgranulaires sombres riches en mégacrists de quartz et de feldspaths potassiques, dont la mésostase est de composition dioritique (Liégeois et *al.*, 1994). Dans ce terrane, deux groupes de gneiss ont été mis en évidence par (Black et *al.*, 1967, 1994; Liégeois et *al.*, 1994). Il s'agit du groupe d'Azanguerene (Azan) et celui de Tafourfouzete (Taf) (Figure 3B).

(1) Le groupe d'Azanguerene (Azan)

Il est représenté par des gneiss gris, souvent migmatitiques, des amphibolites et de rares roches calco-alcalines. Ce groupe est affecté par des structures complexes et est considéré comme un ancien socle.

(2) Le groupe de Tafourfouzete (Taf)

Il est constitué de gneiss leucocrates riches en feldspaths potassiques associés à des quartzites, des marbres, des amphibolites et de rares méta-pelites. Le groupe de Tafourfouzete monocyclique et/ou polyphasé, représente l'équivalent de l'unité d'Arrei faiblement métamorphisée (Black et *al.*, 1991; Boullier et *al.*, 1991).

Le terrane d'Aouzegueur et le terrane de Barghot sont associés à une ceinture de chevauchement formée de plusieurs nappes présentant de pandages variant de 20° à 40° vers l'Ouest à Sud-ouest. Une linéation d'étirement plongeant de N20°E à N90°E en remontant la structure de nappe (Boullier et *al.*, 1991). La ceinture de chevauchement est recoupée par un pluton post-cinématique daté d'environ 664 Ma (Liégeois et *al.*, 1994). Cette ceinture est recouverte par un dépôt molassique communément appelé la série du Proche Ténéré.

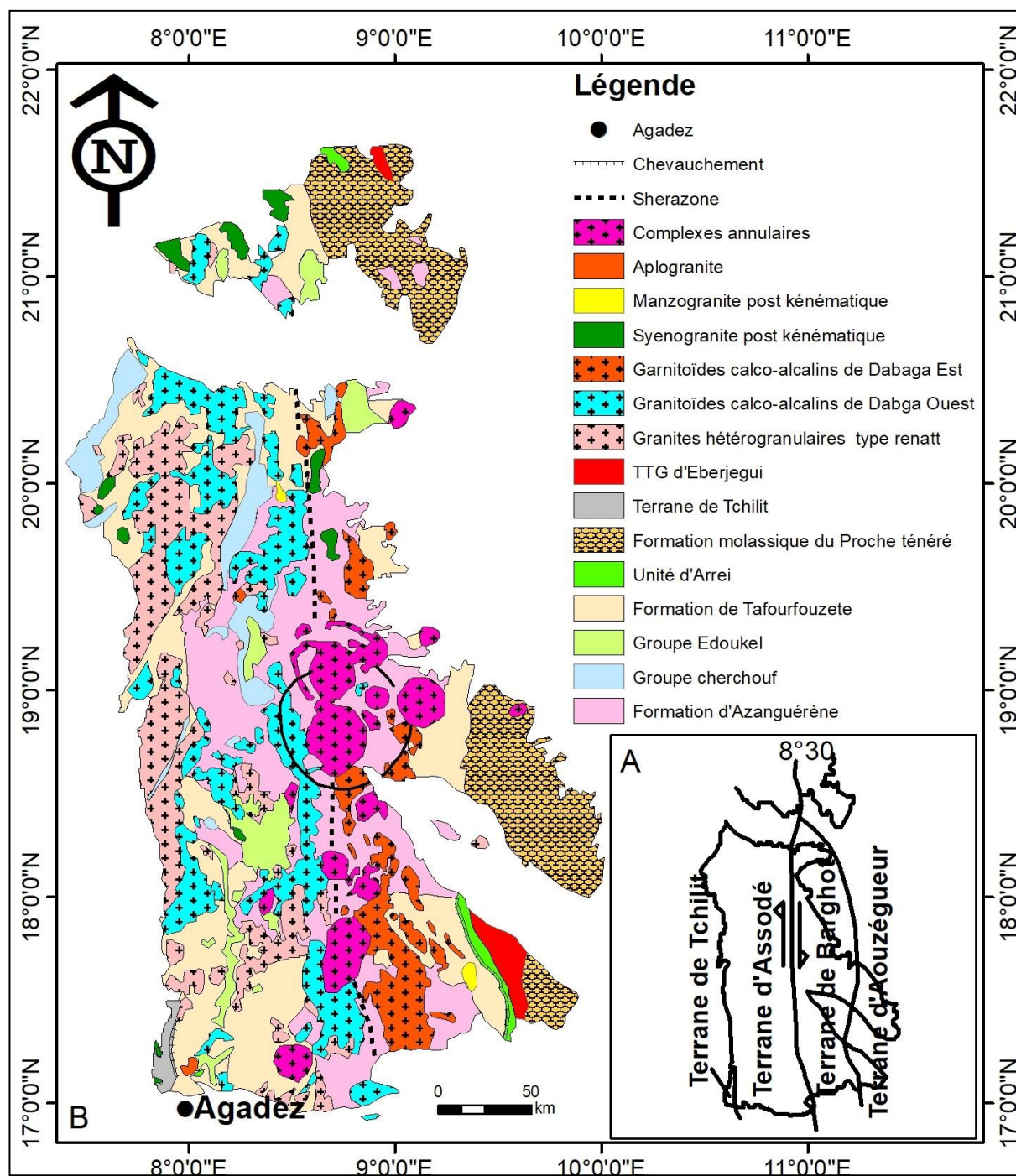


Fig. 3. Carte géologique du massif de l'Aïr (Black et al., 1994)

Les terranes de Barghot et d'Aouzegueur sont associés à plusieurs nappes constituant une ceinture de chevauchement orientée N-S à NNW-SSE avec des pendages 20° à 40° vers l'W ou l'WSW (Liégeois et al., 1994). Dans le terrane d'Aouzegueur, la partie inférieure du chevauchement correspond à l'unité TTG d'Eberjegui, généralement affectée par une mylonitisation notamment sous la nappe de charriage qui a transporté l'unité ophiolitique (Black et al., 1991; Liégeois et al., 1994).

2.3.3 TERRANE D'ASSODÉ

Il est constitué des socles migmatitiques de plusieurs séquences supracrustales métamorphisées dans le faciès amphibolite (Black et al., 1994). Dans ce terrane, quatre groupes lithologiques de gneiss ont été identifiés: le groupe de Cherchouf, le groupe

d'Edoukel, le groupe d'Azanguerène, le groupe de Tafourfouzete, dont les deux derniers groupes sont des équivalents lithologiques du groupe d'Azanguerène et de Tafourfouzete misent en évidence dans le terrane de Barghot (**Figure 3B**). (Black et al., 1967, 1994; Liégeois et al., 1994).

(1) Le groupe de Cherchouf couvrant la partie nord et centrale du terrane d'Assodé, est constitué par d'orthogneiss alcalins riches en Cpx-Hb-Kf, de gneiss à biotite, d'amphibolites, de quartzites et de horizons mineurs de talc-silicates.

(2) Le groupe d'Edoukel constitue une bande synforme N-S par rapport au groupe de Cherchouf et au groupe de Taf sous-jacents au centre du domaine d'Assodé. Il s'agit d'une séquence pélitique composée de micaschistes avec des intercalations de roches calco-alcalines, de quartzites, d'amphibolites et de marbres (Black et al., 1967, 1994). Le terrane d'Assodé est fondamentalement différent des ensembles d'Aougueur et de Barghot car il ne contient pas de granitoïdes calco-alcalins de l'épisode à 730-700 Ma, mais il a subi un métamorphisme de haute température et moyenne pression, accompagné d'une fusion partielle de la croûte moyenne et l'intrusion de grands volumes de granites d'anatexie (granite renatt) (Black et Liégeois, 1993; Fabre, 2005). À l'affleurement, ce granite est hétérogène et hétérogranulaire, présentant typiquement des nuages de mégacrists de microcline. À l'échelle régionale, il est très homogène et facilement identifiable. Les gneiss sont affectés par une phase de tectonique horizontale précoce responsable de la schistosité régionale déformée par la suite en des plis serrés orientés vers l'ESE (Black et al., 1991; Liégeois et al., 1994). Le granite leucocrate hétérogène de type Renatt est tardi-cinématique par rapport à cette phase. Le terrane d'Assodé a enregistré deux phases de l'orogénèse panafricaine. En effet, au cours de l'orogénèse panafricaine précoce, le terrane d'Assodé n'a pas été charrié sur le Craton Est-Saharien, mais la collision a provoqué un épaississement crustal comparable à celui du Tibet actuel (Fabre, 2005; Liégeois et al., 1994). Ce comportement différent tient sans doute au fait que le terrane d'Assodé était à une distance relativement plus grande de la marge d'Aouzgueur comme l'indique l'absence de roches caractéristiques d'une zone de subduction (Liégeois et al., 1994). En réponse à une délamination du manteau lithosphérique continental d'Assodé (Black et Liégeois, 1993; Liégeois et al., 1994), le métamorphisme lié une remontée du manteau asthénosphérique a entraîné une fusion partielle de la croûte inférieure et la production d'un volume important de granite d'anatexie potassique (vers 666 Ma en Rb/Sr). Durant l'orogénèse panafricaine terminale, le terrane d'Assodé est délaminé, non protégé et sans attache avec le craton est-saharien, propulsé par une ride expansion oblique. Il s'est déplacé vers le Nord d'environ 1000 km le long de zone de cisaillement senestre de Raghane qui marque la limite ouest du craton rigide (Fabre, 2005). Ce dispositif longeant une zone de cisaillement est très favorable à la formation de larges volumes de plutons calco-alcalins (Quick, 1991).

2.3.4 TERRANE DE TCHILIT

Le terrane de Tchilit est composé d'amphibolites (métabasaltés et méta-andésites), de méta-rhyolites, de métasédiments néoproterozoïques et de syénogranites tardifs à post-cinématiques d'âge panafricain tardif (619 ± 39 Ma) (Navez et al., 1999).

3 MÉTHODOLOGIE

La démarche méthodologique adoptée au cours de cette étude est basée sur l'analyse pétrostructurale effectuée sur le terrain (description pétrographique des différents faciès et mesures de plans de schistosité/foliation et de plans de fractures). Au total, 300 mesures ont été effectuées. Aussi, une chronologie relative entre les différentes structures tectoniques a été établie sur le terrain, en se basant sur les critères de recoupement. Les données recueillies sur le terrain ont permis de réaliser le stéréodiagramme. Le traitement de ces données a été réalisé à l'aide du programme Stéréonet 10 (Allmendinger, 2017) et du programme Win-Tensor (version 5.8.9) (Delvaux, 2003) pour la détermination des tenseurs de contraintes (σ_1 , σ_2 , σ_3). L'étude des déformations à l'échelle microscopique, complète celles réalisées sur le terrain. Les résultats du traitement permettent de visualiser, selon le cas, la direction moyenne de raccourcissement.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 PÉTROGRAPHIE DES TERRANES DE TCHILIT

L'analyse pétrographique a permis de montrer que le terrane de Tchilit est constitué de trois (3) types de roches: métamorphiques, magmatiques et filoniennes.

4.1.1 ROCHES MÉTAMORPHIQUES DU TERRANE DE TCHILIT

4.1.1.1 PHYLLADES

Les phyllades affleurent notamment dans le secteur de Gofat, formant des buttes d'orientation NW-SE. A l'affleurement, il présente une couleur gris clair ou sombre (Figure 4a) et également des injections des veines quartz boudinées de forme lenticulaire. Au microscope, la roche présente une texture lépidoblastique avec une association minérale constituée de quartz, de biotite et de muscovite (Figure 4b).

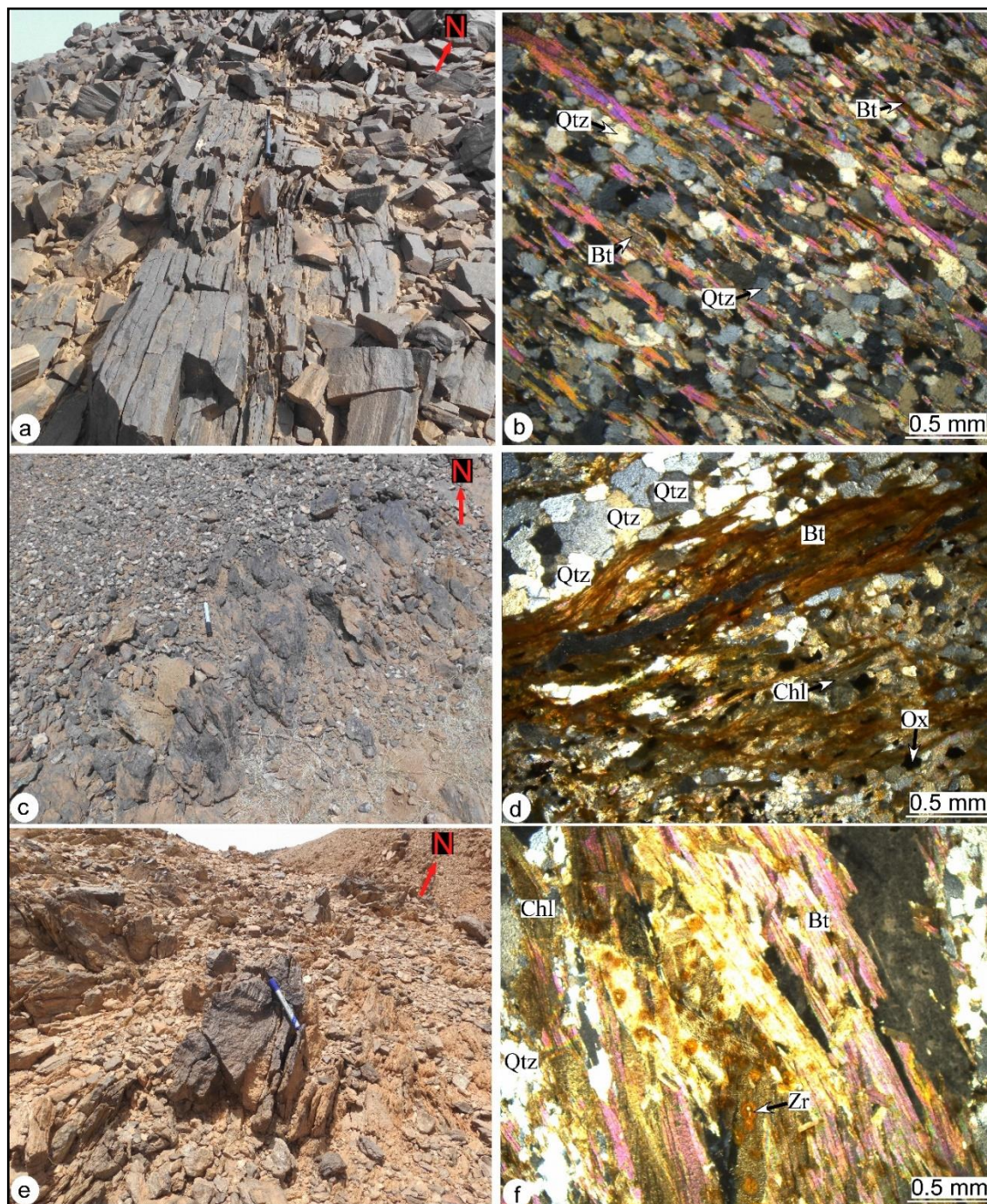


Fig. 4. Aspect à l'affleurement et au microscope des roches métamorphiques du secteur de Gofat. (a): phyllades. (b): Microphotographie de phyllades. (c): Chloritoschistes. (d): Microphotographie de chloritoschistes. (e): Biotitites à quartz. (f): Microphotographie de biotitites à quartz. Qtz: Quartz; Bt: Biotite; Mus: Muscovite; Zr: Zircon et Ox: Oxydes

4.1.1.2 CHLORITOSCHISTES

L'affleurement est représenté par des chloritoschistes de couleur verdâtre et grisâtre (Figure 4c). L'observation microscopique des chloritoschistes de Gofat montre une association minéralogique constituée de quartz, de biotites, de chlorites et de minéraux opaques (Figure 4d). Cette association minéralogique (Qtz-chl-bt) caractérise le faciès schiste vert.

4.1.1.3 BIOTITES À QUARTZ

Suivant la direction (NE-SW) de la coupe, un affleurement de biotites à quartz a été observé à 10 m de l'affleurement de chloritoschistes (Figure 4e). Au contact d'une intrusion granitique, ce faciès développe une schistosité de crénulation. La roche est constituée essentiellement de biotites, de muscovites et de quartz (Figure 4f).

4.1.1.4 AMPHIBOLITES

À l'affleurement, les amphibolites à grains fins et moyens ont une couleur vert-sombre. La roche présente une foliation et une linéation minérale. Elles sont parfois recoupées par des veines de quartz. Au microscope, la roche est constituée essentiellement d'amphiboles et de minéraux opaques (Figure 5a, b).

4.1.1.5 PARAGNEISS (LEPTYNITES)

L'affleurement est situé au Nord du village de Gofat-Est. Il affleure sous forme de bancs d'orientation NNE-SSW (Figure 5c). Ce sont des roches de couleur gris clair à rosâtre, constituant des grains fins à moyens. Elles présentent une foliation d'orientation N20°-60°NE, marquée par une alternance des lits quartzo-feldspathiques et sombres constitués des minéraux ferromagnésiens. Au microscope, elles sont généralement représentées par une association minérale constituée de quartz, de biotite, d'orthose et de minéraux opaques (Figure 5d).

4.1.1.6 ORTHOGNEISS

Dans le secteur de Gofat-Est, les orthogneiss affleurent en dalles ou en boules de couleur gris sombre (Figure 5e). L'observation microscopique des échantillons des orthogneiss montre que ces roches sont constituées de quartz, de biotites, d'orthoses, de chlorites et de minéraux opaques (Figure 5f). La texture de la roche est grano-lépidoblastique.

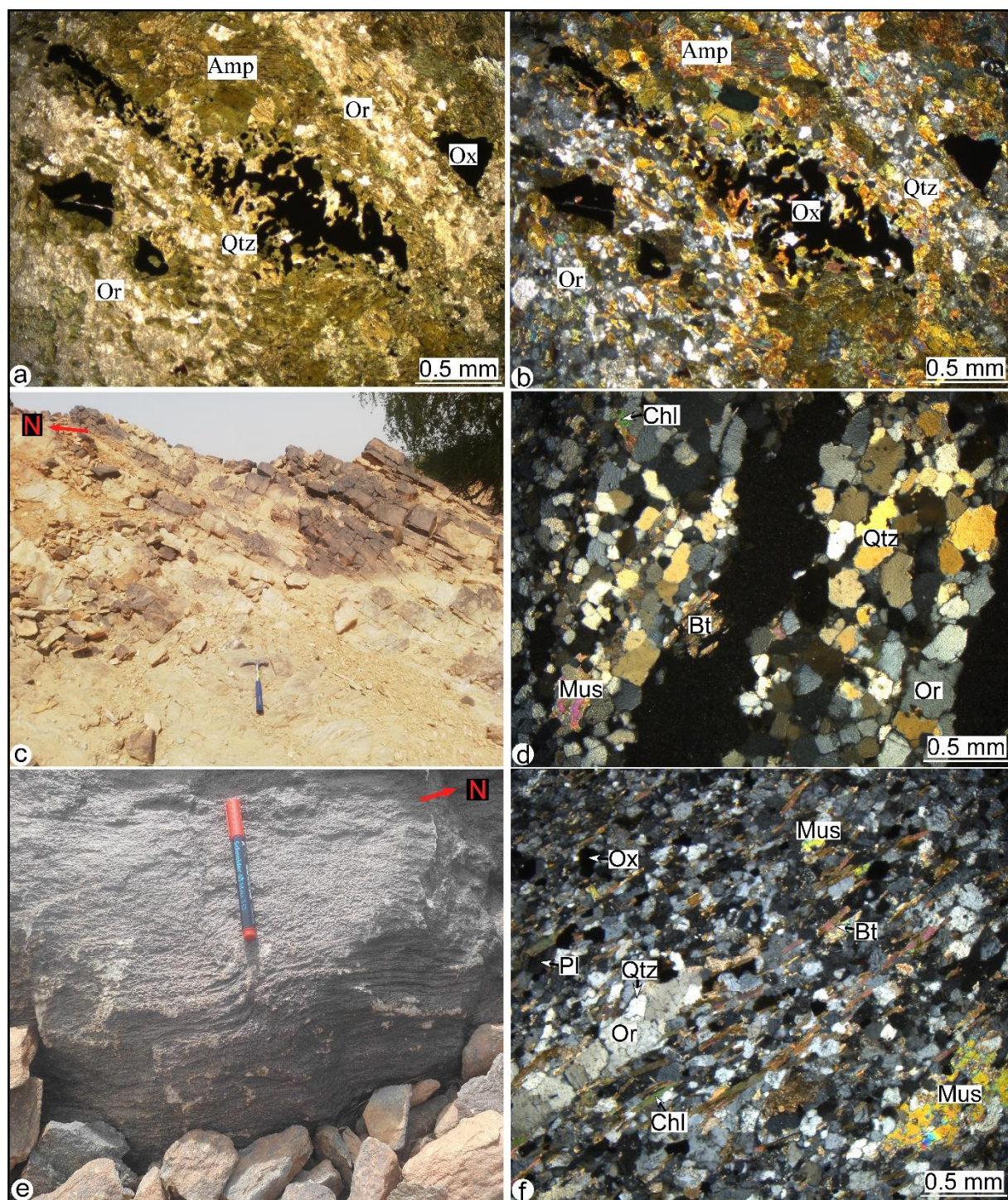


Fig. 5. Aspect à l'affleurement et au microscope des roches métamorphiques du secteur de Gofat. (a, b): Microphotographie d'amphibolites. (c): Paragneiss. (d): Microphotographie de paragneiss. (e): Orthogneiss. (f): Microphotographie d'orthogneiss. Amp: Amphibole; Qtz: Quartz; Or: Orthose; Pl: Plagioclase; Bt: Biotite; Mus: Muscovite; Chl: Chlorite et Ox: Oxyde

4.1.1.7 QUARTZITE À MUSCOVITE

Les quartzites affleurent notamment dans les secteurs de Gofat et de Tafadek (Figure 6a). Ils sont massifs et se rencontrent également en intercalations dans les formations précédentes. Au microscope, les quartzites sont essentiellement constitués de quartz et de muscovite (Figure 6b).

4.1.1.8 QUARTZO-SCHISTES À MUSCOVITE

Il affleure au Sud-Ouest du village de Tafadek, sa teinte est blanchâtre. La roche présente un début de schistosité matérialisée par des fines paillettes de muscovites. L'observation au microscope montre que le quartz-schiste à muscovite est constitué de quartz et de muscovite (Figure 6d).

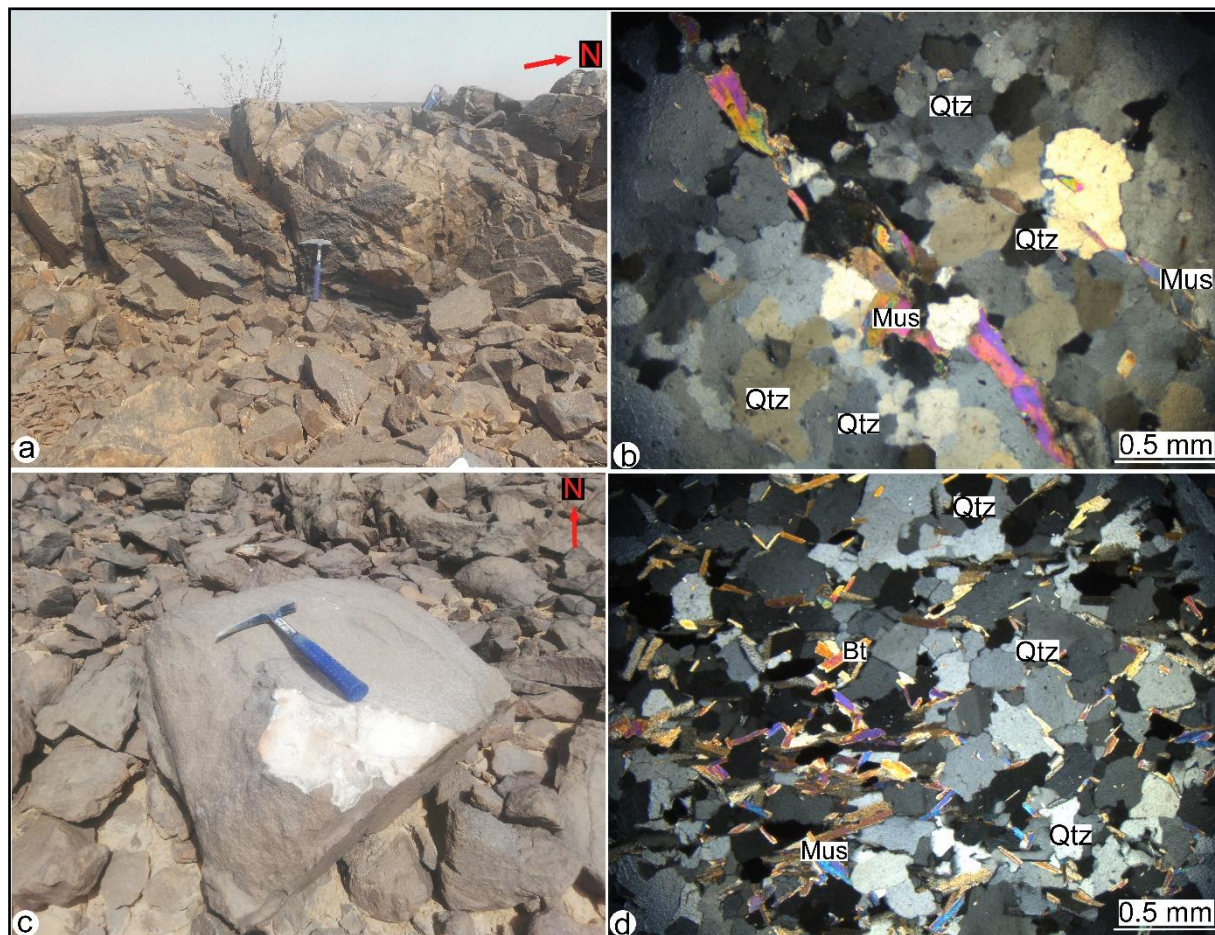


Fig. 6. Aspect à l'affleurement et au microscope des roches métamorphiques du secteur de Gofat. (a): Quartzite. (b): Microphotographie de quartzites. (c): Quartzo-schistes. (d): Microphotographie de quartzo-schistes. Qtz: Quartz; Bt: Biotite; Mus: Muscovite

4.1.2 ROCHES MÉTAVOLCANITES DU TERRANE DE TCHILIT

Dans le terrane de Tchilit, les roches volcaniques sont représentées par des méta-rhyolites et des méta-rhyolites à biotite.

4.1.2.1 MÉTA-RHYOLITES À BIOTITE

A l'échelle de l'affleurement, les métarhyolites ont une couleur gris-sombre (Figure 7a). Cet affleurement est situé au sud-ouest du village de Tafadek (environ 4 Km). L'observation microscopique révèle que la roche est constituée de phénocristaux de microcline, d'orthose, de quartz, de biotite et de minéraux opaques (Figure 7b, c). La biotite, le quartz et les minéraux opaques constituent la mésostase.

4.1.2.2 MÉTARHYOLITES

Au microscope, les métarhyolites sont constituées essentiellement de phénocristaux de plagioclase, de microcline, de muscovite, de quartz et de minéraux opaques (Figure 7d).

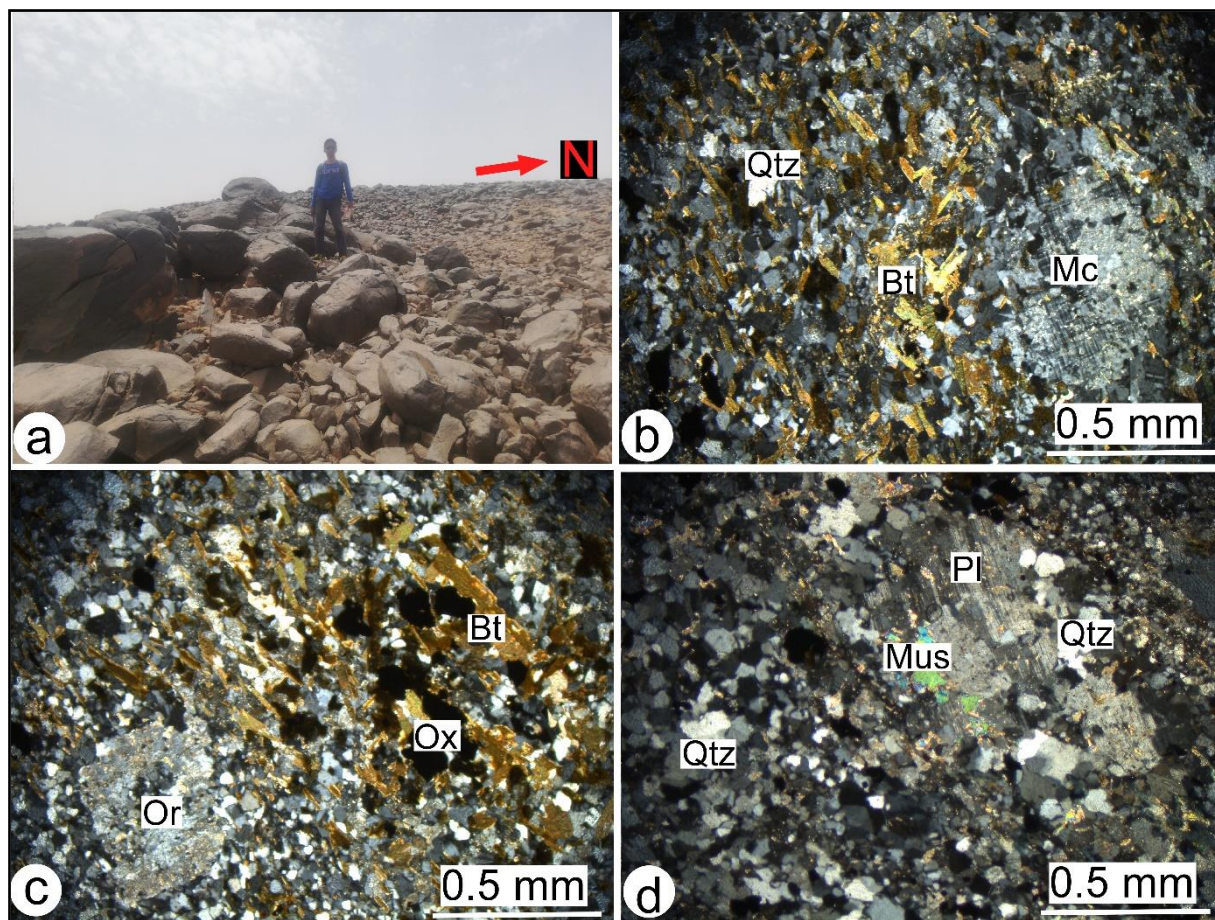


Fig. 7. Aspect à l’affleurement et au microscope des méta-rhyolites des secteurs de Gofat et Tafadek. (a) Méta-rhyolites à biotite. (b, c): Microphotographie de méta-rhyolites de Tafadek. (d): Microphotographie de méta-rhyolites de Gofat. Qtz: Quartz; Or: Orthose; Pl: Plagioclase; Bt: Biotite; Mus: Muscovite et Ox: Oxyde

4.1.3 ROCHES PLUTONIQUES DU TERRANE DE TCHILIT

Les roches plutoniques du terrane de Tchilit sont représentées essentiellement par des granites. Les textures observées sont généralement grenues à microgrenues. A l’échelle de la carte, ces faciès bien circonscrits et dispersés, recoupent les unités métamorphiques.

4.1.3.1 GRANITES HÉTÉROGRANULAIRES À MICROCLINE

L’affleurement correspond à des granites alcalins hétérogranulaires de couleur rosâtre.

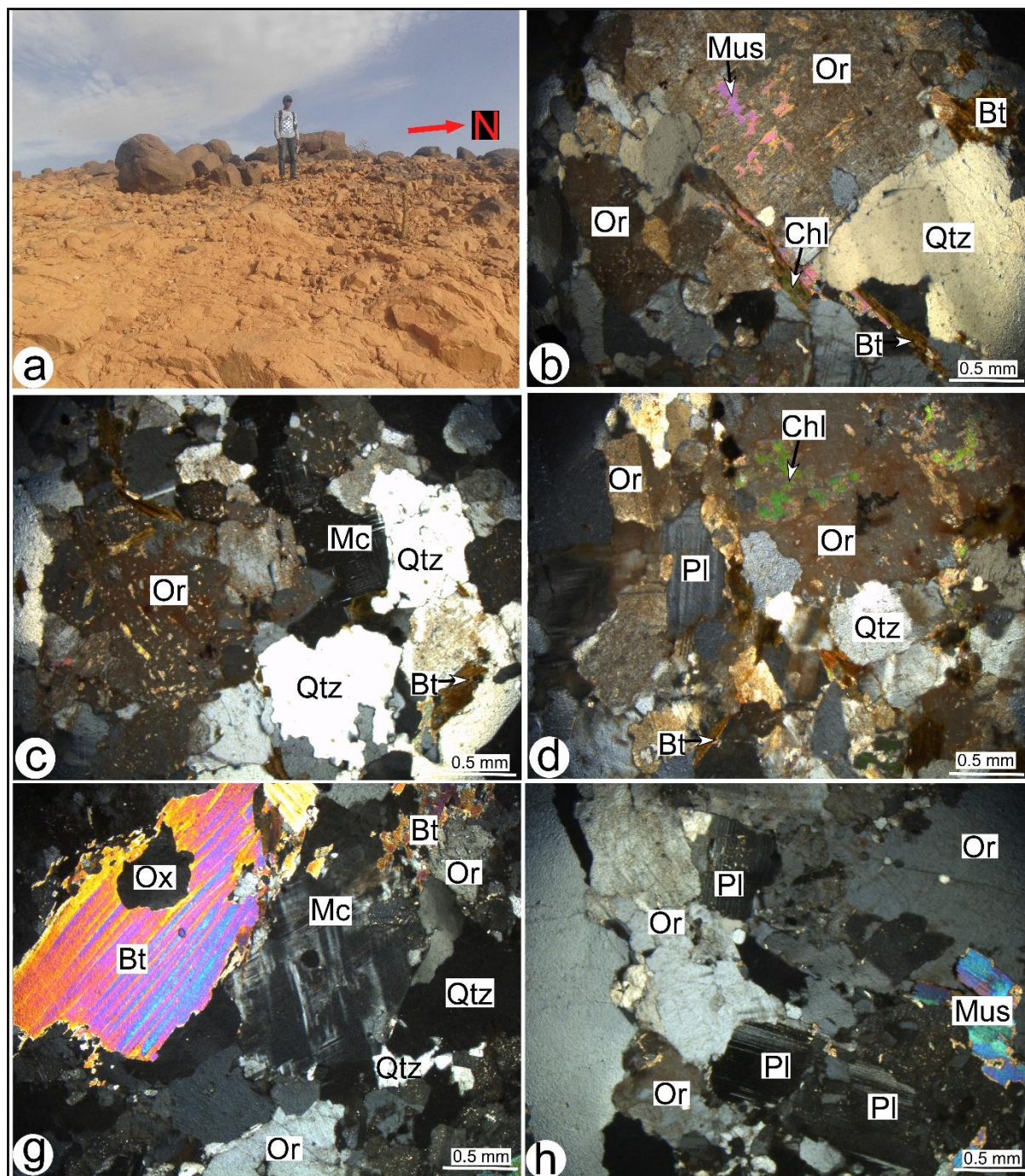


Fig. 8. Aspect à l'affleurement et au microscope des roches magmatiques du secteur de Gofat. (a): Granites hétérogranulaires à microcline. (b, c, d): Microphotographie de granites hétérogranulaires à microcline. (e, f): Microphotographie de granites à deux micas. Qtz: Quartz; Or: Orthose; Mc: Microcline; Pl: Plagioclase; Bt: Biotite; Mus: Muscovite; Chl: Chlorite et Ox: Oxyde

La roche est constituée de biotite, de quartz, d'orthose, de plagioclase, de microcline, de muscovite et de chlorite (Figure 8a, b, c, d). Ces granites intrudent généralement des phyllades en dykes orientés NW-SE. Par endroits, ils affleurent en filon de granites aplitiques recoupant les granites alcalins porphyriques.

4.1.3.2 GRANITES À DEUX MICAS

Ce sont des granites à deux micas observés au Nord-Ouest du secteur de Gofat. La roche présente une texture grenue. Elle est constituée de plagioclase, de feldspath potassique, de quartz, d'orthose, de biotite, de muscovite et de minéraux opaques (Figure 8a, b).

4.2 CARACTÉRISATION DES DÉFORMATIONS DU TERRANE DE TCHILIT

Dans le terrane de Tchilit, les formations panafricaines du secteur de Gofat-Tafadek sont affectées par plusieurs types de structures de déformation. Il s'agit de schistosité/foliation, de linéations minérales, de plissements, de couloirs de cisaillement et des fractures. L'analyse des relations de recoupement entre les différentes structures tectoniques a permis de les caler chronologiquement. Ainsi trois phases de déformations ont été mises en évidence: D0, D1 et D2. La phase de déformation extensive D0 est pré-panafricaine. Les deux autres phases D1 et D2 sont panafricaines. La première phase de déformation D1 est ductile à semi-ductile, la seconde phase de déformation D2 est essentiellement cassante.

4.2.1 STRUCTURES TECTONIQUES ASSOCIÉES À LA PHASE DE DÉFORMATION EXTENSIVE PRÉ-PANAFRICAINE D0

Dans la zone d'étude, la déformation extensive pré-panafricaine est marquée par des miroirs de failles plus ou moins courbes (Figure 9), de direction N80° à N115°, ayant des pendages variant de 50° à 60° vers le S ou le SW. Ces miroirs présentent des stries courbes ainsi que des figures d'arrachement indiquant des jeux normaux de failles. Ces caractéristiques indiquent ces failles normales ont joué pendant que la roche était relativement ductile et n'était pas totalement consolidée (Figure 9A, B). Cette phase de déformation extensive a été mise en évidence seulement dans les quartzites.

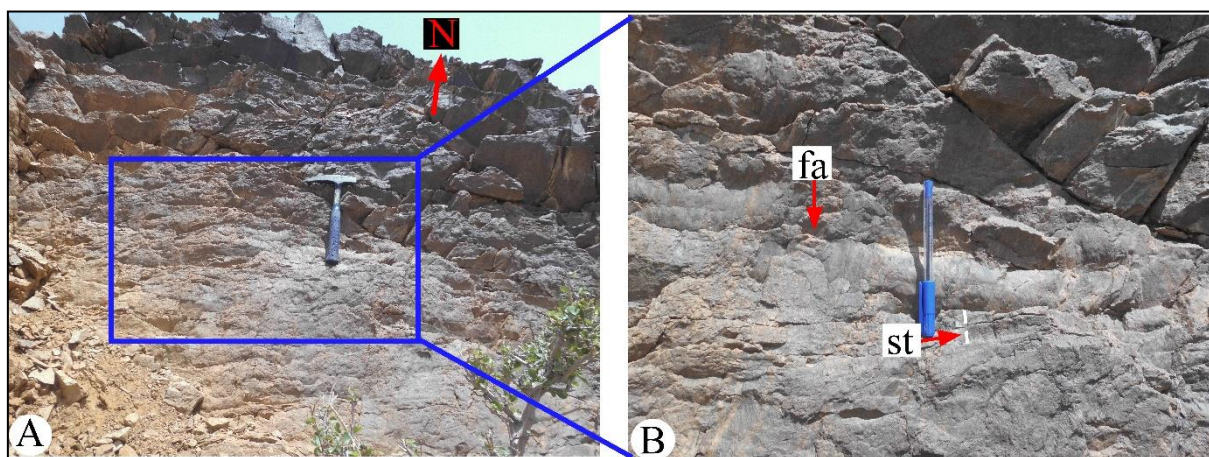


Fig. 9. Failles normales affectant les quartzites. B: Vue de détail de la photo A. fa: d'arrachement. st: Strie

4.2.2 STRUCTURES TECTONIQUES ASSOCIÉES À LA PREMIÈRE PHASE DE DÉFORMATION PANAFRICAINE D1

Dans le secteur de Gofat, le terrane de Tchilit est affecté par une première phase de déformation panafricaine D1 ductile à semi-ductile. Elle est marquée par deux épisodes. Le premier épisode D1a est caractérisé par une schistosité/foliation S1 de direction N140° à N170°. Le deuxième épisode D1b est matérialisé de couloir de cisaillement semi-ductile, des plis, des couloirs de cisaillements ductiles et des boudins.

4.2.2.1 EPISODE DE DÉFORMATION D1A

L'épisode de déformation D1a est marquée par la schistosité/foliation S1 caractérisée par une direction comprise entre N140° et N170° avec des pendages variant de 45° à 80° vers l'Ouest ou l'Est (Figure 10a, b). Dans le secteur d'étude, la schistosité/foliation S1 a été observée dans les phyllades, les orthogneiss, les chloritoschistes et les micaschistes (Figure 10a, b, c, d). Les phyllades et les amphibolites présentent des injections de veinules de quartz, suivant les plans de schistosité/foliation S1.

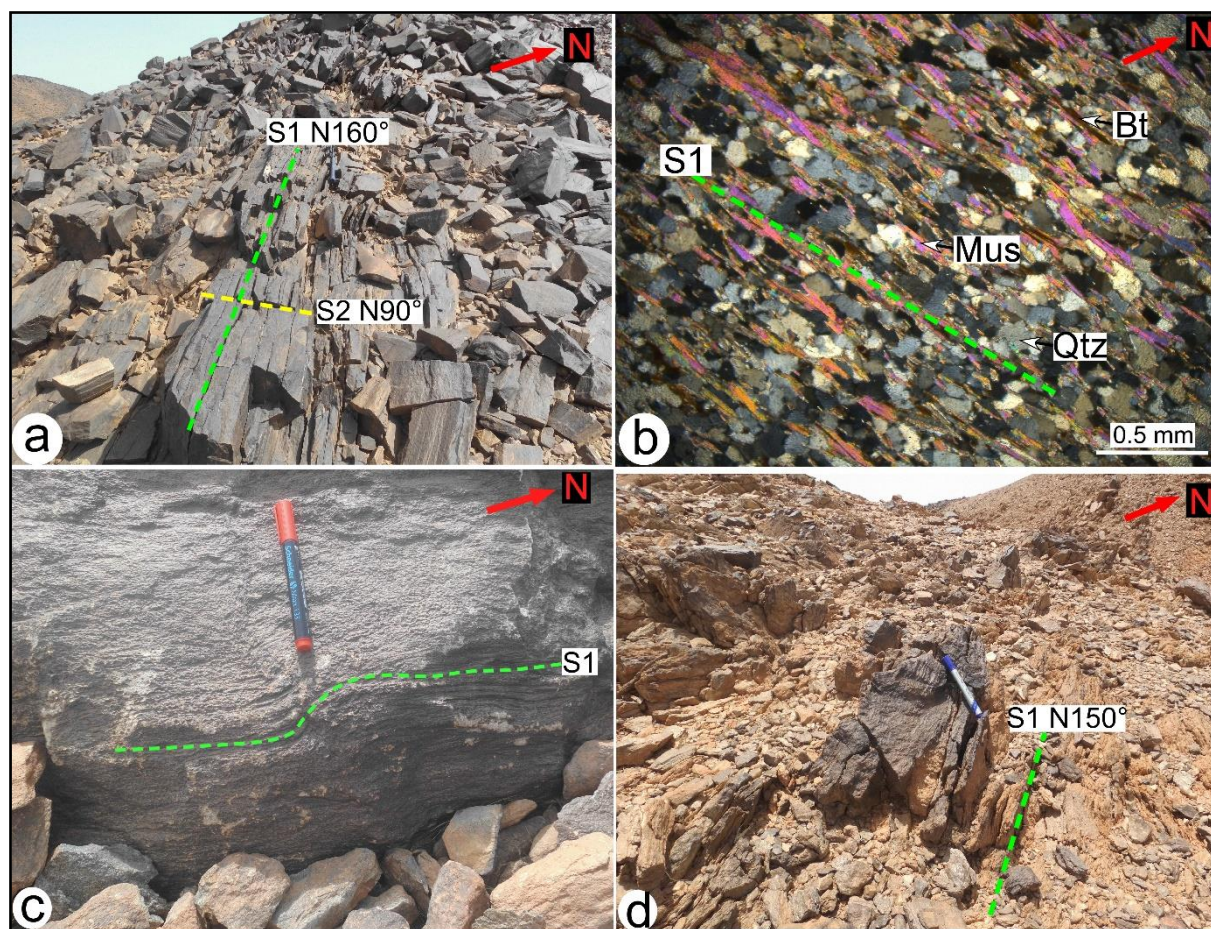


Fig. 10. Structures tectoniques associées à l'épisode D1a. a. Schistosité/foliation (S1) observée dans les phyllades. b. Microphotographie des phyllades. c. Schistosité/foliation (S1) mise en évidence dans les orthogneiss. d. Schistosité/foliation (S1) observée dans les micaschistes

L'observation au microscope des phyllades montre que celles-ci présentent une schistosité de flux naissante, marquée par un alignement préférentiel de minéraux, suggérant une cristallisation syn-cinématique des minéraux phylliteux (Figure 10b). L'absence de composante rotationnelle à l'échelle d'affleurement atteste que l'épisode D1a est une déformation coaxiale, par aplatissement pur.

4.2.2.2 EPISODE DE DÉFORMATION D1B

Le deuxième épisode de déformation panafricaine D1b est marqué par des couloirs de cisaillement, des failles décrochantes, des plis et des boudinages.

4.2.2.2.1 COULOIRS DE CISAILLEMENTS SEMI-DUCTILES

Dans le secteur de Gofat, la schistosité/foliation (S1) a été affectée par un épisode de déformation mylonitique (D1b) ductile à semi-ductile, marquée par le développement d'une fabrique S/C (Figure 11A, B). Ces couloirs de cisaillement orientés N130° avec des pendages compris entre 60° à 80° vers le NE ou le SW, ont été mis en évidence dans les phyllades. Les couloirs de cisaillement NW-SE, indiquent un mouvement senestre (Figure 11A, B).

4.2.2.2.2 MICROFAILLES DÉCROCHANTES

Les quartzites à muscovites présentent des miroirs de microfailles décrochantes d'orientation (N120°, 50°SW). Les miroirs de microfailles décrochantes présentent des stries subhorizontales et des figures d'arrachements. Par endroits, ces miroirs

présentent des recristallisations de quartz en zone abritée (Figure 11C). Ces tectoglyphes mettent en évidence le jeu senestre de la microfaille décrochante (Figure 11C).

4.2.2.2.3 Plus P1

L'épisode de déformation D1b, semi-ductile affecte la schistosité/foliation (S1). Il est marqué par des microplis P1 subisopaques presque droits (Figure 11D). Les plans axiaux de ces plis, de direction comprise entre N80° à N90°, ont un pendage de 65° à 80° vers le SW ou vers le NW. Les plans axiaux de ces plis sont subverticaux et subparallèles à la direction de la schistosité S2. Ces plis ont été observés dans les phyllades du secteur de Gofat.

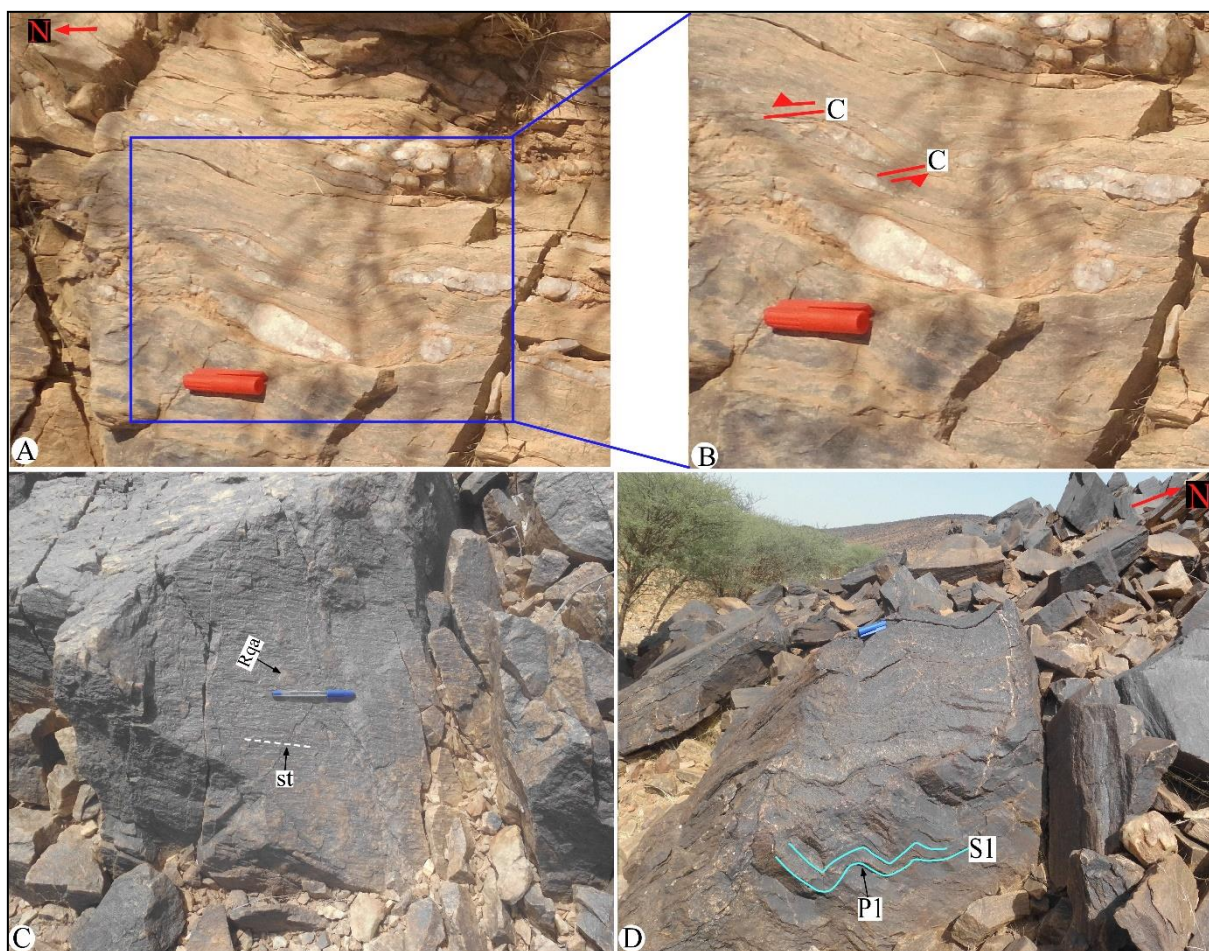


Fig. 11. Structures de déformation caractérisant l'épisode D1b. B: Vue de détail de la photo A: Fabrique S/C senestre. C: Miroir de microfaille décrochante à jeu senestre. D: Microplis (P1) observés dans les phyllades du secteur de Gofat. Raq: Recristallisation de quartz en zone abritée

4.2.2.2.4 BOUDINAGE

Il correspond au tronçonnage par étirement de bancs compétents. Dans le secteur d'étude, les boudins sont orientés suivant la direction N140° à N170° de la schistosité S1 (Figure 12b).

4.2.3 STRUCTURES TECTONIQUES ASSOCIÉES À LA DEUXIÈME PHASE DE DÉFORMATION PANAFRICAIN D2

La phase de déformation D2, semi-ductile à cassante, caractérisée par un mécanisme de déformation par cisaillement simple, est marquée par la schistosité de fracture S2. Cette dernière, d'orientation N80° à N110°, présente des pendages variant entre 60° et 80° vers le Nord ou le Sud (Figure 12A, B). La schistosité S2, qui est une schistosité de fracture, affecte la plupart

des faciès sous forme d'une série de minces fractures ouvertes sans recristallisation de quartz, recoupant la schistosité S1. La schistosité S2 est représentée par un réseau de fractures conjuguées NE-SW et NW-SE.

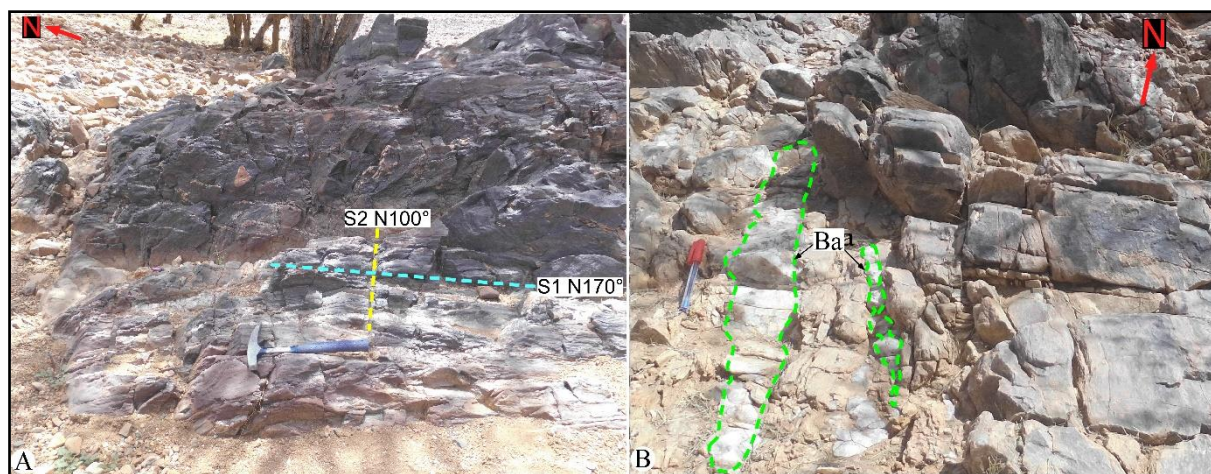


Fig. 12. Structures tectoniques associées à la phase de déformation D2. A: Schistosité de fracture (S2) affectant les phyllades. B: Boudins mis en évidence dans les phyllades

4.3 ANALYSE AU MICROSCOPE DES STRUCTURES DE DÉFORMATION COMPRESSIVE

L'observation microscopique montre que les phyllades présentent une texture lepidoblastique soulignée par des biotites et des muscovites disposées parallèlement à la schistosité/foliation S1, de direction N140° à N170° (Figure 13a). L'alignement de ces micas (muscovites et biotites) suivant une direction préférentielle suggère une déformation à des températures relativement élevées, où la ductilité des minéraux permet ce type de réorganisation (Gapais, 1989; Passchier et Trouw, 2005). Les cristaux de quartz à contours subarrondis sont isogranulaires, ce qui pourrait correspondre à une recristallisation dynamique ou une recristallisation statique (Figure 13a). Localement, une rotation de cristaux néoformés a été observée indiquant un régime de basse température (Passchier et Trouw, 2005).

Au microscope, les chloritoschistes présentent de grands cristaux de quartz indiquant une recristallisation dans des conditions de haute température (Figure 13b). Dans les chloritoschistes, l'association minéralogique est constituée de quartz, de biotite et de chlorite. Cette paragenèse minérale indique que les chloritoschistes se sont formés dans le faciès schiste vert. La biotite se présente en grandes paillettes allongées et localement fracturées dont les microfractures sont remplies par des cristaux de quartz recristallisés. Ces derniers sont enveloppés généralement par de la biotite déformée. La déformation de la biotite s'exprime de deux façons: soit sous la forme de paillettes soulignant des bandes cisaillements, soit sous forme de paillettes à géométrie sigmoïde, dans les deux cas cela traduit un régime de basse température.

Les méta-rhyolites sont constitués de phénocristaux de microcline et de cristaux de quartz (Figure 13c). La présence de microcline indique une déformation à haute température (Eggleton et Busseck, 1980).

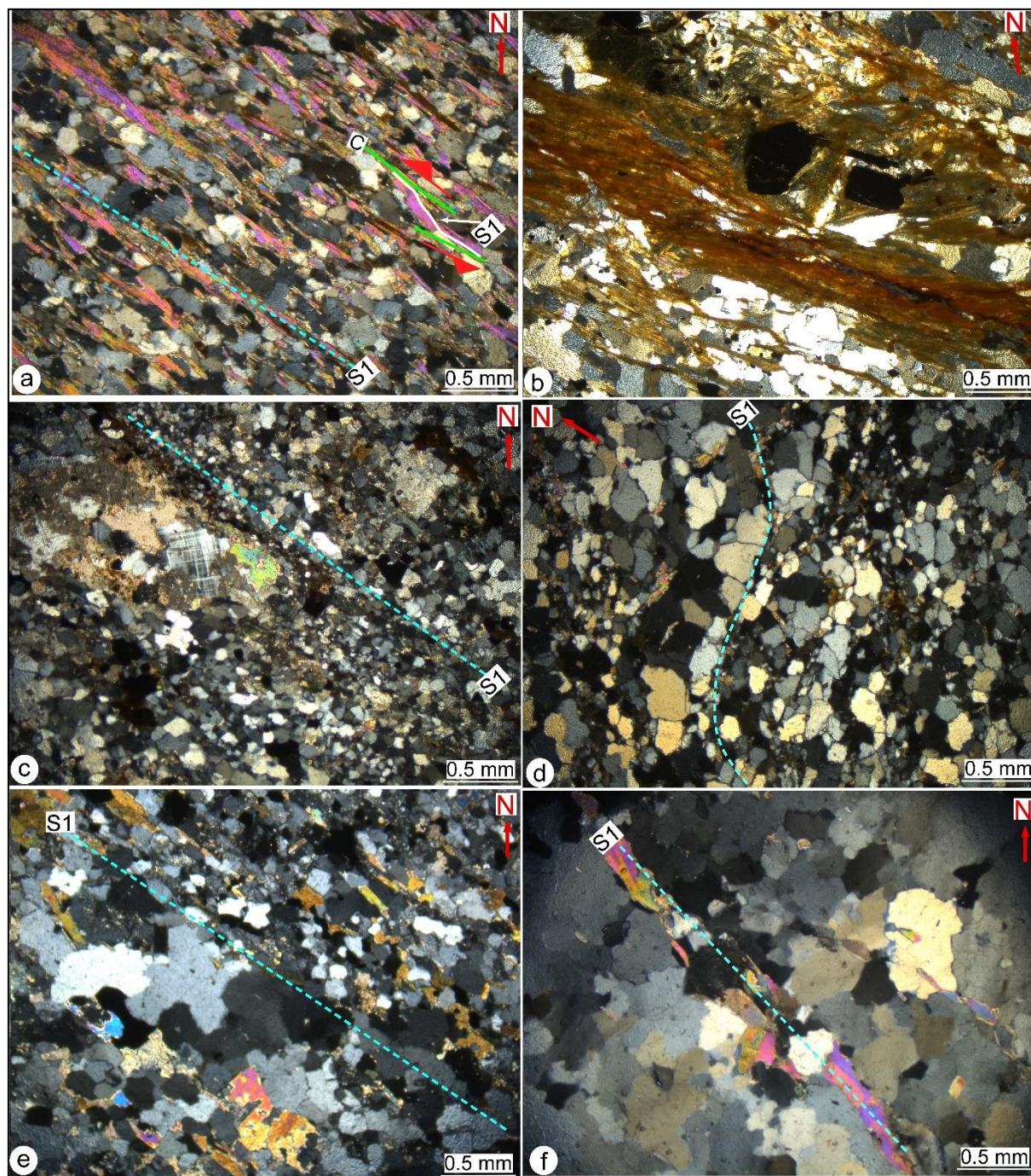


Fig. 13. Différentes structures de déformation à l'échelle microscopique, observées dans les roches métamorphiques. (a): Micaschistes. (b): Chloritoschistes. (c): Méta-rhyolites. (d): Paragneiss. (e): Orthogneiss et (f): Quartzites à muscovites

Dans les paragneiss, la recrystallisation dynamique du quartz est visible à travers la migration des contours des cristaux de quartz à haute température. Les cristaux de quartz montrent également quelques indices de rotation des plus petits cristaux à basse température (Figure 13d).

Au microscope, les orthogneiss présentent une foliation soulignée par une alternance des bandes claires (quartzofeldspathiques) et sombres (constituées de biotites et de muscovite). Les porphyroblastes de quartz généralement dentelés suggérant une migration des contours de quartz (Figure 13e). Ces contours irréguliers indiquent des conditions de cristallisation à des températures supérieures à 550°C (Stipp et al, 2002). Dans les orthogneiss, une diminution progressive de la taille des grains, est attribuable à la formation de petits grains néoformés par recrystallisation dynamique des grands cristaux.

L'observation microscopique des quartzites à muscovite montre que la roche est constituée essentiellement de quartz et de muscovite (Figure 13f). Le quartz se présente en porphyroblastes xénomorphes à sub-automorphes. Il présente une légère migration du contour des cristaux de quartz et une recristallisation de quartz en cristaux de petite taille. La texture définie par les grands cristaux de quartz traduit un régime de haute température (Figure 13f). Dans les quartzites à muscovite, la schistosité est marquée par l'aplatissement des cristaux de quartz et la présence de paillettes de muscovite, disposées suivant une direction préférentielle NW-SE (Figure 13f).

4.4 DÉTERMINATION DES PRINCIPALES PHASES DE DÉFORMATION

Dans le secteur d'étude, des mesures de plans: de schistosité, de microfailles décrochantes et de fractures ont été réalisées. Les données structurales récoltées sur le terrain ont été traitées à l'aide des logiciels Win-Tensor, version 5.8.9 (Delvaux, 2003) et Stereonet, version 9.5.3 d'Allmendinger (2017).

4.4.1 PHASE DE DÉFORMATION EXTENSIVE D0.

Les plans de failles et microfailles normales associés à la déformation extensive pré-panafricaine ont été traités à l'aide du programme Win-Tensor, version 5.8.9 (Delvaux, 2003). Les stéréodiagrammes obtenus indiquent que les tenseurs extensifs se caractérisent par des directions de σ_3 variant de N20°E (Figure 14a) à N170°E (Figure 14b), c'est-à-dire globalement N-S.

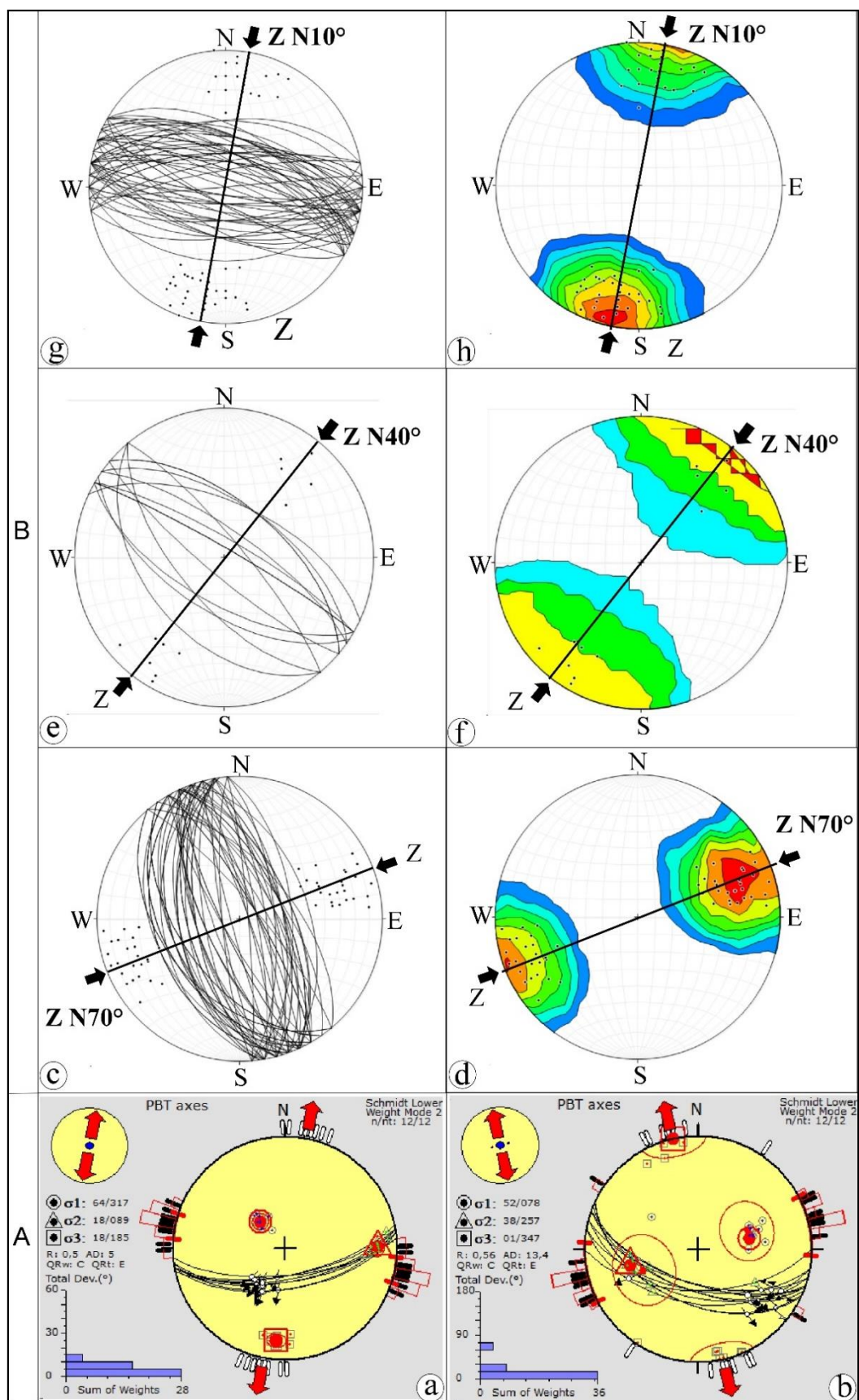


Fig. 14. Différentes phases de déformation panafricaines ayant affecté le terrane de Tchilit

4.4.2 DÉTERMINATION DE LA DIRECTION DE RACCOURCISSEMENT CARACTÉRISANT LA PREMIÈRE PHASE DE DÉFORMATION PANAFRICAINE D1

- Episode de déformation D1a ductile

Dans le secteur d'étude, les plans de schistosités S1, d'orientation N140° à N170° ayant des pendages compris entre 60° et 80° W ou E indiquent une direction moyenne de raccourcissement Z N70° (Figure 14c, d).

- Episode de déformation D1b semi-ductile

Les plans de schistosités S1 subissent une légère rotation dans des couloirs de cisaillement ductiles d'orientation N130° de microfailles décrochantes, à jeu senestre. Les directions moyennes des plans de schistosité sigmoïdes varient de N130° à N140°. La projection des plans S1 déformés sigmoïdes à l'aide du programme Stéréonet, version 9.5.3 d'Allmendinger (2017), indique une direction moyenne de raccourcissement Z N40° (Figure 14e, f).

4.4.3 DÉTERMINATION DE LA DIRECTION DE RACCOURCISSEMENT CARACTÉRISANT LA DEUXIÈME PHASE DE DÉFORMATION PANAFRICAINE D2

Les plans de schistosité de fracture S2, d'orientation N80° à N110°, ayant des pendages de 60° à 80° vers le NW, ont été reportés sur le diagramme de Schmidt. La direction moyenne de raccourcissement Z obtenue est d'environ N10° (Figure 14g, h).

4.5 SYNTHÈSE STRUCTURALE

Les formations panafricaines du terrane de Tchilit du secteur de Gofat-Tafadek sont affectées par trois phases de déformations D0, D1 et D2. Le traitement automatique des données de microtectonique (plans de microfailles et schistosités) a montré que la zone d'étude a été affectée, successivement, par les phases de déformation suivantes (Figure 15):

- La phase extensive pré-panafricaine D0, caractérisée par une extension de direction NNW-SSE (N170°) à NNE-SSW (N20°);
- La phase de raccourcissement panafricaine D1, comprenant 2 épisodes D1a ductile et D1b semi-ductile:
 - L'épisode D1a à raccourcissement WNW-ESE (N70°);
 - L'épisode compressif D1b est marqué par une direction de raccourcissement NE-SW (N40°);
- La phase D2, également compressive, est marquée par une direction de raccourcissement globalement NNE-SSW (N10°).

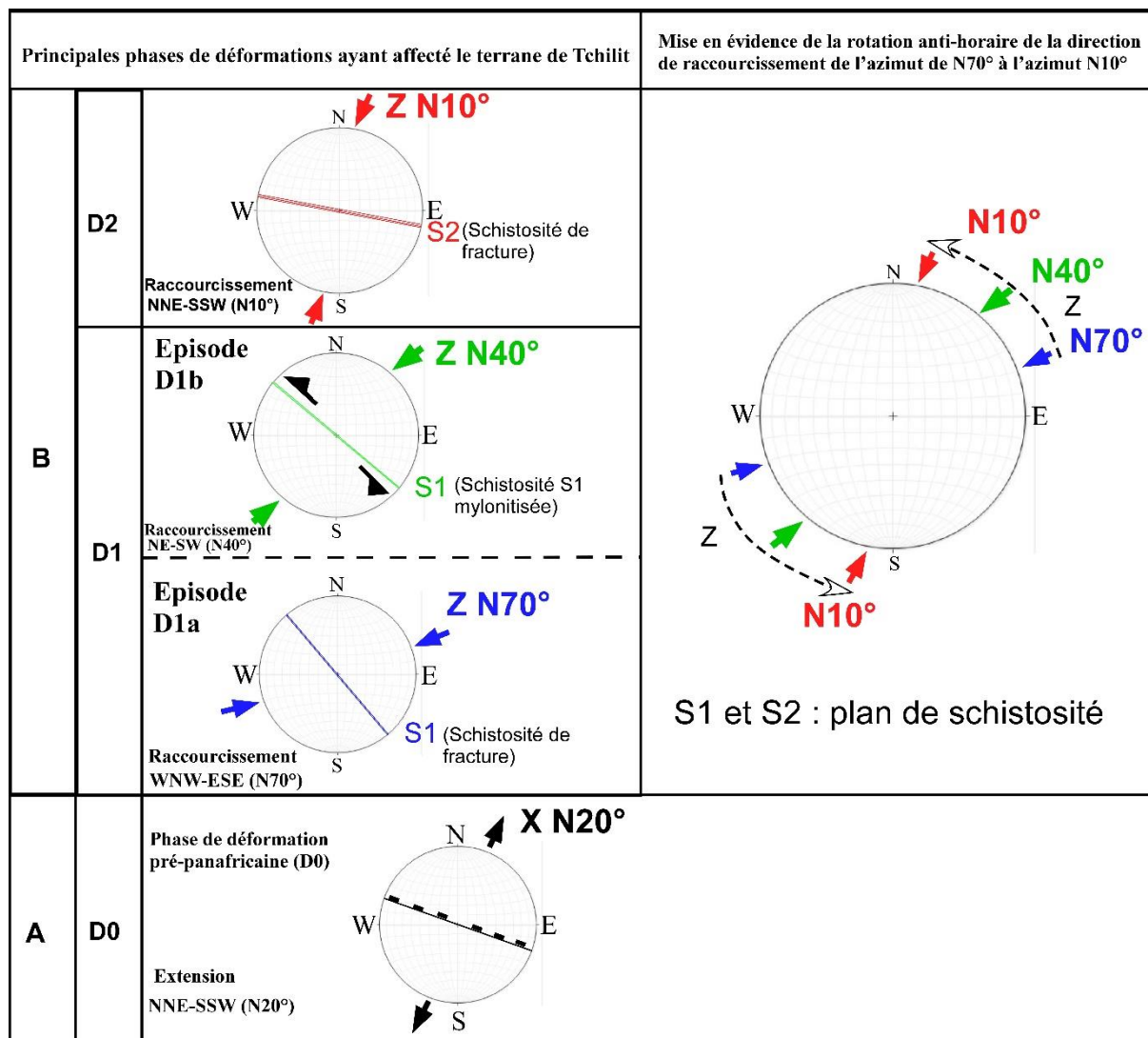


Fig. 15. Différentes phases de déformation ayant affecté le terrane de Tchilit. A: Phase de déformation extensive pré-panafricaine D0. B: Mise en évidence d'une rotation de la direction de raccourcissement Z pendant l'évènement panafricain, de la direction N70° à N10°

4.6 DISCUSSION SUR LES PRINCIPALES PHASES DE DÉFORMATION PANAFRICAINES AYANT AFFECTÉES LE SECTEUR D'ÉTUDE

La région étudiée est affectée par trois phases de déformation majeures: l'une extensive pré-panafricaine et les deux autres compressives panafricaines.

A. Phase de déformation extensive D0

Dans le terrane de Tchilit, la phase de déformation extensive, anté-panafricaine, a été mise en évidence dans les quartzites. Elle est marquée par une direction d'allongement moyenne N20°. Cette direction d'allongement est identique à la direction N20° obtenue par Badamassi et Konaté (2021) dans le Damagaram et par Ibrahim-Maaharou (2020) dans les grès infracambriens de la région de Niamey. Toutefois, cette direction d'extension est différente, à quelques nuances près, de la direction N40° obtenue par Alzouma-Amadou et al. (2020) dans les grès infracambriens de Figoun, plus au Nord et de la direction NNW-SSE obtenue par Affaton et al. (2000) dans les grès infracambriens de Karey Gorou. L'interprétation de cette phase de déformation extensive dans le contexte géodynamique fait encore l'objet de controverse. Pour certains auteurs (Black et al., 1979; Alzouma-Amadou et al., 2020; Ibrahim-Maaharou, 2020), la phase de déformation D0, anté-panafricaine, serait contemporaine de l'ouverture de l'océan néoprotérozoïque entre 870 Ma et 800 Ma. Selon Bertrand et Caby (1978), Black (1978), Affaton (1987 et 1990), la formation de la chaîne panafricaine des Dahomeyides, comporte comme première étape:

une phase de distension qui aurait provoqué l'ouverture d'un domaine océanique évoluant en rift vers 700 Ma (l'ouverture océanique serait plus précoce au Nord dans les Pharosides, aux alentours de 850 Ma selon Caby et Moussine-Pouchkine (1978) et Black et *al.* (1979). Contrairement aux affirmations de ces auteurs, Affaton et *al.* (2000) suggèrent cette extension D0 subméridienne serait liée à la réactivation d'anciennes fractures mésoprotérozoïques, qui auraient engendré la genèse de bassins pendant le Néoprotérozoïque.

B. Phase de déformation panafricaine D1

▪ Episode de déformation D1a

L'épisode de déformation D1a est responsable de schistosité/foliation (S1) et des linéations minérales. Cet épisode de déformation ductile a été relié à un raccourcissement Z N70° (ENE-WSW). Antérieurement à la présente étude, Badamassi et Konaté (2021) ont mis en évidence dans la province panafricaine du Damagaram, un épisode D2b de raccourcissement panafricain, de direction N80°E, très proche de celle obtenue par la présente étude. Cet épisode D1a à raccourcissement N70° est correspond la deuxième phase A2 de raccourcissement tardi-panafricain de direction N75° en moyenne mise en évidence par Konaté (1996) (N60° à N90°) dans le socle panafricain attenant au bassin de Kandi. Cet épisode de raccourcissement panafricain D1a est également comparable à l'épisode D1b de direction N70° à N90° décrit dans le socle panafricain du Sud Maradi par Baraou et Konaté (2020). Dans le terrane de Tchilit, il existe également des filons granitiques, ainsi que des filons de quartz et de pegmatites qui présentent la même orientation que la schistosité/foliation (S1) du secteur d'étude. Ce parallélisme implique une mise en place syn-phase D1 de ces filons.

▪ Episode de déformation D1b

L'épisode D1b, mis en évidence dans le secteur d'étude, correspond à une compression de direction moyenne N40° (NE-SW). Il est caractérisé par des failles décrochantes, des couloirs de cisaillements semi-ductiles, des boudinages et des plis. Antérieurement à la présente étude, Mariane (2013) a mis en évidence dans les chaînes panafricaines des Oubanguides en Centrafrique, une phase compressive D4 (N40° à N50°) identique à celle obtenue dans le secteur de Tchilitt et dans le socle panafricain du Damagaram (Badamassi et Konaté, 2021). Pour certains l'épisode D1b est associé à une tectonique transcurrente, c'est-à-dire liée au fonctionnement de grands couloirs de cisaillement (Caby et Boesse, 2001; Ferre et *al.*, 2002; Toteu et *al.*, 2004; Nzenti et *al.*, 2006; Affaton et *al.*, 2013; Chala et *al.*, 2015; Bassey et Udinmwun, 2019; Badamassi, 2021). Dans la chaîne Trans-Saharienne, cet épisode D1b est concomitant de la phase D3 définie dans Hoggar où, cette phase est à l'origine de zones mylonitiques subméridiennes majeures (Affaton et *al.*, 2013; Ball, 1980; Bertrand et *al.*, 1986).

Comme évoqué plus haut, le passage de l'épisode D1a à D1b est marqué par une rotation anti-horaire de direction de raccourcissement Z (de l'azimut N70° à N40°) traduisant un continuum de déformation (Figure 15).

C. Phase de déformation panafricaine D2

La deuxième phase de déformation D2 cassante, mise en évidence par la présente étude, est caractérisée par une direction moyenne de compression d'environ N10° (NNE-SSW), marquée par le développement d'une schistosité de fracture S2 (Figure 15). En effet, ce caractère cassant de la phase de déformation D2 suggère que la croûte continentale panafricaine était déjà refroidie au moment de cette déformation (Badamassi, 2021). Cette phase de déformation D2 a une direction presque identique à la direction N15°, obtenue par Badamassi et Konaté (2021) dans la province panafricaine du Damagaram.

5 CONCLUSION

L'analyse pétrographique montre que dans le secteur de Gofat-Tafadek, le terrane de Tchilit est constitué de phyllades, de chloritoschistes, de biotites à quartz, de micaschistes, de quartzites à muscovite, de quartzoschistes, de paragneiss, d'orthogneiss à biotite, d'amphibolites, de métarhyolites, de méta-arkoses, de granites à deux micas, de granites hétérogranulaires et de pegmatites.

L'analyse structurale du terrane de Tchilit du secteur de Gofat et de Tafadek met en évidence trois phases de déformation D0, D1 et D2.

La phase de déformation extensive D0 caractérisée par une direction d'extension NNE-SSW (N20°) est matérialisée par des miroirs de microfailles normales observés dans les quartzites.

La première phase de déformation D1 (panafricaine), ductile à semi-ductile comprend deux épisodes, D1a et D1b. En effet, le premier épisode ductile (D1a), de raccourcissement panafricain est caractérisé par une direction de raccourcissement ENE-WSW (N70° en moyenne), tandis que le second épisode semi-ductile à cassant (D1b) est marqué par une direction moyenne de raccourcissement NE-SW (N40°). Le passage de l'épisode D1a à D1b est marqué une rotation anti-horaire de direction de raccourcissement (ZN70° à ZN40°), traduisant un continuum de déformation. La deuxième phase de déformation D2, marquée par une direction raccourcissement N10° (NNE-SSW), est tardive à post-panafricaine. Elle est marquée par le développement d'une schistosité de fracture.

L'évolution structurale dans le temps de la direction de raccourcissement dans le terrane de Tchilit met en évidence une rotation antihoraire senestre, de la direction ENE-WSW (Phase D1) à la direction NNE-SSW (Phase D2). Celle-ci traduit un continuum de déformation pendant l'événement panafricain, en liaison avec la convergence entre les cratons Ouest Africain, de São Francisco, du Congo et le Métacraton Saharien.

Les déformations enregistrées dans le terrane de Tchilit sont marquées par une évolution du gradient de déformation métamorphique du faciès amphibolite dans la partie ouest au faciès schiste vert en allant vers l'Est.

REFERENCES

- [1] Affaton, P., Gaviglio, P., & Pharissat, A. (2000). Réactivation du craton ouest-africain au Panafricain : paléocontraintes déduites de la fracturation des grès néoprotérozoïques de Karey Gorou (Niger, Afrique de l'Ouest). 331, 609–614.
- [2] Affaton, P., Gélard, J. P., & Simpara, N. (1991). Paléocontraintes enregistrées par la fracturation dans l'unité structurale de l'Atacora à la latitude de Défalé (chaîne panafricaine des Dahomeyides, Togo). C. R Acad. Sci. Paris, série II 3, 763–768.
- [3] Affaton, P., Tairou, M. S., Tossa, C., Chala, D., & Kwékam, M. (2013). Premières données microstructurales sur le complexe granito-migmatitique de la région de Nikki, NE-Bénin. Global Journal of Geological Sciences, 11, 13–26.
- [4] Affaton P. (1990). Le Bassin des Volta: une marge passive d'âge protérozoïque supérieur tectonisée au Panafricain (600 ± 50 Ma). Éd. ORSTOM, Coll. Etudes et thèses, 2 volumes, 481 p.
- [5] Affaton P. (1987). Le bassin des Volta (Afrique de l'Ouest): une marge passive, d'âge protérozoïque supérieur, tectonisée au Panafricain (600 ± 50 Ma), Thèse de Doctorat d'Etat, Université Aix-Marseille III, 462 p.
- [6] Ahamed, Y., Soumaila, A., & Harouna, M. (2018). Basaltes quarternaires du Fossé de Termit-Agadem (Niger oriental): caractérisation et signification géodynamique. In Annales de l'Université Abadou Moumouni (Vol. 1, pp. 91–111).
- [7] Ahmed, Y. (1989). Pétrologie et relations structurales des volcanites cénozoïques du Niger oriental: Fossé tectonique du Tefidet (Aïr) (pp. 1–154).
- [8] Ahmed, Y., Konaté, M., & Harouna, Mo. (2016). Tectono-magmatic reactivation of Tefidet Cretaceous trough during Cenozoic (Aïr, Niger). 73–82.
- [9] Allmendinger, R. (2017). Stereonet, version. 10.0. <http://www.Geo.Cornell.Edu/Geology/Faculty/RWA/Programs/Stereonet.Html>.
- [10] Alzouma Amadou D., Konaté M. and Ahmed Y., 2020. Geodynamic context of the Proterozoic deposits of the Firgoun region (eastern border of the West African Craton, West Niger). Geological Society, London, Special Publications (sous presse).
- [11] Amadou, D. A., Konaté, M., & Ahmed, Y. (2020). Geodynamic context of the Proterozoic deposits of the Firgoun Region (eastern border of the West African Craton). Geological Society, London Special Publications (Sous Presse), 1–22. <https://doi.org/10.1144/SP502-2019-115>.
- [12] Angeline, Y. S., Paul, N. J., & Sylvestre, G. (2007). Évolution tectono-métamorphique de la région à l'ouest de Nkambé (province du Nord-Ouest Cameroun). January, 127–134.
- [13] Badamassi, K. M. M. (2021). CARACTERISATION PETROSTRUCTURALE ET GEOCHIMIQUE DES FORMATIONS PANAFRICAINES DE LA PROVINCE DU DAMAGARAM (SUD-EST NIGER). 125.
- [14] Badamassi, M. M. K., & Konaté, M. (2021). Characterization of the Damagaram Province Pan - African basement Deformation (South - East, Niger). International Journal of Science and Research, 1421–1431.
- [15] Ball, E. (1980). AN EXAMPLE OF VERY CONSISTENT BRITTLE DEFORMATION OVER A WIDE INTRACONTINENTAL AREA : THE LATE PAN-AFRICAN FRACTURE SYSTEM OF THE TUAREG AND NIGERIAN SHIELD The central Sahara has been recently subjected to important vertical movements. Due to uplift,. 61, 363–379.
- [16] Ball, E., Bard, J. P., & Soba, D. (1984). Tectonique tangentielle dans la catazone pan-africaine du Cameroun : les gneiss de Yaounde. Journal of African Earth Sciences, 2 (2), 91–95. [https://doi.org/10.1016/S0731-7247\(84\)80002-6](https://doi.org/10.1016/S0731-7247(84)80002-6).
- [17] BARAOU, I. S., KONATE, M., AHAMED, Y., & DJIBO-MAIGA, A. W. (2018). Caractérisation de la déformation du socle de la zone mobile panafricaine du Sud Maradi, Sud Niger Résumé. Afrique SCIENCE, September, 156–170.

- [18] Baraou, I. souley. (2018). Contribution à l'étude pétrographique, géochronologique et structurale des formations panafricaines du Sud Maradi (Sud Niger): relations avec les indices aurifères. Thèse. Université Abdou Moumouni.
- [19] Bassey, N. E., & Udinmwun, E. (2019). Structure and tectonics of Hong Hills in Hawal Precambrian Basement Complex, North East Nigeria., *Journal of Geology and Mining*, 11, 48–58.
- [20] BELLION, Y. J.-C. (1987). Histoire Géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques Bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudeni, Iullemmeden, Tchad). 1–296.
- [21] Benyahia, O., Haddoum, H., Ouzegane, K., Bendaoud, A., Djemai, S., & Kienast, J. R. (2005). Influence panafricaine puis phanérozoïque des shear zones sur le socle éburnéen de la région de Tamanrasset. March 2016.
- [22] Bertrand, J. M., Michard, A., Boullier, A. M., & Dautel, D. (1986). Structure and U-Pb geochronology of the Central Hoggar (Algeria). A reappraisal of its pan-African evolution. *Tectonics*, 5, 955–972.
- [23] Bertrand JLM, Caby R (1978) Geodynamic evolution of the Pan-African orogenic belt: a new interpretation of the Hoggar shield (Algerian Sahara). *Geol Rundsch* 67: 357–388.
- [24] Black, R. (1965). Sur la signification pétrogénétique de la découverte d'anorthosites associées aux complexes annulaires subvolcaniques du Niger. *C R Acad Sci Paris* 260, 5829–5832.
- [25] Black, R., Jaujou, M., & Pellaton, C. (1967). Notice explicative carte géol Air.pdf (pp. 5–55).
- [26] Black, R., Latouche, L., Liégeois, J. P., Caby, R., & Bertrand, J. M. (1994). Pan-African displaced terranes in the Tuareg Shield (central Sahara). *Geology*, 22 (7), 641–644. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0641:PADTIT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0641:PADTIT>2.3.CO;2).
- [27] Black, R., Liégeois, J.-P., Navez, J., & Vlatette, Y. (1991). Terrains exotiques dans les zones internes de la chaîne panafricaine trans-saharienne: les clefs fournies par l'Aïr sud oriental (République du Niger) (pp. 889–895).
- [28] Black, R., & Liégeois, J. p. (1993). Cratons, mobile belts, alkaline rocks and continental lithospheric mantle : the Pan-African testimony. *Cratons, mobile belts, alkaline rocks and continental lithospheric mantle : the Pan-African testimony*. 150 (February 1993), 88–98. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.1.0088>.
- [29] Black R. (1978). Propos sur le Panafricain. *Bull. Soc.Géol. Fr.*, XX, 843-850.
- [30] Black R., Caby R., Moussine-Pouchkine A., Bayer R., Bertrand J.M., Boullier A.M., Fabre J. and Lesquer A. (1979). Evidence for late Precambrian plate tectonics in West Africa. *Nature* 278, 223-227.
- [31] Boullier, A. M., Rocci, G., & Cosson, Y. (1991). La chaîne pan-africaine d'Aouzegueur en Aïr (Niger): un trait majeur du bouclier touareg. *C R Acad Sci Paris* 313:, 63–68.
- [32] Bowden, P., Black, R., Martin, R. F., Ike, E., Kinnaird, J. A., & Batchelor, R. A. (1987). Niger-Nigerian alkaline ring-complexes: a classic example of African Panerozoic anorogenic mid-plate magmatism. In Fitton, J.G and Upton, B.J.G (Eds) *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society, London, Special Publication, 30, 357–380.
- [33] Caby, R., & Andreopoulos-Renaud, U. (1987). Le Hoggar oriental, bloc cratonisé ~ 730 Ma dans la chaîne pan-africaine du nord du continent africain. *Precambrian Res.*, 36:, 335–344.
- [34] Caby R. and Moussine-Pouchkine A., 1978. Le horst birimien de Bouré (Gourma oriental, République du Mali): nature et comportement au cours de l'orogénèse panafricaine. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 278, 5–8.
- [35] Caby, R., & Boesse, J. M. (2001). Pan-African nappe system in southwest Nigeria : the Ife-Ilesha schist belt. 33 (2), 1–15.
- [36] Cahen, L., Klerkx, J., & Michot, J. (1984). Granitoides kibariens précoces et tectonique tangentielle Burundi.pdf (pp. 29–49).
- [37] Chala, D., Tairou, M. S., Wenmenga, U., Kwékam, M., Affaton, P., Kalsbeek, F., Tossa, C., & Houéto, A. (2015). Pan-African deformation markers in the migmatitic complexes of Parakou–Nikki (Northeast Benin). *Journal of African Earth Sciences*, 111, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.08.009>
- [38] Delvaux, D. (2003). Win-Tensor User Guide : PTB Module.
- [39] Demaiffe, D., & Moreau, C. (1996). Crustal growth in Aïr (Niger, West Africa): significance of the Palaeozoic anorthosite-bearing anorogenic province. In: Demaiffe, D. (Ed.), *Petrology and Geochemistry of Magmatic Suites of Rocks in the Continental and Oceanic Crusts*. Université Libre Bruxelles, Belgium, 35–49.
- [40] Dumont, J. F., Toteu, S. F., & Penaye, J. (1985). ENSEMBLES STRUCTURAUX ET PRINCIPALES PHASES DE DEFORMATIONS PANAFRICAINES DANS LA ZONE MOBILE DU NORD CAMEROUN, REGION DE POL. *Rev. Sci. et Tech.Sér. Sci. Terre*, 1, 10–23.
- [41] Eggleton RA and Buseck PR (1980) The orthoclase-microcline inversion: a high-resolution TEM study and strain analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 74: 123-133.
- [42] Fabre, J. (2005). Géologie du Sahara occidental et central. *Tervuren African Geoscience Collection*, 108, Musée Royal de l'Afrique Centrale - Belgique, Tervuren, 572.
- [43] Ferre, E., Gleizes, G., & Caby, R. (2002). Obliquely convergent tectonics and granite emplacement in the Trans-Saharan belt of Eastern Nigeria : a synthesis. *Precambrian Research*, 114, 199–219.
- [44] Fozing, E. M. (2016). Caractérisation structurale et magnétique du pluton granitique de Misajé (Nord-Ouest Cameroun). 156.

- [45] Gapais D (1989) Shear structures within deformed granites: Mechanical and thermal indicators. *Geology* 17: 1144-1147.
- [46] Greigert, R., & Pognet, J. (1967). Essai de description des formations géologiques de la république du Niger. Mem. BRGM, n°48, 239p.pdf (pp. 1–267).
- [47] Guiraud, M. (1990). Mécanisme de formation du bassin sur décrochements multiples de la Haute-Bénoué (Nigéria) : Faciès et géométrie des corps sédimentaires, microtectonique et déformations synsédimentaires. Thèse Doct. d'Etat, Montpellier, 444.
- [48] Ibrahim-Maaharou, H. (2020). Dynamique sédimentaire des grès de Niamey (Niger occidental) : indices de glaciation et déformations associées. 1–137.
- [49] Kamwa, A. N., Owona, S., Tchakounté, J., & Ondoa, J. M. (2017). Fabriques en aplatissement et constriction des granitoïdes de Nga Mbappé et de Yoro au nord du Groupe de Yaoundé (CPNE, Cameroun): témoins de la mise en place de granites syn-tectoniques au cours de l'orogénèse Pan-Africaine. *Fabrics de achatamento e constricção nos granitoides de Nga Mbappé e Yoro ao norte do Grupo Yaoundé (CPNE, Camarões): evidência da instalação de granitos sintectónicos durante a orogenia Pan-.* 2016, 5–16.
- [50] Konaté, M. (1996). Evolution tectono-sédimentaire du bassin paléozoïque de Kandi (Nord Bénin, Sud Niger). Un témoin de l'extension post-orogénique de la chaîne panafricaine. Thèse de Doctorat, Université de Dijon, France, 489.
- [51] Kwache, J. B., & Ntekim, E. E. (2015). Geology of Dumne area in Southeastern Hawal massif, Northeastern Nigeria. *International Journal of Science and Research* 4 (11), 2477–2482.
- [52] Liégeois, J. P. (2019). A new synthetic geological map of the tuareg shield: an overview of its global structure and geological evolution. *Springer Geology*, 83–107. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96794-3_2.
- [53] Liégeois, J. P., Black, R., Navez, J., & Latouche, L. (1994). Early and late Pan-African orogenies in the Air assembly of terranes (Tuareg shield, Niger). *Precambrian Research*, 67 (1–2), 59–88. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)90005-1).
- [54] Liégeois, J. P., Latouche, L., Boughrara, M., Navez, J., & Guiraud, M. (2003). The LATEA metacraton (Central Hoggar, Tuareg shield, Algeria): Behaviour of an old passive margin during the Pan-African orogeny. *Journal of African Earth Sciences*, 37 (3–4), 161–190. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2003.05.004>
- [55] Ligeois, J. P., & Claessens, W. (1991). Short-lived Eburnian orogeny in southern Mali. 50, 111–136.
- [56] Maurin, J. C. (1993). The Pan-African West Congo Belt links with Eastern Brazil an geodynamical reconstruction. *Bulletin de La Société Géologique de France*, 164 (1), 51–60.
- [57] Mvondo, H., Brok, S. W. J. Den, & Ondoa, J. M. (2003). Evidence for symmetric extension and exhumation of the Yaounde nappe (Pan-African fold belt, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 36, 215–231. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00017-4).
- [58] Mariane O.K. (2013). Contribution à l'étude de la chaîne panafricaine des Oubanguides en République Centrafricaine. Thèse de l'Université d'Aix-Marseille.
- [59] Navez, J., Liégeois, J. P., Latouche, L., Boven, A., & Black, R. (1999). The Paleoproterozoic Tchilit exotic terrane (Air, Niger) within the Pan-African collage of the Tuareg shield. *Journal of Geological Society, London*, 156 (April 1999), 247–259. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.2.0247>.
- [60] Njanko, T., Nédélec, A., Kwékam, M., Siqueira, R., & Esteban, L. (2010). Emplacement and deformation of the Fomopea pluton: implication for the Pan-African history of western Cameroon. *J Struct Geol*, 32, 306–320.
- [61] Nzenti, J. P., Kapajika, B., Wörner, G., & Lubala, T. R. (2006). Synkinematic emplacement of granitoids in a Pan-African shear zone in Central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 45, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.01.005>
- [62] Passchier, C. W., & Trouw, R. A. J. (2005). *Microtectonics*. Springer Science & Business Media.
- [63] Pouclet, A., Ahmed, Y., Baubron, J.-C., Bellion, H., & Morel, A. (1994). Age et mise en place du volcanisme cénozoïque du graben de Téfidet (système de rift). *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences, Paris*, 683–690.
- [64] Pouclet, A., & Durand, A. (1983). Structures cassantes cénozoïques d'après les phénomènes volcaniques et néotectoniques au NW du Lac Tchad. *Annales de La Société Géologique Du Nord*, 143–155.
- [65] Quick, J. E. (1991). Late Proterozoic transpression on the Nabitah fault system-implications for the assembly of the Arabian shield. *Precambrian Res.*, 53, 119–147.
- [66] Saquaque, B. A. L. I., Benharref, M., Abia, H., Mrini, Z., Reuber, I., & Karson, J. A. (1992). Evidence for a Panafrican volcanic arc and wrench fault tectonics in the Jbel Saghro, Anti-Atlas, Morocco. 1–13.
- [67] Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., & Schmid, S. M. (2002). Dynamic recrystallization of quartz: Correlation between natural and experimental conditions. *Geological Society, London, Special Publications*, 200 (1), 171–190. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.200.01.11>.
- [68] Tairou, M. S., Affaton, P., Gélard, J.-P., Aïté, R., & Sabi, B. E. (2007). Panafrican brittle deformation and palaeostress superposition in northern Togo (West Africa). 339, 849–857. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.08.001>

- [69] Toteu, S. F., Michard, A., Bertrand, J. M., & Rocci, G. (1987). U/Pb dating of Precambrian rocks from Northern Cameroon, orogenic evolution and chronology of the Pan-African belt of Central Africa. *Precambr Res* 37, 74–87.
- [70] Toteu, S. F., Panaye, J., & Poudjom, D. Y. (2004). Geodynamic evolution of the Pan-African belt of Central Africa with special refernce to Cameroon. *Can. J. Earth Sci*, 41, 73–85.
- [71] Udinmwun, M. (2017). Paleostress configuration of Pan-African orogeny: evidence from the Igarra schist belt, SW Nigeria. *Iranian Journal of Earth Sciences* ç (2), 85–93.

Soil-Structure Interface Modeling and Characterization

Oustasse Abdoulaye Sall¹, Déthié Sarr², and Diogoye Diouf¹

¹Department of Civil Engineering, UFR SI-Université Iba Der Thiam de Thies, Thies, Senegal

²Department of Geotechnics, UFR SI- Université Iba Der Thiam de Thies, Thies, Senegal

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

ABSTRACT: In this work, we propose to study the influence of soil and concrete mechanical properties on soil-structure interaction parameters. Soil-structure interaction is modeled by two parameters, the vertical (k) and horizontal (T) reaction modulus. These two parameters depend on the system's geometric and mechanical characteristics. This study shows that the vertical reaction modulus is not an intrinsic characteristic but depends on soil and concrete parameters (E_s , v_s , E_b and v_b) and foundation dimensions. The analysis shows that soil parameters are more influential than foundation parameters.

KEYWORDS: Interface, Soil-Structure Interaction, Mechanical properties, Modeling.

1 INTRODUCTION

The study of soil-structure interaction is of great importance in the dimensioning of foundation structures. [1] presented a detailed analysis of the problem of soil-foundation interaction, outlining the various approaches proposed to model this interaction. These models assume that the soil reaction is a linear function of the displacements of the soil-foundation interface layer. The response of each of these models is given by the settlement of the soil surface (w) under the action of a system of external loads (q). This settlement generally represents the displacement of the soil-foundation interface layer, and is an essential part of the information required to model soil-foundation interaction. Specifically, in this work, we will carry out a characterization and parametric study of soil-structure interaction.

2 SOIL-STRUCTURE INTERACTION MODELING

2.1 WINKLER MODEL

The modelling of soil behavior proposed by [2] admits that the soil reaction pressure (q), at any point of coordinates (x, y) of the interface layer, is directly proportional to the settlement (w) of the soil at this point and is independent of settlements at other points (Figure 5):

$$q(x, y) = k \cdot w(x, y) \quad (1)$$

where:

k is the elastic modulus of vertical ground reaction.

This assumption has been established in the work of [3], [4], [5], etc. Physically, Winkler's model likens the soil to a system of elastic springs, infinitely adjacent, independent of each other and possessing a stiffness constant (k). Soil settlement occurs in the zone below the loading surface, and outside this zone settlement is equal to zero. On the other hand, settlement in the loaded zone, in the case of a rigid foundation (Figure 1.c), remains the same in the case of a flexible foundation (Figure 1.d).

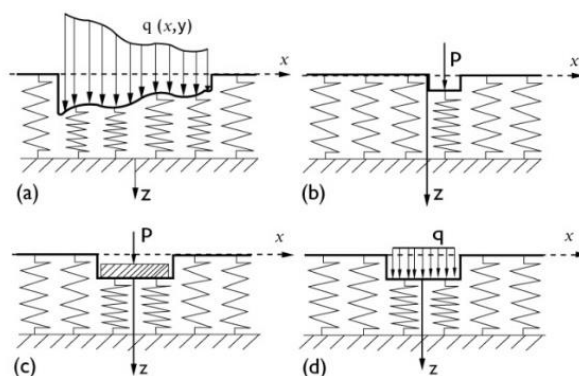


Fig. 1. Ground displacement for Winkler model, (a) any kind of load, (b) concentrated load, (c) rigid foundation, (d) flexible foundation [1]

2.2 FILONENKO-BORODICH MODEL

[6] ensures continuity between the springs in Winkler's model by means of a thin elastic membrane under constant tension T (Figure 7), which connects the springs. Settlement (w) at the soil surface under pressure (q) is given by:

$$q(x, y) = k \cdot w(x, y) - T \cdot \nabla^2 w(x, y) \quad (2)$$

with:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3)$$

The two elastic constants of the model are the reaction coefficient (k) and the tension (T). Figure 2 shows typical examples of settlement profiles for a concentrated load (Figure 2.b), a rigid foundation (Figure 2.c) and a flexible foundation with a uniformly distributed load (Figure 2.d). Developments in civil engineering construction and, above all, the disorders observed in load-bearing structures, have prompted practitioners in the field to take greater account of soil-structure interaction in the process of calculating foundation structures. A number of authors have worked on the soil reaction modulus, which is an important parameter in the consideration of soil-structure interface parameters.

2.3 THE TERZAGHI METHOD

According to [7], [8] has given orders of magnitude of the reaction coefficient for a 30 cm square rigid plate (Table 1). He proposes the following formulas given in Table 2. The reaction modulus k is a coefficient of proportionality between pressure (p) and deformation (w):

$$k = \frac{p}{w} \quad (4)$$

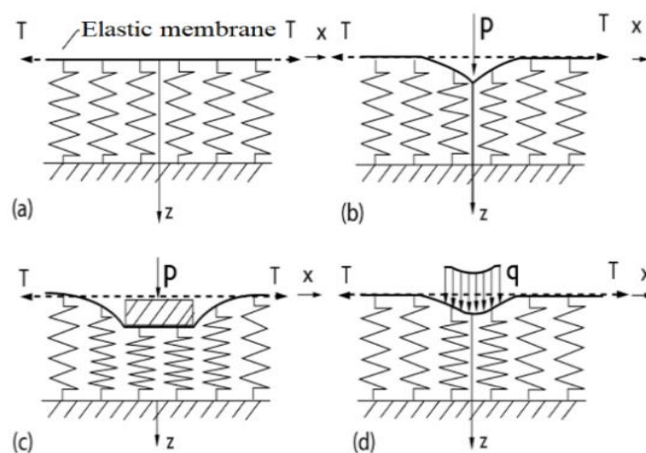


Fig. 2. Filonenko-Borodich model [1]

Table 1. Vertical reaction modulus according to [8]

	Poorly cohesive sandy soils	Clay soils	B/L	C _f
Square or circular foundation	$w = w_0 \left(\frac{2B}{B + B_0} \right)^2$ $K = \frac{p_0}{w_0} \left(\frac{B + B_0}{2B} \right)^2$	$w = w_0 \frac{B}{B_0}$ $K = \frac{p_0}{w_0} \frac{B_0}{B}$		
Rectangular foundation	$w = C_f \cdot w_0 \left(\frac{2B}{B + B_0} \right)^2$ $K = \frac{1}{C_f} \frac{p_0}{w_0} \left(\frac{B + B_0}{2B} \right)^2$	$w = C_f \cdot w_0 \frac{B}{B_0}$ $K = \frac{1}{C_f} \frac{p_0}{w_0} \frac{B_0}{B}$	0,5	1,95
			0,33	2,27
			0,2	2,68
			0,1	3,28

with

- $B_0 = 30$ cm

- C_f = form factor

with:

$K_{ref} = p_0 / w_0$, reference values are given in Tables 2 and 3.

Table 2. K_{ref} Values for sands

Sand	Consistency	Let go	Medium	Dense	Unit
Dry sand	Density	13	1-	19	kN/m ³
	K_{ref} limits	0,6 - 0,9	1,9 - 9,6	9,6 - 32	kg/cm ³
	K_{ref} medium	1,3	4	16	kg/cm ³
Drowned sand	K_{ref} medium	0,8	2,5	10	kg/cm ³

Table 3. K_{ref} Values for clay soils

Consistency	Steep	Very steep	Hard	Unit
Simple compression stress	1à2	2à4	> 4	kN/m ³
K_{ref} limits	1,6 - 3,2	3,2 - 6,4	> 6,4	kg/cm ³
K_{ref} medium	2,5	5	10	kg/cm ³

2.4 FROM MENARD PRESSURE METER TESTS

[9] gives a method for estimating the vertical reaction modulus k under a shallow foundation from the results of pressure meter tests. From the vertical displacement w of the footing and the pressure p exerted by the reacting soil, we establish that $p = kw$. We're now looking to determine k , for long-term forces. The formulas are given in appendix F3 of fascicule 62. Where E_c and E_d represent the weighted average pressure moduli in the spherical and deviatoric domains respectively. In the case of homogeneous soil, $E_c = E_d = E_M$. According to [9], we have:

$$\frac{1}{k} = \frac{\alpha \cdot B}{9E_M} \lambda_c + \frac{2 \cdot B_0}{9E_M} \left(\lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha \quad (5)$$

where

- B : being the width of the foundation,
- B_0 : reference width equal to 0.6 m;
- E_M : the pressure meter modulus;
- α : rheological coefficient depending on soil type (Table 4);
- λ_c and λ_d are shape coefficients and are a function of the L/B ratio, as shown in the following Table 6.

Table 4. Values of the rheological coefficient α for different soils

Soil condition	Peat	Clay		Silt		Sand		Grave	
	α	E/P _{M1}	α	E/P _{M1}	α	E/P _{M1}	α	E/P _{M1}	α
Over consolidated or very tight	-	> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3
Normally consolidated	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Altered and reworked or loose sub-consolidation	-	7-9	1/2	5-8	1/2	5-7	1/3		

For rocks, rheological coefficient values are given in the following Table 5:

Table 5. Values of the rheological coefficient α for different soils

Rock type	Very slightly fractured	Normal	Very fractured	Very impaired
α	2/3	1/2	1/3	2/3

Table 6. Values of the coefficients λ_c and λ_d for different values of the ratio L/B

L/B	Circle	Square	2	3	5	20
λ_c	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,5
λ_d	1,00	1,12	1,53	1,78	2,14	2,65

According to equation (5), as λ_c and λ_d increase, k decreases. This means that for the same applied stress, a slenderer footing (the greater the L/B ratio) will deform more. The "springs" modelling soil elasticity are less stiff. It can therefore be said that the reaction modulus (k) is not an intrinsic characteristic of the foundation soil, but also depends on the structure.

Many authors have been interested in calculating the reaction modulus, which, according to different authors, is within two constants of equation (18). The values of a vary from 0.65 to 0.95 and those of γ from 1/12 to 0.108, as shown in the following Table 7.

Table 7. Soil modulus reaction (k) according to various authors

Modulus reaction (k)	a	γ	Equations	Authors
$k = 0,65 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{E_b I} \right)^{1/12}$	0,65	1/12	6	[10]
$k = 0,69 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{E_b I} \right)^{0,0868}$	0,69	0,0868	7	[11]
$k = 0,74 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{E_b I} \right)^{0,0903}$	0,74	0,0903	8	[12]
$k = 0,78 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{E_b I} \right)^{0,0938}$	0,78	0,0938	9	[13]
$k = 0,82 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{E_b I} \right)^{0,0973}$	0,82	0,0973	10	[14]
$k = 0,87 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{E_b I} \right)^{0,1008}$	0,87	0,1008	11	[15]
$k = 0,91 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{E_b I} \right)^{0,1043}$	0,91	0,1043	12	[16]
$k = 0,95 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{E_b I} \right)^{0,108}$	0,95	0,108	13	[17]

2.5 VERTICAL MODULUS REACTION ACCORDING TO [10]

[10] has developed an empirical formula to express k :

$$k = \frac{0,65E_s}{1-\nu^2} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{EI}} \quad (14)$$

[11] improved on Biot's formula to propose the following relationship:

$$k = \frac{0,95E_s}{1-\nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{(1-\nu^2)E_b I} \right)^{0,108} \quad (15)$$

where

E_s : Modulus of the foundation soil,

ν : Poisson's ratio of the foundation soil;

B : Foundation width;

E_b : Young's modulus of foundation concrete;

I : moment of inertia of the concrete cross-section.

The reaction modulus k proposed by [11] can be written as:

$$k = 0,95 \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right)^{0,108} \frac{E_s}{1-\nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{EI} \right)^{0,108} \quad (16)$$

Generally, for foundations, the Poisson's ratio is between 0.15 and 0.4, and the term $\left(\frac{1}{1-\nu^2} \right)^{0,108}$ is between 1.0025 and 1.019 [18]. This leads us to ignore this term in the expression of k according to [17], which can be rewritten in the following form:

$$k = 0,95 \frac{E_s}{1-\nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{EI} \right)^{0,108} \quad (17)$$

We can write k in a general way expressed by the following equation:

$$k = a \frac{E_s}{1-\nu^2} \left(\frac{E_s B^4}{EI} \right)^{\gamma} \quad (18)$$

where

a and γ are constants given by different authors as shown in Table 7.

In what follows, we attempt to highlight the influence of the various parameters (B, E_s, E, ν, e) on the elastic modulus of soil reaction.

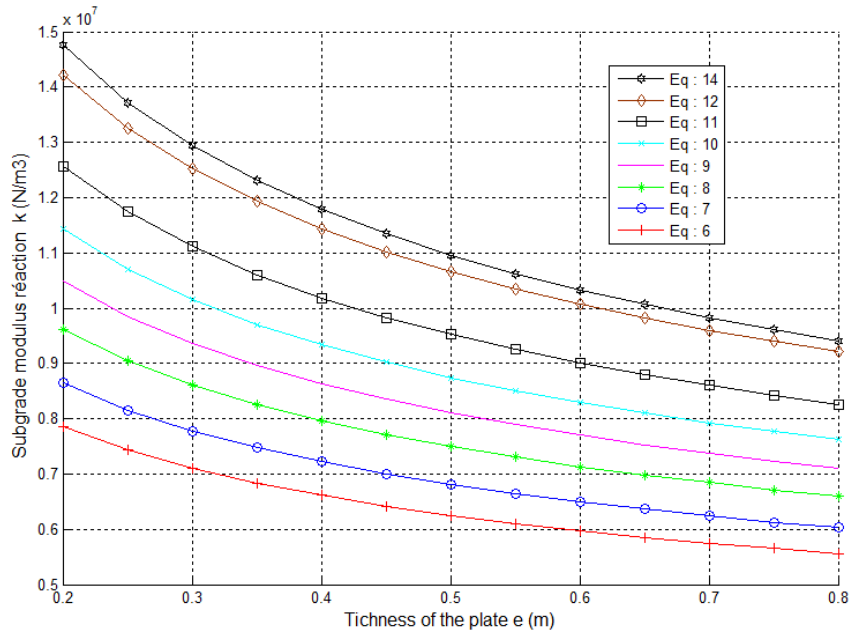


Fig. 3. Modulus of reaction of foundation soil depending on plate width according to various authors

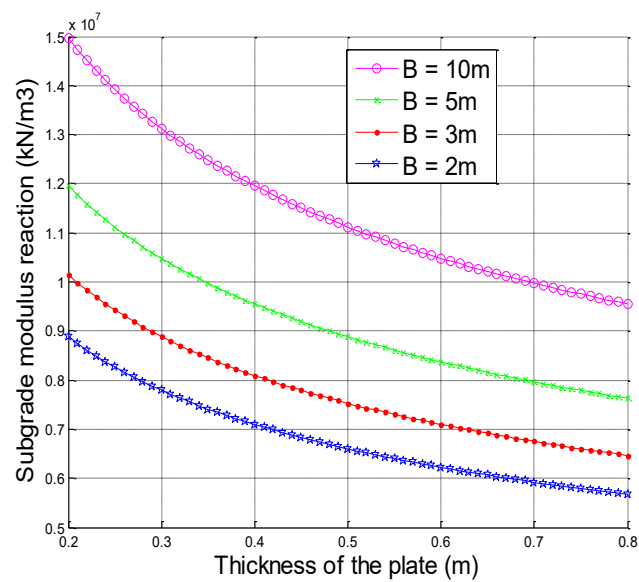


Fig. 4. Variation of soil reaction modulus depending plate thickness for various values of plate width

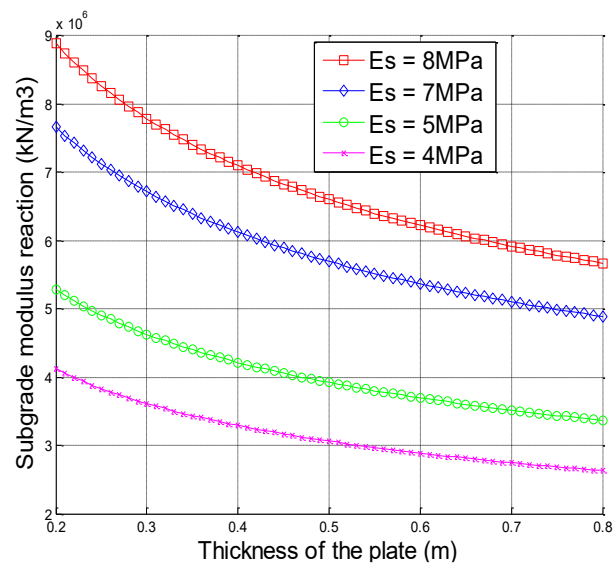


Fig. 5. Variation of soil reaction modulus depending on plate thickness for different values of elastic modulus of foundation soil

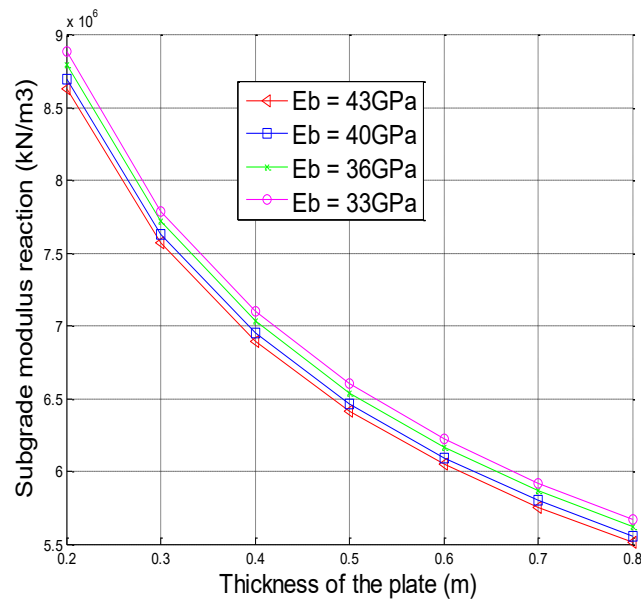


Fig. 6. Variation of soil reaction modulus with plate thickness for different values of elastic modulus of foundation concrete

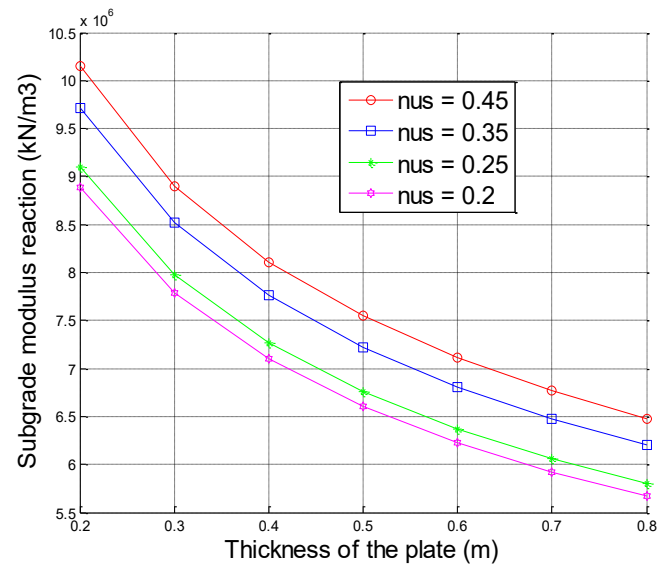


Fig. 7. Variation of soil reaction modulus depending on plate thickness for different values of ν_s

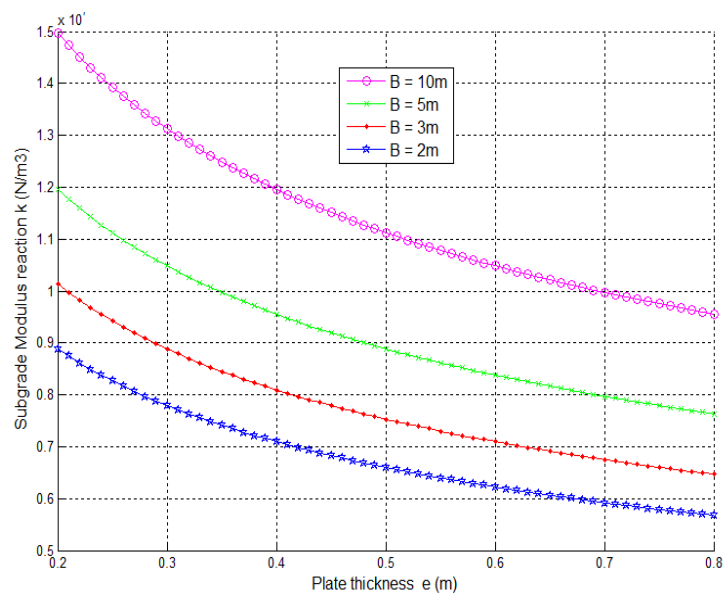


Fig. 8. Variation of soil reaction modulus as a function of plate thickness for different values of B

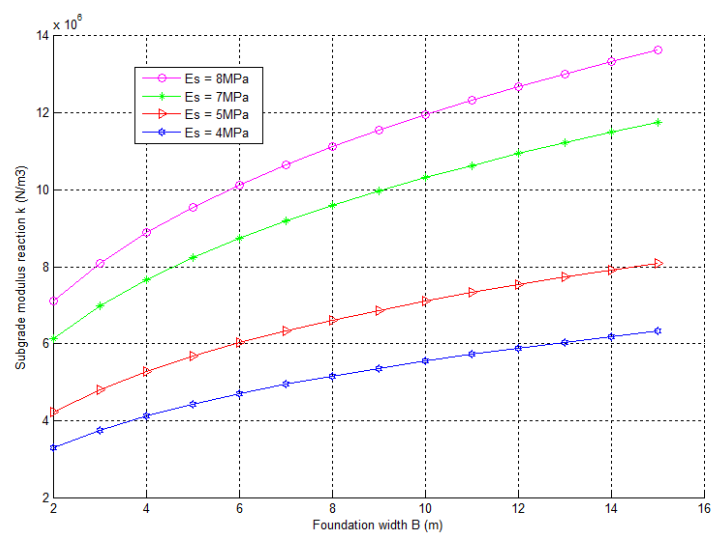


Fig. 9. Variation of soil reaction modulus depending plate width for different values of elastic modulus of foundation soil

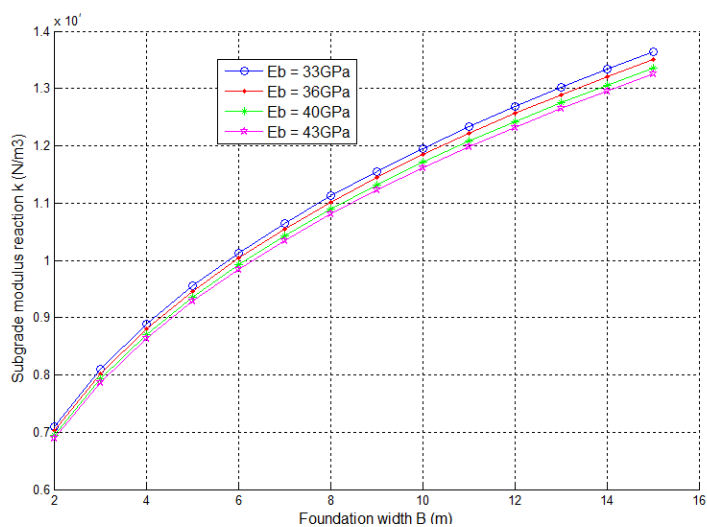


Fig. 10. Variation in soil reaction modulus depending plate width for different values of elastic modulus of foundation concrete

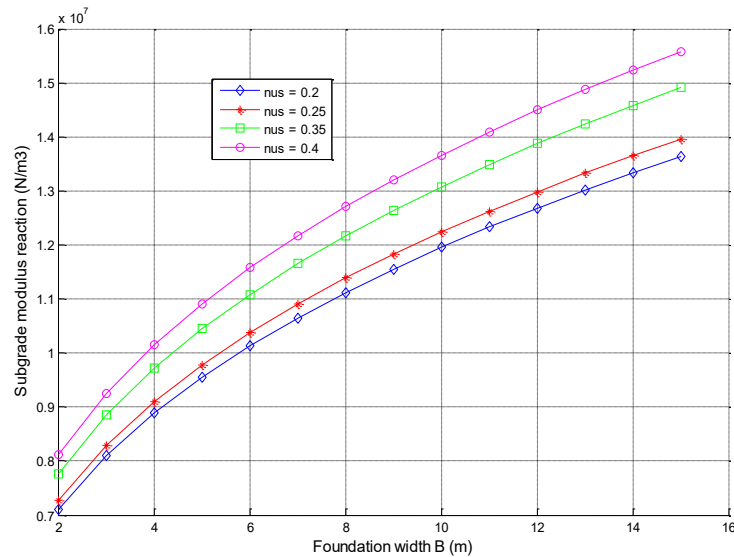


Fig. 11. Variation of soil reaction modulus as a function of plate width for different values of the coefficient ν_s

3 DISCUSSION

According to the equations in Table 7, it is clear that the soil reaction modulus is influenced by the mechanical and geometric characteristics of the soil, rather than those of the foundation concrete. It should be noted that all subsequent authors [10] tend to give the soil reaction modulus higher values depending on the input parameters. This observation prompts us to address one of our concerns, which is to find the appropriate value for the apparent elastic modulus of reinforced concrete, which should be considered in the calculations, rather than the elastic modulus of simple concrete. As our aim is to gain a better understanding of the deformations of the infrastructure, we believe that in the context of this research work (for greater safety), it would be preferable to use the reaction modulus proposed by [10] in the calculations, as we know that the higher the reaction modulus of the soil, the lower the displacements of the plate points will be.

Figures 3 to 11 show the evolution of the soil reaction modulus as a function of the various behavior model parameters. Figures 3 to 7 show a decrease in the reaction modulus of the foundation soil, which is highly dependent on soil parameters (E_s, ν_s) and the geometry of the structure. These figures also show that, for certain fixed parameters, the reaction modulus of the soil varies very little with the mechanical characteristics of the foundation concrete, which suggests that variations in the displacements of the structure will be more dependent on the mechanical parameters of the foundation soil than those of the foundation concrete. Figures 8 to 11 show an increase in the reaction modulus of the foundation soil with increasing values of foundation width. It can also be seen that, for a fixed value of B , the soil reaction modulus is strongly influenced by soil parameters (E_s, ν_s). These figures also show that for certain fixed parameters, the soil reaction modulus varies very little with the mechanical characteristics of the foundation concrete, which suggests that variations in structural displacements will be more closely related to the mechanical parameters of the foundation soil than those of the foundation concrete.

4 CONCLUSION

In this work, we studied the influence of the mechanical properties of soil and concrete on soil-structure interaction parameters. The interaction between soil and structure is modeled by two parameters, the vertical (k) and horizontal ($2T$) reaction moduli. The results show that the soil reaction modulus increases with the geometric characteristics of the foundation. The results also show that the soil reaction modulus is strongly influenced by soil parameters (E_s, ν_s). The results also show that for certain fixed parameters, the soil reaction modulus varies very little with the mechanical characteristics of the foundation concrete.

REFERENCES

- [1] Selvadurai A.P. S (1979) - «Elastic analysis of soil-foundation interaction, » Developments in Geotech Eng. vol. 17, 1979, Elsevier scientific publishing company.
- [2] Winkler E (1867) Die lehre von der eiazitat und Festigkeit. Dominicus, Prague.
- [3] Mandel M. (1936). Buckling in a resilient environment-Applications. Annales des Ponts et Chaussées, n° 25, pp. 443-482.
- [4] Koronev B. G (1960). Structures resting on an elastic foundation. Pergamon Press, Oxford, pp. 160-190.
- [5] Hetenyi M. (1966). Beams and plates on elastic foundation and related problems Appl Mech Rev. n° 19, pp. 95-102.
- [6] Filonenko-Borodich M. M (1940). Some approximate theories of the elastic foundation. Uch. Zap. Mosk. Gos. Univ. Mekh. n° 46, pp. 3-18.
- [7] Cassan M. (1978) «Les essais in situ en mécanique des sols - Applications et méthodes de calculs», Edition Eyrolles, 1978.
- [8] Fascicule n° 62, titre V - Conception et calcul des fondations des ouvrages de génie civil Editions des journaux officiels 192 pages-1993.
- [9] Terzaghi R. (1965) «Sources of error in joint surveys» Géotechnique, 15, 287-304.
- [10] Biot M. A (1937) - «Bending of an Infinite Beam on an Elastic Foundation,» Journal of Applied Physics, Vol. 12, N°2 1937, pp. 155-164. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1712886>.
- [11] Vesic A. B (1963) - «Beams on Elastic Subgrade and the Winkler's Hypothesis, » Proceedings, 5th International Conference of Soil Mechanics, 1963, pp. 845-850.
- [12] Liu F. L (2000) «Rectangular Thick Plates on Winkler Foundation: Deferential Quadrature Element Solution,» International Journal of Solids and Structures, Vol. 37, No. 12, 2000, pp. 1743-1763. [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00306-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00306-0).
- [13] Daloglu T. and Vallabhan C. V. G (2000) «Values of k for Slab on Winkler Foundation,» Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, No. 5,2000, pp. 463-471. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(463\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(463)).
- [14] Fischer F. D. and Gamsjäger E., «Beams on Foundation, Winkler Bedding or Half-Space-A Comparison,» Technische Mechanike, Vol. 2, 2008, pp. 152-155.
- [15] Arul S., Seetharaman S. and Abraham (2008), «Simple Formulation for the Flexure of Plates on Nonlinear Foundation,» Journal of Engineering Mechanics, Vol. 134, No. 1, 2008, pp. 110115.[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:1\(110\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:1(110)).
- [16] Henry M. T. (2007) «Train-Induced Dynamic Response of Rail- way Track and Embankments on Soft Peaty Foundations,» University of Saskatchewan, Canada, 2007.
- [17] Yang K (2006) «Analysis of Laterally Loaded Drilled Shafts in Rock,» University of Akron, OH, 2006.
- [18] Bund H (2009) - «An Improved Method for Foundation Modulus in high way Engineering» EJGE Vol. 14, 2009.

CONTRIBUTION DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE DANS L'ESTIMATION DES DÉBITS MENSUELS DU FLEUVE BAGOÉ À LA STATION HYDROMÉTRIQUE DE KOUTO AU NORD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE

[CONTRIBUTION OF MACHINE LEARNING TO THE ESTIMATION OF MONTHLY FLOWS IN THE BAGOÉ RIVER AT THE KOUTO HYDROMETRIC STATION IN NORTHWESTERN CÔTE D'IVOIRE]

Adja Miessan Germain¹, Kamenan Satti Jean Robert², Tohouiri Privat¹, Youan Ta Marc³, and Kouassi Amani Michel⁴

¹Sciences de la Vie et de la Terre (SVT), École Normale Supérieure (ENS), Abidjan, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Ingénieur, Institut National Polytechnique Houphouët Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

³Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

⁴Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Ingénieur, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

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

ABSTRACT: Streamflow data are very important in assessing the groundwater and surface water resources of a given region. In northern Côte d'Ivoire, particularly in the Bagoé region, although there are long series of rainfall data, streamflow data are still scarce. The few chronicles available are very short and incomplete. The aim of this study is to obtain a long flow chronicle for the period 1996-2016. It aims to estimate flows in the Bagoé River at the Kouto hydrometric station using neural networks. To this end, two neural models were developed to estimate variations in monthly flows of the Bagoé River from 1996 to 2016. The modeling was validated using the Nash criterion (%), the Pearson coefficient (R), the maximum flow ratio and the robustness criterion. The results showed that the validation criteria for these models are optimal. The Nash criterion is greater than 84% for both calibration and validation. The Pearson coefficient ranged from 92% to 96% in calibration and validation. The maximum flow ratio ranges from 93% to 118% in calibration and validation. The robustness criterion ranged from 2.91% to 7.62%. All these results reflect the good performance and stability of neural network-based models for estimating flows in the Bagoé river.

KEYWORDS: Flow data, neural network, Machine Learning, Bagoé River, Ivory Coast.

RESUME: Les débits des cours d'eau sont très importants dans l'évaluation des ressources en eau souterraine et de surface d'une région donnée. Dans le Nord de la Côte d'Ivoire, particulièrement dans la région de la Bagoé, quoiqu'il existe de longues séries de données pluviométriques, celles des débits de cours d'eau demeurent rares. Les quelques chroniques disponibles, sont très courtes et lacunaires. Ainsi, cette étude vise à obtenir une chronique de débit longue de l'épisode 1996-2016. Elle ambitionne d'estimer les débits du fleuve Bagoé à la station hydrométrique de Kouto à l'aide des réseaux de neurones. Pour ce faire, deux modèles neuronaux ont été développés pour estimer les variations des débits mensuels de la Bagoé de 1996 à 2016. La validation de cette modélisation a été réalisée à l'aide du critère de Nash (%), du coefficient de Pearson (R), du rapport

des débits maximaux et du critère de robustesse. Les résultats ont montré que les critères de validation de ces modèles sont optimaux. En effet, le critère de Nash est supérieur à 84 % en calage et en validation. Le coefficient de Pearson, varie de 92 à 96 % en calage et en validation. Le rapport des débits maximaux, varie de 93 à 118 % en calage et en validation. Quant au critère de robustesse, il varie de 2,91 % à 7,62 %. Tous ces résultats traduisent une bonne performance et une bonne stabilité des modèles à base de réseaux de neurones dans l'estimation des débits du fleuve Bagoé.

MOTS-CLEFS: Données de débits, réseau de neurones, Apprentissage automatique, fleuve Bagoé, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

L'estimation des ressources en eau souterraine tout comme celles de surface d'un territoire nécessite la disponibilité de données hydrométéorologiques. Ces dernières se révèlent essentielles et indispensables pour une gestion efficace des dites ressources [1] et également des ouvrages hydrauliques (aménagements hydro électriques, systèmes d'irrigation) [2]. Malheureusement, les réseaux d'observations et de mesures des paramètres hydrométéorologiques dans la plupart des pays africains se dégradent de plus en plus depuis des décennies [3], [4]. Parmi les nombreuses raisons qui pourraient être évoquées figure le coût très élevé de l'entretien de ces réseaux [5]. Une telle situation impacte négativement la qualité des relevés hydrométriques dont les chroniques sont souvent lacunaires, discontinues voire indisponibles [6], [7]. Ces réalités hydrométéorologiques sont connues dans les régions soudano-sahéliennes du Nord de la Côte d'Ivoire [8], [9], en l'occurrence la région de la Bagoé qui a pour principal hydrosystème le bassin versant du fleuve Bagoé. Quoiqu'il existe dans cette région de longues chroniques de données pluviométriques, les données de débits de ce fleuve sur les quatre stations hydrométriques dont il dispose (Papara, Kouto, Guinguéréni et Tombougou) sont soit inexistantes, soit de courte durée avec beaucoup de lacunes [9], [10]. La station hydrométrique située dans la localité de Kouto est la seule pourvue en mesures de débits sur une série temporelle allant de 1961 à 1995 [11]. Toutefois, cette chronique présente quelques lacunes qu'il serait nécessaire de combler. De même, dans le souci de disposer de longues chroniques de débits à cette station pour aider dans l'évaluation et la connaissance de la disponibilité des ressources en eau de la région, la reconstitution des données de débits s'avère importante. Pour y arriver, les modèles mathématiques notamment les réseaux de neurones, s'offrent comme une alternative hydrologique [12], [13]. Ainsi, cette étude se propose de reconstituer les débits mensuels du fleuve Bagoé à la station hydrométrique de Kouto à l'aide des réseaux de neurones.

2 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est le sous-bassin versant de Kouto, une portion du bassin versant de la Bagoé, située au Nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Elle est comprise entre les longitudes -7°00' et -6°00' Ouest et les latitudes 9°00' et 10°15' Nord (Fig.1) [14]. Au plan administratif, cette zone est délimitée par plusieurs régions: au Nord par le département de Tengréla, au Nord-ouest par la région du Folon, au Sud par celles du Worodougou et du Beré, à l'Ouest par la région du Kabadougou et à l'Est par la région du Poro. L'environnement physique de l'espace d'étude présente un relief marqué par une pénéplaine dominée par les collines et des glaciis cuirassés [14]) avec un climat de type soudano-sahélien à guinéen [15]. À ceux-ci s'ajoutent les formations granitoïdes et les séries volcano-sédimentaires birimiennes qui constituent les principaux traits géologiques de la région [16]. Son réseau hydrographique est très dense et caractérisé par le fleuve Bagoé (cours d'eau principal) qui est un affluent du fleuve Niger [8], [17]. L'observation du régime d'écoulement du fleuve Bagoé est assurée par trois stations [8], notamment, celle de Kouto, de Tombougou et de Guinguéréni. Les relevés hydrométriques de ces stations sont dans l'ensemble médiocres, de courtes durées, discontinues et parfois indisponibles depuis 1961 jusqu'à nos jours [9], [10]. Quant à la vie socio-économique, elle est dominée par les activités agricoles et pastorales. Les activités agricoles sont développées autour de la culture de céréales, de légumes, de fruit et de tubercules et des produits d'exportation. La production agricole est fortement tributaire de l'eau, et reste confronté aux aléas et contraintes climatiques [14]. Quant aux activités pastorales principalement l'élevage de bovins, ovins et caprins, sont majoritairement tenues par les peuls transhumants venus du Mali et du Burkina-Faso [18]. Pour mener à bien ces différentes activités, plusieurs barrages ont été construits dont le but est de favoriser l'agriculture, l'élevage, la pêche et la consommation des ménages.

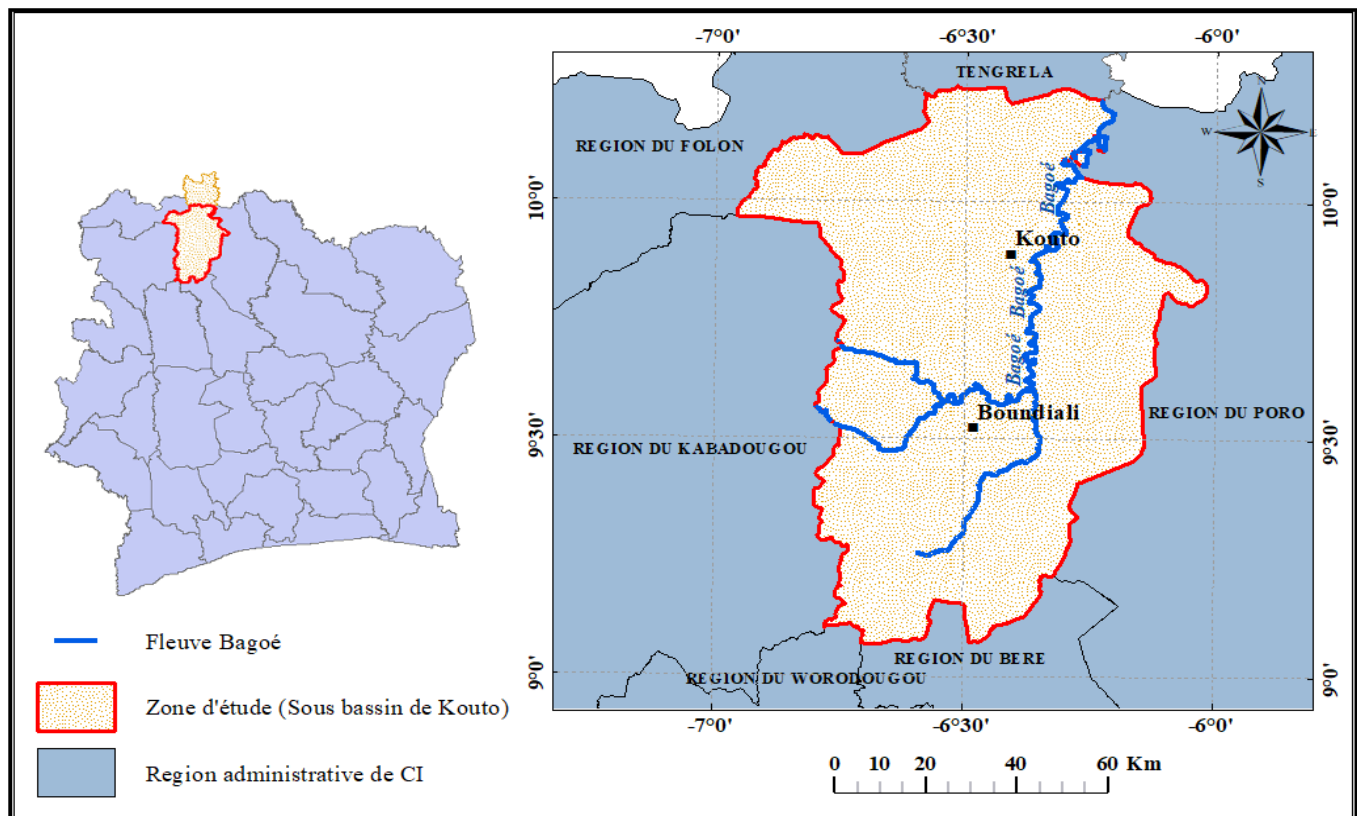


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude (Adja et al., (2019))

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 MATERIEL

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont des séries chronologiques mensuelles de pluies, de débits et de températures. Elles sont classées en deux catégories: les données aéroportées issues de la base de données de la Climatic Research Unit (CRU) [19], [20], [21], [22], [23] et les données *in situ* recueillies auprès de différentes structures ivoiriennes à savoir: la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM), les Services de l'Hydraulique de Côte d'Ivoire (Sous-Direction de l'Hydraulique) et la Société IVOIRE COTON (ex CIDT). Les données *in situ* proviennent respectivement de la station pluviométrique de Boundiali, de la station hydrométrique de Kouto et de la station synoptique de Korhogo. Les données de pluie couvrent la période 1961-2016 et ont été utilisées comme variables de contrôle de la simulation des débits. Les données de températures ont été utilisées pour déterminer les valeurs d'évapotranspiration potentielles qui ont été utilisées comme variables de contrôle de la simulation des débits. Quant aux données de débits, elles couvrent la période 1961-1995, constituant la meilleure chronique de débits disponibles sur le bassin. Elles présentent toutefois des lacunes qui ont été comblées par les données des autres stations (Guinguérini et Tombougou) disposant des chroniques incluses dans la période d'étude. Toutes les données de débits ont été utilisées pour évaluer les performances des modèles développés.

3.2 METHODES

L'approche méthodologique mise en œuvre dans cette étude se décline en trois phases essentielles: l'homogénéisation des données hydro climatiques, la détermination de l'évapotranspiration potentielle et l'estimation des débits du fleuve Bagoé à l'aide des réseaux de neurones.

3.2.1 HOMOGÉNÉISATION DES DONNÉES

Cette phase a consisté au comblement des données in situ de pluies, de températures et de débits qui sont discontinues et lacunaires. D'abord, les données de pluies et de températures provenant de la base de données CRU ont été comparées aux données observées in situ. L'idée est de combler les données in situ manquantes et discontinues à partir des données de la CRU qui sont en générale très longues et continues [24]. À cet effet, des nuages de points sont représentés puis ajustés par une régression linéaire. Cet ajustement a permis d'évaluer le coefficient de corrélation entre les données issues de la CRU et celles mesurées in situ. Ensuite, une équation a été déduite afin de permettre le comblement des lacunes. Enfin, concernant les données de débits, plusieurs techniques existent pour combler les données manquantes. Mais dans cette étude, la méthode du critère de proportionnalité analogue [25] est retenue pour combler les données manquantes observées dans les chroniques de débits du fleuve Bagoé à la station de Kouto. En effet, la disponibilité d'une chronique de débits des stations de Guinguérini, de Tombougou justifie le choix de cette méthode. Ainsi, les différentes surfaces des sous-bassins ont été calculées et les rapports ont été déduits puis utilisés (voir équation (1) et (2)).

$$\frac{Q_{Kouto}}{Surface_{Kouto}} = \frac{Q_{Guinguérini}}{Surface_{Guinguérini}} \text{ d'où } Q_{Kouto} = 4,55 \times Q_{Guinguérini} \quad (1)$$

$$\frac{Q_{Kouto}}{Surface_{Kouto}} = \frac{Q_{Tombougou}}{Surface_{Tombougou}} \text{ d'où } Q_{Kouto} = 1,85 \times Q_{Tombougou} \quad (2)$$

Avec:

Q_{Kouto} = Débit à la station de Kouto; $Q_{Guinguérini}$ = Débit à la station de Guinguérini; $Q_{Tombougou}$ = Débit à la station de Tombougou.

3.2.2 DÉTERMINATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)

L'évaluation de l'ETP a été effectuée par la méthode de Thornthwaite qui est basée essentiellement sur la température de l'air [26], [27], [28] accessible et disponible. Par cette méthode, l'ETP mensuelle s'obtient selon la formule de l'équation 3 [29]:

$$ETP = 1,6 \times \left(\frac{10 \times t}{I} \right)^a \times f \quad (3)$$

Avec:

ETP = évapotranspiration mensuelle (mm);

I = Indice thermique annuel défini comme la somme des indices thermiques mensuels i;

$I = \sum_{janv}^{déc} i \quad (4)$ où $i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$; t = Température moyenne mensuelle (°C);

a = Coefficient fonction de I. Ce coefficient se détermine à l'aide de l'équation 5:

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1,79 \times 10^{-2} \times I + 0,49239 \quad (5)$$

f = le facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré.

Pour cette zone d'étude le tableau suivant donne les différentes valeurs de f par mois.

Tableau 1. Valeurs du facteurs correctif f de la zone d'étude

Mois	Janv	fév	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	déc
f	1	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99

3.2.3 ESTIMATION DES DÉBITS À BASE DE RÉSEAUX DE NEURONES (RN)

- Présentation des réseaux de neurones

Un réseau de neurones se définit comme un arrangement de neurones artificiels qui apprend à modéliser l'hydro système à travers des exemples bien sélectionnés au cours d'un certain nombre d'itérations finis [30]. Selon leur architecture plusieurs

type de modèles neuronaux existant lesquelles le perceptron multicouche (PMC) qui est couramment utilisé pour la simulation des débits mensuels [31]. Ce dernier sera retenu dans cette étude afin de simuler et d'estimer les débits du fleuve Bagoé.

- Construction et optimisation des modèles de réseaux de neurones

Les phases de construction des réseaux de neurones adoptés dans cette étude sont inspirées des travaux antérieurs de [32], de [31], et de [30]. A cet effet, plusieurs paramètres ont été identifiés puis adaptés selon la zone d'étude. Il s'agit entre autres de la sélection du vecteur d'entrée, de la détermination de l'architecture du réseau adapté, de l'optimisation de l'apprentissage du réseau et de la validation des modèles développés à l'aide d'un jeu de données composées des données de pluies et d'évapotranspirations. Toutes ces données ont d'abord été exprimées dans la même échelle de variation comprise entre -1 et 1 à travers la formule de l'équation 6 [33] afin d'éviter la saturation et la mauvaise performance des modèles [31]. Le jeu de données de la période 1961-1995 obtenu est subdivisé en trois lots: Le premier lot (1961-1985) représentant 70% des données, a servi à la période d'apprentissage du modèle devant permettre au réseau d'apprendre; ensuite le deuxième lot (1986-1990) qui concerne 15% des données, est utilisé pendant la période de test et enfin le troisième lot (1991-1995) qui concerne les 15% des données restantes a servi à la validation des modèles conçus. Ce dernier lot est non utilisé durant la phase d'apprentissage. Concernant le vecteur d'entrée convenable des modèles, il a été sélectionné suivant l'approche combinée des corrélations croisées [34] et l'approche « essai-erreur » [35]. La corrélation croisée dont sa formulation mathématique [36] donnée par l'équation (7) a permis de déterminer le décalage mensuel et l'essai erreur qui est une approche expérimentale au cours de laquelle a permis de tester et d'évaluer des combinaisons d'entrée. Quant au nombre de neurones dans chaque couche et le choix des fonctions d'activation associés aux neurones [37], l'approche expérimentaux (essais-erreurs) recommandée par [35] a été utilisée afin de déterminer les valeurs optimales de ces paramètres. Concernant l'optimisation des modèles, ces derniers ont été utilisés en mode supervisé avec la règle d'optimisation Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS). En effet la disposition des données constituées de couples de vecteurs d'entrées et de sorties permet l'usage d'un tel apprentissage [38]. La validation des performances des modèles est effectuée à l'aide de quatre (04) mesures de qualité dont le critère de Nash, le coefficient de Pearson, le rapport des débits maximaux et le critère de robustesse [39], [40], [41], [42] La description et la formulation mathématiques de tous ces critères sont consignées dans le Tableau 2.

$$\hat{X} = \frac{(Y_{max}-Y_{min}) \times (X-X_{min})}{(X_{max}-X_{min})} + Y_{min} \quad (6)$$

Avec:

X = élément du vecteur (entrée ou sortie) à normaliser, $\hat{X}$ = valeur normalisée de X ; X_{max} = valeur du plus grand élément du vecteur à normaliser; X_{min} = valeur du plus petit élément du vecteur à normaliser; Y_{max} = valeur maximale, dans le cas général elle vaut 1; Y_{min} = C'est la valeur minimale, dans le cas général elle vaut -1.

$$R_{xy}(t_0) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - t_0 - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

Où t_0 = décalage ou retard mensuel (0 mois comme début, 1,..., 12 mois); N = nombre d'observation; $\bar{x}$ = la moyenne de la variable d'entrée (Pluie, température, ETP et débit), $\bar{y}$ = la moyenne de la variable de sortie (débit)

Tableau 2. Critères de validation

Nomenclatures	Formules mathématiques	Critères
Nash	$\text{Nash}(\%) = (100) \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{ob_i} - Q_{cal_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{ob_i} - \bar{Q})^2} \right] \quad (8)$	Le modèle est d'autant meilleur que cette valeur est proche de 100 %. Un Nash inférieur à 60 % est l'indication d'un modèle défaillant
Person	$R = \frac{\sum_{i=1}^N q_{ob_i} q_{cal_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N q_{ob_i}^2 \sum_{i=1}^N q_{cal_i}^2}} \quad (9)$	$R \geq 0,80$ alors très forte corrélation entre variables; $0,5 \leq R < 0,80$ alors forte Corrélation entre variables. $R < 0,5$ alors faible corrélation entre variables
Rapport des débits Maximaux	$I_{max} = \frac{Q_{cal_{max}}}{Q_{obs_{max}}} \quad (10)$	Plus cet indice tend vers 1 plus la reproduction du débit maximal mensuel observé est très bonne
Robustesse	Valeur absolue de la différence de la valeur du critère de Nash-Sutcliffe en calage et en validation	Le modèle est dit robuste si la valeur de critère est inférieure ou égal à 10%

Avec:

- Q_{ob_i} et Q_{cal_i} respectivement les débits mesurés (observés) et calculés pour les $i \in \{1, 2, \dots, N\}$;
- $\bar{Q}$ est la moyenne des débits mesurés (observés). $q_{ob_i} = Q_{ob_i} - \bar{Q}_{ob}$ et $q_{cal_i} = Q_{cal_i} - \bar{Q}_{cal}$. Q_{ob_i} et Q_{cal_i} respectivement les débits mesurés (observés) et calculés pour les $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, $\bar{Q}_{ob}$ et $\bar{Q}_{cal}$ sont les moyennes respectives des débits observés et calculés; N = nombre d'entrées;

3.2.4 ESTIMATION DES DÉBITS DU FLEUVE BAGOÉ

L'estimation des débits mensuels du fleuve Bagoé devant aboutir à la simulation de ce paramètre a consisté en une modélisation des débits par deux modèles RNA conçus et optimisés. Ces modèles sont notés S_I et S_{II} . S_I utilise uniquement un vecteur de données de pluie et S_{II} utilise une combinaison de données de pluie et de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Au cours de cette phase, les données manquantes de débits ont été reconstituées (synthétisées) par le meilleur modèle

4 RÉSULTATS

4.1 DONNÉES HOMOGÉNÉISÉES ET CALCULÉES

- Les figures Fig.2 et Fig.3 présentent respectivement la corrélation entre les pluies du CRU et les pluies *in situ* de la SODEXAM de la chronique 1961-2003 et les températures du CRU et les températures *in situ* de la SODEXAM de la chronique 1961-2000). L'analyse de ces figures montre que les variables mesurées par les deux systèmes sont, dans l'ensemble, très corrélées. En effet, les températures sont corrélées à 0,96 et les pluies à 0,92. En fonction des équations déduites des figures 2 et 3, on obtient les relations suivantes:

$$\text{Pluie_CRU} = 0,9871 \times \text{Pluie_in_situ} - 2,66 \quad (11)$$

$$\text{Température_CRU} = 1,056 \times \text{Température_in_situ} - 1,2595 \quad (12)$$

- La figure Fig.4 présente les données de l'ETP mensuelles de la période 1961-2016 calculées. L'analyse de la figure montre que l'ETP mensuelle entame une croissance rapide à partir du mois de Janvier et atteint son pic de 112,91 mm en Mars. Ensuite, elle décroît progressivement jusqu'au mois de Septembre atteignant ainsi sa valeur minimale évaluée à 69,57 mm. Après ce mois, l'ETP subit une croissance lente jusqu'en décembre.

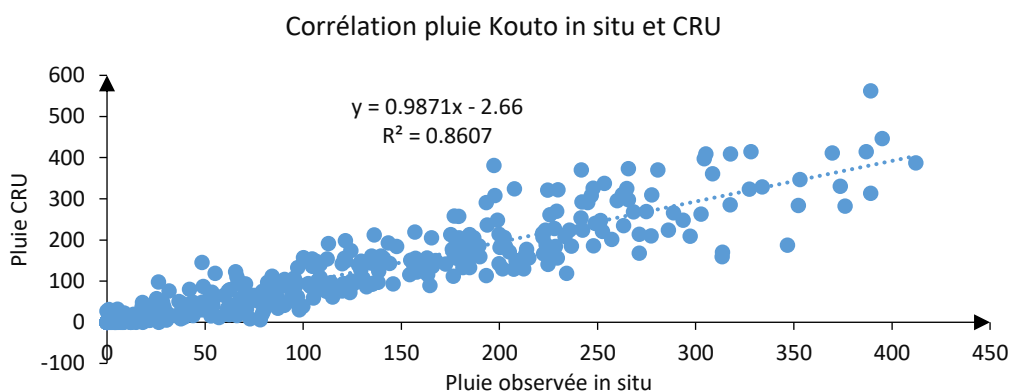


Fig. 2. Corrélation entre les données de pluies *in situ* et CRU

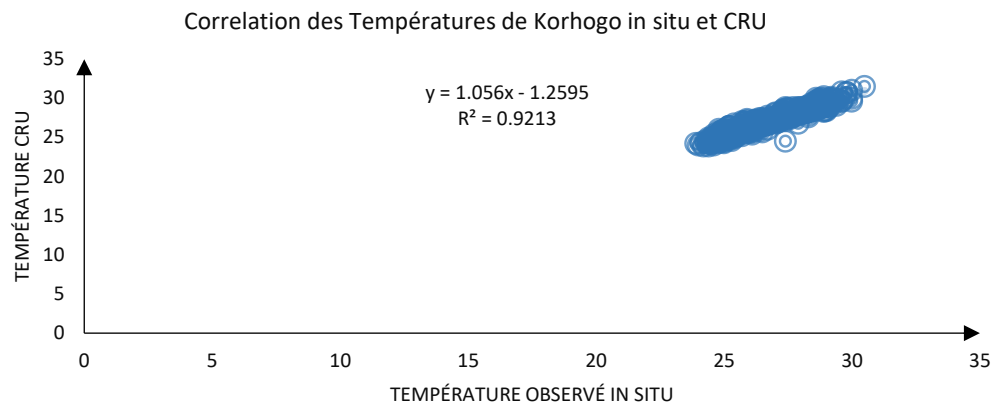


Fig. 3. *Corrélation entre les données de température in situ et CRU*

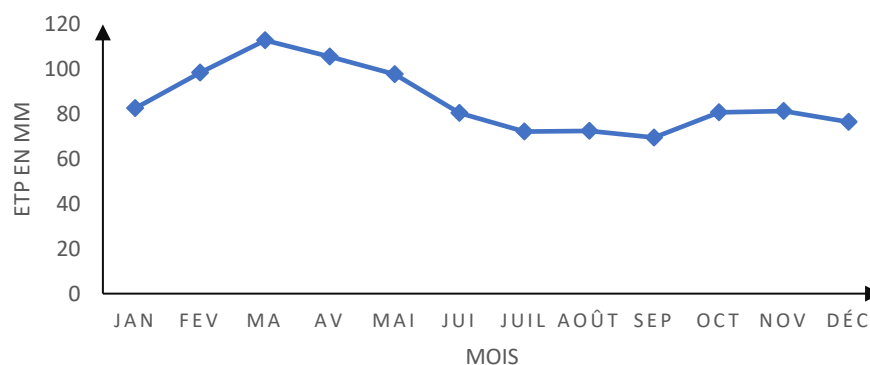


Fig. 4. *Évolution des moyennes mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à Koutou entre 1961 et 2016*

4.2 MODÈLES CONÇUS ET DÉBITS SIMULÉS

4.2.1 MODELES CONÇUS

Le tableau 3 présente les différentes architectures des modèles conçus.

Tableau 3. *Récapitulatif des différentes architectures des modèles retenus*

Modèles	Vecteur d'entrée	Nombre de neurones	Architecture	Fonction d'activation
S_I	$P_t ; P_{t-1} ; P_{t-2} ; P_{t-3}, \dots, P_{t-11}$	10	12-10-1	Exponentielle - Logistique
S_{II}	$P_t ; P_{t-1} ; P_{t-2} ; P_{t-3}, \dots, P_{t-11}$ $ETP_t ; ETP_{t-1} ; \dots ; ETP_{t-11}$	9	24-9-1	Exponentielle - Logistique

L'analyse du tableau 3 montre que le modèle S_I possède dix (10) neurones sur sa couche cachée et un (1) neurone sur sa couche de sortie qui estime le débit à l'instant t (mois), soit une architecture 12-10-1. La fonction exponentielle et Logistique sont utilisées comme fonction d'activation respectivement des neurones de la couche cachée et du neurone de la couche de sortie. Quant au modèle S_{II} , il possède neuf (9) neurones sur sa couche cachée et un (1) neurone sur sa couche de sortie qui estime le débit à l'instant t (mois), soit une architecture 24-9-1. La fonction exponentielle et Logistique sont utilisées comme

fonction d'activation respectivement des neurones de la couche cachée et du neurone de la couche de sortie du modèle S_{II} . Les performances des modèles développés sont résumées dans le tableau 4.

Tableau 4. Critères de performance des modèles de simulation

Modèle		Calage			Validation			Critère de robustesse (%)
Code	Structure	Nash (%)	r	i_{max}	Nash (%)	r	i_{max}	
S_I	12-10-1	84,71	0,92	0,80	92,33	0,94	0,93	7,62
S_{II}	24-9-1	90,35	0,95	0,91	93,26	0,96	1,18	2,91

L'analyse du tableau 4 montre que les valeurs du critère de Nash calculées sont de 84,71 % pour le modèle S_I et de 90,35 % pour le modèle S_{II} en calage et respectivement de 92,33 % et de 93,26 % en validation; les valeurs du critère de robustesse calculées sont de 7,62 % pour S_I et de 2,91 % pour S_{II} . Elles sont toutes inférieures à 10%; les valeurs du coefficient de corrélation sont de 0,92 pour S_I et de 0,95 pour S_{II} en calage et respectivement de 0,94 et de 0,96 en validation; le rapport des débits maximaux est de 0,80 pour S_I et de 0,91 pour S_{II} en calage et respectivement de 0,93 et 1,18 en validation.

Toutes ces valeurs traduisent une bonne performance des modèles de simulation développés.

Le critère de robustesse de chaque modèle étant inférieur à 10%, montre que les modèles sont robustes par conséquent stables. Les figures 5 et 6 sont les représentations du nuage de points du couple formé par les débits observés et ceux simulés par les modèles S_I et S_{II} en calage comme en validation.

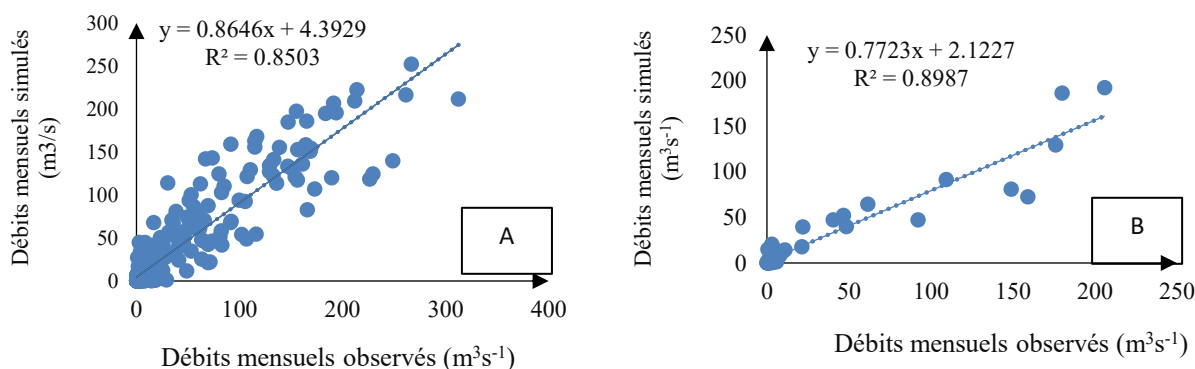


Fig. 5. Corrélation entre débits observés et débits simulés par le modèle S_I , A: en calage; B: en validation

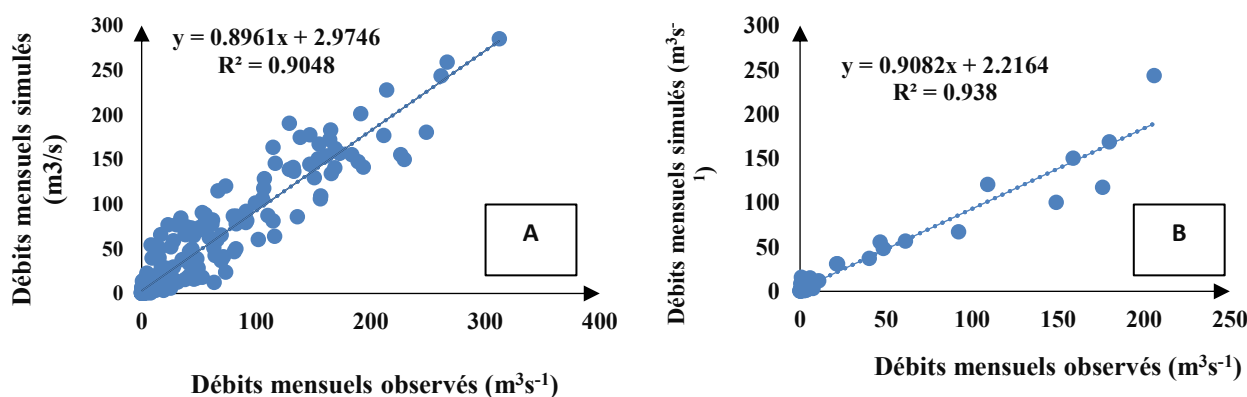


Fig. 6. Corrélation entre débits observés et débits simulés par le modèle S_{II} , A: en calage; B: en validation

L'analyse des figures (Fig. 5 et Fig. 6) montre que les points de nuage ont une allure linéaire. C'est-à-dire leur allure est une droite. Ce qui traduit une bonne corrélation entre les débits mensuels simulés et ceux observés en calage et en validation. Ces résultats illustrent parfaitement les différentes valeurs du coefficient de corrélation de Pearson calculées. Tous ces résultats

traduisent que les modèles de simulations estiment des valeurs de débits dont les variations sont similaires à celles des débits observés.

4.2.2 DÉBITS SIMULÉS

- En calage

Les hydrogrammes mesurés et simulés par les modèles en calage sont illustrés par les figures 7 et 8. L'analyse des figures (Fig.7 et Fig.8) met en évidence l'existence d'une bonne synchronisation entre les débits observés et ceux simulés par les modèles S_I et S_{II} en calage. Ainsi, les modèles neuronaux développés S_I et S_{II} restituent correctement les débits observés en calage. Cependant, quelques décalages sont observés sur certaines parties de ces représentations. Par exemple, les débits de crue de septembre 1962, septembre 1964, septembre 1971, septembre 1975, septembre 1984 et les débits d'étiage de juin 1978, juillet 1978 marquant les périodes fortes du régime hydrologique sont par endroit mal estimés.

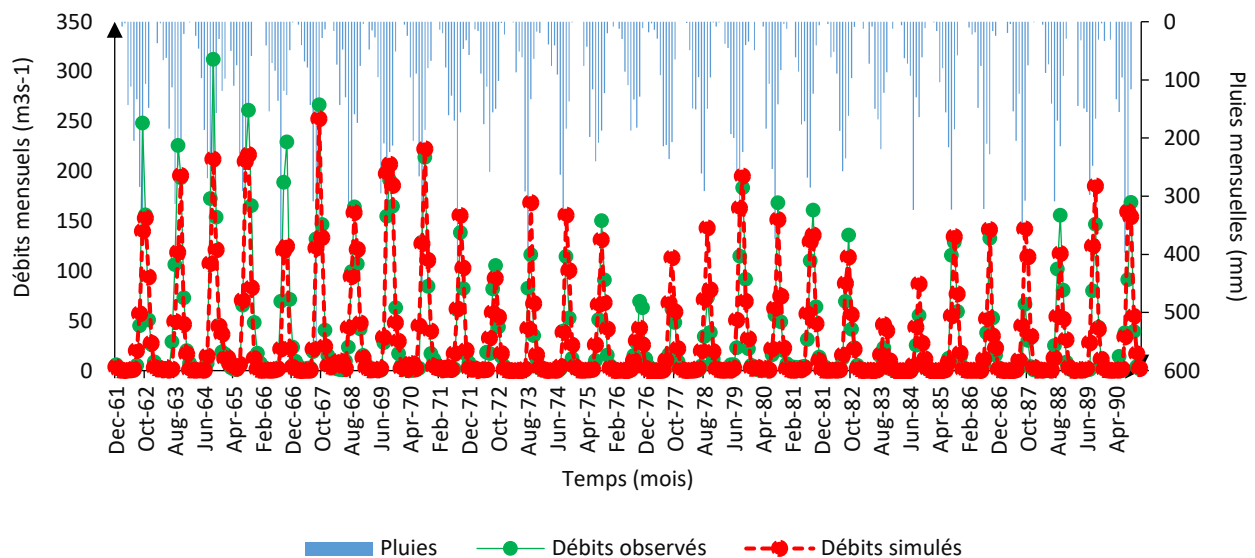


Fig. 7. Hydrogrammes des débits mesurés et simulés par le modèle S_I en calage à la station de Kouto

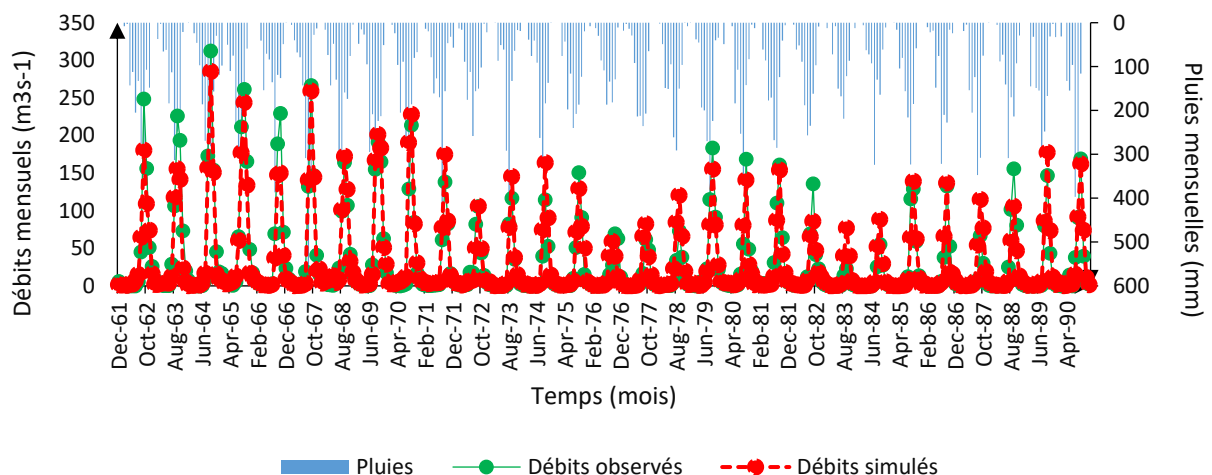


Fig. 8. Hydrogrammes des débits mesurés et simulés par le modèle S_{II} en calage à la station de Kouto

- En validation

Les hydrogrammes mesurés et simulés par les modèles sont illustrés par les figures 9 et 10. L'analyse des hydrogrammes (Fig. 9 et 10) montre une synchronisation entre les débits observés et les débits simulés par les modèles S_I et S_{II} en validation. Aussi, des décalages sont observés sur certaines parties de ces représentations. Par exemple, les débits de crue de septembre 1993, septembre 1994, septembre 1995 et les débits d'étiage de mars 1992 et janvier 1995 marquant les périodes fortes du régime hydrologique sont par endroit mal estimés par les modèles conçus.

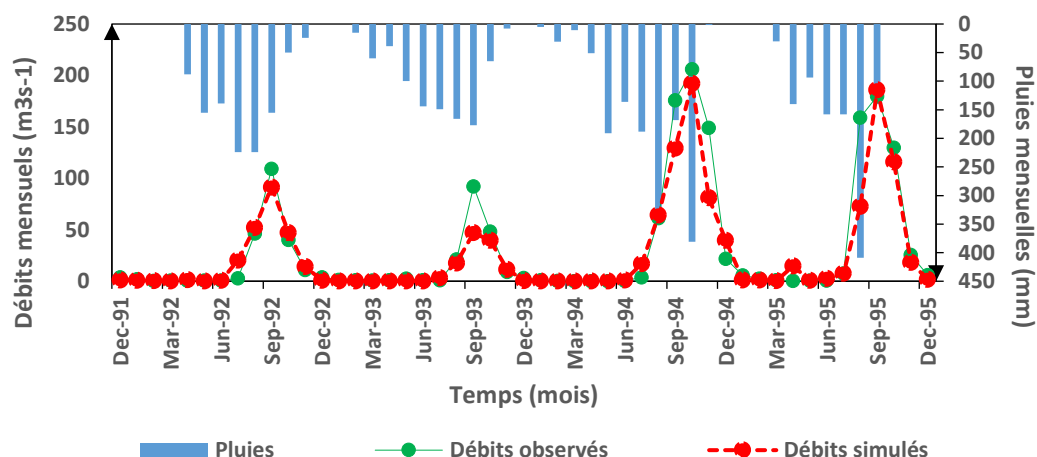


Fig. 9. Hydrogrammes des débits mesurés et simulés par le modèle S_I en validation à la station de Kouto

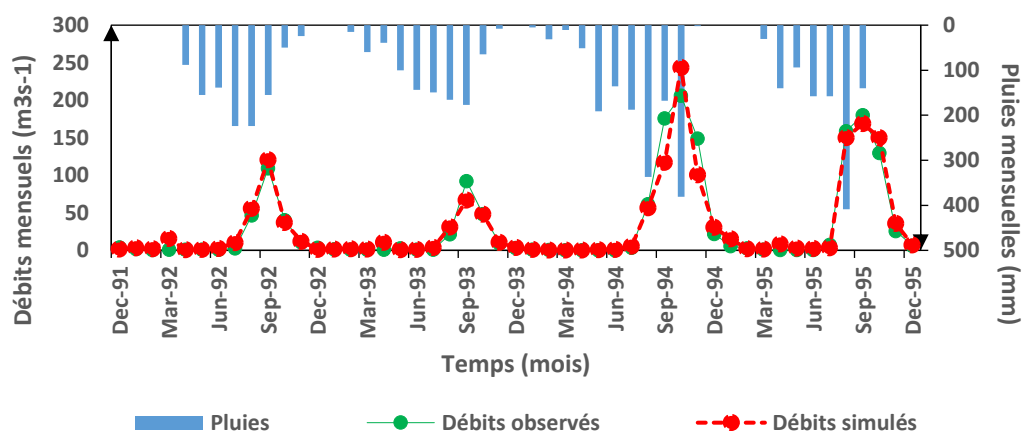


Fig. 10. Hydrogrammes des débits mesurés et simulés par le modèle S_{II} en validation à la station de Kouto

Au regard de tous ces résultats, une comparaison entre les performances des modèles de simulation montre que le modèle S_{II} constitue le meilleur simulateur des débits du fleuve Bagoé. Lequel modèle S_{II} a permis d'étendre les valeurs des débits mensuels du fleuve Bagoé de 1996 à 2016 (Figure 11).

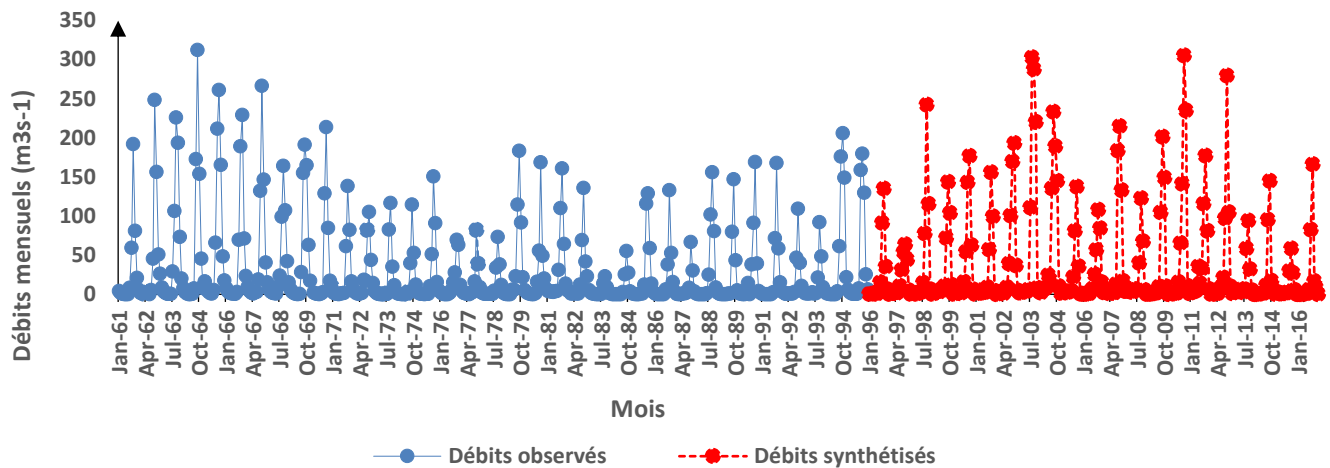


Fig. 11. Evolution des débits mensuels durant la période 1961-2016 à la station de Kouto

5 DISCUSSION DES RESULTATS

5.1 EFFICACITÉ ET ROBUSTESSE DES MODÈLES NEURONAUX

Dans cette étude, deux (02) modèles à base de réseaux de neurones pour la simulation des débits mensuels du fleuve Bagoé à la station de Kouto ont été développés. Le minimum des valeurs du critère de Nash calculées entre les débits mesurés et les débits calculés par tous ces modèles est de 84,71% et le maximum de ce critère est de 93,26 %. Le critère de robustesse calculé traduisant la stabilité des modèles, varie de 2,91 % à 7,62 %. Cette variation du Nash et du critère de robustesse met en évidence l'influence de la qualité de certains paramètres des modèles neuronaux sur l'efficacité et la robustesse des modèles. Il s'agit notamment du vecteur d'entrée, du nombre de neurones de la couche cachée et de la règle de l'apprentissage. En effet, dans la modélisation avec les réseaux de neurones, la qualité du vecteur des entrées est indispensable pour une efficacité des modèles [34]. L'utilisation de la corrélation croisée pour déterminer le retard approprié des séries chronologiques a contribué à la sélection d'un vecteur d'entrée pertinent. Ce résultat s'accorde avec ceux obtenus par plusieurs auteurs [43], [44], [45], [46], [47]. En effet, dans leurs travaux pour la prévision des débits pour deux bassins versant au Royaume-Uni, [44] ont utilisé une analyse de corrélation croisée pour identifier les retards appropriés des séries chronologiques des stations de jaugeage en amont comme entrées des modèles RNA développés. Ces modèles ont été efficaces et performants. [30] ont obtenu les mêmes résultats de l'utilisation de la corrélation croisée pour la sélection d'un vecteur d'entrée pertinent. L'ajout des valeurs de l'évapotranspiration comme variable à l'entrée du modèle a amélioré énormément la performance des modèles développés. En effet, l'évapotranspiration potentielle est un paramètre qui influence les débits d'un cours d'eau [48]. Cette influence semble avoir été bien traduite puis mis en évidence par les réseaux de neurones sur les débits estimés. Plusieurs auteurs dont [41] et [42] ont obtenu les mêmes résultats. Selon ces auteurs, l'ajout des données d'évapotranspiration potentielle comme variable explicative améliore la performance des modèles neuronaux. Un modèle neuronal bien conçu avec une architecture optimale est très performant. Et cela passe bien évidemment par la détermination du nombre de neurones sur la ou les couches cachée (s). Le nombre de neurone des modèles développés ici varie de 9 à 10 pour un vecteur d'entrée dont l'effectif varie de 12 à 24. Cette variation du nombre de neurones de la couche cachée a contribué considérablement à améliorer les performances des modèles développés. Mais le nombre des neurones sur la couche cachée des modèles conçus dans cette étude est supérieur à ceux déterminés par les auteurs [49] dans leurs travaux sur le Bandama Blanc à Tortiya. En effet ces auteurs ont obtenu un Nash qui varie de 73 % à 89 % et le nombre de neurones sur la couche cachée varie de 4 à 6 pour un vecteur d'entrée dont les variables varient de 3 à 5. Cette différence pourrait s'expliquer par le nombre de variables à l'entrée des modèles. En effet le nombre de variables à l'entrée détermine le nombre de neurones possible sur la ou les couches cachées à la lumière du théorème de Kolmogorov [50]. Toutefois, l'augmentation du nombre de neurones sur la couche cachée n'implique pas obligatoirement l'obtention d'une meilleure performance [51]. L'efficacité et la robustesse des modèles développés pourraient être dues à l'algorithme d'apprentissage BFGS. En effet, l'algorithme BFGS [52], [30] découle de la méthode du quasi-Newton, permettant de supprimer la minimisation unidimensionnelle. Cette méthode fournit généralement de meilleurs résultats que les algorithmes plus classiques comme la Descente de Gradient [31].

5.2 SIMULATION DES DÉBITS MENSUELS DU FLEUVE BAGOÉ

Les modèles à base de réseaux de neurones ont contribué à simuler des débits mensuels du fleuve Bagoé à la station de Kouto. Cette technique se caractérise par sa rapidité dans la modélisation des débits puis par sa capacité de généralisation. Le coefficient de corrélation de Pearson traduisant la corrélation entre les débits mesurés et les débits calculés par les modèles varie de 0,92 à 0,96. Cette variation traduit une bonne reproduction des débits observés par les modèles de simulation. Ces résultats obtenus ici, s'inscrivent dans l'intervalle d'évolution des coefficients de corrélation obtenu par [49] et [42]. En effet, le coefficient de corrélation de Pearson traduisant la corrélation entre les débits observés et débits simulés par les modèles conçus par les auteurs [49] et [42] varient respectivement de 0,85 à 0,94 et de 0,95 à 0,98. Les hydrogrammes observés et simulés par les modèles développés sont synchrones. Cependant des décalages sont observés entre ces hydrogrammes. Cela est dû à l'incapacité des modèles neuronaux conçus à reproduire des débits extrêmes à la station de Kouto. Ce résultat concorde avec les conclusions des travaux de [31]. Dans ces travaux sur le Bandama blanc au Nord de la Côte d'Ivoire, cet auteur a relevé l'incapacité des modèles de réseaux de neurones à reproduire certains débits du fleuve qui ne sont pas seulement le fait des seules pluies tombées sur le bassin versant. Aussi, les RNA durant leur phase d'apprentissage, se familiarisent aux données. Ils extraient des singularités dans ces données comme l'a justifié Koffi [31]. Dans cette étude de modélisation, les crues s'observent une fois dans l'année et généralement durant la période d'Août ou de septembre ou d'Octobre. Comme les données de débits de crue sont généralement en nombre très restreint par rapport aux autres débits, les modèles RNA disposent donc peu de données de débit de crue afin d'extraire la singularité.

6 CONCLUSION

Cette étude portant sur l'utilisation des modèles des réseaux de neurones dans la résolution des problèmes des Sciences de la Terre, est initiée pour tenter d'estimer les débits mensuels du fleuve Bagoé à la station hydrométrique de Kouto. Elle a conduit à la construction des modèles de réseaux de neurones et ensuite, à leur utilisation en simulation de débits. Les résultats obtenus indiquent que ces modèles neuronaux développés pour les débits mensuels ont exprimé plus de 84% de ces débits. En effet, mesurée en simulation cette performance a permis de synthétiser les débits du fleuve Bagoé à la station de Kouto de 1996 à 2016. Les critères de validation de ces modèles sont optimaux: le minimum des critères de Nash est de 84,71 % en calage et de 92,33 % en validation; et le maximum de ce critère est de 90,35 % en calage et de 93,26 % en validation. Au niveau des coefficients de corrélation de Pearson, le minimum en calage est de 0,92 et de 0,94 en validation; et le maximum est de 0,95 en calage et de 0,96 en validation. Au niveau du rapport des débits maximaux, la valeur minimale est de 0,80 en calage et de 0,93 en validation, et la valeur maximale est de 0,96 en calage et de 1,18 en validation. Au niveau du critère de robustesse, il varie de 2,91 % à 7,62 %. Tous ces résultats traduisent la performance des réseaux de neurones dans la simulation et la prévision de l'écoulement surfacique. Toutefois, des débits forts sont parfois surestimés ou sous-estimés par ces modèles qui présentent en général une faiblesse dans la reproduction des débits extrêmes.

REFERENCES

- [1] K. A. Kouamé, K. F. Kouamé, A. M. Kouassi, S. Oulare, G. C-R. Adon and M. Bernier, «Mise en place d'une base de données pour une modélisation hydrologique distribuée du bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire): apport d'un modèle numérique d'altitude, de la télédétection et du SIG», *Afrique Science*, Vol.7, N°2, pp 94-114, 2013.
- [2] L. Christian, Hydrométrie : Mesurer les débits d'une rivière, pourquoi et comment ? Encyclopédie de l'environnement, 2017. [Online] Available: <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/hydrometrie-mesurer-debits-dune-riviere/> (Consulté le 15 Mars 2022).
- [3] OMM, «Atelier régional sur l'amélioration de la prévision météorologique et hydrologique des crues dans les pays d'Afrique centrale et occidentale». Organisation Météorologique Mondiale (OMM) Niamey (Niger), Rapport du projet, 18 p, 2006.
- [4] F. Papa, J.-F. Crétaux, M. Grippa, E. Robert, M. Trigg, R. M. Tshimanga, B. Kitambo, A. Paris, A. Carr, A. S. Fleischmann, M. de Fleury, P. G. Gbetkom, B. Calmettes and S. Calmant, «Water Resources in Africa under Global Change : Monitoring Surface Waters from Space», *Surveys in Geophysics*, 44 (1), pp. 43-93. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09700-9>, 2023.
- [5] Y. Diémé, S. Sambou, M.T. Cissé, S. Tamba, I. Lèye, M.L. Sané, and I. Sarr, «Utilisation du modèle Muskingum pour reconstruire des séries de débits journaliers. Application au fleuve Sénégal», *Revue scientifique et technique, LIEE* N°26&27, pp. 62-82, 2015.

- [6] A. Bodian, «Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau: Application au haut bassin du fleuve Sénégal», Thèse de Doctorat de l'Université Cheikh Anta Diop (Dakar), Sénégal, 288 p, 2011.
- [7] M. Gosset, P. A. Dibi-Anoh, G. Schumann, R. Hostache, A. Paris, E.-P. Zahiri, M. Kacou and L. Gal, Hydrometeorological Extreme Events in Africa : The Role of Satellite Observations for Monitoring Pluvial and Fluvial Flood Risk, *Surveys in Geophysics*, 44, pp. 197-223, <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09749-6>, 2023.
- [8] ABN, Etude pour la mise en place d'un réseau de recherche et développement à l'échelle du bassin du Niger. Autorité du Bassin du Niger (ABN), Niamey (Niger), Rapport final provisoire, 109 p, 2008.
- [9] M. G. Adja, Etude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoé dans un contexte de variabilité climatique. Départements de Boundiali et Tengréla, (milieux soudano-sahéliens au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 195 p, 2009.
- [10] Y. Brunet-Moret, P. Chaperon, J. P. Lamagat and M. Molinier, Monographies hydrologiques, Orstom, Paris. No. 8, 521p, 1986.
- [11] ABN, Renforcement du système d'observation pour une meilleure gestion des ressources en eau dans le bassin du fleuve Niger, Autorité du Bassin du Niger (ABN), Niamey (Niger). Rapport provisoire, 47p, 2010.
- [12] J. P. Villeneuve, P. Hubert, A. Mailhot and A.N. Rousseau, La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau, *Journal of Water Science*, 11, pp 19–39. <https://doi.org/10.7202/705327ar>, 1998.
- [13] M. Hamaoui, Étude statistique et comparative de modèles conceptuels hydrologiques pour des bassins versants de la province du Québec, Maîtrise en ingénierie de l'Université du Québec à Chicoutimi, Canada, 167 p, 2019.
- [14] M. G. Adja, J. E. Djemin, F. O. N'dri, F. K. Kouame and J. Biemi, «Contribution des modèles hydrologiques et des SIG à l'étude de l'impact de la variabilité climatique et du changement de l'occupation du sol sur les ressources en eau du bassin versant de la Volta en Côte d'Ivoire», *International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-932*, Vol. 26, (No. 2), pp. 652-667, 2019.
- [15] G. Girard, Etude du bassin de la Haute Bagoé. Résultats de la campagne 1960, ORSTM, 82 p, 1961.
- [16] B. Tagini, Esquisse géotechnique de la Côte d'Ivoire. SODEMI. Rapport n° 107, Abidjan. Côte d'Ivoire, 94 p, 1965.
- [17] S. F. Assouman, M. Koné and B. Z. Koli, «Morphologie du paysage, variabilité pluviométrique et aménagement de la plaine alluviale de la Bagoé: L'exemple de Guinguerini au nord de la Côte d'Ivoire», *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 1, pp. 1-17, 2016.
- [18] K. Kindinin and C. A. Yao, «Déterminants bio-culturels de l'exploitation du charbon de bois à Boundiali (nord cote d'ivoire)», *Revue Africaine d'Anthropologie*, Nyansa-Pô, N° 21, pp. 142-157, 2016.
- [19] A. Abbas, S. Ullah, W. Ullah, M. Waseem, X. Dou, C. Zhao, A. Karim, J. Zhu, D. F. T. Hagan and A. S. Bhatti, «Evaluation and projection of precipitation in Pakistan using the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 model simulations», *International Journal of Climatology*, 42 (13), pp. 6665-6684, 2022.
- [20] F. Huang, S. Jiang, W. Zhan, B. Bechtel, Z. Liu, M. Demuzere, Y. Huang, Y. Xu, L. Ma and W. Xia, «Mapping local climate zones for cities : A large review. Remote Sensing of Environment, 292, 113573, 2023.
- [21] M. A. Lachaud, B. E. Bravo-Ureta and C. E. Ludena, «Economic effects of climate change on agricultural production and productivity in Latin America and the Caribbean (LAC)», *Agricultural Economics*, 53 (2), pp. 321-332, 2022.
- [22] I. M. Maclean and R. Early, «Macroclimate data overestimate range shifts of plants in response to climate change», *Nature Climate Change*, pp. 1-7, 2023.
- [23] S. Shelton and R. D. Dixon, «Long-term seasonal drought trends in the China-Pakistan economic corridor. Climate», 11 (2), 45p, 2023.
- [24] M. New, M. Hulme and P. Jones, «Representing 20th century space-time climate variability.II: Development of 1901–1996 monthly terrestrial climate fields», *J. Climate* 13, pp. 2217–2238, 1998.
- [25] A. S. V. Assoko, Conception d'outils de prévision des extrêmes hydrologiques en région tropicale ouest africaine : cas du bassin versant de la Marahoué en côte d'ivoire. Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique Felix Houphouët-Boigny, 240p, 2022.
- [26] K. Medane, Hydrologie et modélisation pluie-débit: cas du bassin versant de l'oued boumessaoud (tafna nw- algerien). MAGISTER de l'université abou bekr belkaid – tlemcen (tlemcen), Algérie, 121 p, 2012.
- [27] U. D. Baruah, A. Saikia and N. Mili, «Modelling of Reference Crop Evapotranspiration in Humid-Wet Tropical Region of India. In Climate Change Adaptation», *Springer*, pp. 407-417, 2023.
- [28] H. Darabi, M. M. Chari, P. Afrasiab and H. Piri, Evaluation and Calibration of Thornthwaite equation for Estimating Reference Evapotranspiration in windy areas (case study of Sistan region). *Physical Geography Research Quarterly*, 54 (4), pp. 549-564, 2023.
- [29] A. Tegos, S. Stefanidis, J. Cody and D. Koutsoyiannis, On the Sensitivity of Standardized-Precipitation-Evapotranspiration and Aridity Indexes Using Alternative Potential Evapotranspiration Models, *Hydrology*, 10 (3), 64, 2023.
- [30] O. Kharroubi, O. Blanpain, E. Masson and S. Lallahem, Application du réseau des neurones artificiels à la prévision des débits horaires: Cas du bassin versant de l'Eure, France. *Hydrological Sciences Journal*, Volume 61, n°3, pp. 541–550, 2016.

- [31] Y. B. Koffi, Modélisation pluie-débit en région tropicale humide: Application des réseaux de neurones sur quatre stations hydrométriques du Bandama Blanc (Bada, Marabadiassa, Tortiya, Bou), Nord de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 210 p, 2007.
- [32] S. Démure, Estimation des précipitations par télédétection spatiale active et passive. Maîtrise d'Ingénierie Mathématiques. Université Paris-Sud 11, 73 p, 2004.
- [33] W. Li and Z. Wu, «A method of SVM with Normalization in Intrusion Detection Procedia», *Environmental Sciences*, Volume 11, pp. 256-262, 2011.
- [34] G. J. Bowden, G. C. Dandy and H.R. Maier, «Input determination for neural network models in water resources applications: Part 1 - Background and methodology», *Journal of Hydrology*, 301 (1-4), pp. 75-92, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.021, 2005.
- [35] S. V.-C. Jofack, Cartographie des potentialités en eaux souterraines dans les Hauts Plateaux de l'Ouest - Cameroun : contribution de la Télédétection (optique et radar), des Systèmes d'Informations Géographiques et des Réseaux de Neurones. Thèse de Doctorat de l'Université Felix Houphouët-Boigny de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 267 p, 2016.
- [36] P. Stollsteiner, A. Wuillemier, H. Bessière and J. Seguin, Guide pour la détermination des indicateurs piézométriques en vue d'une gestion quantitative de la ressource. [Rapport de recherche] Brgm; Onema. ffhaf-02936929ff, 2012.
- [37] Y. A. Chakali et S. A. Hadj, Optimisation des paramètres essentiels de la formulation d'un bcr à base de fillers calcaire par les réseaux de neurones artificiels «rna». Conférence Internationale Francophone NoMaD, Liège, Belgique, 7-8 Novembre, 2018.
- [38] R. Laurent, J. Henriët, M. Salomon, M. Sauget, F. Nguyen, R. Gschwind and L. Makovicka, «Utilisation d'un réseau de neurones artificiels pour la simulation des mouvements pulmonaires», *Cancer/Radiothérapie*, 15, pp. 123-129, 2011.
- [39] N. Dechemi, T. Benkaci et A. Issolah, «Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous», *Revue des Sciences de l'eau*, Volume 16, n°4, pp. 407-424, 2003.
- [40] A. Tarik et N. Dechemi, «Modélisation pluie-débit journalière par des modèles conceptuels et « boîte noire », test d'un modèle neuro flou», *Hydrological sciences journal*, Volume 49, n°5, pp. 919-930, 2004.
- [41] Y. B. Koffi., K. E Ahoussi., A. M. Kouassi, O. Kouassi, L. C. Kpangui and J. Biemi, «Application des réseaux de neurones formels pour la prévision des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire)», *Afrique Science: Revue Internationale Des Sciences et Technologie*, Volume 10, n°3, pp. 134-135, 2014.
- [42] Y. T. Brou, F. Akindès and Bigot S, «La variabilité climatique en Côte d'Ivoire: Entre perceptions sociales et réponses agricoles», *Cahiers Agricultures*, Volume 14, n°6, pp. 533-540, 2005.
- [43] N. Sajikumar and B. S. Thandaveswara, «A non-linear rainfall-runoff model using an artificial neural network», *Journal of Hydrology*, 216, pp. 32-35, 1999.
- [44] C.E. Imrie, S. Durucan and A. Korre, «River flow prediction using artificial neural networks: generalisation beyond the calibration range», *Journal of Hydrology*, 233, pp. 138-153, 2000.
- [45] K.C. Luk, J.E. Ball and A. Sharma, A study of optimal model lag and spatial inputs to artificial neural network for rainfall forecasting», *Journal of Hydrology*, 227, pp. 56-65, 2000.
- [46] D. Silverman and J.A.Dracup, «Artificial neural networks and long-range precipitation in California», *Journal of Applied Meteorology*, 31 (1): pp. 57-66, 2000.
- [47] W. Huang and S. Foo, «Neural network modeling of salinity variation in Apalachicola River», *Water Research*, 36, pp. 356-362, 2002.
- [48] J. Callède, «Oscillations journalières du débit des rivières en l'absence de précipitations», *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, 14 (3), pp. 219-283, 1977.
- [49] Y. Koffi, P. Ayrat, A. Kouassi, A. Johannet and J. Biemi, «Modélisation des débits des rivières en région tropicale humide: application des réseaux de neurones et du modèle GR2M au Bandama Blanc (CÔTE D'IVOIRE)», *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 17, pp. 151-171, 2011.
- [50] C. M. Bishop, Neural Networks for pattern recognition. Oxford University press, p. 482, 1995.
- [51] N. H. Meledje, Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux des sédiments dans le lac du barrage hydro-électrique d'Ayame 1. Thèse de doctorat de l'Université Nangui Abrogoua (Abidjan), Côte d'Ivoire, 215 p, 2014.
- [52] M. Lucea, Modélisation dynamique par réseaux de neurones et machines à vecteurs supports: contribution à la maîtrise des émissions polluantes de véhicules automobiles. Thèse de Doctorat de l'Université PARIS 6, Paris, France, 199 p, 2006.

UTILISATION DES MATERIAUX BIOSOURCES DANS L'ISOLATION THERMIQUE DES HABITATIONS: CAS DE LA PAILLE DE RIZ ET DE LA NATTE DE ROSEAU

[USE OF BIO-SOURCE MATERIALS IN THE THERMAL INSULATION OF DWELLINGS: CASE OF RICE STRAW AND REED MAT]

Waibaye Adoum¹, Bozabe Renonet Karka², and Koivoudou Lacatus¹

¹Department of Civil Engineering, National Advanced School of Public Works (ENSTP), N'Djamena, Chad

²Department of Civil Engineering, National Higher Institute of Arts and Crafts of Biltine (INSAMB), Biltine, Chad

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

ABSTRACT: This work explores the use of innovative eco-friendly solutions from bio-based materials Sources such as rice straw and reed mat in the thermal insulation of buildings to optimize energy requirements and limit loss of ambient temperature inside homes. For this purpose, an experimental cell in clay brick of dimensions 1.60 m x 1.50 m x 1.55 m was built to highlight these materials. As for the cases of one of the vertical walls and the roof insulated with rice straw and reed mat, the results obtained on the vertical wall made of terracotta brick + reed + rice straw + reed + clay coating show that the surface transmission coefficient defined by U has a value of 0.24 W/m²K equal to the recommended limit value. This wall therefore has the thermal qualities of a good insulator. Which leads to the absence of water condensation in the wall and the hygrometry content is good and pleasant to human life as well as the summer comfort as a whole must be better. It appears that this wall has a strong thermal resistance and diffuses little heat from the outside to the inside. At the roof level, two cases were considered. One without insulation and the other with insulation. U of the non-insulated roof is 1.6 W/m²K, higher than the recommended limit value of 0.24 W/m²K. Once insulated, it is equal to 0.24 W/m²K. Based on the results of this parameter, we can conclude that the sheet metal roof, insulated with rice straw, acts as an insulator.

KEYWORDS: Bio-source materials, rice straw, reed mat, insulation, thermal.

RESUME: Ces travaux explorent l'utilisation des solutions écologiques innovantes des matériaux bio-sources tels que la paille de riz et la natte de roseau dans l'isolation thermique des bâtiments afin d'optimiser le besoin en énergie et de limiter la déperdition de température ambiante à l'intérieur des maisons. A cet effet, une cellule expérimentale en brique cuite de terre de dimensions 1,60 m x 1,50 m x 1,55 m a été construite pour mettre en valeur ces matériaux. Quant aux cas de l'une des parois verticales et la toiture isolée à l'aide de la paille de riz et de la natte de roseau, les résultats obtenus sur la paroi verticale construite en brique de terre cuite + le roseau + paille de riz + roseau + enduit en argile montrent que le coefficient de transmission surfacique définie par U a une valeur de 0,24 W/m²K égale à la valeur limite recommandée. Cette paroi présente par conséquent des qualités thermiques d'un bon isolant. Ce qui conduit à l'absence de condensation d'eau dans le mur et la teneur en hygrométrie est bonne et agréable à la vie humaine ainsi que le confort d'été dans son ensemble doit être meilleur. Il apparait que cette paroi dispose d'une forte résistance thermique et diffuse peu la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur. Au niveau de la toiture, deux cas ont été considérés. L'un sans isolation et l'autre avec isolation. U de la toiture non isolée est de 1,6 W/m²K, supérieur à la valeur limite égale à 0,24 W/m²K recommandée. Une fois isolée, il est égal à 0,24 W/m²K. Au vu des résultats de ce paramètre, nous pouvons conclure que la toiture en tôle, isolée à l'aide de la paille de riz assure le rôle d'un isolant.

MOTS-CLEFS: Matériaux bio-sources, paille de riz, natte de Roseau, isolation, thermique.

1 INTRODUCTION

En cette ère du 21ème siècle, la question du Développement Durable est d'actualité. Elle interpelle à tous les niveaux et appelle à un changement de comportement. Elle exige à développer des stratégies d'émergence économique tout en intégrant certains paramètres prenant en compte la sauvegarde de la planète. Au niveau des constructeurs des ouvrages de génie-civil, deuxième émetteur de CO₂

après les industriels, des efforts doivent être fournis pour limiter la consommation énergétique en opérant des choix de matériaux dont le processus de fabrication a un faible besoin en énergie grise. En plus de cela, certaines dispositions techniques doivent aussi être intégrées dans la construction des bâtiments à forte inertie thermique afin de limiter l'utilisation des climatisations mécaniques, émettrices des gaz fluorés, dont l'impact peut être 23000 fois supérieur à celui du CO₂ sur effet de serre [1]. Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) des Nations Unies a confirmé en 2007 que les activités humaines ont un impact grandissant sur la stabilité du système climatique [2]. Si nous en sommes la cause, nous avons aussi la solution entre nos mains. Afin de limiter les conséquences du changement climatique, les émissions de gaz à effet de serre doivent être divisées par deux d'ici 2050 [2]. Certains documents renseignent que le domaine du bâtiment est globalement responsable de 40% de toutes les émissions des gaz à effet de serre dans le monde, 37% en 2021 [3]. La tendance actuelle est d'arriver à construire écologiquement et sain. A cet effet, plusieurs travaux sont menés sur les matériaux bio-sources, d'isolation thermique des bâtiments. On peut citer quelques-uns. Par exemple des résultats furent obtenus avec les fibres présentes dans les feuilles de bananier avec une conductivité très promotrice selon l'étude réalisée par A. J. NELSON lors de ses travaux de thèse [4]. Dans le même esprit, E. Antezak and al ont mené des travaux sur le comportement hygrothermique de la paille d'anas de lin utilisé comme isolant en vrac de combles perdus dispersé et étalé horizontalement sur une épaisseur de 25 à 30 cm dont les résultats ont été probants [5]. On peut aussi citer les travaux de T. Vincendas and al ont eu à réaliser des travaux sur un mélange de chanvre et de la terre crue à utiliser dans les constructions afin de leur procurer une meilleure conductivité [6]. Les travaux de H. Kaddouri and al, visent à améliorer les niveaux de confort thermique et les besoins énergétiques d'un bâtiment résidentiel; dont ils ont eu à appliquer trois types de matériaux bio-sources tels que la laine de chanvre, la fibre de bois et le liège expansé dans la boucle murale d'un bâtiment. Leurs travaux ont montré que l'isolation d'un toit avec 8 cm de laine de chanvre, contribue à des économies d'énergie presque de 37% au refroidissement et au chauffage [7]. D'après les travaux consultés de références [8], [9], [10], [11] et [12], l'étude du comportement thermique dynamique des composants de bâtiment est liée aux consommations d'énergie en matière de chauffage et de climatisation dans le but de maintenir constante la température ambiante intérieure du bâtiment dans les pays tempérés.

Les travaux de Rabemanantsoa et al (2021) traitent la caractérisation du comportement thermique dynamique des composants d'un bâtiment à usage d'habitation se sont focalisés sur le confort thermique de l'habitation en murs à base de terre [13]. Cette étude qui s'appuie sur deux méthodes telles que la norme internationale ISO 13786 et la méthode des mesures in situ sur des cellules prototypes a permis de démontrer que l'épaisseur d'un mur a un effet significatif sur le facteur d'amortissement et le temps de retard de la propagation de la variation journalière de température. Adagbe a aussi utilisé en 2021 de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme matériau des éléments porteurs des bâtiments armés avec le rônier [14].

L'accessibilité à l'électricité aux ménages tchadiens par exemple est moins de 20% d'après la Banque Mondiale en 2018 [15]. Au vu de tous ces indices défavorables, si l'on veut améliorer les conditions de vie dans l'habitat et diminuer les risques qui pèsent sur l'état de santé et la productivité des occupants du fait de l'inconfort thermique dans les bâtiments, on doit penser à une adaptation et donc il faut une meilleure connaissance des performances énergétiques de l'enveloppe du bâtiment et de ses composantes. Cela nécessite le recours aux matériaux écologiques et aux outils d'analyse pour mieux analyser et comprendre le comportement des bâtiments afin d'améliorer ses performances énergétiques que ce soit en phase de conception ou de vie.

Les travaux de cet article s'inscrivent dans le cadre d'une démarche liée aux respects du principe de Développement Durable. Les motivations de ces travaux consistent en premier lieu d'approfondir les connaissances sur le comportement thermique des matériaux écologiques par l'expérimentation et les calculs d'une part, et d'autre part d'analyser les solutions passives permettant d'éviter l'augmentation de la température dans l'environnement intérieur d'un bâtiment et par conséquent diminuer les heures d'inconfort. Ces travaux ont permis d'opérer un choix d'un prototype de cellule ou bâtiment expérimental pouvant permettre de réaliser les travaux expérimentaux. Ensuite identifier un certain nombre de matériaux bio-sources qui peuvent être utilisés comme isolants principaux et d'autres comme isolants de complément. Ensuite, les résultats obtenus permettent de faire les analyses et les discussions.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Pour parvenir à la réalisation de ces essais expérimentaux, nous avons commencé à réfléchir sur la conception et la réalisation des échantillons expérimentaux. C'est ainsi que sur la base de certains travaux réalisés via la littérature, nous étions emmenés à concevoir un échantillon d'une cellule expérimentale de dimensions 1,60 m x 1,50m et de hauteur 1,55 m dont la toiture est en tôle. Pour ces études, quatre types d'échantillons sont considérés. Il s'agit de deux parois verticales en murs constituées d'une paroi témoin non isolée et l'autre isolée. Ensuite deux cas de toitures dont l'un non isolé et l'autre isolé sur base de quelques matériaux isolants.

2.1 IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION ET D'ISOLATION

Les matériaux utilisés pour la construction de nos échantillons sont: briques en terre cuite de dimensions 25 cm x 15 cm x 7 cm, mortier de terre crue (argile) et enduit de crépissage en argile mélangée avec du sable. Les matériaux choisis comme isolants pour ces études sont: la natte de roseau et la paille du riz. L'agencement ou la disposition de ces matériaux constituent des échantillons et on a:

Echantillon n°1: mur en brique de terre cuite et enduit en mortier de ciment (témoin);

Echantillon n°2: mur en brique de terre cuite, natte de roseau, paille du riz, natte roseau et enduit d'argile;

Echantillon n°3: tôle au niveau de toiture non isolée;

Echantillon n°4: tôle au niveau de toiture, paille du riz et natte de roseau.

2.2 DÉTERMINATION DES MASSES VOLUMIQUES DES MATÉRIAUX

Les masses volumiques des différents matériaux ont été déterminées au laboratoire de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP) de N'Djamena, Tchad, conformément à la norme NFP18-554. Les matériels utilisés à cet effet sont essentiellement: une burette graduée de 500 ml, une balance électronique, une tare. Pour la détermination des volumes et masses des matériaux étudiés, nous sommes passé par plusieurs étapes.

2.2.1 MESURES PONDÉRALES

La Figure 1-a-b présente les images relatives aux mesures pondérales des échantillons d'une brique en terre cuite et des pailles du riz.

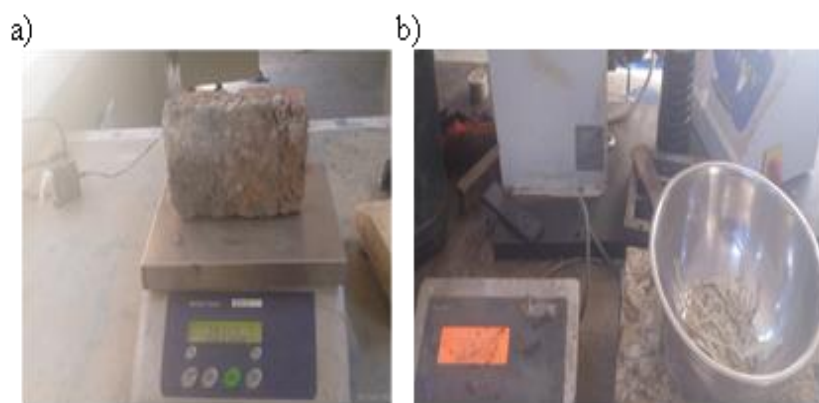


Fig. 1. Pesage des échantillons de la brique en terre cuite et des pailles de riz

2.2.2 MESURES VOLUMIQUES

Les essais sont réalisés pour les mesures volumiques des matériaux étudiés tels que la paille de riz, le roseau et la brique en terre cuite. Dans un premier temps, il a été utilisé une éprouvette graduée contenant 300 ml d'eau. Ensuite pour la mesure volumique des matériaux, on introduit à tour d'essai les échantillons des matériaux précédemment pesés. A travers les lectures de volumes, sont déterminés les volumes réels des matériaux. L'ensemble de ces essais sont présentés par la Figure 2. Cependant, dès qu'il est procédé à l'immersion, il est conseillé de réaliser aussitôt les mesures afin de limiter l'adsorption d'eau par les matériaux.



Fig. 2. Immersion du matériau paille de riz

Le volume total V_{total} donné par l'équation (1) correspond au volume initial d'eau augmenté du volume du matériau immergé $V_{matériau}$ à mesurer.

$$V_{total} = V_{eau\ initial} + V_{matériau} \quad (1)$$

Le calcul du volume du matériau inconnu V_m se calcule en faisant soustraire du volume total le volume d'eau initial $V_{initial}$.

$$V_{matériau} = V_{total} - V_{eau\ initial} \quad (2)$$

Le calcul de la masse volumique d'une substance solide peut être déterminée en calculant le rapport entre la masse du solide et son volume. La mesure de la masse a été effectuée à la première étape à l'aide d'une balance. Pour retrouver le volume du matériau, les équations (1) et (2) nous permettent de le déterminer. Une fois le volume est déterminé, le rapport entre la masse et le volume permet d'obtenir la masse volumique du solide.

$$\rho = \frac{M_{masse\ du\ matériau}}{V_{volume\ du\ matériau}} \quad (3)$$

ρ : représente la masse volumique apparente du matériau (Kg/m^3).

$M_{masse\ des\ matériaux}$: représente la masse du solide (Kg).

$V_{volume\ des\ matériaux}$: représente le volume du solide (m^3).

2.3 DISPOSITIF CONSTRUCTIF DU PROTOTYPE EXPÉRIMENTAL

Les essais expérimentaux sont réalisés sur une cellule construite en briques de terre cuite dont la toiture est en tôle (voir Figure 3). Deux des quatre parois verticales et une paroi horizontale de toiture en tôle de la cellule constitue un type d'échantillon avec ou sans isolation:

Echantillon 1: Mur en brique cuite + enduit mortier de ciment (échantillon témoin);

Echantillon 2: Mur en brique cuite + natte de roseau + paille du riz + natte de roseau + enduit en argile;

Echantillon 3: Toiture non isolée

Echantillon 4: Natte de roseau + paille du riz + tôle.



Fig. 3. Cellule expérimentale construite dans le cadre de notre étude

Afin de créer des espaces pour la mise en place des isolants, des gabarits en chevrons sont réalisés et placés à une distance de 14,5 cm du côté intérieur de la cellule par rapport aux trois murs et permettant de fixer les nattes de roseau (voir Figure 4-a). Ces gabarits permettent de régler l'épaisseur de l'isolation (épaisseur des isolants + enduit de crépissage). La mise en œuvre de ces gabarits facilite grandement le travail pour les étapes ultérieures. La figure 4-b présente le cas d'une isolation relative à l'échantillon 2.

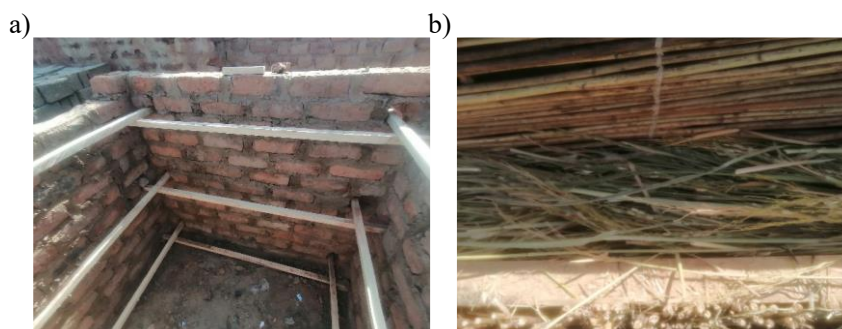


Fig. 4. a) Bardage pour isolation; b) Paille de riz entre nattes de roseaux (échantillon 2)

En plus des gabarits, nous avons utilisé plusieurs autres techniques permettant le réglage de la planimétrie des parois. Il s'agit des ficelles de réglage de niveau de paroi afin de contrôler la planéité du gabarit tout au long de sa pose. Les gabarits de niveau inférieur sont au moins positionnés à 15 cm au-dessus du sol fini (Figure 4-a). Des liteaux ou cales sont fixés sur les lambourdes tous les 80 cm afin de maintenir une équidistance entre gabarits et parois de murs et aussi pour assurer la stabilité de l'ensemble des isolations (Figure 4-a);

Les Figures 5-a et b présentent respectivement les images des parois intérieures de la cellule après avoir appliqué le crépissage sur les nattes de roseau ainsi que la disposition des pailles de riz entre les nattes de roseau dont l'une fixée aux murs et l'autre aux gabarits crépis à l'enduit d'argile, c'est le cas de l'échantillon 2.

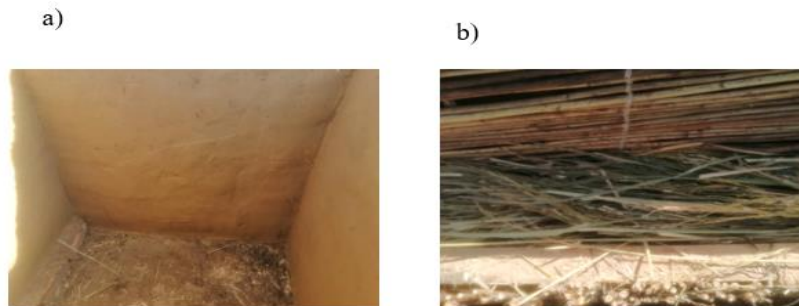


Fig. 5. a) parois crépis avec l'enduit d'argile crue; b) paille du riz entre deux parois de nattes de roseau (échantillon 2)

Les figures 6-a-b correspondent aux cas de la toiture. Ici sur la Figure 6-a, les nattes de roseau sont disposées en sous faces inférieures de la toiture servant de support pour étaler les pailles du riz voire Figure 6-b. c'est le cas de l'échantillon 4.

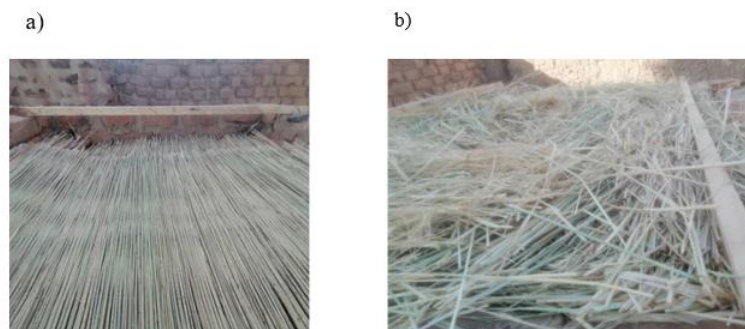


Fig. 6. Isolation de la toiture-a) nattes de roseau à la sous face de la toiture; b) étalage des pailles du riz (échantillon 4)

2.4 MESURE DES TEMPÉRATURES ET CALCUL DU DÉPHASAGE THERMIQUE

2.4.1 MESURE DES TEMPÉRATURES

Une série de mesures est effectuée sur les faces intérieures et extérieures des quatre échantillons. En effet, pour la présente étude, il a été procédé à l'observation de l'évolution des gradients thermiques par mesure de température sur chacune des faces au cours d'une journée (Figure 7-a). L'objectif ici, c'est la mise en évidence de la question de transfert thermique sur chaque paroi isolée thermiquement ou non. Ceci permet de caractériser les propriétés thermiques des parois dans leur composante d'isolation. De plus, la fiabilité dans le temps et la résistance aux intempéries font partie des qualités nécessaires surtout que ces matériaux sont à l'abris des intempéries telles que la pluie. Rappelons que les parois extérieures des murs sont utilisées principalement comme une protection. Elles constituent les premières barrières thermiques qui limitent les échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur d'une pièce. Etudier son inertie conduit aussi donc à suivre l'évolution de la température ambiante de l'air en contact avec la surface interne. C'est pour cette raison que l'évolution de la variation de la température interne de la cellule a été observée au moyen de l'enregistreur de température Elitech rc-5 (voir Figure 7-a-b). Cet instrument a été placé sur les faces intérieure et extérieure des parois pour mesurer les variations de température extérieure et intérieure des échantillons 1, 2, 3 et 4 faisant l'objet de ces études.

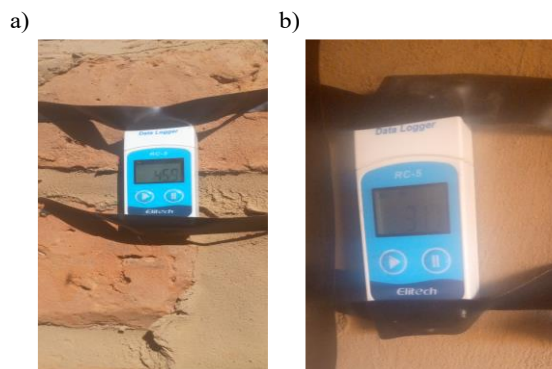


Fig. 7. a) température paroi extérieure; b) température paroi intérieure de l'échantillon 2

2.4.2 CALCUL DES DÉPHASAGES THERMIQUES

Ce paramètre est l'un des plus importants dans une démarche constructive en vue d'évaluer l'inertie thermique d'une paroi. Sa détermination est capitale durant la phase expérimentale. Les résultats obtenus feront ensuite l'objet d'une comparaison avec ceux de la Réglementation Thermique de 2012. D'une manière générale, le déphasage thermique est égal à l'intervalle de temps entre le moment où le maximum d'une sollicitation thermique extérieure impacte de façon équivalente l'intérieur d'un bâtiment en une journée. Cette grandeur caractérise la capacité d'un matériau à retarder le transfert de chaleur. Noté D , il est donc obtenu par la relation suivante:

$$D = t_{T_{extmax}} - t_{T_{intmax}} [h] \quad (4)$$

Où

$$D = \frac{\sqrt{T}}{e \times \sqrt{\pi}} \times e \times \sqrt{\frac{\rho C}{\lambda}} \quad (5)$$

Avec $T = 24 \text{ heures} = 24 \times 3600s$; e : c'est l'épaisseur du matériau, ρ la masse volumique, C : est la chaleur spécifique.

$$C_p = \frac{Q}{m \Delta T}; \text{ avec } Q = \varphi \times \Delta t \quad (6)$$

Où Q est la quantité de chaleur, m la masse du corps en Kg et ΔT la différence de température en kelvin. φ est le flux de chaleur par unité de surface et Δt le temps pour lequel la quantité de chaleur est calculée, prise égale à une heure dans notre cas.

2.5 CHOIX DE LA MÉTHODE DE CALCUL DE CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Pour le calcul des conductivités thermiques des matériaux utilisés au cours de ces travaux, les choix ont été porté sur les deux méthodes empiriques qui sont celles de Elangovan R et Marie VIEL (Figure 8) [16]. En effet, par manque des appareils de mesures appropriés, il a été jugé utile d'opter pour ces méthodes. S'agissant de la méthode de MARIE VIEL, elle est appliquée aux matériaux isolants dont leurs masses volumiques sont faibles ($< 500 \text{ Kg/m}^3$). Elle donne des résultats proches des valeurs de la conductivité λ des autres expériences.

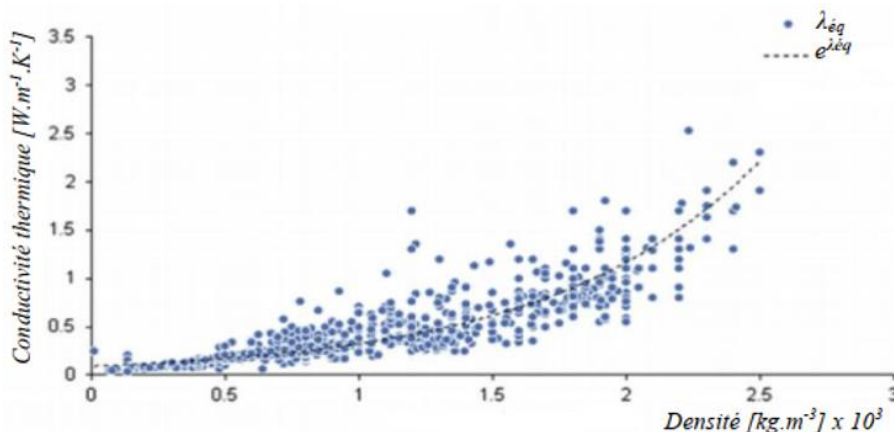


Fig. 8. Relation entre la densité et conductivité thermique des matériaux de construction [7]

SIMULATION

Après avoir déterminé la valeur de la conductivité thermique de chaque matériau et mesuré les températures à l'extérieur et à l'intérieur des parois considérées comme des données initiales, il a été procédé à des simulations numériques pour déterminer les températures sur les parois intérieures et au niveau des interfaces de chaque couche de matériau constituant les parois ou échantillons.

3 RÉSULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS

Dans cette section, il est donc question de faire des analyses et discussions sur l'ensemble des résultats obtenus. Elles concernent les masses volumiques, les conductivités, les résistances thermiques, les coefficients ou capacités thermiques ainsi que les déphasages des matériaux utilisés. Au final, un jugement peut être porté sur le comportement thermique de chaque échantillon selon les matériaux associés.

3.1 MESURES DES TEMPÉRATURES

Le tableau 1 présente les résultats des mesures de l'évolution des températures effectuées en 24 heures sur les faces intérieures et extérieures des échantillons.

Tableau 1. Températures enregistrées sur les parois des échantillons 1, 2, 3 et 4 de la cellule

N°	Échantillons	Températures extérieures max °C	Températures intérieures max °C	Variation en baisse de températures en %
1	Mur + enduit en ciment	45	42	6,66
2	Brique en terre cuite+ le roseau+ paille de riz+ roseau+ enduit en argile	45	31,5	30
3	Toiture non isolée	54	51	5,55
4	Toiture isolée (paille de riz + le roseau)	56	37,9	32,32

3.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

Les valeurs des masses volumiques de la paille de riz, nattes de roseau et briques en terre cuite sont dans le Tableau 2. La valeur la plus élevée est celle de la brique en terre cuite. En général, plus la masse volumique est élevée, moins le matériau est performant dans l'isolation.

Tableau 2. Caractéristiques physiques des matériaux

	Paille du riz	Nattes de roseau	Brique en terre cuite
Masse (g)	7.4	21.6	2.835
Volume initial d'eau(ml)	300	300	2.2.10-3
Volume final d'eau (ml)	496	384	-
Variation de volume (ml)	196	84	-
Masse volumique (kg/m³)	38	257	1288.63

3.3 CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES

3.3.1 CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Les conductivités thermiques issues de ces études pour les différents matériaux sont présentées par le Tableau 3. Pour la paille du riz, il apparait que la valeur obtenue égale à $\lambda = 0,041 \frac{W}{mK}$ est proche de celle obtenue par Valin Colson dans le cas des isolations relatives aux panneaux en fibres bio-sources et techniques en 2019 [17]. Par ailleurs, il faut noter que la valeur ici de ces travaux est inférieure à celle obtenue par Mariette T. ADAGBE en 2021 dans le cadre de sa thèse axée sur l'utilisation de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme matériau des éléments porteurs des bâtiments armés avec le rônier [14]. Cependant, on note que les valeurs de conductivité thermique obtenues à l'issue de nos travaux présentent un grand écart par rapport à ceux de DOUZANE et al., 2016 [18]. Ces derniers ont mis en évidence que la conductivité thermique dépend de l'orientation des bottes de paille de riz selon que l'orientation est parallèle ou perpendiculaire aux flux. Tout de même la valeur de la conductivité obtenue à l'issue de nos travaux est proche de la valeur de référence égale à 0,04 W/m.K selon la Règlementation Thermique de 2024. On peut conclure que la paille de riz est un bon

isolant thermique. Elle est pratiquement égale à la valeur moyenne des isolants confondus qui est de $0,04 \frac{W}{m} \cdot K$. Pour la natte de roseau, la valeur de sa conductivité thermique déterminée au cours des essais est de $0,071 \text{ W/m.K}$ (Tableau 3). Elle est supérieure à la valeur limite de $0,04 \text{ W/m.K}$ selon la RT 2024 (Règlementation Thermique de 2024) et à celle définie par J-M Pupile, architecte DPLG qui est de $0,05 \text{ W/m.K}$ [19]. Ce qui veut dire que tout comme la paille de riz, le roseau est aussi un isolant thermique. Cependant, il intervient en complément dans le cadre de cette étude. Quant à la brique en terre cuite, sa conductivité est de $0,51 \text{ W/m.K}$. Elle est presque 9 fois supérieure à la valeur limite $0,04 \text{ W/m.K}$ selon la RT 2024. Ce qui veut dire qu'elle est une passoire thermique qui laisse passer le flux de chaleur.

Tableau 3. Propriétés thermiques de la paille de riz, natte de roseau et brique en terre cuite

	Paille du riz (14,5cm)	Natte de roseau (2cm)	Brique en terre cuite de 15cm	Valeur recommandée
Conductivité λ (W/m.k)	0,041	0,071	0,51	$\leq 0,06$
Résistance R ($m^2 \text{ K/W}$)	3,53	0,281	0,294	$\geq 2,9$
Transmittance U ($w/(m^2.K)$)	0,28	3,55	3,40	$\leq 0,24$

3.3.2 RÉSISTANCE THERMIQUE

La capacité thermique d'un matériau à résister à la conduction de la chaleur est caractérisée par sa résistance thermique. Plus sa valeur est élevée plus le matériau en question est un bon isolant. Dans le cas de nos essais présentés par le tableau 3, la paille de riz présente la meilleure résistance thermique par rapports aux autres sur la base des épaisseurs étudiées. Sa résistance thermique égale à $3,53 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour une épaisseur de 14,5 cm est bien supérieure à la valeur minimale recommandée de $2,9 \text{ m}^2\text{K/W}$ dans le cas d'une isolation d'un bâtiment. Vu que la couche de la paille sera associée à d'autres couches pour obtenir une paroi isolante, nous pourrions dire qu'elle présente une très bonne capacité thermique. Il faut noter qu'ici, l'épaisseur de la natte de roseau n'est que de 2 cm. Pour ce matériau, on peut obtenir une meilleure performance thermique en augmentant son épaisseur. On peut donc conclure que ce matériau à une bonne résistance à la conduction de la chaleur. S'agissant de la brique en terre cuite, sa capacité thermique égale à $0,294 \text{ m}^2\text{K/W}$ est au moins 9 fois inférieure à la valeur minimale recommandée qui est de $2,9 \text{ m}^2\text{K/W}$. On peut donc conclure que ce matériau a une valeur de résistance très faible.

3.4 SIMULATIONS DES PAROIS ÉCHANTILLONS

ÉCHANTILLON 1 (TÉMOIN) ET ÉCHANTILLON 2 (ISOLÉ)

Lors des simulations, plusieurs paramètres sont déterminés. Il s'agit de l'isolation thermique, l'hygrométrie et le confort thermique d'été dont les principaux paramètres sont l'atténuation d'amplitude thermique et le déphasage thermique.

RÉSISTANCES THERMIQUES, TEMPÉRATURES ET CONDUCTIVITÉS THERMIQUES

Le tableau 4 présente les caractéristiques thermiques telles que la conductivité thermique (λ), la résistance thermique R ainsi que les valeurs de températures min et max des différentes couches de l'échantillon 1 (témoin non isolé) et l'échantillon 2 isolé. On note que la variation de température est aussi observable. Au niveau de l'échantillon 1, elle évolue de 45°C à $42,2^\circ\text{C}$ avec une résistance thermique de $0,346 \text{ m}^2\text{K/W}$, très inférieure à la valeur minimale recommandée ($2,9 \text{ m}^2\text{K/W}$). Ce qui prouve que cette paroi est une passoire thermique. Cependant au niveau de l'échantillon 2, l'analyse, montre que les valeurs des conductivités thermiques au niveaux des isolants varient de $0,04$ à $0,065 \text{ W/m.K}$. La moyenne de leur conductivité reste inférieure à la valeur recommandée qui est de $0,06 \text{ W/m.K}$. Par ailleurs, au niveau de l'échantillon 2, la variation de température évolue de 45°C à $31,5^\circ\text{C}$ entre l'extérieur et l'intérieur. Cet écart est au-delà de 10°C . De plus, on remarque que sa résistance équivalente est de $4,22 \text{ m}^2\text{K/W}$, proche de $4 \text{ m}^2\text{K/W}$ caractérisant les parois des bâtiments à Basse Consommation Énergétique (BBC) selon la RT 2024 (Règlementation Thermique de 2024). Ce qui veut dire que cet échantillon offre une bonne qualité de confort thermique.

Tableau 4. Valeurs des résistances, conductivités thermiques et évolutions de température

a) Echantillon 1 (témoin)

#	Matériau	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Température [°C]		Poids [kg/m ²]
				min	max	
	Résistance thermique surfacique*		0,130	39,0	42,2	
1	2 cm Enduit chaux/ciment	1,000	0,020	42,2	42,5	36,0
2	15 cm Brique pleine terre cuite	0,960	0,156	42,5	44,5	300,0
	Résistance thermique surfacique*		0,040	44,5	45,0	
	17 cm Total de la composition		0,346			336,0

*Résistances thermique suivant la norme DIN 6946 pour le calcul de la valeur U. Pour la protection contre l'humidité et du profil de température, R_{si} = 0,25 et R_{se} = 0,04 ont été utilisés conformément à la norme DIN 4108-3.

Température de surface intérieure (min/med/max): 42,2°C 42,2°C 42,2°C
Température de surface extérieure (min/med/max): 44,5°C 44,5°C 44,5°C

b) Echantillon 2 (isolé)

#	Matériau	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Température [°C]		Poids [kg/m ²]
				min	max	
	Résistance thermique surfacique*		0,130	30,7	31,5	
1	3 cm Enduit d'argile	0,800	0,038	31,5	31,6	51,0
2	1 cm Roseau	0,065	0,154	31,6	32,2	2,3
3	14,5 cm Paille comprimée	0,040	3,625	32,2	44,1	14,5
4	0,5 cm Roseau	0,065	0,077	44,1	44,4	1,1
5	15 cm Brique pleine terre cuite	0,960	0,156	44,4	44,9	300,0
	Résistance thermique surfacique*		0,040	44,9	45,0	
	34 cm Total de la composition		4,220			368,9

*Résistances thermique suivant la norme DIN 6946 pour le calcul de la valeur U. Pour la protection contre l'humidité et du profil de température, R_{si} = 0,25 et R_{se} = 0,04 ont été utilisés conformément à la norme DIN 4108-3.

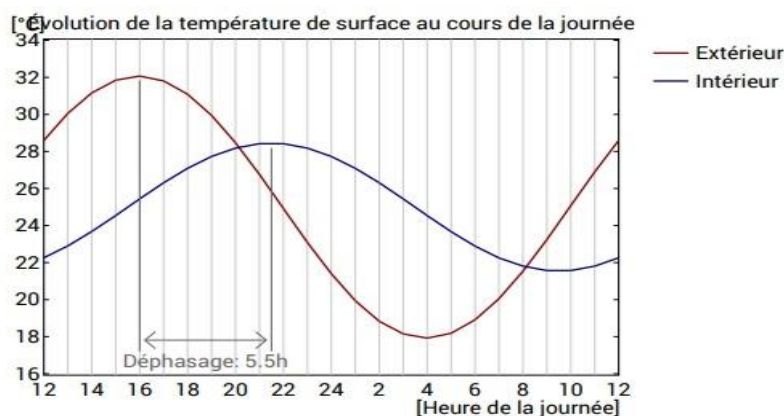
Température de surface intérieure (min/med/max): 31,5°C 31,5°C 31,5°C
Température de surface extérieure (min/med/max): 44,9°C 44,9°C 44,9°C

EVOLUTION DES PROFILS DE TEMPÉRATURES À TRAVERS LES ÉCHANTILLONS 1 ET 2

La figure 9 présente les profils de l'évolution de la température sur les deux échantillons (1 et 2). On remarque que la variation de température entre l'extérieur et l'intérieur est trop faible au niveau de l'échantillon 1 (Figure 9-a). Ce qui veut dire que cet échantillon 1 (témoin) présente une faible résistance thermique et la diffusion de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur est élevée. C'est une passoire thermique.

Comparativement à la figure 9-a, la figure 9-b présente le profil de l'évolution de température avec un gradient thermique plus élevé entre l'extérieur et l'intérieur des échantillons. Il apparait donc que l'échantillon 2 dispose d'une forte résistance thermique et diffuse peu la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur.

a) Echantillon 1 (témoin)



b) Echantillon 2 (isolé)

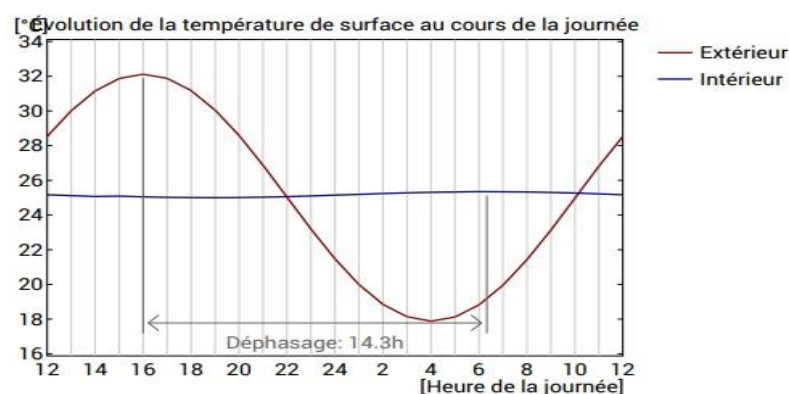
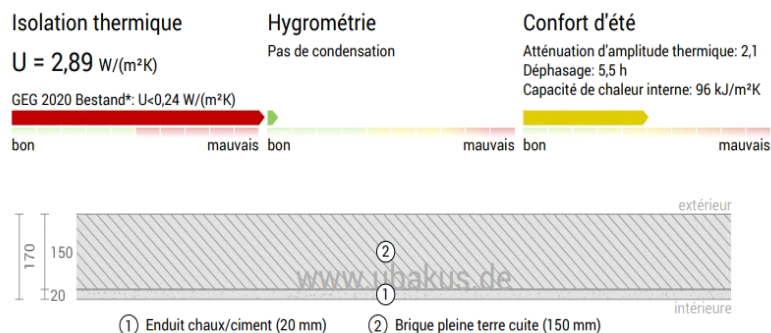


Fig. 9. Échantillon 1, courbes des variations de températures

COEFFICIENT DE TRANSMITTANCE, HYGROMÉTRIE ET CONFORT D'ÉTÉ

Le paramètre d'isolation thermique caractérisé par U (exprimée en $\frac{W}{m^2.K}$), aussi appelée coefficient de transmission surfacique dont ses valeurs pour les échantillons 1 et 2 sont présentées par la Figure 10-a-b. Au niveau de l'échantillon 1 (témoin) la valeur de U égale à $2,89 W/(m^2.K)$, est supérieure à la valeur limite égale à $0,24 W/(m^2.K)$. Plus U est faible, plus la paroi est performante thermiquement. Vu que pour cet échantillon, la valeur de U est élevée et égale à $2,89 W/(m^2.K)$, cela prouve que l'échantillon 1 est un mauvais isolant. Elle diffuse plus vite la chaleur de l'extérieure vers l'intérieur. Par contre l'échantillon 2 isolé, présente une valeur de U égale $0,24 W/(m^2.K)$ correspondant à la valeur recommandée. Cela prouve que l'échantillon 2 présente une bonne isolation thermique. Quant à l'hygrométrie, elle est bonne au niveau des échantillons 1 et 2. Par contre le confort thermique au niveau de l'échantillon 2 est meilleur que celui de l'échantillon 1 (voir Figure 10).

a) Echantillon 1 (témoin)



b) Echantillon 2 (isolé)

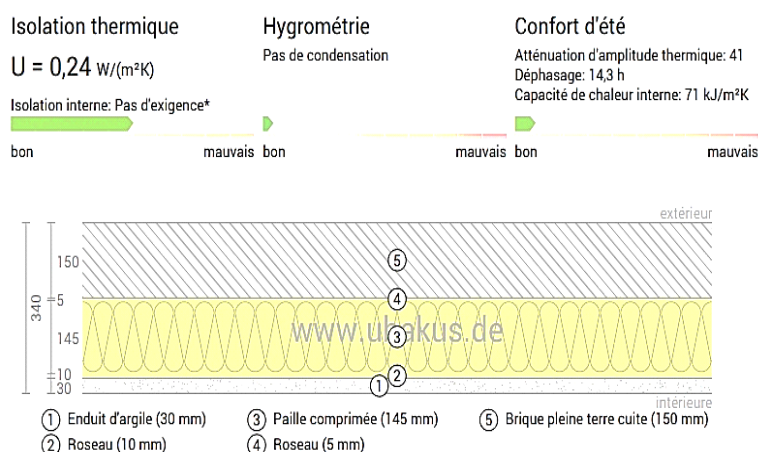


Fig. 10. Echantillon 1 et 2, courbes des variations de températures

RÉSISTANCE, CONDUCTIVITÉ THERMIQUE ET TEMPÉRATURES

Le tableau 5 présente les valeurs des conductivités thermiques des échantillons 3 et 4 correspondant respectivement aux $0,750 \text{ W/m.K}$ et $0,04 \text{ W/m.K}$ tout en sachant que la valeur recommandée qui est de $0,06 \text{ W/m.K}$ selon la RT 2012 (Règlementation Thermique de 2012). En ce qui concerne la variation de température, elle passe de 54°C à cause de surchauffe à 51°C . Ces valeurs ont été mesurées au-dessus de la tôle sous le chevron. Les résistances équivalentes présentées pour les échantillons 3 et 4 sont respectivement de $0,865 \text{ m}^2\text{K/W}$ et de $4,192 \text{ m}^2\text{K/W}$ sachant que la valeur limite est de $3,3 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour les toitures selon la RT 2012 (Règlementation Thermique de 2012). L'échantillon présente une bonne isolation thermique.

Tableau 5. Valeurs des résistances, conductivités thermiques et évolutions de température

a) Echantillon 3 (témoin: toiture non isolée)

#	Matériau	λ [W/mK]	R [m²K/W]	Température [°C]		Poids [kg/m²]
				min	max	
1	8 cm Lame d'air (ventilée)				51,0	0,1
	Résistance thermique surfacique*		0,170	51,0	51,8	
2	8 cm Lambourde	0,130	0,615	51,8	53,7	36,0
3	3 cm Tôle ondulée	0,750	0,040	53,7	53,9	15,0
	Résistance thermique surfacique*		0,040	53,9	54,0	
	19 cm Total de la composition		0,865			54,4

*Résistances thermique suivant la norme DIN 6946 pour le calcul de la valeur U. Pour la protection contre l'humidité et du profil de température, Rsi =0,25 et Rse =0,04 ont été utilisés conformément à la norme DIN 4108-3.

Température de surface intérieure (min/med/max): 51,8°C 51,8°C 51,8°C

Température de surface extérieure (min/med/max): 53,9°C 53,9°C 53,9°C

b) Echantillon 4 (toiture isolée)

#	Matériau	λ [W/mK]	R [m²K/W]	Température [°C]		Poids [kg/m²]
				min	max	
	Résistance thermique surfacique*		0,170	36,3	37,9	
1	2 cm Roseau	0,065	0,308	37,3	40,0	4,5
2	0,02 cm Membrane, Polyéthylène	0,400	0,001	38,6	40,0	0,2
3	14 cm Paille de riz	0,040	3,500	38,6	52,9	12,6
	14 cm Chevron (12%)	0,130	1,077	39,5	51,6	6,3
4	8 cm Paille de riz	0,040	2,000	52,9	55,4	0,0
	8 cm Lambourde (100%)	0,130	0,615	51,4	55,4	36,0
5	3 cm Tôle ondulée	0,300	0,100	55,2	55,8	15,0
	Résistance thermique surfacique*		0,040	55,8	56,0	
	27,02 cm Total de la composition		4,192			74,6

*Résistances thermique suivant la norme DIN 6946 pour le calcul de la valeur U. Pour la protection contre l'humidité et du profil de température, Rsi =0,25 et Rse =0,04 ont été utilisés conformément à la norme DIN 4108-3.

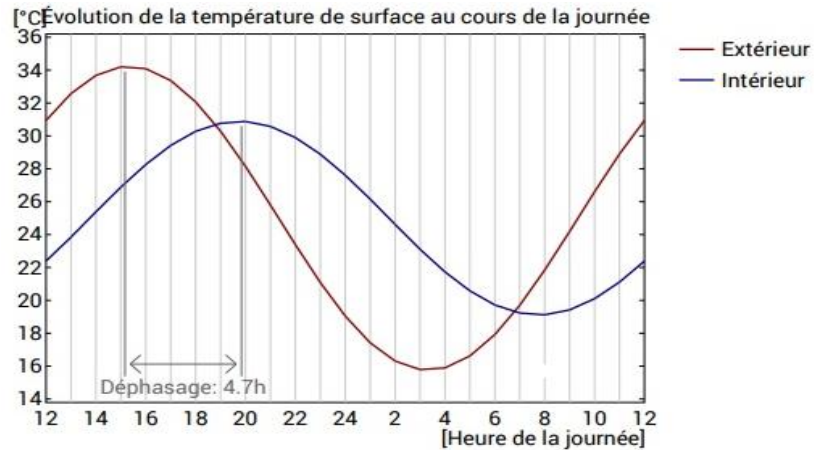
Température de surface intérieure (min/med/max): 37,3°C 37,5°C 37,9°C

Température de surface extérieure (min/med/max): 55,8°C 55,8°C 55,8°C

DÉPHASAGE

La figure 11 présente l'évolution de la température en vingt-quatre heures sur la toiture en tôle ondulée correspondant aux l'échantillons 3 et 4. Pour l'échantillon 3, le déphasage est seulement de 4,7 heures. Mais il est de 11,2 heures au niveau de l'échantillon 4. On conclut, que cette toiture dispose une qualité thermique. Par conséquent, elle permet de créer un confort.

a) Echantillon 3 (témoin: toiture non isolée)



b) Echantillon 4 (toiture isolée)

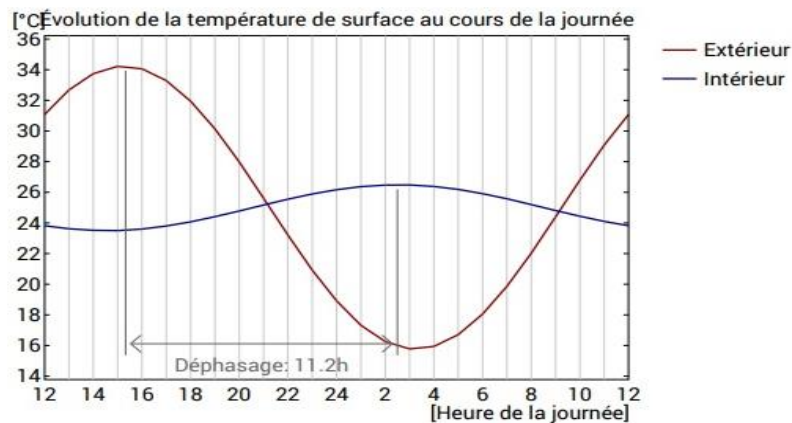
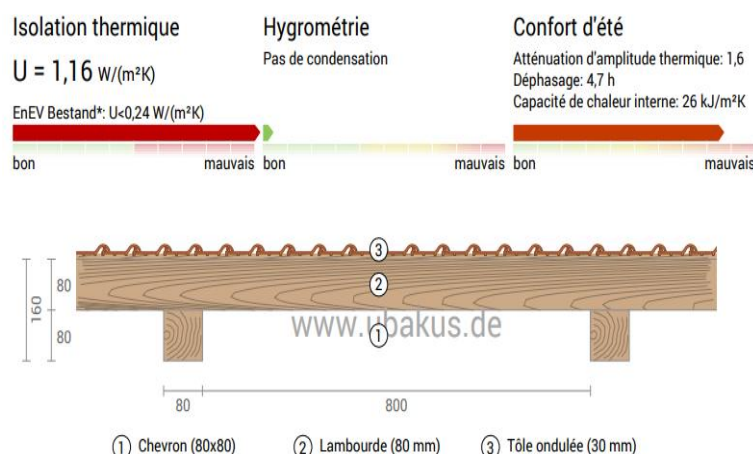


Fig. 11. Échantillon 3 et 4, variation des courbes de températures de la paroi en tôle ondulée isolée à l'aide de la paille de riz associée à la natte de roseau dont la disposition se fait de l'intérieur vers l'extérieur

COEFFICIENT DE TRANSMITTANCE, HYGROMÉTRIE ET CONFORT D'ÉTÉ

La figure 12 présente les paramètres liés à l'isolation thermique, l'hygrométrie et le confort thermique d'été caractérisant les toitures non isolées et isolées correspondant respectivement aux échantillons 3 et 4. Les résultats montrent ici que la valeur de l'isolation thermique U de la toiture non isolée est de $1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, supérieure à la valeur limite égale à $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ recommandée. Par contre au niveau de l'échantillon 4, elle est de $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Au vu de ce paramètre, la toiture en tôle, isolée à l'aide de la paille de riz et la natte de roseau assure le rôle d'un isolant. Cette dernière offre de meilleur isolation thermique ainsi qu'un meilleur confort d'été par rapport à l'échantillon 3.

a) Echantillon 3 (témoin: toiture non isolée)



b) Echantillon 4 (toiture isolée)

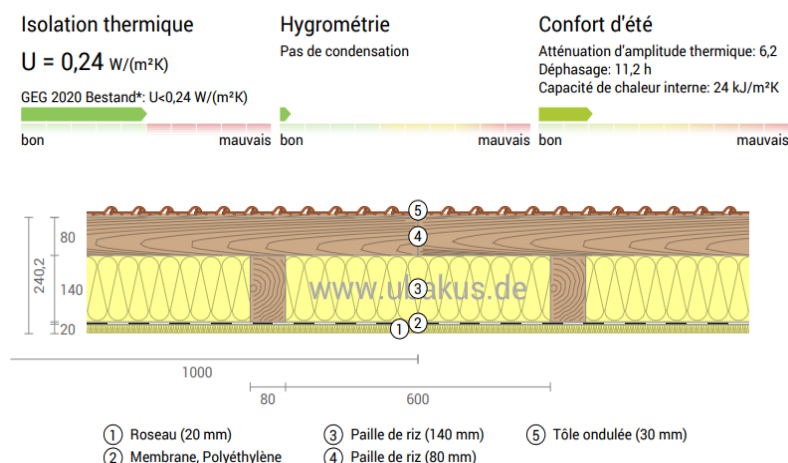


Fig. 12. Echantillons 3 (témoin sans isolation) et 4 (avec isolation)

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces travaux, ont permis de mettre en évidence, la question de flux de chaleur émis par le rayonnement au cours de la journée. Cette chaleur peut solliciter thermiquement les parois d'une construction d'habitation par exemple. Et comme par moment, l'homme voudra bien se mettre à l'abri de la chaleur ultra violée au cours de la journée et infra rouge dans la nuit, il est donc évident d'isoler thermiquement les bâtiments dans sa globalité. Ici, des choix ont été portés sur quelques matériaux bio-sources comme la paille de riz, la natte de roseau dans l'optique de réduire l'effet de chaleur à l'intérieur des habitations. C'est dans cet esprit qu'il était question d'associer ces éléments bio-sources soit au niveau des murs ou au niveau de la toiture en tôle ondulée isolée et non isolée. Les résultats de ces travaux montrent qu'au niveau des parois verticales de la cellule, cas des échantillons 1 (non isolé) et 2 (non isolé), la chaleur diffuse peu de l'extérieur vers l'intérieur de la cellule à cause de l'isolation thermique appliqué au niveau de l'échantillon 2. La valeur de la résistance passe de 2,9 à $0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Le déphasage thermique passe de 5,5 heures à 14,30 heures. L'échantillon 2 isolé offre de meilleures conditions thermiques. S'agissant des parois horizontales (toitures) relatives aux échantillons 3 (non isolé) et 4 (isolé), la chaleur diffuse également peut (au niveau de l'échantillon 4) à cause des valeurs des résistances thermiques qui passe de 1,16 dans le cas de l'échantillon 1 à $0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ à l'échantillon 4. Le déphasage thermique passe aussi de 4,7 heures à 11,20 heures. L'échantillon 2 isolé offre de meilleures conditions thermiques.

Pour l'ensemble des échantillons, l'hygrométrie est bonne. Ces résultats ouvrent des perspectives dans le domaine du génie civil surtout dans les bâtiments. Le fait d'utiliser les matériaux bio-sources comme isolants thermiques dans l'intérêt de créer des confort thermiques à l'intérieur des habitations offre des perspectives à un pays comme le Tchad où il fait chaud en certaine période de l'année et la disponibilité d'énergie se pose avec acuité. On sait qu'en période de canicule, il est difficile de vivre harmonieusement dans nos bâtiments. Les quelques techniques développées dans ce mémoire peuvent faire l'objet d'amélioration afin de les vulgariser.

REFERENCES

- [1] Impact Assessment (European Parliament), Proposition de règlement de la Commission européenne sur les gaz à effet de serre fluorés, 2012. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2013/496753/IPOL-JOIN_NT\(2013\)496753_FR.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2013/496753/IPOL-JOIN_NT(2013)496753_FR.pdf).
- [2] Benoît SAAR (2017). Bilan du changement climatique du niveau global au niveau africain. Atelier national de renforcement des capacités en négociations internationales sur le climat. N'Djamena, Tchad, 26 au 29 septembre. pp 1-30.
- [3] Rapport sur l'état mondial des bâtiments et de la construction en 2022, https://globalabc.org/sites/default/files/202211/FRENCH_Executive%20Summary_Buildings-GSR.pdf
- [4] A. P NELSON, Etude de Matériaux Bio-sources pour l'Isolation Thermique des Bâtiments en Climat Tropical Humide, thèse 2020, <https://theses.fr/2020ANTI0517.pdf>
- [5] E. Antczak, M. Asli, F. Brachelet, F. Brue, D. Defer, Etude du comportement hygrothermique d'anas de lin utilisés comme isolant en vrac de combles perdus, in: Conference IBPSA France 2018, Bordeaux, France, 2018. Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-03209296>.
- [6] T. Vincelas, T. Colinar, E. Hamard, A.H. de M'enibus, T. Lecompte, H. Lenormand, Light earth performances for thermal insulation: application to earth-hemp, *Acad. J. Civ. Eng.* 35 (2) (2017), <https://doi.org/10.26168/icbbm2017.26>.
- [7] H. Kaddouri, A. Bidouche, M. S. H. Alaoui, I. Driouch, M. Hamdaoui: Impact of Insulation using Bio-sourced Materials on the Thermal and Energy Performance of a Typical Residential Building in Morocco, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 117, Issue 1 (2024) 43-59, https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/index.
- [8] ANTONIO G. et al, Influence of natural ventilation on the thermal behavior of a massive building, 6th International Building Physics Conference, *Energy Procedia*, volume 78, pages 1287 – 1292, 2015. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.142>).
- [9] MAZZEO D. et al, Dynamic thermal characteristics of opaque building components - A proposal for the extension of EN ISO 13786, 6th International building physics conference, *Energy Procedia*, volume 78, pages 3240 – 3245, 2015. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.787>).
- [10] EMILIO S. et al, Thermal performance evaluation of a massive brick wall under real weather conditions via the conduction transfer function method, case studies in construction materials, volume 7, pages 56 – 65, 2017. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2017.04.003>).
- [11] FAYCAL E. et al., Thermal performance of unfired clay bricks used in construction in the north of France: Case study, case studies in construction materials, volume 3, pages 102 – 111, 2015. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2015.09.001>).
- [12] TOMASZ K., Performance of building materials and whole enclosures in nonstationary thermal conditions, 7th Scientific-Technical conference material problems in civil engineering, *Procedia Engineering*, volume 108, pages 445 – 452, 2015. (<https://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.169>).
- [13] Herimamy NAHARITRA RABEMANANTSOA, étude de l'inertie thermique de parois: Cas des murs typiques de maisons d'habitation de Madagascar. Génie civil. Université d'Antananarivo, 2021. <https://theses.hal.science/tel-03157609/de>.
- [14] Mariette TOGNONNOUMI ADAGBE, utilisation de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme matériau des éléments porteurs des bâtiments armés avec le rônier. Construction durable. Université Paul Sabatier - Toulouse III, Université d'Abomey-Calavi, 2021. <https://theses.hal.science/tel-03551654/file/2021TOU30084b.pdf>
- [15] Évaluation de l'accès à l'électricité des personnes déplacées de force et des communautés d'accueil au Sahel, préparé par la Banque Mondiale, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099051624162017832/pdf/P17317212c253a0a1a6a7166ee58cccc5f.pdf>
- [16] Marie VIEL (2019). Développement des composites bio-sources destinés à l'isolation des bâtiments. *Academic journal of civil engineering*, vol 36 (N°1), pp. 408-415. <https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.96>.
- [17] V. Colson, thèse: Panneaux composites bio-sourcés destinés à l'isolation des bâtiments: caractérisation des ressources et procédé de production. Matériaux composites et construction. Université de Rennes, 2019. Français. ffNNT: 2019REN1S031ff. fftel-03738039f, https://theses.hal.science/tel-03738039/file/COLSON_Valentin.pdf
- [18] Douzane et al., performance hygrothermique d'un bâtiment en botte de paille: investigations in-situ et en laboratoire, 2026. <https://www.researchgate.net/publication/282847689>.
- [19] J-M Pupile (2025). Qualités thermiques comparées des matériaux de construction. <https://passivact.fr>.

Modélisation hydrodynamique de l'aquifère côtier du Saloum (Centre Ouest du Sénégal) par approche stochastique

[Hydrodynamic modelling of the Saloum coastal aquifer (central western Senegal) using stochastic approach]

Seyni Ndoye¹, Hamza Brahim Mahamat², Amadou Sarr¹, Mathieu Le Coz³, Arnaud Gauthier⁴, Cheikh Bécaye Gaye⁵, Philippe Le Coustumer⁶, and Moumtaz Razack³

¹Water-Energy-Environment-Industrial Processes Laboratory (LE3PI), Department of Civil Engineering, Polytechnic School, Cheikh Anta Diop University, BP 5085 Dakar Fann, Senegal

²Polytechnic University of Mongo, Faculty of Mines and Geology, BP 4377 Mongo, Chad

³University of Poitiers, CNRS, UMR 7285 IC2MP, 40 Avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex, France

⁴Civil Engineering and Geo-Environment Laboratory, Faculty of Science and Technology, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France

⁵Cheikh Anta Diop University, Faculty of Science and Technology, Department of Geology, BP 5005 Dakar-Fann, Senegal

⁶Bordeaux Imaging Center, University of Bordeaux, Bordeaux, France

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

ABSTRACT: Water supply in the Saloum area is provided by the groundwater in the sandy-clay formations of the Continental Terminal. The presence of hypersaline waters from the Saloum River in the north and the ocean in the west, climate change and population growth are threatening groundwater resources, hence the need for a better understanding of the aquifer system. The aim of this work is to establish a hydrodynamic model that can reproduce the behaviour of flows by identifying the main recharge and evaporation mechanisms and estimating the hydrodynamic properties. The heterogeneity of the geological formation is at the root of a very large variation in the hydraulic parameters. This heterogeneity and the very limited uncertainty in the data justify opting for a stochastic modelling approach. The modelling is carried out under steady state conditions with imposed loads in order to quantify the natural flows passing through the aquifer and to understand the distribution of hydrodynamic parameters in order to reconstruct the piezometry. The probability densities for the values of permeability and recharge obtained indicate a high sensitivity of the simulations to these two parameters. The hydraulic conductivity values oscillate between 10^{-2} and 10^{-5} m.s⁻¹ and are identical to those obtained by test pumping. The overall average balance shows a perfect balance between inflow and outflow. The average annual recharge of 13.98 mm is provided mainly by rainwater, and evapotranspiration is 13.65 mm. The model, which is deemed acceptable under steady-state conditions, will serve as the basis for modelling saline intrusion.

KEYWORDS: Modelling, Stochastic, Aquifer, Saloum, Senegal.

RESUME: L'alimentation en eau dans la zone du Saloum est assurée par la nappe sablo-argileuses du Continental Terminal. La présence des eaux hypersalées du fleuve Saloum au nord et l'océan l'Ouest, les changements climatiques, l'accroissement de la population constituent une menace accrue sur les ressources en eau souterraine d'où un besoin d'une meilleure

compréhension du système aquifère. Ce travail cherche à établir un modèle hydrodynamique permettant de reproduire le comportement des écoulements à travers l'identification des principaux mécanismes de recharge, d'évaporation et l'estimation des propriétés hydrodynamiques. L'hétérogénéité de la formation géologique est à l'origine d'une très forte variation des paramètres hydrauliques. Cette hétérogénéité et l'incertitude des données très réduites conduisent à opter pour une approche de modélisation stochastique. La modélisation est faite en régime permanent en charge imposée pour la quantification des débits naturels transitant dans l'aquifère et la connaissance de la distribution des paramètres hydrodynamiques permettant la reconstitution de la piézométrie. Les densités de probabilité pour les valeurs de perméabilité et de la recharge peu étalées obtenues indiquent une forte sensibilité des simulations à ces deux paramètres. Les valeurs de conductivité hydraulique oscillent entre 10^{-2} et 10^{-5} m.s^{-1} et sont identiques à celles obtenus par pompage d'essai. Le bilan global moyen montre un équilibre parfait entre les débits d'entrée et de sortie. La recharge annuelle moyenne de 13,98 mm est assurée pour l'essentiel par les eaux de pluie et l'évapotranspiration est de 13,65 mm. Le modèle jugé acceptable en régime permanent va servir de base pour la modélisation de l'intrusion saline.

MOTS-CLEFS: Modélisation, Stochastique, Aquifère, Saloum, Sénégal.

1 INTRODUCTION

L'existence de nombreux logiciels de modélisation en hydrogéologie est une opportunité pour la communauté scientifique en lui permettant de générer des modèles prédictifs tant qualitatif que quantitatif [1]; [2]; [3]; [4]; [5]. Ceci permet aussi de pallier aux manques de données de terrains en générant des données aléatoires qui peuvent venir caler les modèles générés puis les affiner ([6]; [7]; [8]; [9]; [10]). Les raisons pour lesquelles les données sont difficiles à obtenir, collecter, compiler sont autant scientifiques que socio-politiques. D'un point de vue scientifique, les données peuvent être manquantes, pas assez nombreuses, hétérogènes et parfois peu fiables. Les problèmes liés aux campagnes de terrain sont multiples allant des zones de conflits rendant la collecte difficile voire impossible, à la difficulté d'organiser et financer de telles campagnes. Ce manque de moyens peut être à l'origine des zones « grises » en hydrogéologie qualitative et quantitative. Au Sénégal par exemple, les premières études hydrogéologiques ayant permis d'avoir des données nécessaires à la compréhension du fonctionnement hydrogéochimique des aquifères et à l'établissement de cartes piézométriques, datent des années 1950. Jusque dans les années 1970, des campagnes de terrains ont permis de mieux appréhender l'hydrogéologie de certaines zones du pays comme celle qui nous intéresse dans ce travail à savoir la région côtière du Saloum [11]; [12]. Dans les zones littorales, la pression anthropique sur les réserves en eaux douces et le changement climatique modifient les flux, menant entre autres à une salinisation de nombreux aquifères ([13]; [14]; [15]; [16]; [17]; [18]). La zone côtière centre du Sénégal (Delta du Saloum) culmine les problèmes: 1) prélèvements en augmentation constante liés au 1) a) développement de la population mais aussi à 1) b) des transferts de l'eau vers d'autres zones comme les îles du Saloum ([19] des pratiques agricoles et touristiques, 3) une salinisation par le développement d'intrusions marines ([20]; [21]; [22] les conditions climatiques perturbées ([23]).

La caractérisation hydrogéologique pour l'estimation des réserves (quantitativement et qualitativement) afin d'adapter la gestion et la surveillance devient un défi majeur. Il est donc aujourd'hui plus que jamais opportun d'améliorer la connaissance sur les aquifères. Pour ces raisons suite aux travaux effectués dans la zone [24]; [25]; [26], cette nouvelle étude de l'aquifère côtier du Saloum se propose de caractériser son fonctionnement hydrogéologique avec une autre approche de modélisation. Elle est axée sur la mise en place d'un modèle hydrodynamique afin de reproduire le comportement de l'écoulement à travers l'identification des mécanismes principaux de la recharge, de l'évaporation et de l'estimation des propriétés hydrodynamiques par une approche basée sur la méthode stochastique par simulation Monté Carlo pour faire face à la faible densité et aux incertitudes importantes des données disponibles. C'est ainsi qu'après une présentation de la région d'étude et des outils de travail, nous avons montré la méthode d'identification des paramètres du modèle puis terminé par la présentation des résultats et leur discussion.

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

La zone d'étude (Figure 1) est située dans le centre ouest du Sénégal et s'inscrit dans un quadrilatère ($13^{\circ}35'$ à $14^{\circ}10'$ de latitude Nord et $15^{\circ}40'$ à $16^{\circ}30'$ de longitude Ouest) qui couvre une superficie d'environ 5000 km². Ses limites sont l'Océan Atlantique à l'Ouest, le fleuve Saloum au Nord, le réseau hydrographique du Nianiji Bolon (ou Bao Bolon) à l'Est et la Gambie

au Sud. Le modelé général de la région est un ensemble de vastes plateaux tabulaires pouvant passer de 30 à 40 mètres d'altitude, entaillé par un réseau de larges vallées aux versants peu pentés.

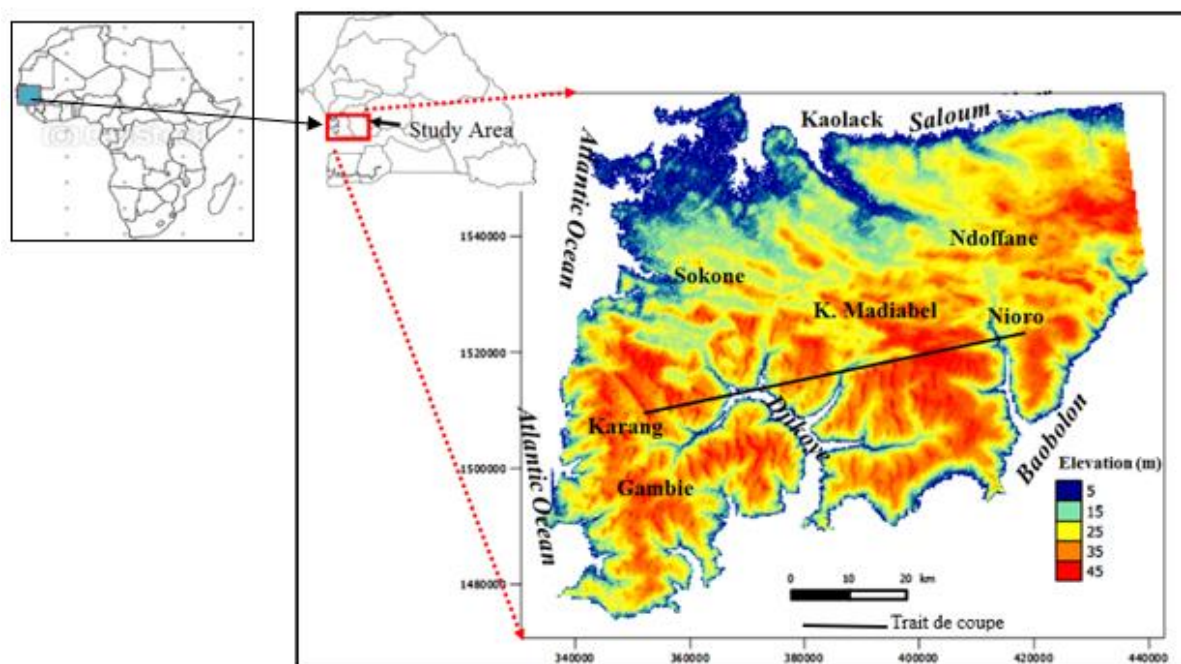


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

La zone du Saloum est caractérisée par l'alternance d'une longue saison sèche et d'une saison pluvieuse courte (4 à 5 mois). L'essentiel des pluies tombent entre juillet et septembre dans l'ensemble de la zone d'étude avec une diminution notée du Sud vers le Nord dans l'étendu du pays au cours du temps. Les apports météoriques représentant l'essentiel de la recharge; dans ces conditions, la diminution de la pluviosité aurait des répercussions néfastes sur les systèmes hydrogéologiques locaux. La zone d'étude est aujourd'hui encadrée par les isohyètes 400 et 800 mm [23], ce qui correspond à une zone climatique de type soudano-sahélien.

Le régime des vents est sous la dominance des alizés. En saison sèche, les vents secs continentaux viennent du Nord-Est, pendant la saison des pluies, les vents humides du Sud-Ouest amènent un régime de mousson. L'évapotranspiration moyenne annuelle tourne au tour de 1800mm. La moyenne des températures mensuelles varie de 25,6 °C (janvier) à 31,3 °C (mai). Les températures moyennes mensuelles les plus élevées s'observent en général pendant le mois de mai. Les valeurs d'humidité relative mensuelles moyennes varient entre 37,8 et 79,5 %. L'humidité relative varie beaucoup au cours de l'année et peut atteindre des valeurs maximales de 95 %.

2.2 GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

La région appartient à la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien qui est le plus occidental et l'un des plus vastes bassins du littoral ouest-africain représenté par des formations d'âge mésocénozoïque [27]. Au niveau de la région du Saloum, la formation géologique qui nous intéresse dans cette étude est celle du Continental Terminal (CT) essentiellement sablo-argileuse appelé formation du Saloum (Figure 2). C'est un dépôt marin détritique qui a été affecté par une altération continentale [28]. Ses variations latérales et verticales de faciès sont fréquentes, passant à des matériaux plus ou moins argileux ou plus ou moins latéritiques [11] à des grès hétérométriques, argileux et bariolés, parfois cimentés par de la calcite micritique ([28]. En revanche, les grès cuirassés sont constitués d'oxy-hydroxydes de fer, généralement de la goethite, plus rarement de l'hématite qui épigénisent les minéraux argileux ([29]; [30], essentiellement kaolinique.

L'épaisseur du CT est très variable avec une augmentation qui se fait du nord vers le sud et d'ouest vers l'est, allant d'une dizaine de mètres à 150 m ([19]. Les zones de plus forte épaisseur sont associées à d'anciennes vallées incisées dans le substratum marno-calcaire [12]. Le CT est surmonté par une formation cuirassée issue d'une altération latéritique en climat chaud et humide localement surmontée des dépôts quaternaires.

Les ressources en eau souterraine du bassin sédimentaire sénégalais sont contenues dans plusieurs aquifères associés à différentes formations d'âge Maastrichtien à Quaternaire ([31]). L'extension et la continuité verticale de ces aquifères sont très variables. Deux aquifères sont rencontrés au niveau de la zone d'étude; l'aquifère à nappe profonde du Maastrichtien qui est saumâtre et celui à nappe superficielle contenue dans les formations géologiques du Continental Terminal. La nappe du Continental Terminal a pour réservoir une épaisse succession de sables, de sables argileux et d'argiles montrant de fortes variations latérales de faciès. Les paramètres hydrodynamiques de cet aquifère [12] montrent une grande variabilité qui s'explique par l'hétérogénéité lithologique. Le coefficient de perméabilité (K) varie donc fortement entre $0,2 \cdot 10^{-4}$ et $3,2 \cdot 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ avec les plus fortes valeurs de K ($1,2 \cdot 10^{-4}$ et $3,2 \cdot 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$) mesurées dans le secteur centre où dominent les faciès sableux (sable grossier à moyen) à chenaux gréseux et passées argileuses. Les coefficients de perméabilité sont de l'ordre de $0,2 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ dans les secteurs Nord et Nord-Ouest à dominant sables fins à argileux et limons. Les valeurs de transmissivité oscillent entre $2,1 \cdot 10^{-4}$ et $6,9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ avec une moyenne de $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En plus de l'hétérogénéité des faciès, la variabilité des transmissivités peut également s'expliquer par la variation de l'épaisseur de la nappe qui n'est pas toujours totalement traversée. Les valeurs de coefficient d'emménagement (S) obtenues à partir des pompages d'essai [12] sont peu nombreuses et variables

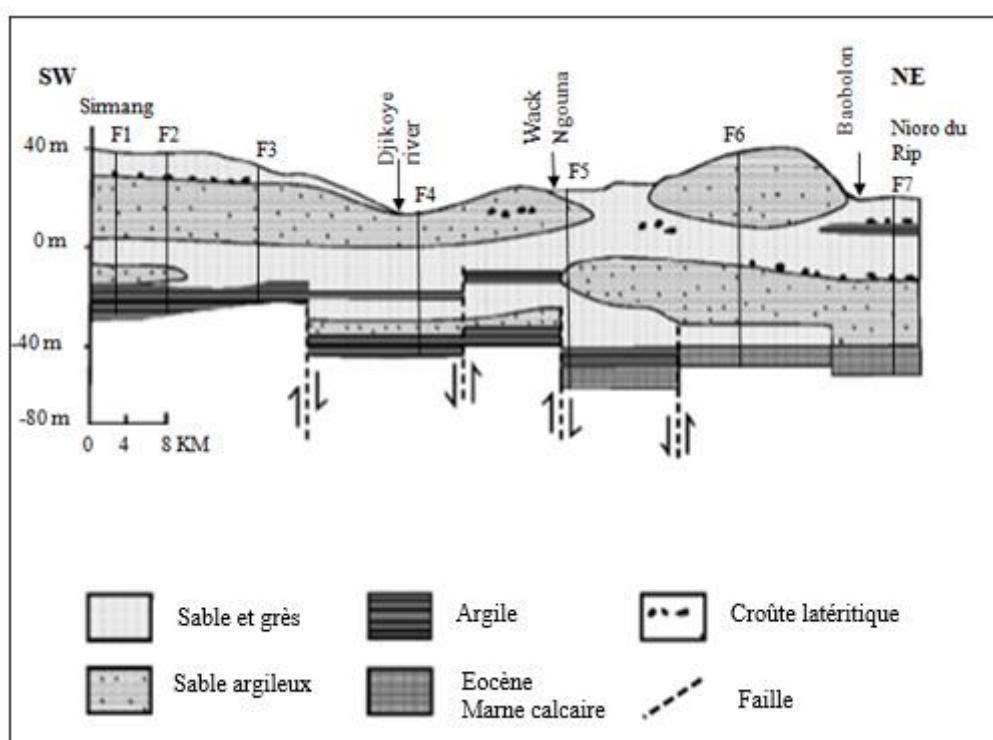


Fig. 2. Coupe géologique interprétative de la région du Saloum [21]; trait de coupe 1)

La surface piézométrique présente une morphologie à gradient hydraulique variable (Figure 3). L'écoulement est divergent dans le secteur Sud-Ouest, ce qui indique que les principaux exutoires sont constitués par l'Océan à l'Ouest, le Djikoye et le Baobolon au sud de la région. Le secteur Nord-Est de la région est caractérisé par une piézométrie négative et l'écoulement y est convergent. Les altitudes piézométriques dans ce secteur avoisinent les 10 m sous l'Océan.

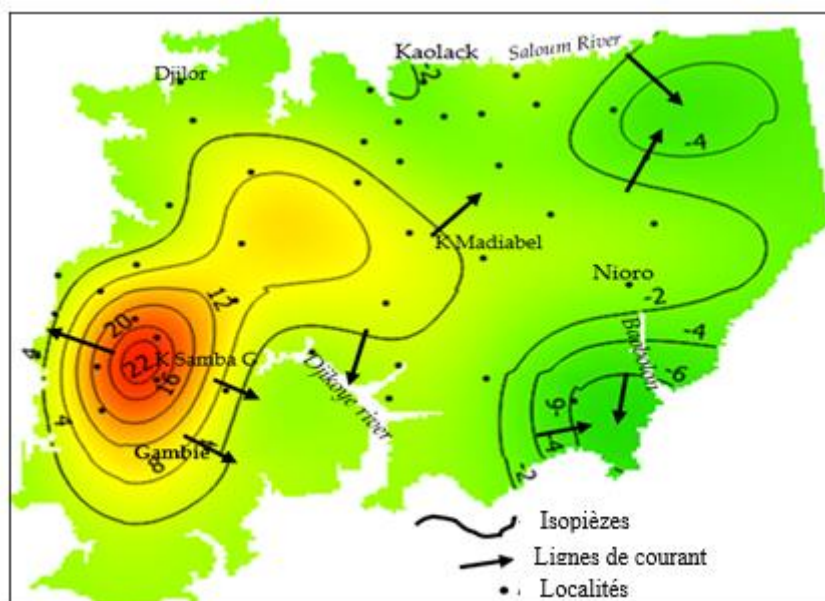


Fig. 3. Carte piézométrique de la nappe du Saloum en mai 2012

3 OUTILS ET METHODOLOGIE

3.1 OUTILS

L'outil de travail utilisé est le code de modélisation MODFLOW-2005 développé en Fortran 90 par l'United State Geological Survey ([32] disponible gratuitement). Le logiciel est conçu pour simuler le fonctionnement de systèmes aquifères par différence finie [33]. Il doit sa réputation à une utilisation mondiale massive et ayant pour qualités premières d'être simple et modulaire ([1]; [34]; [35]). Pour ce travail, le code source de MODFLOW-2005 est couplé avec le SIG (Système d'Information Géographique) GRASS (Geographic Resources Analysis Support System). GRASS a été mise au point pour la première fois en 1980 par l'U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories (USA-CERL) comme outil de gestion foncière et de planification de l'environnement pour l'armée. Cet outil connaît un essor important grâce à une équipe de l'université de Baylor à partir de 1995 qui le développe sous le système d'exploitation Linux. Ce Logiciel est amélioré notamment avec la création d'une interface graphique entièrement opérationnelle pour tous les systèmes d'exploitation au fil du temps. GRASS GIS contient un ensemble de modules conçu pour faciliter des analyses rapides et efficaces sur des rasters, vecteurs et données tabulaires (ASCII, TXT, etc.) et interagit avec MODFLOW grâce à un programme de communication écrit en langage Bash sous le système d'exploitation Linux. Ce couplage permet de profiter pleinement des capacités des SIG pour la création des entrées nécessaires à la modélisation des écoulements mais aussi de stocker, manipuler et visualiser celles obtenues en sortie du modèle ([36]).

3.2 METHODOLOGIE

L'hétérogénéité des formations géologiques est à l'origine d'une très forte variation des paramètres hydrauliques. La prise en compte de l'hétérogénéité et de l'incertitude sur les données nous amène à opter pour une approche stochastique de modélisation ([37]; [38]; [39]; [40]). L'approche stochastique repose sur une méthode numérique et une méthode statistique. La méthode numérique utilisée est celle des différences finies quant à la méthode statistique, c'est celle de la simulation Monte Carlo avec la loi de distribution normale. Plusieurs jeux de paramètres acceptables sont obtenus et classés en fonction de l'ajustement qui a abouti à des calibrations optimales. Elle n'accepte pas le principe du paramètre optimal unique ([41]; [42]; [43]; [44]; [45]).

L'erreur de discrétisation (ou erreur numérique) doit être largement inférieure à l'incertitude et pour cela le maillage doit être assez fin [46]. Le domaine d'étude est ainsi discrétisé par un maillage carré régulier de 500 m de côté. Le modèle comprend 63 648 mailles qui sont distribuées sur 204 lignes et 148 colonnes selon les directions est-ouest et nord-sud. La discrétisation verticale quant à elle, est réalisée en utilisant une monocouche limitée par le terrain naturel au sommet et la couche d'argiles imperméables ou parfois de calcaires compacts à la base. Les données relatives à la limite basale sont obtenues avec les

travaux de [12] et de [47]. La morphologie de cette surface est ensuite interpolée au moyen du logiciel GRASS afin d'obtenir une altitude pour chaque maille du modèle.

Les conditions aux limites latérales retenues sont des charges imposées et des flux nuls (Figure 4). Les charges imposées sont appliquées sur toutes les limites à eau (océan et rivière) pour mieux contraindre le domaine afin de bien restituer les paramètres hydrodynamiques. Dans la partie Est, un flux nul est défini grâce à l'analyse de la carte piézométrique qui montre sur cette frontière la présence de lignes de courant presque parallèles aux limites.

Les Paramètres internes nécessitant une calibration sont la conductivité hydraulique, la recharge et l'évapotranspiration. Avec une hétérogénéité des faciès [11] qui peut atteindre des degrés très élevés suivant les secteurs, il est difficile d'établir une carte objective de la lithologie. De plus, il faut noter le caractère localisé des estimations des paramètres hydrodynamiques (transmissivité, conductivité hydraulique, coefficient d'emménagement).



Fig. 4. Conditions aux limites

Le nombre de valeurs disponibles est très réduit et ne permet pas d'établir une carte spatialisée de la conductivité hydraulique. La seule carte spatialisée disponible est la carte des sols seul moyen a priori de catégorisation des unités hydrogéologiques et des zones de recharge nette. Cette carte révèle deux grandes zones délimitées selon la nature des faciès (Figure 5).

À défaut de carte homogénéisée pour la lithologie du réservoir, ces deux zones sont retenues comme zones de conductivité hydraulique homogène appliquée au modèle pour le paramètre K. Pour l'évapotranspiration et la recharge, l'utilisation de cette carte ne pose pas de problème sachant que ces deux paramètres s'appliquent directement sur le sol.

Les différentes conductivités hydrauliques ont été estimées à partir de l'interprétation des essais de pompages [12] dans les différents forages de la zone. La recharge (RCH) comme l'évapotranspiration (EVT) sont des données obtenues à partir des travaux antérieurs ([47]; [48]; [49]; [50]; [24]. Ces données d'entrée sont associées aux différentes unités géologiques selon une plage de valeurs pour chaque paramètre.

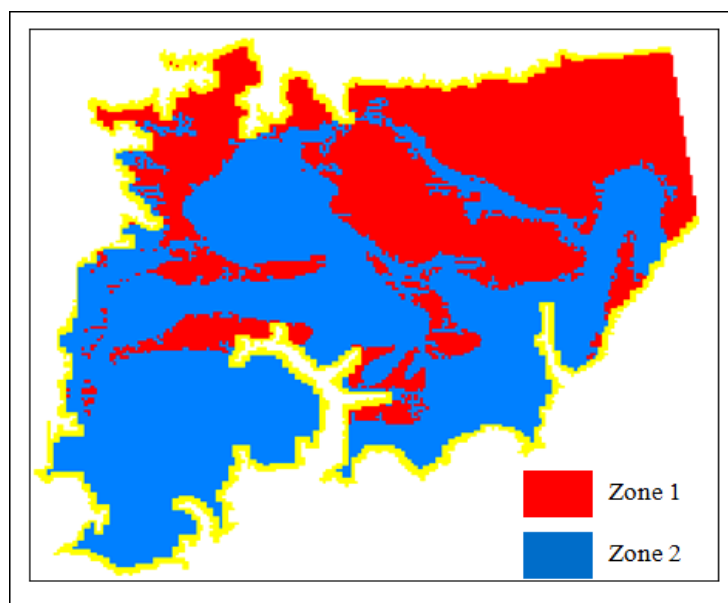


Fig. 5. Zonage des unités hydrogéologiques à partir de la carte des sols

La mise en œuvre de la méthode de simulation Monte Carlo suit quatre étapes:

- 1- *Définir les gammes de paramètres*: la conductivité hydraulique qui permet de restituer l'écoulement est contrainte dans une première étape. La plage probable de la conductivité hydraulique trouvée (Tableau 1) est ensuite associée à la plage probable des autres paramètres pour générer les jeux de paramètres.

Tableau 1. Plages probables des paramètres d'entrée au niveau des deux zones

Paramètres	K (m/s)	RCH (mm)	EVT (mm)
Minimum	10^{-7}	0	0
Maximum	10^{-1}	50	50

- 2- *Tirage aléatoirement* de 10 000 jeux de paramètres parmi les plages probables selon une loi de distribution normale avec le logiciel Scilab.
- 3- *Dix milles simulations* sont réalisées en régime permanent à partir des résultats aléatoires permettant une reconstitution de la piézométrie observée dans la région d'étude. Le modèle hydrodynamique qui a pour objectif d'identifier le système (champ de conductivité hydraulique recharge, etc.) n'a pas tenu compte des prélèvements.
- 4- *L'évaluation de la performance du modèle* est faite grâce à l'utilisation de la RMSE (Root Mean Square Error). Cette erreur quadratique [51] moyenne indicatrice de la différence (Δh) entre charges observées et charges simulées au niveau des points d'observation est obtenue suivant l'équation 1:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(h_i^{sim}) - h_i^{obs}]^2} \text{ (Equation 1)}$$

Avec RMSE: l'erreur quadratique moyenne, n le nombre d'ouvrages de contrôle, et h_i^{sim} et h_i^{obs} les charges piézométriques simulées et observées au niveau de l'ouvrage i .

Trois cas de figures sont implémentés dans le modèle pour contrôler cette différence entre les charges simulées et observées au niveau de 35 ouvrages de contrôle pour chaque simulation: $\Delta h \leq 3$ m; $\Delta h \leq 5$ m et $\Delta h \leq 10$ m

Toute simulation ayant une RMSE inférieure à l'erreur admissible (Equation 2) est considérée comme acceptable:

$$E_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^{o\max} - h_i^{o\min})^2} \text{ (Equation 2)}$$

Avec $h_i^{omax_i^{obs}}$ et $h_i^{omin_i^{obs}}$

E_a erreur admissible et σ_i l'écart-type de la droite d'étalonnage

Une densité de probabilité est obtenue pour chaque paramètre en se basant sur les 250 meilleures simulations pour lesquelles la RMSE est inférieure à l'erreur admissible fixée à 5 m.

4 RESULTATS

Les densités de probabilité associées aux conductivités hydrauliques et à la recharge sont examinées pour les deux zones considérées au niveau de la Figure 5. La densité de probabilité de la conductivité hydraulique présente une distribution unimodale (Figure 6A) peu étalée, centrée sur une valeur moyenne de $10^{-4,23}$ (m/s) avec une médiane de $10^{-4,20}$ pour le K de la zone 1 et une distribution plus ou moins peu étalée avec le K de la zone 2 (Figure 6B), centré sur $10^{-3,60}$ avec une médiane de $10^{-3,50}$. La densité de probabilité de la recharge moyenne présente une distribution unimodale peu étalée (Figure 7) et centrée sur une moyenne de 20 mm (médiane 22,6 mm) pour un écart type de 11,9.

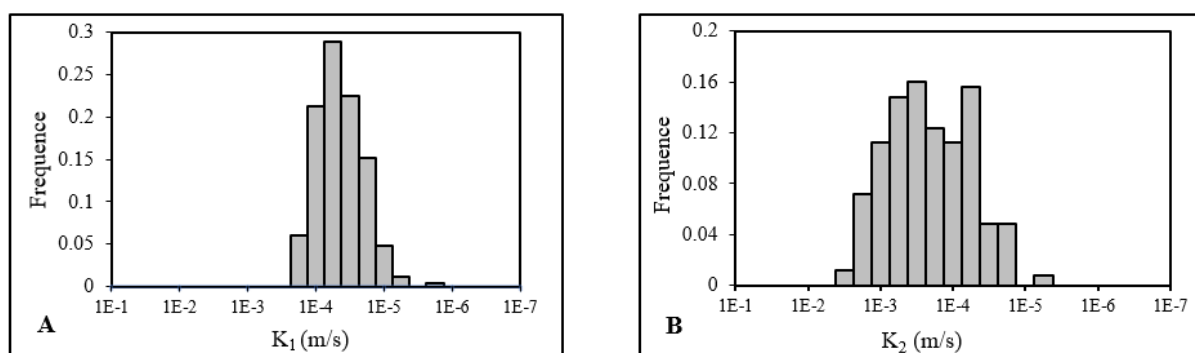


Fig. 6. Densité de probabilité de la conductivité hydraulique moyenne au niveau de chaque zone (A) zone 1 et (B) zone 2

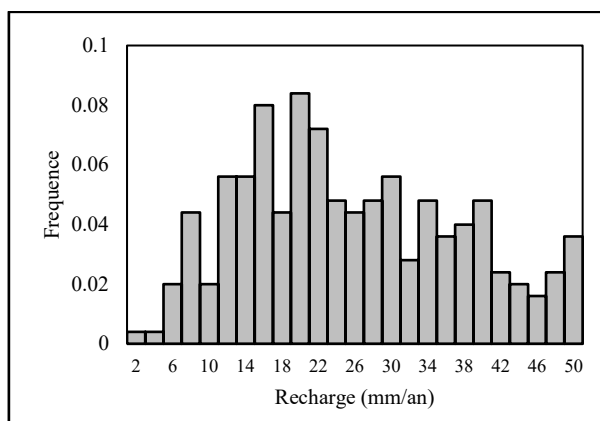


Fig. 7. Densité de probabilité de la recharge moyenne

La répartition spatiale de la piézométrie moyenne obtenue après simulations, est représentée à la figure 8. Dans l'ensemble, la morphologie du dôme piézométrique et de la dépression apparaît assez bien reconstituée. La comparaison entre la piézométrie moyenne calculée et celle observée au niveau des ouvrages d'observation révèle que sur l'ensemble des points d'observation, 46 % montre une différence ≤ 3 m, 34 % entre 3 et 5 m et 20 % égale à 5 m correspondant à l'erreur maximale.

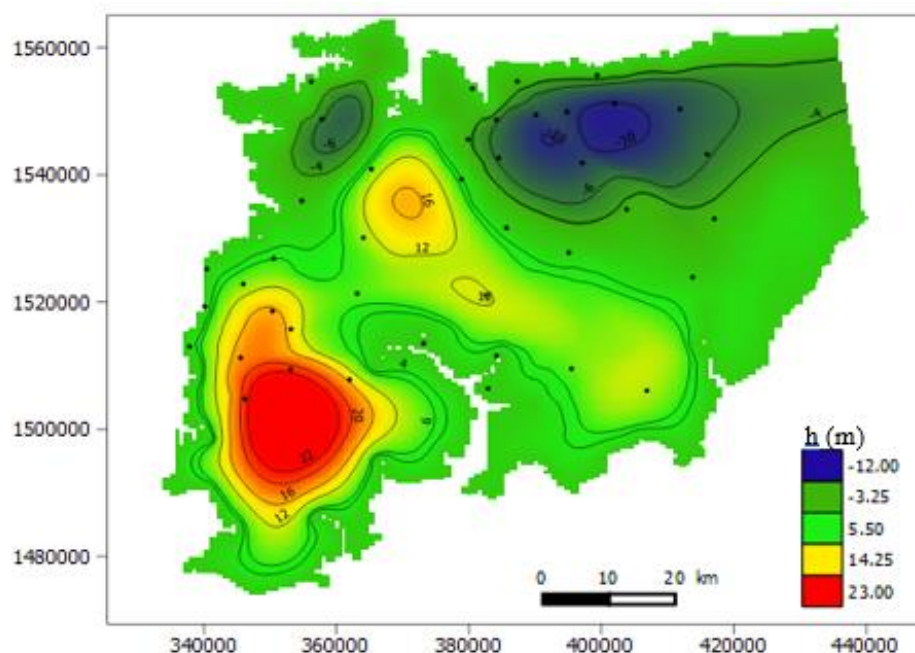


Fig. 8. Carte piézométrique moyenne simulée

Les niveaux piézométriques reconstitués sont assez proches de ceux mesurés dans les différentes localités (Figure 9). Les ouvrages où des problèmes de calibration sont rencontrés se trouvent au niveau du dôme piézométrique et vers le nord dans les environs du fleuve Saloum.

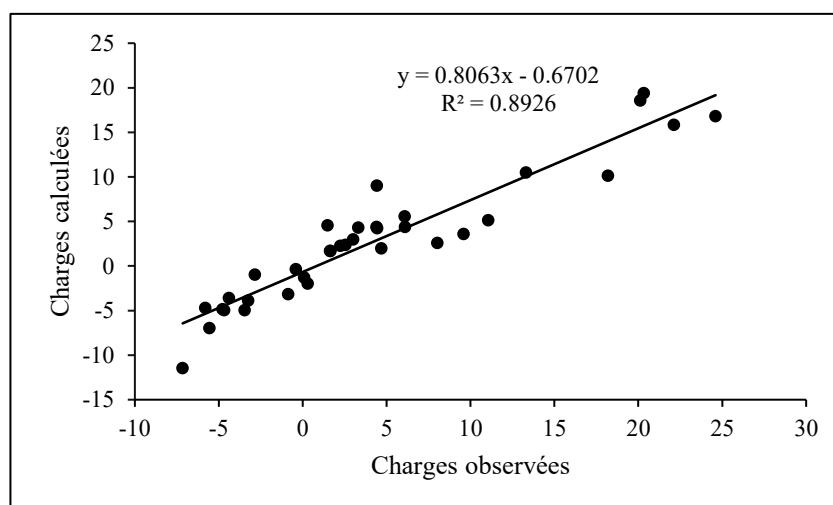


Fig. 9. Validation de la calibration (Charges mesurées vs calculées au niveau des ouvrages d'observation)

Le bilan des flux qui entrent dans le système est équilibré par celui qui sort (Tableau 2). Les apports aux limites représentent 7 % des entrées du système. Les pertes aux limites évaluées en moyenne par le modèle sur toutes les limites sont de l'ordre de 1,73 m³/s. Les pertes en mer évaluées sur toute la ligne côtière représentent 0,83 m³/s et celles évaluées au niveau des rivières, 0,68 m³/s. La quantité d'eau perdue par le système par évaporation est de 0,95 m³/s.

Tableau 2. Bilan global moyen des débits

ENTREE (m ³ /s)		SORTIE (m ³ /s)	
Emmagasinement	0	Emmagasinement	0
Apports aux limites	0,21	Sortie par les limites	1,73
Recharge	2,47	EVT	0,95
Total	2,68	Total	2,68
IN - OUT = 0.00			

5 DISCUSSIONS

Les densités de probabilité pour les valeurs de conductivité hydraulique et de la recharge peu étalées obtenues indiquent une forte sensibilité des simulations à ces deux paramètres. Cet effet sensibilité est plus accentué avec la conductivité hydraulique qui présente une densité de probabilité moins étalée. Les simulations en condition de potentiels imposés nous ont permis de bien contraindre le modèle afin d'avoir des valeurs correctes des paramètres hydrodynamiques de notre aquifère.

Les valeurs de conductivité hydraulique sont semblables aux valeurs obtenues par pompage d'essai dans la zone ([12]; [11]; [49]). Les valeurs oscillent entre 10^{-2} et 10^{-5} m.s⁻¹. Ces différentes valeurs de K sont en phase avec des faciès à dominante sableux et sablo-argileux des différents terrains. Dans l'ensemble, la morphologie du dôme piézométrique et de la dépression apparaît assez bien reconstituée.

La comparaison entre la piézométrie calculée et celle observée révèle une calibration jugée satisfaisante dans l'ensemble. Il faut noter cependant que des problèmes de calibration sont rencontrés sur quelques ouvrages au niveau du dôme avec des valeurs inférieures aux valeurs observées. Ceci peut être lié à une variation in situ de la conductivité hydraulique au niveau de ces différents points car ayant travaillé avec une conductivité hydraulique homogène. Les autres points où une meilleure calibration n'a pu être obtenue se situent au Nord dans les environs du fleuve Saloum et au Sud à proximité du BaoBolon. Le décalage entre les charges calculées et mesurées peut découler d'une mauvaise appréhension des charges piézométriques imposées au niveau de ces rivières.

Le bilan global moyen montre un équilibre parfait des débits d'entrée et de sortie. Le renouvellement de la réserve en eau souterraine est assuré pour l'essentiel par l'infiltration des eaux de pluie avec une recharge annuelle moyenne de 20,60 mm/an en potentiel imposé. Ces valeurs trouvées après les différentes simulations sont dans la gamme de valeurs obtenues avec les différents travaux antérieurs ([47]; [48]; [24]).

La valeur de l'évapotranspiration annuelle moyenne obtenue après simulation est de 13,65 mm/an. Ces valeurs très proches sont dans le même ordre de grandeur que celles obtenues avec les différents travaux antérieurs.

Les pertes d'eau aux limites sont importantes et se font vers l'océan. Les sorties en mer peuvent s'expliquer par la configuration piézométrique de l'aquifère. L'écoulement divergent au niveau du dôme piézométrique montre des pertes vers la mer à l'Ouest.

L'échantillonnage des densités de probabilité associées aux propriétés hydrodynamiques étant suffisante et vue que les différents résultats trouvés s'apparentent à ceux existants, le modèle peut être jugé acceptable.

6 CONCLUSION

Ce travail relate la modélisation hydrodynamique en régime permanent de l'aquifère côtier du Saloum (Sénégal) en tenant compte de l'hétérogénéité des formations géologiques. L'approche utilisée dans ce travail, basée sur une modélisation stochastique, s'est révélée assez efficace pour gérer la forte hétérogénéité de l'aquifère. Cette approche a conduit à une calibration très satisfaisante du modèle en potentiel imposé. Les conditions initiales ont été reproduites grâce au calage du modèle en régime permanent. Les conductivités hydrauliques sont respectivement comprises entre 10^{-2} et 10^{-5} m/s. Le bilan obtenu a permis de quantifier les entrées d'eau de mer et du fleuve Saloum; les pertes vers les effluents de la Gambie et celles évapotranspiratoires.

En perspective, cette modélisation va être approfondie en tenant compte des paramètres et des variables plus détaillées (climatique et pompage). Les modèles en régime permanent proposé pourraient servir de base pour une modélisation de

l'intrusion saline avec l'approche de l'interface abrupte en prenant en compte un paramètre supplémentaire incertain, la porosité.

REFERENCES

- [1] McDonald, M.C.; Harbaugh, A.W. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, p. 586, 1988.
- [2] Guo, W., Langevin, C. D. User's guide to SEAWAT: a computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow, U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A7, Tallahassee, Florida, USA, 2002.
- [3] Voss, C.I., Provost, A.M. SUTRA, a model for saturated-unsaturated variable density groundwater flow with energy or solute transport. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations, Open-File Report. 87-4369, 2008.
- [4] Diersch, H.-J.G. FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system reference manual. *Report No. WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research*, 2002.
- [5] Singh, A. Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review, *Sci Total Environ*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.048, 2014.
- [6] Carrera, J.; Alcolea, A.; Medina, A.; Hidalgo, J.; Slooten, L.J. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeol. J.* 13, 206-222, 2005.
- [7] Cooley, R.L. A Theory for Modeling Ground-Water Flow in Heterogeneous Media; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2004.
- [8] Al-Bitar, A., Ababou, R. Random field approach to seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers: unconditional simulations and statistical analysis. In: Renard, P., Demougeot-Renard, H., Froidevaux, R. (Eds.), *Geostatistics for Environmental Applications*, Springer Verlag, 2005.
- [9] EL Mezouary, L.; Kabbaj, S.; ELMansouri, B.; Scozzari, A.; Doveri, M.; Menichini, M.; Kili, M. Stochastic modeling of flow in porous media by Monte Carlo simulation of permeability. *Math-Recherche et Application*, 16, pp. 1-24, 2016.
- [10] Zhou, H.; Jaime Gomez-Hernandez, J.; Li, L. Inverse methods in hydrogeology: Evolution and recent trends. *Adv. Water Resour.* 63, 22-37, 2014.
- [11] Noël, Y. Etude hydrogéologique du Continental Terminal de Sine Gambie première phase et rapport de synthèse, BRGM DKR 75 DK 05, p. 30, 1975.
- [12] Diluca, C. Hydrogeology of the Continental Terminal aquifer between the Sine and the Gambia. *Technical report, BRGM DKR 76 DKR 1976*, p.33, 1976.
- [13] Ranjan, P. S., Kazama, S., Sawamoto, M. Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers. *Journal of Environmental Management*, 80, 1, 25-35, 2006.
- [14] Mahesha, A.; Nagaraja, S.H. Effect of natural recharge on sea water intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 174, 211-220, 1996.
- [15] Oude Essink, G. H. P.; Van Baaren, E. S.; De Louwn, P. G. B. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, *Water Resour. Res.* 46, W00F04, doi: 10.1029/2009WR008719., 2010.
- [16] Ferguson, G., and Gleeson, T. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, 2, 5, 342-345. doi: 10.1038/nclimate1413, 2012.
- [17] Shrestha, S., Bach, T. V., Pandey, V. P. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science and Policy*, 61, 1-13. doi: 10.1016/j.envsci.2016.03.010, 2016.
- [18] Pholkern, K., Saraphirom, P., & Srisuk, K. Potential impact of climate change on groundwater resources in the Central Huai Luang Basin, Northeast Thailand. *Science of The Total Environment*, 633, 1518-1535, 2018.
- [19] Faye, S. Etudes hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal dans la zone Sine-Gambie. *Rapport géophysique*. Projet PEPAM-BAD, 2017.
- [20] Faye, S.; Faye, S.C.; Ndoeye, S.; Faye, A. Hydrogeochemistry of the Saloum (Senegal) superficial coastal aquifer. *International journal of Geoscience environmental geology*, 44, 2, pp. 127-136, 2003.
- [21] Faye, S.; Maloszewski, P.; Stichler, W.; Trimborn, P.; Cisse Faye, S. and Gaye, C.B., Groundwater salinization in the Saloum (Senegal) delta aquifer: minor elements and isotopic indicators. *Sci. Total Environ*, 343, 243-259, 2005.
- [22] Ndoeye, S., Razack M., Faye S. et Gaye, C. B., Application des méthodes statistiques multivariées et de la classification de Stuyfzand pour la caractérisation des eaux souterraines de l'aquifère côtier du Saloum, Sénégal, *Afrique SCIENCE*, 13, 2 200-212, 2017.
- [23] Gaye, A.T.; Lo, H.M.; Djimbira, S. S.; Fall, M.S.; Ndiaye, I. Sénégal: Revue du contexte socio-économique, politique et environnemental. *Rapport d'études*, p. 85, 2015.

- [24] Ndoye, S. Comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe côtière du Continental Terminal du Saloum. Thèse 3^{ème} cycle Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 152 p, 2003.
- [25] Faye, S., Apports des outils géochimiques et isotopiques à l'identification des sources de salinité et à l'évaluation du régime d'écoulement de la nappe du Saloum. *Thèse es Sciences*. Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 153p, 2005.
- [26] Ndoye, S.; Faye S.; BA M. I. - Hydrodynamique de la nappe côtière du Saloum: étude par modèle numérique. *Revue du CAMES, Sciences appliquées et de l'Ingénieur*, Vol.1, N° 2, 2014.
- [27] Bellion, J.C. Histoire géodynamique post paléozoïque de l'Afrique de l'ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemeden, Tchad). Thèse d'état sciences Univ. d'Avignon et des pays du Vaucluse. 296p, 1987.
- [28] Lappartient, J.R. The Continental Terminal and the early Pleistocene of the Senegalo-mauritanian basin. Stratigraphy, sedimentology, diagenesis, alterations, paleoshore reconstitutions from the ferrallitic formations, PhD, University of Marseille 1985.
- [29] Flicoteaux, R.; Lappartient. J.R. Le passage de l'Eocène Inférieur à l'Eocène moyen sur la bordure orientale du dôme de Ndiass (Sénégal occidental). *Travx. Labo. Sc. Terre, Fac. Sci. Marseille Sr-Jérôme. Série A*, n°8, p. 28, 1972.
- [30] Conrad, G. and Lappartient, J. R. The Continental Terminal, its position within the Cenozoic geodynamic evolution of the Senegalo-mauritanian basin. *J African Earth Sciences*, 6 (1), 45-60, 1987.
- [31] Travi, Y. Hydrogéologie et Hydrochimie des Aquifères du Sénégal: Hydrochimie du fluor dans les eaux souterraines. Mem. N°95. Univ. Louis Pasteur et CNRS, p.148, 1993.
- [32] Harbaugh, A. W. Modflow-2005, The U S Geological Survey modular ground-water model - the Groundwater-Water Flow Process: U S Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, 2005.
- [33] Leake, S.A. *Modeling Groundwater Flow with MODFLOW and Related Programs*. US Department of the Interior, US Geological Survey, Fact sheet 121-97, doi: 10.3133/fs12197, 1997.
- [34] Harbaugh, A.W.; McDonald, M.G. *User's documentation for MODFLOW-96*, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey, Open-File Report 96 D 485, p. 56, 1996.
- [35] Kumar, C. P.; Singh, S. Concepts and Modeling of Groundwater System. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 2, February 2015.
- [36] Carrera-Hernandez, J.J. and Gaskin, S. J. The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): Open-source groundwater flow modeling. *Computers & Geosciences*, 32 pp. 339-351, 2006.
- [37] Dagan, G. Flow and transport in porous formations, Springer, Berlin 1989.
- [38] Gelhar, L. W. Stochastic Subsurface Hydrology, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [39] Zhang, D. Stochastic Methods for Flow in Porous Media Coping with Uncertainties. Academic Press, San Diego, CA. p. 350, 2002.
- [40] Al Bitar, A. Modélisation des écoulements en milieu poreux hétérogènes 2D / 3D, avec couplages surface / souterrain et densitaires. Thèse de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [41] Sorooshian, S.; Gupta, V. K. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resour. Res.*, 19, 260-268, 1983.
- [42] Duan, Q. S.; Sorooshian, S.; Gupta, V. K. Effective and efficient global optimisation for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 28, 1015-1031, 1992.
- [43] Beven, K. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Adv. Water Resources*. 16, 41-51, 1993.
- [44] Freer, J.; Beven, K.; Ambrose, B. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach. *Water Resour. Res.* 32, 2161-2173, 1996.
- [45] Beven, K. On the future of distributed modelling in hydrology. *Hydrological processes*, 14, 3183-3184, 2000.
- [46] Bonnet, M. Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. *Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, p. 270, 1978.
- [47] Dieng, B. Paléohydrogéologie et hydrogéologie quantitative du bassin sédimentaire du Sénégal. Essai d'explication des anomalies piézométriques observées. *Thèse d'université*, Ecole Nationale Supérieure de mine Paris, p. 172, 1987.
- [48] Gaye, C. B. Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évapotranspiratoires des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal. Thèse es Sciences. Univ. De Dakar, p. 245, 1990.
- [49] Aranyosy, J. F. and Gaye, C. B. La recherche du pic de tritium thermonucléaire en zone non saturée profonde sous climat semi-aride pour la mesure de la recharge des nappes: première application au Sahel. *C. R. Acad. Sci. Paris II*, 315, pp. 637-643, 1992.
- [50] Aranyosy, J. F. and Ndiaye, B. Étude et modélisation de la formation des dépressions piézométriques en Afrique sahélienne. *Rev. Sci. Eau*, 6, pp. 81-96, 1993.
- [51] Chai, T.; Draxler, R.R. Root means square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) ? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geosci. Model Dev.* 7, 1247-1250, doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014.

Etude de l'impact de *Chromolaena odorata* (Asteraceae) sur les propriétés du sol (acidité et humidité) ainsi que sur les performances agronomiques du maïs (Zea mays) dans la région du Haut Sassandra, Centre Ouest de la Côte d'Ivoire

[Study of the impact of *Chromolaena odorata* (Asteraceae) on soil properties (acidity and moisture) and on the agronomic performance of maize (Zea mays) in the Haut Sassandra region, central-western Côte d'Ivoire]

Kouamé Firmin KONAN¹, Roger BAYALA¹, Lisette Zeh TOKPA¹, Bessimory TOURE¹, Lance Armand BALE¹, Yao Sadaïou Sabas BARIMA², and Sidiky BAKAYOKO¹

¹Université Jean Lorougnon Guédé, Unité de Formation et de Recherche en Agroforesterie, Département d'Agro-pédologie, Laboratoire d'Amélioration de la Production Agricole, Bp 150 Daloa, Côte d'Ivoire

²Université Jean Lorougnon Guédé, Unité de Formation et de Recherche en Environnement, Bp 150 Daloa, Côte d'Ivoire

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

ABSTRACT: *Chromolaena odorata* is a fast-spreading invasive plant species that poses a serious threat to agricultural ecosystems, particularly in sub-Saharan Africa. Despite its reputation as a harmful weed, there has recently been an increase in interest in its potential use as an organic soil improver. This study evaluates the impact of *C. odorata* biomass on soil physicochemical properties, specifically pH and moisture content, as well as on the agronomic performance of maize (*Zea mays*). The experiment was conducted in Zépréguhé, in the Haut Sassandra region of central-western Côte d'Ivoire, using a randomised complete block design. Four treatments were tested: *C. odorata* biomass alone; *C. odorata* combined with a 170 kg/ha mineral fertiliser (NPK 15-15-15); mineral fertiliser alone; and an untreated control. A single maize variety (LG-501) was used to ensure consistency across the treatments. The agronomic parameters measured included plant height, the number of leaves, the stem base diameter and the yields of ears and grain. Soil pH and moisture were also assessed. The results showed that the treatments involving *C. odorata* significantly enhanced plant growth and increased soil moisture, while slightly neutralising soil acidity. Applying *C. odorata* alone produced the highest yields (10.74 t/ha for ears and 7.62 t/ha for grain), outperforming the mineral fertiliser treatment and the control. The combination treatment also yielded good results, albeit slightly lower. These results suggest that *C. odorata* biomass could be used as an effective, inexpensive alternative to or addition to synthetic fertilisers, thereby promoting soil health and sustainable maize production in tropical agroecosystems.

KEYWORDS: Agronomic parameters, *Chromolaena odorata*, maize, moisture, pH.

RESUME: L'étude porte sur l'impact agronomique et pédologique de *Chromolaena odorata*, une plante envahissante originaire d'Afrique subsaharienne souvent jugée nuisible, mais qui présente un intérêt comme amendement organique. Réalisée à Zépréguhé, dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, l'expérimentation a comparé quatre traitements: la biomasse de *C. odorata* seule, en combinaison avec un engrais minéral (NPK 15-15-15), l'engrais minéral seul, et un témoin sans apport. Une seule variété de maïs (LG-501) a été cultivée pour garantir l'uniformité des conditions. Les paramètres analysés incluent la croissance des plants, les rendements en épis et en grains, ainsi que le pH et l'humidité du sol. Les résultats montrent que *C. odorata* améliore significativement la croissance du maïs, augmente l'humidité du sol et tend à neutraliser son acidité. Le traitement à base de biomasse seule a donné les meilleurs rendements en épis (10,74 t/ha) et en grains (7,62 t/ha), suivi de son association avec le NPK (8,75 t/ha et 6,05 t/ha). L'engrais chimique seul a produit des rendements inférieurs (7,82 t/ha et

5,41 t/ha), tandis que le témoin a affiché les performances les plus faibles (7,63 t/ha et 4,44 t/ha). Ces résultats suggèrent que *C. odorata* peut constituer une alternative ou un complément viable aux engrais minéraux, favorisant ainsi la productivité tout en améliorant la qualité des sols. Ces résultats suggèrent que *C. odorata* pourrait constituer une alternative durable aux engrais chimiques, tout en contribuant à la restauration des sols.

MOTS-CLEFS: *Chromolaena odorata*, humidité, maïs, paramètres agronomiques, pH.

1 INTRODUCTION

En Afrique subsaharienne, l'agriculture représente la principale source de subsistance pour la majorité des populations rurales [1, 2]. En Côte d'Ivoire, ce secteur constitue un pilier stratégique de l'économie nationale, mobilisant une part importante de la population active [3, 4]. Le maïs (*Zea mays*), culture vivrière de première importance, connaît une expansion croissante, notamment dans la région de Daloa, au Centre-Ouest du pays, en raison de sa valeur nutritionnelle et de sa polyvalence dans l'alimentation humaine et animale [6]. Toutefois, malgré son potentiel agronomique, la productivité du maïs demeure faible, entravée par de multiples contraintes parmi lesquelles la dégradation des sols, la faible teneur en matière organique, ainsi que la pression exercée par les adventices [6, 7, 8]. Parmi ces adventices figure *Chromolaena odorata* (Asteraceae), plante herbacée vivace originaire d'Amérique tropicale, aujourd'hui largement naturalisée et envahissante dans de nombreuses régions d'Afrique de l'Ouest, y compris en Côte d'Ivoire [9, 10]. Introduite initialement pour des usages ornementaux ou comme couverture antiérosive, cette espèce est devenue problématique en raison de sa croissance rapide, de sa capacité à monopoliser les ressources, et de son fort pouvoir de couverture [11]. Toutefois, malgré sa réputation d'espèce nuisible, *C. odorata* suscite un intérêt croissant en tant que ressource potentielle pour l'agriculture durable. Plusieurs travaux ont souligné son aptitude à produire une biomasse abondante et à enrichir les sols en matière organique par décomposition [12, 13]. De plus, certaines études menées en zone tropicale suggèrent que son incorporation dans le sol pourrait améliorer les caractéristiques physico-chimiques telles que le pH, l'humidité et la structure du sol, contribuant ainsi à la régénération de sols dégradés [14,15]. Néanmoins, l'effet réel de *Chromolaena odorata* sur la fertilité des sols et les performances agronomiques des cultures vivrières, en particulier du maïs, reste encore peu documenté dans des contextes agroécologiques spécifiques comme celui de la région de Daloa [16, 17]. Or, dans cette zone soumise à une pression agricole croissante et où les intrants chimiques demeurent souvent inaccessibles pour les petits producteurs, l'intégration d'espèces végétales locales telles que *C. odorata* dans les pratiques culturales pourrait constituer une alternative agroécologique prometteuse [18, 19]. Dans cette optique, la présente étude se propose d'évaluer les effets de *Chromolaena odorata* sur certaines propriétés du sol, notamment l'acidité et l'humidité, ainsi que sur les performances agronomiques du maïs (*Zea mays*).

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 SITE D'ETUDE

La présente étude a été conduite dans la région du Haut-Sassandra, située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, plus précisément dans le département de Daloa (Figure 1). Cette localité, qui constitue le chef-lieu dudit département, est géographiquement positionnée aux alentours de 6°52' de latitude nord et 6°27' de longitude ouest [20]. Elle couvre une superficie estimée à environ 3 876 hectares et abrite une population moyenne de 421 879 habitants, selon les données du Recensement Général de la Population et de l'Habitat [21].

Sur le plan administratif, le territoire de Daloa est délimité au nord par les départements de Vavoua et Zuénoula, au sud par ceux d'Issia et Sinfra, à l'ouest par Duékoué et Bangolo, et à l'est par Bouaflé [22]. Du point de vue pédologique, les sols sont majoritairement constitués de sols ferrallitiques remaniés sur les zones de plateau, tandis que les bas-fonds présentent des sols hydromorphes, caractéristiques des zones humides [23].

Daloa, en tant que chef-lieu régional, bénéficie d'un climat tropical marqué par deux saisons principales: une saison sèche et chaude s'étendant de novembre à février, et une longue saison pluvieuse allant de mars à octobre. Les précipitations annuelles oscillent entre 1 000 et 1 400 mm. Durant la période sèche, la région est parfois soumise à l'influence de l'harmattan, un vent sec et poussiéreux en provenance du Sahara. Les températures moyennes varient au cours de l'année: elles atteignent environ 24,7 °C au mois d'août, considéré comme le plus frais, et culminent à 27,8 °C en février, mois le plus chaud.

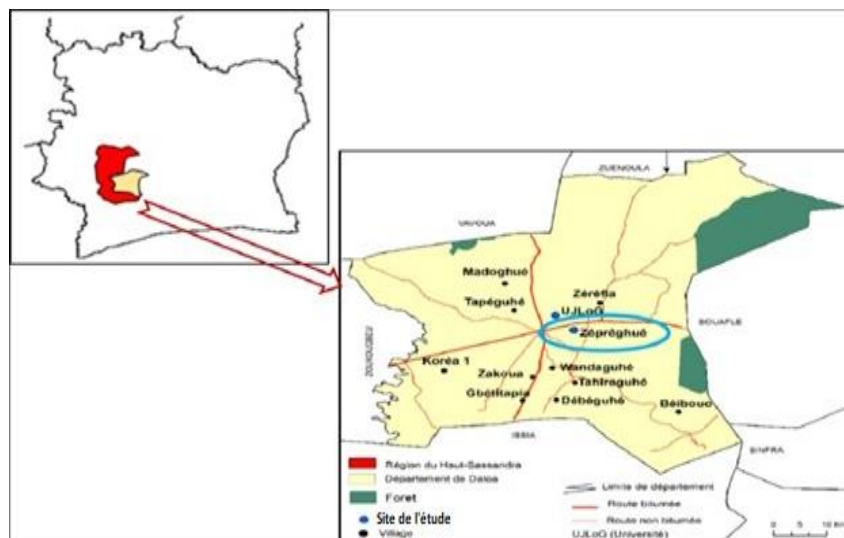


Fig. 1. Situation du site de l'étude

2.2 INTRANTS

Les intrants mobilisés pour cette expérimentation comprennent principalement des semences de maïs de la variété LG-501, reconnue pour ses performances agronomiques remarquables. Cette variété se caractérise par une floraison survenant aux alentours du 60^e jour après semis, ainsi qu'une maturité précoce, généralement atteinte entre 105 et 110 jours. Elle offre un potentiel de rendement élevé, estimé entre 6 et 8 tonnes par hectare dans des conditions culturales optimales. Les grains de la variété LG-501 sont de teinte jaune-orangé, de type semi-corné, aisément moulables, et riches en acides aminés essentiels, contribuant à une bonne valeur nutritionnelle. Par ailleurs, cette variété présente une résistance notable à la rouille et à plusieurs pathologies foliaires, ce qui en fait une solution adaptée aux systèmes agricoles vivriers tropicaux. D'autre part, la fertilisation repose sur l'utilisation conjointe de deux types de fumure: la fumure minérale, de type NPK 15-15-15, destinée à assurer un apport équilibré en azote, phosphore et potassium, éléments essentiels à la croissance et au rendement du maïs. La fumure organique, constituée de la biomasse aérienne de *Chromolaena odorata* (Asteraceae), plante réputée pour sa richesse en matière organique après décomposition.

2.3 ECHANTILLONNAGE DU SOL POUR LA DETERMINATION DE L'ACIDITE (PH) ET DE L'HUMIDITE DU SOL

Pour la collecte et l'analyse des échantillons de sol, plusieurs équipements ont été mobilisés. Le prélèvement des échantillons a été réalisé à l'aide d'une tarière, outil permettant d'extraire des échantillons de sol à différentes profondeurs. Les échantillons ainsi obtenus ont été conditionnés dans des sacs appropriés, garantissant leur intégrité jusqu'à l'analyse. La mesure de l'humidité du sol a été effectuée à l'aide d'un humidimètre électronique, appareil de précision permettant de déterminer rapidement la teneur en eau du sol. Pour l'évaluation du pH, un pH-mètre de terrain (ou en laboratoire) a été utilisé afin d'apprécier l'acidité ou l'alcalinité du sol.

2.4 MESURES DES PARAMETRES DE CROISSANCE ET DE RENDEMENT DU MAÏS

L'analyse des paramètres de croissance et de rendement du maïs a nécessité l'usage d'un ensemble d'outils adaptés aux mesures agronomiques. Un pied à coulisse a été utilisé pour déterminer avec précision le diamètre au collet des plants de maïs. La hauteur des plantes a été mesurée à l'aide d'un ruban-mètre, déroulé depuis la base jusqu'à l'extrémité supérieure de chaque plant. Enfin, une balance électronique ou un peson a permis de peser les récoltes, fournissant ainsi des données quantitatives fiables sur le rendement par unité de surface, indispensables à l'évaluation de la productivité de la culture.

2.5 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'expérimentation a été conduite sur un bloc de type Fischer d'une superficie totale de 1 298 m². Ce bloc a été subdivisé en quatre sous-blocs, chacun séparé des autres par une distance de 3 mètres. Chaque sous-bloc, d'une surface de 120 m², a été à

son tour compartimenté en quatre parcelles élémentaires isolées par des intervalles de 2 mètres. Chacune de ces parcelles élémentaires couvre une superficie de 20 m² (4 m × 5 m), comme illustré à la figure 3.

Quatre traitements ont été appliqués:

- CO: application de *Chromolaena odorata* seule,
- CO + NPK: association de *Chromolaena odorata* et de l'engrais minéral (NPK-15-15-15),
- NPK-15-15-15: application de l'engrais minéral seul,
- T0: témoin non fertilisé (absence de tout apport).

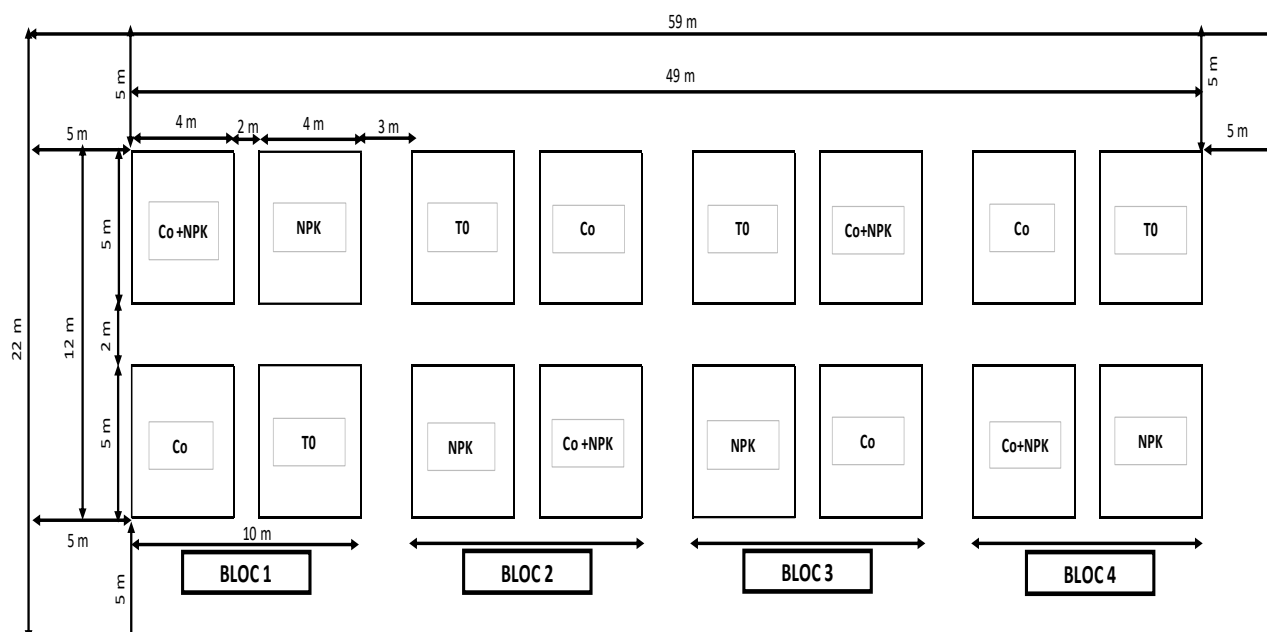


Fig. 2. Dispositif expérimental

2.6 CONDUITE DE L'EXPÉRIMENTATION

Le semis a été réalisé conformément au protocole décrit par [24], avec un espacement de 80 cm entre les lignes et de 40 cm entre les poquets. Les graines ont été enfouies à une profondeur de 4 à 5 cm, à raison de deux grains par poquet. Un démariage a été effectué après la levée afin de ne conserver qu'un seul plant par poquet. Ainsi, chaque unité élémentaire comportait 60 plants de maïs, ce qui correspond à un total de 960 plants pour l'ensemble du dispositif expérimental. En ce qui concerne la collecte des données agronomiques les observations ont porté sur 12 plantes par traitement et par parcelle élémentaire. Les paramètres agronomiques suivants ont été enregistrés chaque semaine à partir du 15^e jour après le semis, et ce, jusqu'à la floraison: diamètre au collet, nombre de feuilles et hauteur des plantes. Le rendement en grain a été calculé selon [25]:

2.7 ETUDE DU PH ET DE L'HUMIDITE DU SOL

Le pH_{eau} a été déterminé par un pH-mètre électronique, sur une suspension eau - sol tamisé, dans un rapport de 1/2,5. Elle s'est faite à deux niveaux: le pH avant la mise en place de l'expérimentation (la culture) et le pH après l'expérimentation (fin du cycle). La détermination du pH du sol a été faite sur 16 échantillons prélevés aléatoirement dans les micro-parcelles correspondant aux différents traitements expérimentaux. Ces échantillons ont fait l'objet d'une analyse individuelle, et la moyenne arithmétique obtenue a été considérée comme représentant la valeur de pH du sol par parcelle expérimentale. L'humidité du sol a été déterminée à l'aide d'une sonde hygrométrique PMS710 dans la profondeur 0 – 10 cm du sol. Les relevés ont été effectués une fois par semaine jusqu'à la fin du cycle.

2.8 ANALYSES STATISTIQUES

Les données collectées ont été analysées à l'aide du logiciel STATISTIX 8.1. Elles ont été soumises à une analyse de la variance, au seuil de 5 %. Le test de Tukey a permis de comparer les moyennes.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 RESULTATS

3.1.1 EFFET DES TRAITEMENTS SUR LES PARAMETRES DU SOL

3.1.1.1 EFFET DES TRAITEMENTS SUR LE PH DU SOL

Avant la mise en place de l'essai, les valeurs de pH observées dans les parcelles dédiées aux traitements CO et CONPK sont proches de la neutralité (pH=7). Les autres parcelles dédiées aux traitements TO et T1- NPK ont des pH compris entre 5,70. et 5,76. A la fin du cycle culturale, il y a une légère augmentation du pH au niveau de tous les traitements, les parcelles qui ont reçu les traitements CO et CONPK présentent des valeurs qui varient respectivement entre 6,30 et 6,33. Les autres traitements TO et T1-NPK) affichent une valeur identique à la fin du cycle culturale (pH=6,10). De façon générale tous les pH avant et après la culture sont bons pour le développement des plantes et la disponibilité des nutriments. Même si on observe des différences numériques entre les moyennes du pH des quatre traitements, l'analyse de variance a révélé qu'il n'y pas de différence statistiquement significative entre les différents traitements (figure 3).

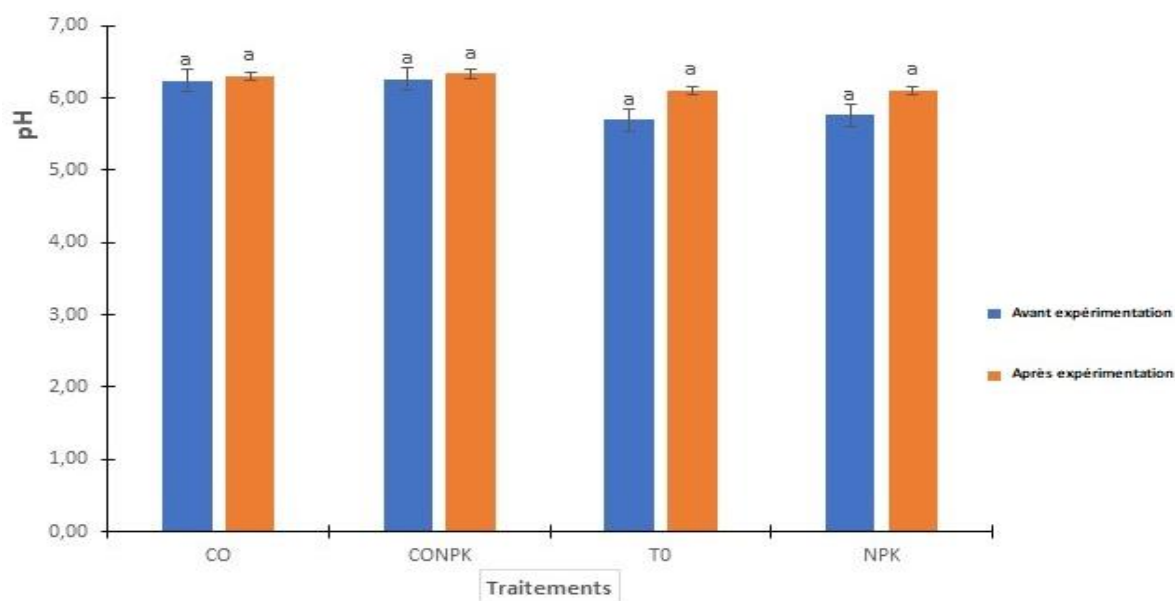


Fig. 3. Variation du pH en fonction des traitements avant et après expérimentation

Les valeurs affectées par les mêmes lettres sont sensiblement identiques, avec des lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5%.

Les graphes en bleu représentent du résultat du pH obtenus avant et les graphes en rouge représentent les résultats obtenus à la floraison. Toutes les données sont affectées par la même lettre, cela signifie qu'elles sont statistiquement identiques au seuil de 5%, test de turkey HSD. CO= apport de la biomasse de *chromolaena odorata*; CONPK= apport de la biomasse de *chromolaena odorata* associée avec de l'engrais chimique (NPK 15-15-15=170 kg/ha); NPK= apport de 170 kg/ha; TO= témoin absolu.

3.1.1.2 EFFET DES TRAITEMENTS SUR L'ÉVOLUTION DE L'HUMIDITÉ DU SOL

Le traitement avec l'apport de la biomasse de *Chromolaena odorata* aux plants enregistre les valeurs optimales de taux d'humidité, atteignant 48,28% au 53^{ème} JAS; 51,02% au 60^{ème} JAS et 49,82% au 68^{ème} JAS. Ce traitement semble donc favoriser un maintien adéquat de l'humidité dans le sol tout au long du cycle cultural. En revanche, les traitements de CO+NPK et NPK présentent une variation du taux d'humidité relativement similaire. Les valeurs sont comprises entre 37,6% et 48,3% au 53^{ème} et 60^{ème} JAS, puis restent autour de 45-46% au 68^{ème} JAS. Bien que satisfaisantes, ces performances ne sont pas aussi élevées que celles du traitement à la biomasse de *Chromolaena odorata*. Le traitement témoin, quant à lui, enregistre les plus faibles taux d'humidité, à savoir 43,9% au 53^{ème} JAS, seulement 37,7% au 60^{ème} JAS et 39,42% au 68^{ème} JAS.

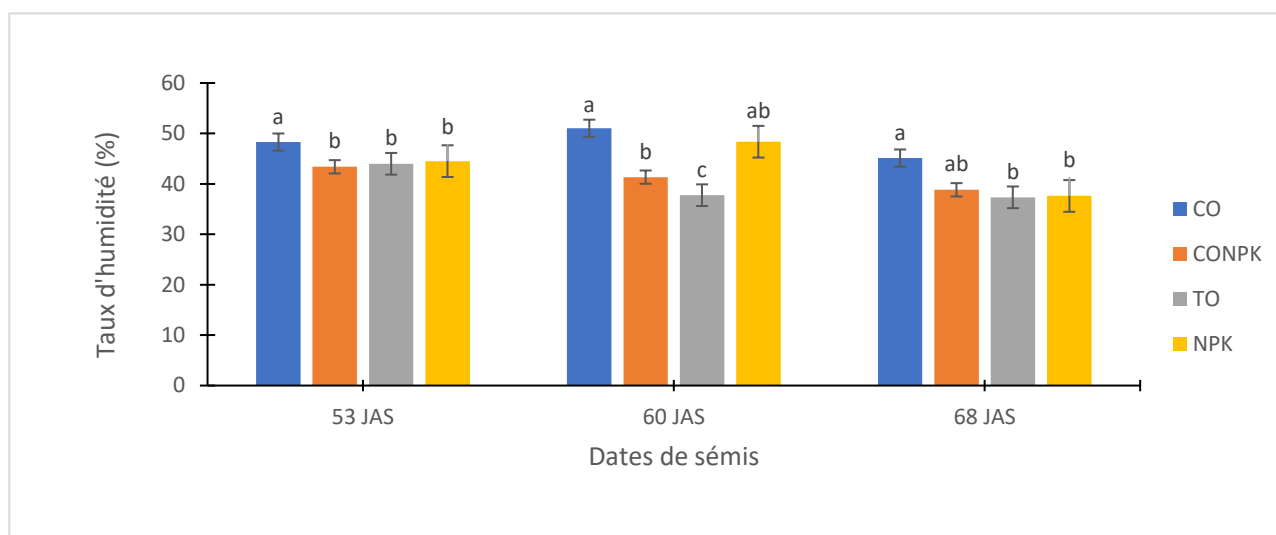


Fig. 4. Effet des traitements sur l'humidité du sol pendant le cycle cultural

Les valeurs affectées par les mêmes lettres sont sensiblement identiques, avec des lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5%.

3.1.2 EFFET DES TRAITEMENTS SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU MAÏS

3.1.2.1 EFFET DES TRAITEMENTS SUR LE DIAMÈTRE AU COLLET DES PLANTS DE MAÏS

L'évolution du diamètre au collet des plants de maïs soumis à différents traitements (figure 5). On observe une augmentation régulière du diamètre moyen au collet sur l'ensemble du cycle cultural. Une différence significative ($P=0,0000$; $F= 22,58$) apparaît entre les traitements à partir de 25^{èmes} jours après semis (JAS). Les plants ayant reçu la biomasse de *Chromolaena odorata* ont vu leur diamètre au collet augmenter de 15 à 38% par rapport au témoin. Cette différence est statistiquement significative ($P=0,0001$) avec un accroissement de 11 mm à 32^{ème} JAS, tendance qui se poursuit jusqu'à 53^{ème} JAS ($P=0,0000$; $F=20,88$). Le témoin présente les plus faibles diamètres, entre 6 et 18,90 mm, tandis que les deux autres traitements évoluent de manière similaire, entre 9,46 et 19,89 mm.

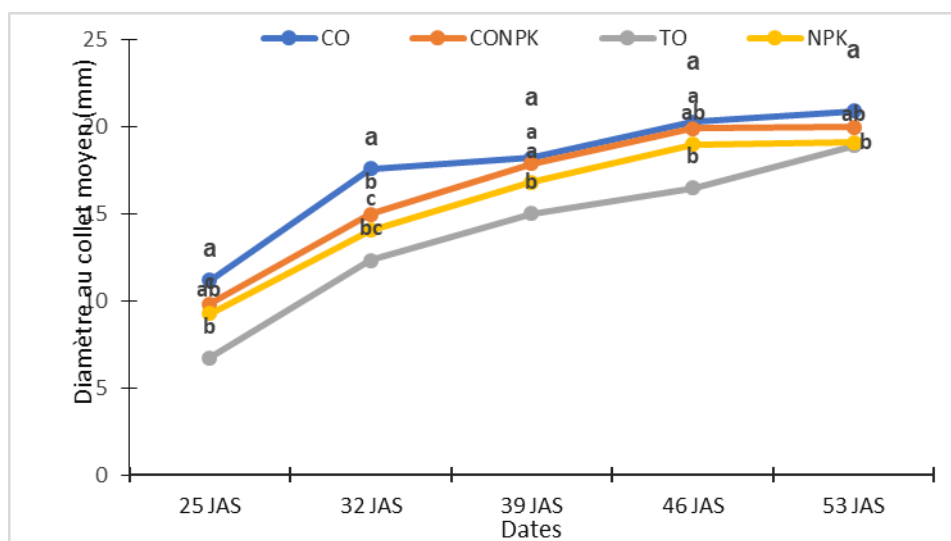


Fig. 5. Effet des traitements sur la croissance du diamètre au collet des plants de maïs

Les valeurs affectées par les mêmes lettres sont sensiblement identiques, avec des lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5%.

3.1.2.2 EFFET DES TRAITEMENTS SUR LE NOMBRE DE FEUILLES DU MAÏS

L'analyse statistique a révélé un effet significatif des traitements sur le nombre de feuilles ($p < 0,05$). Le traitement à base de *Chromolaena odorata* seul (CO) a généré le nombre moyen de feuilles le plus élevé, suivi du traitement combiné *Chromolaena odorata* + NPK (CONPK). À l'inverse, les traitements NPK seul et le témoin non traité (TO) ont enregistré les plus faibles valeurs.

Tableau 1. Nombre moyen de feuilles du maïs par traitements

Traitements	Nombres de feuilles
TO	10,6b
NPK	11,02b
CO+NPK	11,7ab
CO	12,2a
P value	0,001

Les valeurs affectées par les mêmes lettres sont sensiblement identiques, avec des lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5%.

3.1.2.3 EFFET DES TRAITEMENTS SUR LA HAUTEUR DU MAÏS

L'évolution des hauteurs moyennes des plants de maïs en fonction des dates de mesure (JAS). A travers les formes distinctives des courbes, on observe une augmentation des hauteurs pour tous les traitements au cours du cycle cultural. Au 25^{ème} il n'y a pas de différence significative entre les traitements ainsi jusqu'au 32^{ème} JAS. Les plants ayant reçu la biomasse de *Chromolaena odorata* ont présenté les hauteurs les plus élevées, allant de 20 à 160 cm jusqu'à la fin du cycle. Les plants des parcelles témoins ont enregistré les plus faibles valeurs de hauteur à partir du 32^{ème} JAS jusqu'en fin de cycle (allant de 20-140 cm). Le traitement avec engrais minéral a entraîné une croissance en hauteur intermédiaire, comprise entre 20 et 150 cm (figure 6).

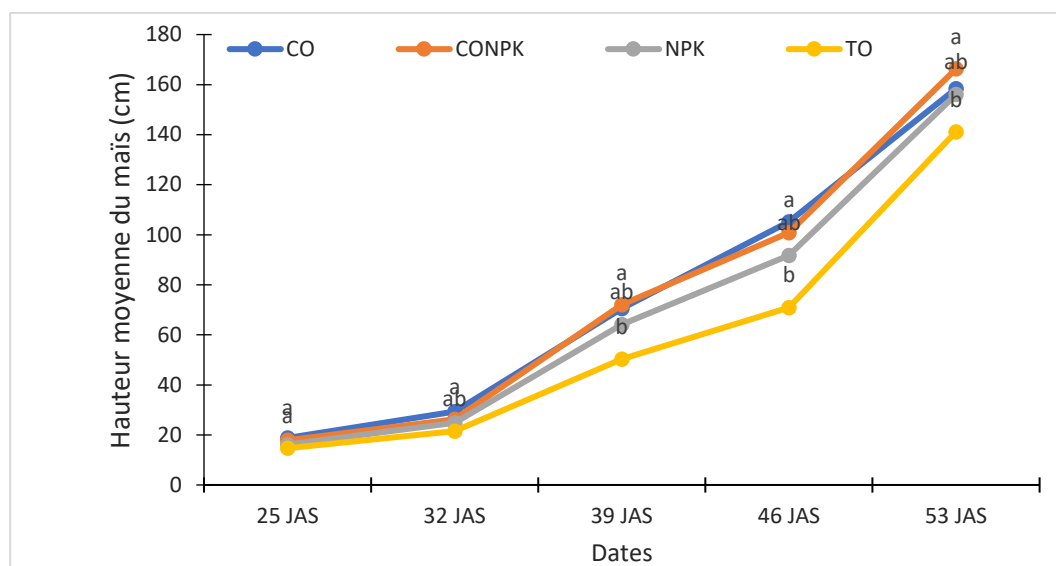


Fig. 6. Effet des traitements sur la croissance en hauteur du maïs

Les valeurs affectées par les mêmes lettres sont sensiblement identiques, avec des lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5%.

3.1.2.4 EFFET DES TRAITEMENTS SUR LE RENDEMENT DU MAÏS

L'évaluation des effets des différents traitements sur les rendements en épis et en grains révèle que l'application de *Chromolaena odorata* (CO) induit les performances agronomiques les plus élevées, avec des rendements moyens de 10,74 t/ha pour les épis et de 7,74 t/ha pour les grains. Ce traitement est suivi de près par l'association *Chromolaena odorata* et l'engrais minéral NPK 15-15-15 (CONPK), qui enregistre respectivement des rendements moyens de 8,75 t/ha et 6,05 t/ha. L'engrais chimique seul (NPK 15-15-15) présente des rendements inférieurs à ceux des traitements précédents, atteignant en moyenne 7,82 t/ha pour les épis et 5,42 t/ha pour les grains. À l'opposé, le témoin non traité (TO) enregistre les plus faibles rendements, avec des moyennes respectives de 7,63 t/ha pour les épis et 4,43 t/ha pour les grains.

Tableau 2. Rendements moyens en épi en grain du maïs

Traitements	Rendement en épis (t/ha)	Rendements grain (t/ha)
CO	10,74a	7,62a
CONPK	8,75ab	6,05ab
NPK	7,82b	5,41b
TO	7,63b	4,44c
P value	0,0001	0,0001

Les valeurs portant les mêmes lettres ne diffèrent pas de manière significative, tandis que celles portant des lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5 %.

3.2 DISCUSSION

3.2.1 IMPACT DE CHROMOLAENA ODORATA SUR L'ACIDITE ET L'HUMIDITE DU SOL

L'analyse des résultats montre que l'incorporation de la biomasse de *Chromolaena odorata* a un effet favorable sur la rétention d'humidité dans le sol tout au long du cycle cultural, mais que son impact sur l'acidité du sol reste marginal. Avant la mise en place de l'essai, le pH du sol dans les parcelles dédiées aux traitements avec *Chromolaena odorata* (CO) et CO+NPK était proche de la neutralité (pH = 7), tandis que les parcelles avec les traitements témoins (TO) et fertilisé avec de l'engrais NPK (T1) avaient des valeurs de pH légèrement acides (comprises entre 5,70 et 5,76). À la fin du cycle culturel, une légère

augmentation du pH a été observée dans toutes les parcelles, bien que ces changements ne soient pas statistiquement significatifs. Les parcelles ayant reçu la biomasse de *Chromolaena odorata* (CO) et le traitement CONPK ont enregistré des pH entre 6,30 et 6,33, tandis que les traitements T0 et T1 ont affiché des valeurs identiques de pH = 6,10. Cette légère augmentation du pH pourrait être liée à la dégradation de la biomasse organique de *Chromolaena odorata*, qui pourrait avoir entraîné la libération de composés basiques ou une réduction de l'acidité du sol. Ces résultats corroborent avec les études de [26] qui a montré que l'apport de matières organiques augmente le pH des sols acides. Cependant, les différences observées dans cette étude ne sont pas statistiquement significatives, ce qui suggère que l'impact de *Chromolaena odorata* sur l'acidité du sol est relativement modeste et pourrait dépendre d'autres facteurs comme la nature du sol et les pratiques de gestion agricole. D'autres recherches ont montré que l'apport de résidus organiques peut, à long terme, améliorer le pH des sols acides, mais cet effet est souvent plus marqué avec des apports plus importants ou sur des périodes plus longues [27]. Dans l'étude, le pH reste dans des valeurs favorables pour la croissance des plantes (pH entre 6 et 7), ce qui est généralement considéré comme optimal pour la disponibilité des nutriments [28]. Cette étude montre donc clairement l'avantage de l'utilisation de *C. odorata* comme biofertilisant quant à son effet alcalinisant. En ce qui concerne l'humidité du sol l'incorporation de *C. odorata* montre une différence marquée entre les traitements. Le traitement avec l'apport de la biomasse de *Chromolaena odorata* enregistre les taux d'humidité les plus élevés, atteignant 48,28% au 53^{ème} jour après semis (JAS), 51,02% au 60^{ème} JAS et 49,82% au 68^{ème} JAS. Cette rétention optimale d'humidité dans le sol pourrait être attribuée à la capacité de la biomasse de *Chromolaena odorata* à agir comme un "mulch" naturel, réduisant l'évaporation de l'eau et améliorant la structure du sol [29]. La matière organique présente dans la biomasse permet au sol de mieux retenir l'humidité, ce qui est particulièrement avantageux dans les régions soumises à des stress hydriques [30]. En revanche, les traitements CO+NPK et NPK ont montré une variation du taux d'humidité relativement similaire, oscillant entre 37,6% et 48,3% aux 53^{ème} et 60^{ème} JAS, puis stabilisant autour de 45-46% au 68^{ème} JAS. Bien que ces résultats soient satisfaisants, ils ne sont pas aussi élevés que ceux observés avec la biomasse de *Chromolaena odorata*. Cela peut être dû au fait que les fertilisants NPK ne jouent pas un rôle direct dans la rétention d'humidité, mais plutôt dans l'amélioration de la nutrition des plantes, ce qui peut indirectement affecter la gestion de l'eau en optimisant la croissance végétale [31]. Le traitement témoin (T0), sans apport de biomasse ou d'engrais, a montré les taux d'humidité les plus faibles, avec seulement 43,9% au 53^{ème} JAS, 37,7% au 60^{ème} JAS et 39,42% au 68^{ème} JAS. Cette réduction suggère que l'absence d'amendements organiques et de fertilisation nuit à la capacité du sol à maintenir l'humidité, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur la croissance des cultures. Ce phénomène est bien documenté dans la littérature, où il a été observé que les sols sans matière organique ont une capacité réduite de rétention d'eau, surtout dans des environnements arides ou semi-arides [32]. Les résultats de cette étude sont cohérents avec ceux d'autres recherches sur l'impact de la biomasse de plantes comme *Chromolaena odorata* sur la rétention d'humidité dans les sols. Par exemple, [33] ont montré que l'application de résidus de *Chromolaena odorata* peut améliorer significativement la rétention d'eau dans le sol, notamment dans les sols sableux et légèrement acides. De même, plusieurs études ont souligné que les amendements organiques augmentent la capacité de rétention d'eau et réduisent l'évaporation [34]. Toutefois, l'impact sur l'acidité du sol semble moins prononcé, ce qui est également confirmé par cette étude. En conclusion, l'apport de la biomasse de *Chromolaena odorata* montre un effet positif sur la rétention de l'humidité dans le sol, avec des taux d'humidité supérieurs à ceux obtenus avec les traitements classiques à base de fertilisants NPK. Cependant, l'impact sur l'acidité du sol reste modeste, et les variations observées ne sont pas statistiquement significatives. Les résultats confirment que *Chromolaena odorata* pourrait être une option intéressante pour améliorer la gestion de l'humidité des sols, en particulier dans les systèmes agricoles où la gestion de l'eau est un défi majeur.

3.2.2 IMPACT DE CHROMOLAENA ODORATA SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES

Cette étude sur l'impact de *Chromolaena odorata* (Asteraceae) sur les performances agronomiques du maïs (*Zea mays*) révèle que la hauteur moyenne des plants de maïs augmente progressivement au fil des dates de mesure (JAS), tout au long du cycle de culture. L'analyse de la variance a montré une différence statistiquement significative entre les traitements à partir du 25^{ème} JAS. Les plants de maïs ayant reçu le traitement avec la biomasse de *Chromolaena odorata* (CO) ont présenté les valeurs des hauteurs les plus élevées jusqu'à la fin du cycle végétatif de la culture allant de 20 – 160 à cm. Les plants des parcelles témoins ont enregistré les plus faibles valeurs de hauteur à partir du 32^{ème} JAS jusqu'en fin de cycle allant de 20 – 140 cm. L'apport d'engrais à 300 kg/ha a entraîné une croissance moins élevée, mais supérieure au témoin, avec une hauteur qui oscille entre 20 à 150 cm. Les plus fortes valeurs de la hauteur observées avec la biomasse de *Chromolaena odorata* confirment l'apport nutritionnel important de *C. odorata* et de son action sur la fertilité physique des sols. En effet *C. odorata* est réputée pour la restitution des macronutriments tels que l'azote, le phosphore et le potassium [35]. Au niveau du nombre moyen de feuille et d'indice foliaire, la plus grande valeur a été obtenue avec le traitement de *Chromolaena odorata* seul ainsi que de sa combinaison avec le NPK. Cela montre la restitution des fertilisants contenus dans la biomasse de *Chromolaena odorata* au sol comme cela a été démontré par [35]. Mais aussi l'association au NPK est un atout important car l'azote, le phosphore et le

potassium sont les éléments majeurs de la production des cultures et notamment le maïs [36]. En ce qui concerne les rendements (le rendement en épis et grain), les différents traitements ont eu un effet significatif sur le rendement du maïs. Le rendement le plus élevé a été obtenu en utilisant uniquement *Chromolaena odorata* (CO) mettant en évidence l'intérêt agronomique de cette espèce végétale en tant qu'amendement naturel. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par [37] qui soutient que l'application de la biomasse de *Chromolaena odorata* permet d'augmenter le rendement du maïs, d'améliorer particulièrement les teneurs en phosphore des sols et la productivité des ferralsols dégradés. Des résultats satisfaisants ont également été obtenus en combinant *Chromolaena odorata* avec un engrais chimique standard utilisé en culture de maïs en Côte d'Ivoire [17], avec des rendements moyens inférieurs au traitement *Chromolaena odorata* seul (CO). Cela justifie que la combinaison de l'amendement organique à *Chromolaena odorata* et d'engrais minéral améliore les rendements et le développement végétal. Ces résultats sont similaires à ceux de [38], qui ont mis en évidence l'effet significatif de la combinaison de *Chromolaena odorata* et le NPK sur les rendements en grains du maïs.

4 CONCLUSION

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude mettent en évidence l'efficacité de la biomasse de *Chromolaena odorata* en tant qu'amendement organique pour améliorer la croissance du maïs, la rétention hydrique du sol ainsi que sa fertilité globale. L'application de cette biomasse a induit une amélioration significative des paramètres de croissance, notamment en termes de hauteur des plants et de nombre de feuilles, surpassant non seulement le témoin non traité mais également les traitements combinant biomasse et engrais minéraux. A l'inverse, bien que les apports d'engrais NPK aient engendré une amélioration par rapport au témoin, leurs effets demeurent inférieurs à ceux observés avec l'application exclusive de biomasse. Concernant la réaction du sol, une légère élévation du pH a été observée suite à l'ajout de la biomasse, sans toutefois atteindre un seuil de signification statistique. En conclusion, *Chromolaena odorata* apparaît comme une option agronomique prometteuse pour favoriser la croissance du maïs et optimiser la gestion de l'humidité dans les sols, en particulier dans les zones sujettes à la sécheresse. Son intégration dans les pratiques agricoles pourrait contribuer à améliorer durablement la productivité des sols tout en limitant le recours aux intrants chimiques.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du financement du Fond pour la Science, la Technologie et l'Innovation (FONSTI) que nous tenons à remercier.

REFERENCES

- [1] FAO, The future of food and agriculture – Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.
- [2] T. S. Jayne, D. Mather and E. Mghenyi, «Smallholder farming and food security in sub-Saharan Africa: Current status and policy implications,» *Food Policy*, vol. 48, pp. 1–12, 2019.
- [3] FAO, Statistical Yearbook – World Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [4] K. N Kouassi, I. Bamba and K. F N'Guessan, «Situation de la culture du maïs en Côte d'Ivoire et perspectives d'amélioration,» *Revue Ivoirienne des Sciences Agronomiques*, vol. 9, no. 2, pp. 55–68, 2021.
- [5] A. M. Yao, K. E. Kouadio and K. A. Kouamé, «Évolution de la production de maïs en Côte d'Ivoire: Enjeux et contraintes,» *Revue Africaine des Sciences et Technologies*, vol. 28, no. 1, pp. 23–39, 2018.
- [6] R. Lal, «Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands,» *Land Degradation & Development*, vol. 17, no. 2, pp. 197–209, 2006.
- [7] Bationo, A., Waswa, B. S., Okeyo, J. M., Maina, F., & Kihara, J. M., Improving Soil Fertility Recommendation in Africa using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). *Springer*, 2007.
- [8] K. A. Adje, M. Dagnogo and D. J. Gnaoré, «Contraintes et pratiques culturelles des producteurs de maïs dans la région de Daloa,» *Cahiers du Développement Rural*, 5, pp. 15–27, 2020.
- [9] Zachariades, C., Day, M. D., Muniappan, R. and Reddy, G. V. P., *Chromolaena odorata*: Distribution and impact. In Biological Control of Tropical Weeds using Arthropods, Cambridge University Press, pp 211–243, 2009.
- [10] B. F. Tano, A. B. Kouame and K. E. N'Guessan, «Invasion de *Chromolaena odorata* et impact sur les cultures vivrières en Côte d'Ivoire,» *Journal of Applied Biosciences*, 92, pp. 8574–8582, 2015.
- [11] C. E. Ikuenobe and A. O Ayeni, «Effect of *Chromolaena odorata* on soil chemical properties and yield of maize,» *Nigerian Journal of Weed Science*, vol. 11, no 1, pp. 41–49, 1998.

- [12] K. Anitha, G. Rajendran and S. Loganathan, «Biomass potential of *Chromolaena odorata* and its impact on rice productivity,» *Indian Journal of Agronomy*, vol. 59, no 2, pp. 185–189, 2014.
- [13] Y. M. Koudou, K. J. Djaha and L. Kouadio, «Utilisation de *Chromolaena odorata* comme amendement organique en culture de maïs», *Revue Africaine d'Agronomie*, 8 (1), pp. 33–41, 2021.
- [14] M. Ngobo, S. F. Weise, and S. Schulz, «Recolonization of degraded soils in Cameroon by *Chromolaena odorata*: effects on soil properties and crop performance,» *Soil Use and Management*, vol. 23, no. 2, pp. 97–104, 2007.
- [15] S. Semboli, F. Mbemba and D. T. Yapi, «Rôle de la biomasse végétale dans la restauration de la fertilité des sols tropicaux,» *Tropicultura*, vol. 38, no. 4, pp. 282–290, 2020.
- [16] A. K. Konan, L. F. Coulibaly and J. M. Koffi, «Approches agroécologiques pour la fertilisation des sols à Daloa,» *Revue Ivoirienne d'Agronomie Durable*, vol. 11, no. 1, pp. 55–69, 2025.
- [17] K. F. Konan, R. Bayala, L. Z. Tokpa, K. H. Kouadio and S. Bakayoko, «Evaluation de l'impact de l'intégration de la biomasse de *Chromolaena odorata* sur le rendement du maïs dans les sols de la région de Daloa, centre-ouest de la Côte d'Ivoire,» *International Journal of Innovation and Scientific Research*, vol. 78, no. 1, pp. 30–36, 2025.
- [18] J. Pretty, A. D. Noble, D. Bossio, J. Dixo, R. E. Hine, F. W. T Penning de Vries and J. I. L. Morison, «Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries,» *Environmental Science & Technology*, vol. 40, no. 4, pp. 1114–1119, 2006.
- [19] M. A. Altieri and C. I. Nicholls, «Agroecology and the reconstruction of a post-COVID-19 agriculture,» *The Journal of Peasant Studies*, vol. 47, no. 5, pp. 881–898, 2020.
- [20] G. A Bolou, K. A Kouamé, A. H. Kouakou and A. D. F. V. Loba, «Non-respect des normes de construction des logements et incidences sur la dégradation du cadre de vie à Daloa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire)», *Lettres, Sciences sociales et humaines*, 37 (1), pp.129-148, 2021.
- [21] INS (Institut National de la Statistique), «RGPH (Recensement général de la population et de l'habitat), résultats globaux», 2022, Available: <https://plan.gouv.ci/assets/fichier/RGPH2021-RESULTATS-GLOBAUX-VF.pdf> (July 22. 2022).
- [22] E. Y. Kouassi, D. C. Gouaméné and K. Tano, «Accès à la propriété foncière dans les villages périurbains de Daloa (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire): les exemples de Gbokora, Petit Zakoua et Sapia. AHOHO,» *revue de Géographie du LARDYMES*, Numéro spécial, pp. 138–150, 2018.
- [23] F. G. B. Zro, A. M. Guéi, Y. K. Nangah, D. Soro and S. Bakayoko, «Statistical approach to the analysis of the variability and fertility of vegetable soils of Daloa (Côte d'Ivoire),» *African Journal of Soil Science*, vol. 4, no. 4, pp. 328-338, 2016.
- [24] L. Akanvou, R. Akanvou, C. Koffi and D. Saraka, «Evaluation agronomique des variétés de maïs riches en protéines de qualité (MRP) en station et en milieu paysan dans la zone forestière de côte d'Ivoire», *Agronomie Africaine* 21 (3): 309 – 317, 2009.
- [25] FAO, Manual for agricultural yield survey. FAO Statistical Development Series No. 1, Rome, 1982.
- [26] Renald, S. A. (2021). Potentiel de séquestration de carbone dans le sol et la biomasse végétale d'un parc à résidus miniers amendés et reboisés (Doctoral dissertation, Université du Québec à Chicoutimi).
- [27] G. Agegnehu, P. N. Nelson and M. I. Bird, «Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols,» *Soil and Tillage Research*, vol. 160, pp. 1-13, 2016.
- [28] Lal, R. (2015). Soil fertility and its role in sustainable agriculture. Springer Science & Business Media.
- [29] S. K. Ogundare, I. J. Babatunde, M. O. Aduloju and A. S. Hinmikaiye Abolu, «Effect of *Chromolaena odorata* residue and urea fertilizer on plant available nitrogen, growth and yield of maize (*Zea Mays* L.) in Ejiba, Kogi State, Nigeria». *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, vol. 2, no 8, pp. 1-5, 2015.
- [30] Guessoum, S, Diagnostic du comportement de quelques variétés de blé dur (*triticum durum* desf.) en relation avec l'état hydrique du sol en agriculture de conservation en zone semi-aride (Doctoral dissertation), 2018, Available: <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/1910> (July 5, 2018).
- [31] Juttu, R., Jogula, K., Priyadarshini, S., Reddy, S. B., Patra, P. K., Raju, B. and Pilli, K. (2021). Strategies and Programs for Improved Nutrient Use Efficiency, Technology in Agriculture, 289, 2021.
- [32] R. Lal, «Soil carbon sequestration to mitigate climate change,» *Geoderma*, vol. 123, pp. 1–2, 2004.
- [33] S. K. Ogundare, I. J. Babatunde, M. O. Aduloju and A. A. S, «Hinmikaiye Effect of *Chromolaena odorata* residue and urea fertilizer on plant available nitrogen, growth and yield of maize (*Zea Mays* L.) in Ejiba, Kogi State, Nigeria», *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 2 (8), 1-5, 2015.
- [34] M. Aytenew and G. Bore, «Effects of organic amendments on soil fertility and environmental quality: A review». *Plant Science*, vol. 8, no. 5, pp. 112-119, 2020.
- [35] K. A. Tshinyangu, T. J. M. Mutombo, M. A. Kayombo, M. M. Nkongolo, N. G. Yalombe and M. J. Cibanda, «Effet comparé de *Chromolaena odorata* King et *HE Robins*, et *Tithonia diversifolia* A. Gray sur la culture du Maïs (*Zea mays* L) à Mbujimayi (RD. Congo),» *Journal of Applied Biosciences*, vol. 112, pp. 10996 11001, 2017.

- [36] A. M. Igue, A. Saidou, A. Adjanohoun, G. Ezui, P. Attiogbe, G. Kpagbin and J. M. Sogbedji, J. M, «Evaluation de la fertilité des sols au sud et centre du Bénin,» *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, pp. 12-23, 2013.
- [37] J. M. Kabuya, P.K. Kasangala, M. N. Mulambuila, and G. M. Mupala, «Effets de la biomasse foliacée de *Tithonia diversifolia* et de la bouse de vache comparativement à l’engrais minéral sur la croissance et la production de la culture du maïs,» *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, vol. 11, no. 4, pp. 441 446, 2023.

Effet du sarclo-binage sur le rendement et la rentabilité d'aubergine en culture de contre saison à Faranah, République de Guinée

[Effect of hoeing on the yield and profitability of eggplant in off-season cultivation in Faranah, Republic of Guinea]

Mamadou Malal Balde¹, Bandjou Samoura², Hamidou Bah³, Hadiatou Mariama Diallo⁴, and Diawadou Diallo⁵

¹Département Vulgarisation Agricole, Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire de Faranah, Faranah, BP: 131, Guinée

²Laboratoire Nutrition Végétale, Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire de Faranah, Faranah, BP: 131, Guinée

³Département Agriculture, Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire de Faranah, Faranah, BP: 131, Guinée

⁴Département Médecine Vétérinaire, Institut Supérieur des Sciences et de Médecine Vétérinaire de Dalaba, Dalaba, BP: 09, Guinée

⁵Service des Etudes Avancées, Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire de Faranah, Faranah, BP: 131, Guinée

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

ABSTRACT: Many weed management techniques exist everywhere on farms. However, the frequently used mechanical weeding reduces their nuisance. The combination of weeding and hoeing has multiple advantages on crop development. The objective of this research is to evaluate the effects of hoeing on the yield and profitability of eggplant cultivation in the off-season. Four hoeing frequencies (F0, F1, F2 and F3) have been tested. After transplantation into a Randomized Complete Block, the frequencies were implemented with a localized watering system. At harvest, biometric parameters, fruit marketing, profitability and their components were evaluated and subjected to statistical calculations. The main results showed from an agronomic point of view that the watering frequencies did not influence the length of the fruits and the number of fruits per plant. Thus, the F3 frequency gave the best yield with 20.36 t/ha on the two harvests. However, the baton turned out to be better from an economic point of view with a profitability of 326.75%. Controlling weeds on eggplant crops in the off-season by hoeing gradually reduces its profitability. Its cultivation without hoeing during this period, with localized irrigation, can promote the conservation of soil moisture for good plant nutrition on a permanent basis and a reduction in the pressure of unwanted weeds.

KEYWORDS: Eggplant (*Solanum melongena*), hoeing, off-season, yield, profitability, Republic of Guinea.

RESUME: De nombreuses techniques de gestion des adventices existent partout dans les exploitations agricoles. Toutefois, le désherbage mécanique fréquemment utilisé permet de réduire leur nuisance. La combinaison du sarclage et du binage a de multiples avantages sur le développement des cultures. L'objectif de cette recherche est d'évaluer les effets du sarclo-binage sur le rendement et la rentabilité de la culture de l'aubergine en contre-saison. Quatre fréquences de sarclo-binage (F0, F1, F2 et F3) ont été expérimentées. Après la transplantation dans un Bloc Complet Randomisé, les fréquences ont été mises en application avec un système d'arrosage localisé. A la récolte, les paramètres biométriques, la commercialisation des fruits, la rentabilité et leurs composants ont été évalués et soumis aux calculs statistiques. Les principaux résultats ont montré du point de vue agronomique les fréquences d'arrosage n'ont pas influencé la longueur des fruits et le nombre de fruits par pied. Ainsi, la fréquence F3 a donné le meilleur rendement avec 20,36 t/ha sur les deux récoltes. Cependant le témoin s'est révélé meilleur

du point de vue économique avec une rentabilité de 326,75%. Le contrôle des adventices sur la culture d'aubergine en contre-saison par sarclo-binage réduit progressivement sa rentabilité. Sa culture sans sarclo-binage durant cette période, avec une irrigation localisée peut favoriser la conservation de l'humidité du sol pour une bonne nutrition des plants de façon permanente et une baisse de la pression des herbes indésirées.

MOTS-CLEFS: Aubergine (*Solanum melongena*), sarclo-binage, contre saison, rendement, rentabilité, République de Guinée.

1 INTRODUCTION

Le continent Africain connaît une croissance démographique rapide qui devrait s'accélérer dans les 20 prochaines années [1]. L'agriculture urbaine et périurbaine joue un rôle primordial dans l'offre de produits alimentaires frais et périssables dans les villes, améliore aussi le revenu de plusieurs ménages dans les pays en développement [2]. Le dynamisme du marché urbain et l'utilisation des intrants par les exploitants favorisent l'essor du maraîchage. Du fait que cette activité procure beaucoup de biens matériels et économiques, une forte proportion de jeunes s'y adonnent de nos jours [3]. L'adoption des pratiques agro-écologiques dans la production maraîchères maintiendrait la fertilité des sols et ainsi réhausserait le rendement des cultures [4]. Le maraîchage participe à l'approvisionnement en légumes frais localement produits pour les consommateurs urbains de catégories sociales diverses. La proximité des marchés et des services urbains procure beaucoup des avantages aux producteurs qui peuvent livrer leurs marchandises périssables sur les marchés et s'acquérir en intrants dans le commerce et l'agro-industrie urbaine [5]. Sur la même lancée, [6] ajoutent que le maraîchage peut offrir de multiples bénéfices importants pour les ménages qui s'y adonnent. Toutefois, [7], définissent le terme d'exploitation agricole comme étant un concept social aux multiples dimensions: spatiale, agronomique, économique, statistique, institutionnelle, symbolique.

Le renforcement de l'autonomie des systèmes de culture est nécessaire pour leur performance. L'enjeu est de libérer le producteur de ses tâches à faible valeur ajoutée pour le laisser se concentrer sur les tâches à plus forte valeur ajoutée. Le désherbage mécanique par exemple est nécessaire pour répondre aux enjeux sociétaux et environnementaux tout en maintenant la compétitivité des systèmes de culture [8]. Parmi les différents types de ravageurs, la réduction du rendement de l'aubergine due aux mauvaises herbes seules varie de 49 à 90 %, [9].

Un désherbage fréquent dans les exploitations agricoles aide à un contrôle, le plus tôt possible, pour la maîtrise des insectes et leurs dégâts [10]. Le type de désherbage le plus fréquent dans les bas fonds en toute saison est le sarclo-binage, [11]. La croissance incontrôlée des mauvaises herbes interfère avec le développement des aubergines et le rendement de la culture, [12].

Par ailleurs, l'aubergine (*Solanum melongena* L.) est l'une des légumières les plus importantes au monde après la pomme de terre, la tomate et concombre, [13]. Elle se cultive toute l'année avec une production maximale en saison sèche fraîche, moment où le climat est plus favorable en température pour sa production, [14]. Cette culture, en termes de superficie, occupe 31 000 hectares de terres agricoles en Turquie [15].

Certes, l'évaluation de l'effet du nombre de sarclo-binages sur la culture de l'aubergine en contre saison pourrait améliorer le revenu des maraîchers et le régime alimentaire des consommateurs. C'est dans cette optique que cette recherche a été réalisée à l'ISAV de Faranah. Son but est d'évaluer l'influence du nombre de sarclo-binages sur le rendement et la rentabilité de la culture de l'aubergine.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La Commune Urbaine de Faranah qui a servi de zone d'étude couvre une superficie de 1 300 km² pour une population de 325 893 habitants dont 168 600 femmes soit une densité moyenne de 18 habitants au Km² (Direction Régionale du Plan et du Développement de Faranah, 2019). Les travaux de recherche ont été effectués dans la période allant du 25 novembre 2022 au 19 Avril 2023 à l'Institut Supérieur Agronomique et Vétérinaire de Faranah (ISAV/F). Le site a été géo-référencé à travers le GPS « Garmin » et les coordonnées géographiques ont permis d'établir la carte (Fig. 1). L'essai a été monté à la station de recherche du Département Vulgarisation agricole situé au côte Sud-ouest du Campus universitaire.

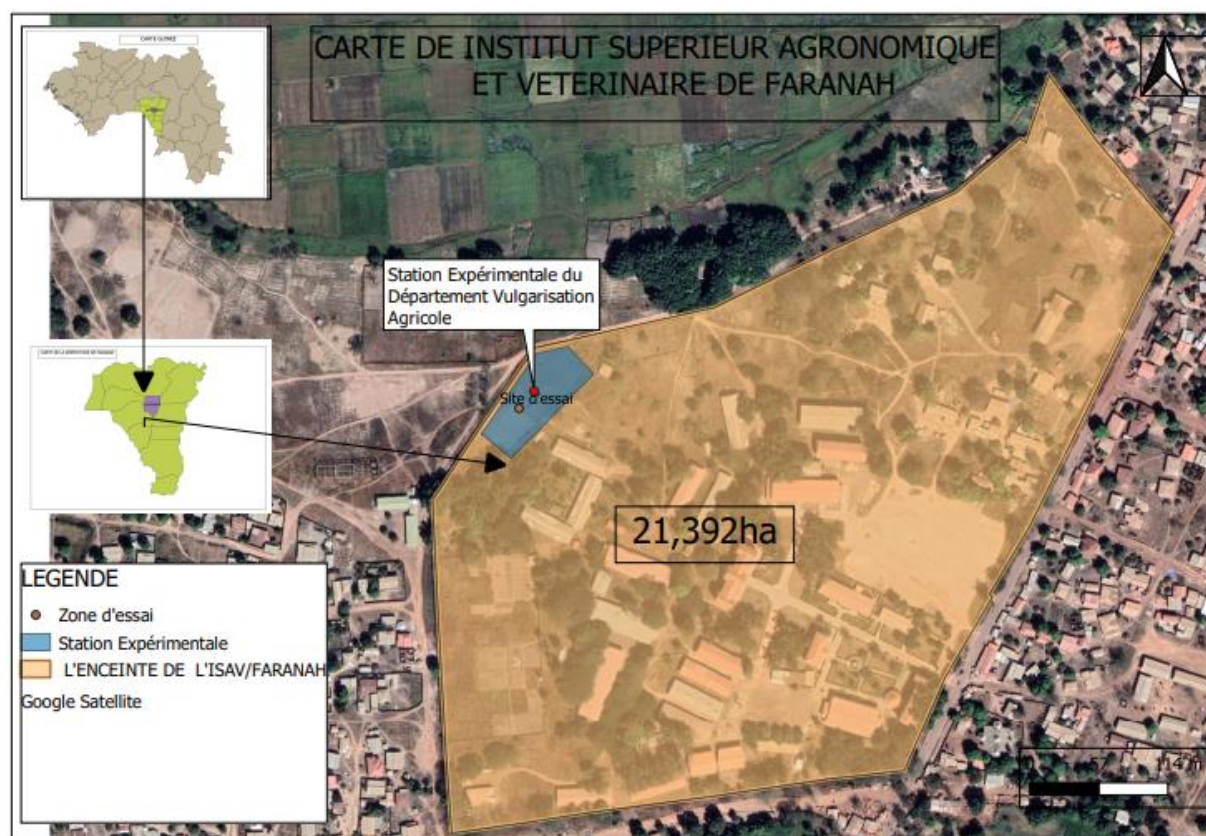


Fig. 1. Carte du site expérimental

2.2 MATÉRIEL VÉGÉTAL UTILISÉ

La variété kalenda F1 d'aubergine (*Solanum melongena*) appartenant à la famille des solanacées a été utilisée, Cette variété bien adaptée aux climats tropicaux, est cultivée partout en Guinée. Son cycle de culture est de 7 à 8 mois avec un rendement moyen oscille de 5 à 24 t/ha suivant les conditions de culture. Selon [16] l'espèce *Solanum melongena* L., aussi appelée brinjal, aubergine ou courge de Guinée, est une espèce largement cultivée pour ses fruits comestibles.

2.3 FERTILISATION

Sur un sol ferrallitique à texture sablo-limoneuse, la fiente de poule a été épandue comme fumure de fond à la dose de 10 t/ha soit 354 g par poquets, une semaine avant la transplantation. Après la reprise complète 30 jours de la transplantation, au début de la floraison, une dose de 100kg/ha soit 3,5g par poquet d'urée technique titrée de 46% d'azote a été incorporée, comme fumure de couverture.

2.4 MÉTHODES

Le nombre de sarclo-binage a servi de facteur d'étude avec quatre variantes qui sont: F_0 (zéro sarclo-binage durant le cycle végétatif); F_1 (un sarclo-binage par semaine); F_2 (un sarclo-binage à chaque deux semaines); F_3 (un sarclo-binage à chaque trois semaines). Le dispositif expérimental utilisé a été le Bloc Complet Randomisé composé de quatre (4) variantes et trois (3) répétitions soit douze (12) parcelles élémentaires.

2.4.1 CONDUITE CULTURALE

La semence de 6g a été semé en pépinière sur une superficie de $1,5m^2$. Trente jours après le semis, les jeunes plants ont été transplantés pour la mise en compétition les différentes variantes. L'entretien de ces variantes à consister à un arrosage localisé d'un volume d'eau de 2 litres par jour (matin et soir), le sarclabinage en fonction de leur fréquence et les observations

phytosanitaires. Les observations phénologiques ont été portées sur la durée des phénophases de l'aubergine avec un début de 10% et 75% pour une plénitude.

2.4.2 EVALUATIONS BIOMÉTRIQUES

Elles ont porté sur la hauteur des plants (cm) par mesure; le poids des fruits (g) par pesage; le diamètre des Fruits (mm) et la longueur des fruits (cm) par mesure; le nombre de fruits par pied et le nombre de rameaux par pied par comptage et Rendement (t/ha) par mesure et calcul.

2.4.3 EVALUATION DE LA RENTABILITÉ

L'évaluation de la rentabilité a consisté à deux étapes: l'analyse économique du coût de la production par variante en tenant compte surtout de la main d'œuvres utilisée à chaque sarclo-binage et les autres activités d'une part. D'autre part, la commercialisation des fruits récolté qui a permis d'obtenir la valeur de la production de chaque variante. Cela a permis de faire la différence entre la valeur de la production et le coût de la production pour en tirer la marge de bénéfice et exprimer la rentabilité en pourcentage.

2.5 ANALYSE STATISTIQUE

les données des évaluations biométriques ont été soumis à l'analyse de variance et la comparaison des moyennes par le test de Duncan au seuil de 5% à travers les logiciels d'analyses statistiques Microsoft Excel 2013, SPSS version 2021 et Sigmaplot version 12.5. Pour le calcul de la rentabilité, la formule suivante a été effectué:

$$\text{Rentabilité} = (\text{valeur de la production} - \text{coût de la production}) / \text{coût de la production}.$$

3 RÉSULTATS

3.1 OBSERVATIONS PHÉNOLOGIQUES

La durée des différentes phénophases se trouvent dans le tableau 1.

Tableau 1. *Durée des différentes phénophases (jours après transplantation)*

Variantes	Transplantation	Reprise			Ramification			Floraison			Fructification			Maturation			1 ^{ère} récolte
		D	F	d	D	F	d	D	F	d	D	F	d	D	F	d	
F ₀	30 ^{ème} jour	3 ^è	5 ^è	3	10 ^è	17 ^è	8	34 ^è	41 ^è	8	49 ^è	59 ^è	11	61 ^è	65 ^è	5	65
F ₁		3 ^è	5 ^è	3	10 ^è	17 ^è	8	33 ^è	38 ^è	6	50 ^è	59 ^è	10	61 ^è	65 ^è	5	
F ₂		3 ^è	5 ^è	3	10 ^è	17 ^è	8	34 ^è	38 ^è	5	50 ^è	57 ^è	8	61 ^è	65 ^è	5	
F ₃		3 ^è	5 ^è	3	10 ^è	17 ^è	8	33 ^è	41 ^è	9	49 ^è	57 ^è	9	61 ^è	65 ^è	5	

Legende: D = début; F = fin; d = durée

L'analyse de ce tableau nous montre que la transplantation a eu lieu le 30^{ème} jour après semis; la durée de la reprise, la ramification et de la maturation ont été uniformes; toutefois des légers décalages entre les variantes sur la durée de la floraison et de la fructification ont été enregistré avec une minimale obtenue par F2. Le 65^{ème} jour la récolte a été commencé sur toute les variantes. Cela pourrait s'expliquer par l'état de l'homogène du sol d'une part et de l'effet du nombres de sarclo-binages d'autre part.

3.2 EVALUATIONS BIOMÉTRIQUES

La synthèse des analyses statistiques des paramètres biométriques évalués est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2. Synthèse des analyses de variance

Paramètres	Moyenne générale	Ecart type	F.	P=0,05
Hauteur moyenne de plants à la récolte	80,72±1,71 cm	5,93796	6,375	0,016
Diamètre moyen des fruits	61,90±1,40 mm	4,84908	177,219	0,000
Nombre moyen de fruits par pied	2,42±0,15	0,51493	1,222	0,363
Nombre moyen des rameaux par pied	4,15±0,19	0,64545	12,664	0,002
Longueur moyenne des fruits	10,05±0,27 cm	0,94294	1,631	0,258
Poids moyen des fruits	186,61±12,00 g	41,56850	6513,056	0,000
Rendement	18,11±0,47 t/ha	1,61909	21,849	0,000

Il ressort de ce tableau que le nombre moyen de fruits par pied et la longueur moyenne des fruits ont affiché une différence non significative entre les variantes. Cependant, la différence a été significative sur la hauteur moyenne de plants à la récolte et hautement significative pour tous les autres paramètres. Ces résultats peuvent se justifier par l'influence du nombre de sarclo-binage sur les facteurs de croissance et de développement de l'aubergine.

3.3 COMPARAISON DES MOYENNES

Les graphiques 2; 3 et 4 ont été conçu pour mieux ressortir les différences statistiques entre les traitements par la comparaison de leurs moyennes.

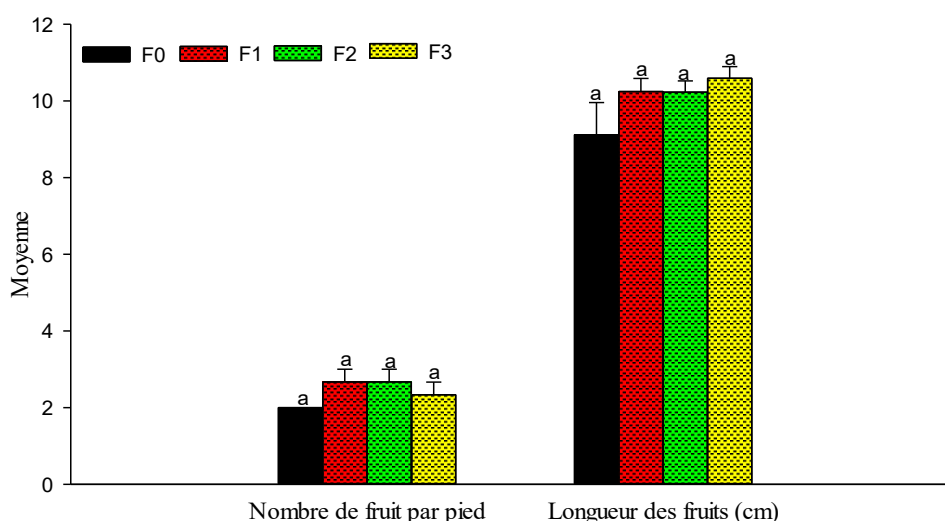


Figure 2 : nombre moyenne de fruits par pied et longueur moyenne des fruits

Légende: F0 = zéro sarclo-binage durant le cycle végétatif; F1 = un sarclo-binage par semaine; F2 = un sarclo-binage par deux semaines et F3 = un sarclo-binage par trois semaines.

Les variantes portant les mêmes lettres sont statistiquement identiques et celles portant des lettres différentes sont statistiquement différentes.

Cette figure 2 montre que le nombre de sarclo-binage n'a influencé significativement ni le nombre moyen de fruits par pied, encore moins la longueur moyenne des fruits. Ces résultats peuvent confirmer la spécificité des caractères génétiques et botaniques de la variété utilisée.

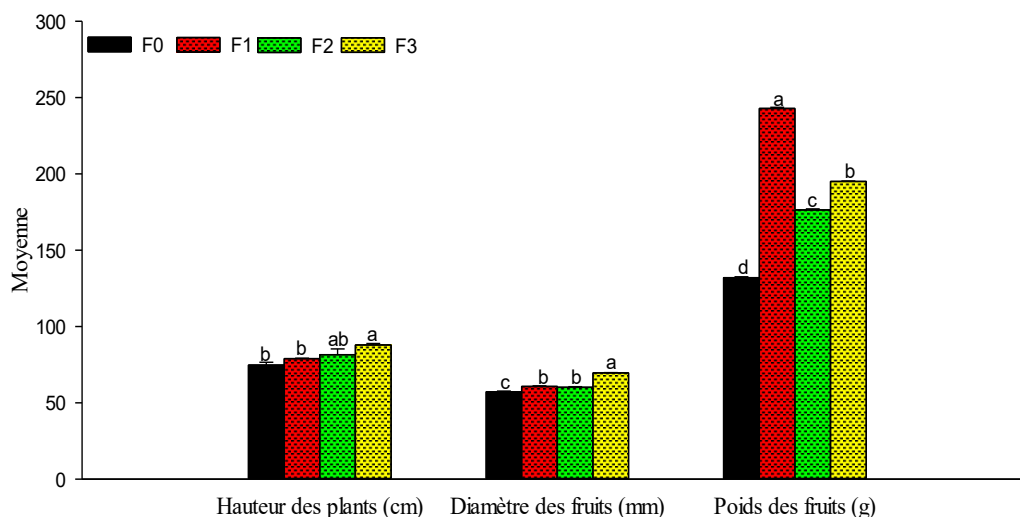


Figure 3 : Hauteur des plants à la récolte, diamètre des fruits et poids des fruits

Légende: F0 = zéro sarclo-binage durant le cycle végétatif; F1 = un sarclo-binage par semaine; F2 = un sarclo-binage par deux semaines et F3 = un sarclo-binage par trois semaines.

Les variantes portant les mêmes lettres sont statistiquement identiques et celles portant des lettres différentes sont statistiquement différentes.

La figure 3 affiche une différence significative sur tous les paramètres; la variante F3 a enregistré la plus grande hauteur plants à la récolte et le diamètre le plus large des fruits suivis par les variantes F2 et F1. Par ailleurs, le poids moyen de fruits a enregistré une différence hautement significative entre les variantes, la F1 s'est révélée meilleure et la F0 a donné le plus bas poids. L'effet du nombre du sarclo-binage pourrait être à l'origine de ces variations de hauteur des plants, du diamètre et du poids de fruits.

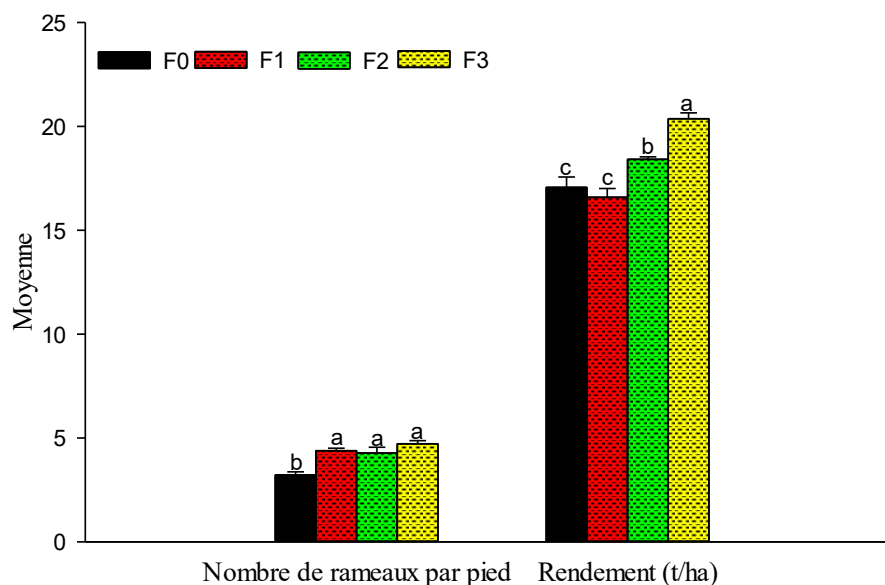


Figure 4 : nombre de rameaux par pied et rendement

Légende: F0 = zéro sarclo-binage durant le cycle végétatif; F1 = un sarclo-binage par semaine; F2 = un sarclo-binage par deux semaines et F3 = un sarclo-binage par trois semaines.

Les variantes portant les mêmes lettres sont statistiquement identiques et celles portant des lettres différentes sont statistiquement différentes.

D'après la figure 4, le sarclo-binage améliore plus la multiplication des rameaux en culture d'aubergine. Toutefois, le zéro sarclo-binage a obtenu un rendement supérieur à celui qui a reçu un sarclo-binage par semaine et le meilleur rendement a été porté par la F3 (un sarclo-binage par trois semaines). Cela pourrait traduire une réaction différente de ce deux paramètres affichés face au nombre du sarclo-binage effectué.

3.4 EVALUATION DE LA RENTABILITÉ

Les données obtenues sur le coût de l'exploitation, le rendement par variante et la commercialisation des fruits selon les réalités du marché (le prix) ont conduit aux calculs économiques et les résultats se trouvent consignés dans le tableau 3.

Tableau 3. *calcul de la rentabilité économique*

N°	Variante	Rendement (t/ha)	Prix unitaire (GNF)	Valeurs de la production (GNF)	Coût de production (GNF)	Marge bénéficiaire (GNF)	Rentabilité (%)	Rang
1	F ₀	17,07	250 000	85 350 000	20 000 000	65 350 000	326,75	1 ^{er}
2	F ₁	16,59	250 000	82 950 000	40 475 000	42 475 000	104,94	4 ^{eme}
3	F ₂	18,41	250 000	92 050 000	35 209 000	56 841 000	161,44	3 ^{eme}
4	F ₃	20,36	250 000	101 800 000	32 667 000	69 133 000	211,63	2 ^{eme}

Il ressort de ce tableau que la variante F₀ a occupé le 1^{er} rang avec une rentabilité de 326,75% suivie de F₃ (211,63%), F₂ (161,44%) et F₁ (104,94%). Il convient de retenir que plus le nombre du sarclo-binage est élevé, plus la charge de l'exploitation augmente et la rentabilité baisse. Le nombre du sarclo-binage n'est pas proportionnel à la rentabilité.

3.5 CORRÉLATION

Le tableau 4 expose les différents types de corrélations qui existent entre le rendement, le coût et la valeur de la production et la rentabilité.

Tableau 4. *matrice de corrélation*

Paramètres	Rendement	Coût de production	Valeurs de la production	Rentabilité
Rendement	1			
Coût de production	0,047	1		
Valeurs de la production	1,000**	0,047	1	
Rentabilité	0,057	-0,993**	0,057	1

*** la corrélation est significative au niveau 0,01 (unilatéral)*

Ce tableau laisse voir que la rentabilité est liée au rendement et la valeur de la production avec une faible corrélation positive. Cependant, elle entretient avec le coût de la production, une corrélation négative hautement significative.

4 DISCUSSION

4.1 PARAMÈTRES BIOMÉTRIQUES

Le cycle végétatif enregistré sur les variantes pour la 1^{ère} récolte (65 jours après transplantation) est proche à celui de [17], qui stipule que le cycle de production le plus court est de 2 mois pour aubergine violette, concombre,... et le plus long cycle est de 5 mois (piment).

La hauteur moyenne de plants à la récolte (80,72±1,71 cm) se rapproche à celle trouvée par [18], qui est de 85,36 cm en moyenne.

Pour les deux récoltes, le nombre moyen de fruits par pied ($2,42 \pm 0,15$), le poids moyen des fruits ($186,61 \pm 12,00$ g) présentent un écart considérable avec les résultats obtenus par [19], qui ont enregistré un nombre moyen de fruits par plant de 57,41 et un poids moyen de fruit de 33,59 g avec l'aubergine amère (*Solanum aethiopicum gilo*).

Le nombre de sarco-binage n'a pas eu d'effet significatif sur la longueur des fruits, par contre sur le diamètre des fruits l'effet est hautement significatif. Ces résultats corroborent avec ceux de [20], qui ont trouvé que les longueurs des fruits n'ont pas varié significativement en fonction des fertilisants appliqués à la culture d'aubergine amère contrairement aux diamètres des fruits avec une variation significative entre les types de fertilisants T1 (2,20 cm) et T3 (2,23 cm), et T0 (2,05 cm) les variantes ont favorisé le développement de ces paramètres agronomiques du fruit.

Le nombre moyen des rameaux par pied ($4,15 \pm 0,19$) est très inférieur à la conclusion de [21] selon lesquels le nombre maximum de branches a été observé en T1 (un binage) 12,22 suivis du T2 11,45.

Le rendement moyen de l'essai ($18,11 \pm 0,47$ t/ha) est inférieur de ceux trouvés par [22] les valeurs varient de $20,11 \pm 0,75$ à $49,14 \pm 5,22$ t/ha avec la variété d'Aubergine « F1 kalenda ». Mais supérieur aux valeurs obtenues par [23], qui se situent de $17,28 \pm 0,69$ à $11,06 \pm 1,43$ sur l'espèce *Solanum aethiopicum* L.

4.2 EVALUATION DE LA RENTABILITÉ

La rentabilité des variantes qui s'étend de 326,75% (F0) à 104,94% (F1) présente une efficience plus élevée par rapport à celles de [20], qui attestent que la rentabilité financière des traitements a permis de distinguer trois groupes: le traitement T3 (2,12); T1, T2, T4 et T5 (une rentabilité intermédiaire) et le témoin (0,60) avec la plus faible rentabilité. De même, [24] soutient que sur les cinq spéculations maraichères, les résultats bruts d'exploitation sont positifs et cela a traduit une rentabilité relative pour chacune des spéculations. Par ailleurs, [25] martèlent aussi que les agriculteurs des zones d'étude ont obtenu des revenus bruts nettement plus élevés (21%) et le revenu net (83%). D'après [26], le coût de production de 1kg d'aubergines est de 3,07 TRY pour un bénéfice brut de 0,44 TRY et un bénéfice net à - 0,41 TRY. En 2018, une recherche menée à Adiyaman, a été évalué le coût d'un kg l'aubergine à 0,68 TL et le prix de vente à 2 TL [27]. Un ratio avantages-coûts a été trouvé pour l'aubergine qui était de 2,58 et 2,77 sur coût complet et coût variable [28].

5 CONCLUSION

Cette recherche a fait ressortir l'effet du nombre de sarco-binage sur le rendement et ces composant d'une part puis sur la rentabilité d'aubergine en culture de contre saison à Faranah d'autre part. Cet effet s'est manifesté notamment sur le diamètre des fruits, le poids des fruits, le rendement, le nombre des rameaux par pied et la hauteur de plants à la récolte. Une forte corrélation positive existe entre le rendement et la valeur de la production; seulement l'augmentation du coût de la production améliore faiblement les deux paramètres. L'augmentation du coût de la production par le nombre de sarco-binage diminue la rentabilité. En contre saison, la culture de l'aubergine sans sarco-binage est plus rentable.

REMERCIEMENTS

Les remerciements de l'équipe de recherche vont à l'endroit:

- De la Direction Générale de l'isav de Faranah pour avoir financé la recherche et la mise à la disposition de l'équipe le domaine expérimental à travers le Département Vulgarisation Agricole;
- A notre consultant, encadreur Pr. Diawadou DIALLO, Chef service des études avancées de l'isav de Faranah pour sa disponibilité et son appui multiformes pendant le déroulement de toutes les activités de la recherche;
- Au Laboratoire Nutrition Végétale de l'isav/F pour leur facilitation aux processus d'analyses des échantillons biométriques.

REFERENCES

- [1] Temple L. et Moustier P., 2004. Les fonctions et contraintes de l'agriculture périurbaine de quelques villes africaines (Yaoundé, Cotonou, Dakar). Cahiers Agricultures. 13: 15-22.
- [2] Levasseur V., Brunelle R., Carre G. et Mahotiere J. F., 2013. Les coopératives agricoles: un outil de développement au service des productrices et des producteurs haïtiens, Cahier thématique – Aménagement du territoire et environnement. Haïti Perspectives, vol. 2, no 2, pp.57-63.

- [3] Kouame A. R., Vei K. N., Yao N. F., 2017. Performance de la filière maraîchère dans la commune de Bouaké. Germivore n° Spécial 7/2017. ISSN 2411-6750. p15.
- [4] Kpadenou C. C., Tama C., Dado Tossou B. et Yabi J. A., 2019. Déterminants socio-économiques de l'adoption des pratiques agro-écologiques en production maraîchère dans la vallée du Niger au Bénin. Int. J. Biol. Chem. Sci. 13 (7): 3103-3118, December 2019.
- [5] Gravel A., 2016. Les pratiques agroécologiques dans les exploitations agricoles urbaines et périurbaines pour la sécurité alimentaire des villes d'Afrique subsaharienne. Essai présenté au Département de biologie en vue de l'obtention du grade de maître en écologie internationale (M.E.I.). Faculté des sciences, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [6] Biaou D., Yabi J., Yegbemey R., Biaou G., 2016. Performances technique et économique des pratiques culturales de gestion et de conservation de la fertilité des sols en production maraîchère dans la commune de Malanville, Nord Bénin. International Journal of Innovation and Scientific Research, 21: 2351-8014.
- [7] Laurent C. et Rémy J., 2000. « L'exploitation agricole en perspective », in Courrier de l'environnement de l'INRA, n°41, pp5-22.
- [8] Rubrecht S. et Gauthier F., 2017. Désherbage mécanique en exploitation légumière avec le robot PUMAgri. Innovations Agronomiques 61 (2017), 25-31.
- [9] Maheshwari UM, Arthanari PM. 2017 Nutrient removal by weeds and organic Brinjal (*Solanum melongena* L.) Through weed management interventions, Int J Chem Studies; 5 (3): 705-07.
- [10] Mustapha A. B., Sajo A. A., Gworgwor N. A., Saidu M. S. and Jakusko B. B., 2001. Effect of Weeding Frequency on the yield of three varieties of maize (*Zea mays* L.) in Yola Adamawa State. Nigerian Journal of Tropical Agriculture, 3.32-38.
- [11] Alissou A. E., 2011. Analyse des pratiques culturales maraîchères dans les bas-fonds rizicoles d'Agbédranfo-Vovokanmey (Couffo) et de Houinga (Mono) au sud-Bénin, et effet de l'azote sur la croissance et la production du crincri (*Corchorus olitorius* L.). Thèse pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome Sciences et Technique de Production Végétale. Université d'Abomey-Calavi (Benin). Faculte des Sciences Agronomiques (FSA). 128p.
- [12] Stagnari, F. and Pisante, M., 2011. The critical period for weed competition in French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Mediterranean areas. Crop Protection Guildford, 3 (1): 179-184.
- [13] Sanni K. O. et Okeowo T. A., 2016. Growth, Yield Performance And Cost Benefit Of Eggplant (*Solanum melogena*) Production Using Goat And Pig Manure In Ikorodu Lagos Nigeria. International Journal of Scientific Research and Engineering Studies (IJSRES) Volume 3 Issue 4, April 2016 ISSN: 2349-8862.
- [14] Makosso S., 2010. Utilisation combinée de *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray et d'engrais NPK pour améliorer la production de *Solanum Melongena* L. dans la zone maraîchère de Brazzaville. 11 (4), 7p.
- [15] Almhemed K. et Ustuner T., 2022. Assessment of some weed control methods efficacy and yield losses caused by weed in eggplant. Kahramanmaras Sutcu Imam University, Agricultural Faculty, Kahramanmaras, Turkey. Volume 31– No. 08/2022 pages 7514-7520.
- [16] Mir R., Calabuig-Serna A., Seguí-Simarro J. M., 2021. Doubled Haploids in Eggplant. Biology, 10, 685.
- [17] Traore A. J. F., 2022. Analyse socioéconomique de la chaîne de valeur des cultures maraîchères dans la zone de korhogo. Spécialité: Management des Entreprises et Organisations Agropastorales. Master. Institut de gestion agropastorale. Université pelefogo gon coulibaly p32.
- [18] Banjare K., Sharma G., Singh A. P., 2014. Effect of weed management practices on crop growth and yield of winter season brinjal (*Solanum melongena* L.) under Chhattisgarh Plains, Ind J Agric Res. 48 (5): 394-97.
- [19] Coulibaly N. D., Fondio L. et N'gbesso M. F. P., 2021. Évaluation des performances agromorphologiques de neuf cultivars d'aubergine en station au Centre de la Côte d'Ivoire. ISSN 1813-548X, Afrique SCIENCE 18 (1) (2021) 1 - 11.
- [20] Alla T. K., Bomisso L. E., Tuo S. et Dick E. A., 2021. Effets de la fertilisation organique à base de pelure de banane plantain et de fiente de poulet sur les paramètres agronomiques et la rentabilité financière de l'aubergine N'drowa (*Solanum aethiopicum* L.) en Côte d'Ivoire. Afrique SCIENCE 18 (6) (2021) 25 - 38. ISSN 1813-548X, p32.
- [21] Kamboj S., Brar K. S. et Gandhi N., 2019. Effects of different sowing methods and weed management on yield of Brinjal (*Solanum melongena* L.) crop. (Special Issue- 4) National Seminar «Role of Biological Sciences in Organic Farming» (March 20, 2019). JPP 2019; SP4: 39-41. P-ISSN: 2349-8234.
- [22] Alla K. T., Bomisso E. L., Ouattara G., Dick A. E., 2018. Effets de la fertilisation à base des sous-produits de la pelure de banane plantain sur les paramètres agromorphologiques de la variété d'Aubergine F1 kalenda (*Solanum melongena*) dans la localité de Bingerville en Côte d'Ivoire. Journal of Animal & Plant Sciences, 2018. Vol.38, Issue 3: 6292-6306. ISSN 2071-7024 p6298.
- [23] Yeo K. T., et al 2022 Arrière effet de trois légumineuses alimentaires sur la productivité de l'aubergine (*Solanum aethiopicum* L.), cultivée dans la localité de Bouaké au Centre de la Côte d'Ivoire. Afrique SCIENCE 20 (6) (2022) 1 – 13. ISSN 1813-548X. p9.

- [24] Sow H., 2018. Analyse-diagnostic des systemes de production et des circuits de commercialisation des produits maraichers dans la commune de Ziguinchor (Sénégal). Master. Spécialité: Aménagement et Gestion Durable des Ecosystèmes Forestiers et Agroforestiers. Département d'Agroforesterie. Université Assane Seck de Ziguinchor.
- [25] Gül M., Değirmenci N., Şirikçi, B. S., Kadakoğlu B., 2022. Cost and profitability analysis of greenhouse eggplant production: a case study of Antalya Province, Turkey. v. 18, n. 2, Abr/Jun - 2022. ISSN 1808-2882.
- [26] Bayramoğlu Z., Karakayaci Z., Ağızan, K., Ağızan S., Bozdemir M., 2021. Determination of factors affecting production costs in major vegetable products (in Turkish). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, v. 24, n. 3, p. 603-613, 2021.
- [27] Ukav İ. 2018. A research on the production costs and profitability of some vegetables produced in Adıyaman province (in Turkish). Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, v. 6, n. 9, p. 1285-1289.
- [28] Supti R. S., Alam M. K., Alam M. J., Salahin N. and Rahman S., 2018. Financial profitability, resource use efficiency and factors affecting eggplant *Solanum melongena* L. cultivation in Bangladesh. International Journal of Current Research Vol. 10, Issue, 02, pp.64896-64899, February, 2018.

